



НАУКА
МИРОВОЗЗРЕНИЕ
ЖИЗНЬ

В.М.ГЛУШКОВ

КИБЕРНЕТИКА
ВОПРОСЫ
ТЕОРИИ
И ПРАКТИКИ



**НАУКА
МИРОВОЗЗРЕНИЕ
ЖИЗНЬ**

Редакционная коллегия серии:

Академик П. Н. ФЕДОСЕЕВ (председатель)

Академик Е. П. ВЕЛИХОВ

Академик Ю. А. ОВЧИННИКОВ

Академик Г. К. СКРЯБИН

Академик А. Л. ЯНШИН

Е. С. ЛИХТЕНШТЕЙН (ученый секретарь)

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

В.М.ГЛУШКОВ

КИБЕРНЕТИКА
ВОПРОСЫ
ТЕОРИИ
И ПРАКТИКИ

Ответственный редактор
академик В. С. МИХАЛЕВИЧ



МОСКВА
«НАУКА»
1986

УДК 519.6

Глушков В. М. Кибернетика. Вопросы теории и практики. — М.: Наука, 1986. 488 с. (Наука. Мировоззрение. Жизнь).

В книге выдающегося советского ученого академика В. М. Глушкова определяется место и значение развивающейся области знаний — кибернетики. Раскрывается взаимодействие и связь кибернетики с другими науками. Большое внимание уделяется методологии и инструментарию научного исследования, которые порождает кибернетика. В книге содержится ряд фундаментальных результатов автора по математическому аппарату кибернетики, архитектуре и структуре кибернетических устройств, в том числе вычислительных систем, определивших в значительной степени широкое распространение идей и результатов кибернетики. Большое внимание уделяется раскрытию феноменологии и построению моделей управленческой деятельности, социального познания и философского осмысления процессов автоматизации различного рода интеллектуальной деятельности людей в условиях научно-технической революции.

Для широкого круга читателей, интересующихся вопросами кибернетики.

Составитель Ю. В. КАПИТОНОВА

Рецензенты И. И. ЛЯШКО, Е. Л. ЮЩЕНКО

СОДЕРЖАНИЕ

ВСТУПИТЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ	7
1. ФИЛОСОФСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ КИБЕРНЕТИКИ	14
Мышление и кибернетика	14
Гносеологическая природа информационного моделирования	33
О гносеологических основах математизации наук	42
Кибернетика, вычислительная техника и развитие производительных сил	47
Кибернетика	69
Роль математики в современной науке	87
Индустрия переработки информации	98
Математизация научного знания и теория решений	112
Математика и кибернетика	121
Развитие абстрактного мышления и запрет Геделя	133
Математизация знания в области человеческих решений	143
2. ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ КИБЕРНЕТИКИ	150
О некоторых задачах вычислительной техники и связанных с ними задачах математики	150
Проблемная ориентация и другие пути повышения эффективности ЭВМ	161
Проблемы создания перспективных ЭВМ и задачи их реализации	171
Об архитектуре высокопроизводительных ЭВМ	197
Сети ЭВМ	208
Вычислительная техника в СССР	219
Основные архитектурные принципы повышения производительности ЭВМ	229

3. КИБЕРНЕТИКА И УПРАВЛЕНИЕ	247
Вычислительные машины и автоматизация управления производством	247
Экономика и кибернетика	253
Вычислительная техника и проблемы автоматизации управления	258
АСУ. Состояние и перспективы	271
О некоторых проблемах автоматизации плановых расчетов	278
Управление наукой и фундаментальные исследования	296
Человек и автоматизация управления	305
Проблемы ОГАС на современном этапе	312
Перспективы развития автоматизированных систем управления наукой	324
Социально-экономическое управление в эпоху научно-технической революции	334
Организационному управлению — совершенную технологию	371
Диалоговые макроэкономические модели	375
 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ УМСТВЕННОГО ТРУДА	 384
Моделирование мыслительных процессов	384
Распознавание образов в бионике	401
Электронные машины и автоматизация умственного труда	407
Искусственный интеллект	422
Использование искусственного интеллекта в деятельности инженеров	433
Кибернетика и творчество (реальность и поиски)	449
Основания математики и проблема автоматизации дедуктивных построений	460
 5. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВЗАИМОСВЯЗИ КИБЕРНЕТИКИ И БИОЛОГИИ	 470
Флуктуационная системология	470
Кибернетика — любовь моя	476

ВСТУПИТЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Виктор Михайлович Глушков — выдающийся советский ученый, известный в СССР и за рубежом фундаментальными трудами по математике, вычислительной технике, теоретической и прикладной кибернетике. С его именем связано становление в нашей стране кибернетики как науки. Под его руководством проведен огромный комплекс научных исследований, реализован ряд программ разработки средств вычислительной техники и систем управления, в результате чего были созданы первоклассные ЭВМ и автоматизированные системы управления, которые сыграли важную роль в развитии современного математического машиностроения и систем обработки данных.

Более 25 лет В. М. Глушков возглавлял Институт кибернетики АН УССР, являясь его основателем. За это время институт сформировался в один из крупнейших научно-исследовательских центров нашей страны. Круг научных интересов В. М. Глушкова был очень широким. Однако в каком бы направлении исследований он ни работал, им настойчиво проводились в жизнь принципы единства дальних и ближних целей, а также единства теории и практики.

В. М. Глушков родился 24 августа 1923 г. в Ростове-на-Дону в семье служащих. Получив высшее математическое и техническое образование в Новочеркасском политехническом институте (1943—1948) и Ростовском госуниверситете (1947—1948), В. М. Глушков с октября 1948 г. работал преподавателем Уральского лесотехнического института и вел интенсивную научно-исследовательскую работу. В октябре 1951 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Локально-нильпотентные группы без кручения с условием обрыва некоторых цепей подгрупп», а в декабре 1955 г. после окончания одногодичной докторантуры МГУ им. Ломоносова защитил докторскую диссертацию на тему «Топологические локально-нильпотентные группы».

Его первые научные труды относятся к области современной алгебры, в которой он добился фундаментальных результатов. Выполнив научные исследования для докторской диссертации по решению обобщенной пятой проблемы Гильберта, Виктор Михайлович стал в ряд ведущих алгебраистов на-

шей страны, и его алгебраические исследования продолжались многими учеными как у нас в стране, так и за рубежом.

По приглашению академика АН УССР Б. В. Гнеденко с августа 1956 г. В. М. Глушков начал работать в Институте математики АН УССР заведующим лабораторией вычислительной техники и математики. С этого момента вся его деятельность неразрывно связана с Академией наук Украинской ССР. Хотя лаборатория, которую возглавил В. М. Глушков, была малочисленна, в ней еще до его прихода под руководством С. А. Лебедева была выполнена разработка Малой электронной счетной машины (МЭСМ) — первой отечественной вычислительной машины и велись разработки вычислительных машин СЭСМ и «Киев». В декабре 1957 г. лаборатория была преобразована в Вычислительный Центр Академии наук УССР, директором которого стал В. М. Глушков. Им была разработана программа научных исследований, представление о которой можно составить по работе, включенной в настоящее издание, «О некоторых задачах вычислительной техники и связанных с ними задачах математики».

Для отечественной науки конца 50-х и начала 60-х годов характерно возрастание роли прикладной математики и кибернетики. Именно в этот период Виктор Михайлович тесно связал свои творческие интересы с разработкой теоретических основ кибернетики и вычислительной техники. С 1957 г. он вел исследования в области теории автоматов и проектирования вычислительных машин, одним из основных результатов которых стало создание общей теории цифровых автоматов, которая имела первостепенное значение для синтеза кибернетических систем и ЭВМ. В 1962 г. вышла в свет монография «Синтез цифровых автоматов». Главным результатом этой работы было создание методики синтеза цифровых автоматов, разработка формального математического аппарата, который дал возможность широкому кругу разработчиков эффективно применять абстрактно-автоматные и другие алгебраические методы для задач инженерного проектирования устройств в вычислительной технике.

В этот же период В. М. Глушков большое значение придает философскому осмыслению и методологическим вопросам развития и использования результатов исследований в области кибернетики и вычислительной техники. Он ведет большую и успешную просветительскую работу. В результате усилий В. М. Глушкова, А. А. Дородницына, А. А. Ляпунова и других известных ученых в нашей стране формируется про-

грамма исследовательских работ и разработок в области вычислительной и кибернетической техники.

В целях дальнейшего развертывания исследований в областях теоретической, технической, экономической, биологической кибернетики и вычислительной техники, в 1962 г. Вычислительный Центр АН УССР преобразовывается в Институт кибернетики АН УССР. Директором его и заведующим отделом теории цифровых автоматов был утвержден В. М. Глушков. В том же 1962 г. он избран вице-президентом АН УССР и утвержден председателем Научного совета по проблеме «Кибернетика» АН УССР. В 1963 г. В. М. Глушков как талантливый организатор науки и выдающийся ученый утвержден председателем Межведомственного научного совета по внедрению вычислительной техники и экономико-математических методов в народное хозяйство при Государственном комитете Совета Министров СССР по науке и технике. В 1964 г. за цикл работ в области теории автоматов и теоретической кибернетики ему присуждена Ленинская премия и он избран действительным членом Академии наук СССР.

В 1965 г. начал издаваться Всесоюзный научно-теоретический журнал «Кибернетика», главным редактором которого до конца жизни являлся В. М. Глушков.

По инициативе В. М. Глушкова в 1966 г. в Киевском университете был организован факультет кибернетики, где он заведовал кафедрой теоретической кибернетики.

Почти все важнейшие работы, которые принесли известность Институту кибернетики АН УССР, выполнены под научным руководством В. М. Глушкова и под влиянием его идей.

Так, в 1966 г. была завершена разработка технического проекта большой ЭВМ «Украина», предвосхитившего многие идеи американских больших ЭВМ 70-х годов.

Значительный вклад в создание отечественных образцов ЭВМ был внесен разработкой машин серии МИР. В этих машинах впервые в мире была реализована идея аппаратной интерпретации языков высокого уровня, не потерявшая своей актуальности и теперь.

Коллектив разработчиков ЭВМ серии МИР во главе с В. М. Глушковым в 1968 г. был удостоен Государственной премии СССР. Эта была первая в нашей стране Государственная премия СССР, присужденная за работу в области вычислительной техники.

За цикл работ по теоретической кибернетике, посвященных формальным методам проектирования ЭВМ, в 1967 г.

В. М. Глушкову присуждена премия им. Н. М. Крылова. Широкую известность получили его труды в области социальных и философских проблем кибернетики, управления научно-техническим прогрессом. Глубокое проникновение в теорию кибернетики дало возможность ученому плодотворно работать и в области эффективного использования в народном хозяйстве ее средств.

Огромную роль Виктор Михайлович сыграл в формировании идей создания автоматизированных систем управления. Вместе со своими учениками он выполнил разработку специальных технических средств для управления рядом технологических процессов в металлургической, химической и судостроительной промышленности, микроэлектронике (например, управление повалкой бессемеровского конвертора, система «Гальваник» и др.).

В 1967 г. сдана в эксплуатацию и рекомендована к массовому тиражированию первая в стране автоматизированная система управления предприятием с массовым характером производства «Львов». На этой системе были отработаны многие принципы, положенные в основу автоматизированных систем управления иных типов. В 1970 г. Виктору Михайловичу (в коллективе авторов) присуждена Государственная премия УССР за эту разработку. В 1967 г. при Институте кибернетики АН УССР была организована кафедра теоретической кибернетики и методов оптимального управления Московского физико-технического института, заведующим которой стал В. М. Глушков.

Виктору Михайловичу были присущи широта научных интересов, новаторство, научная интуиция. В нем гармонично сочетались талант ученого-теоретика с незаурядными способностями организатора внедрений достижений науки в народное хозяйство. Не ограничиваясь узкими рамками отдельных теорий и направлений, он энергично и с энтузиазмом брался за малоисследованные проблемы, находил оригинальные решения. Еще в начале 60-х годов сформулировал и начал пропагандировать идею объединения АСУ различных звеньев и уровней в общегосударственную автоматизированную систему (ОГАС). По его инициативе и под его руководством комиссией Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике был разработан предэскизный проект «Единой государственной сети вычислительных центров», который стал основой современных представлений об ОГАС. С этой задачей связаны теоретические исследования Вик-

тора Михайловича Глушкова в области макроэкономики.

В 1969 г. за большие успехи в развитии науки и подготовке научных кадров Институт кибернетики АН УССР награжден орденом Ленина, а Глушкову В. М. присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ему ордена Ленина и Золотой медали «Серп и Молот».

Виктор Михайлович постоянно и остро ощущал потребность практики в научных обобщениях и новых методах. В 60-х годах он сформулировал и затем активно проводил в жизнь программу работ по автоматизации проектирования ЭЦВМ. Основным результатом работ этого направления было создание практической методики проектирования ЭВМ, включающей понятие единства описания данных о машине на всех этапах ее проектирования. Эта методика дает возможность решать сложнейшие задачи автоматического внесения изменений в проект и формализацию средств общения между различными разработчиками проекта.

В творческом наследии В. М. Глушкова значительное место занимают исследования в области искусственного интеллекта. Здесь объектом наблюдения и изучения являются кибернетические устройства. Основные усилия концентрируются на вопросах разработки теории дискретных самоорганизующих систем, автоматизации мыслительной, умственной деятельности человека, повышение интеллектуальных возможностей вычислительных машин, разработки теории дедуктивных построений в математике, теории распознавания образов.

В 1972 г. вышла в свет монография В. М. Глушкова «Введение в АСУ», отразившая достижения научных исследований в области создания АСУ. Наряду с полным анализом ведущих типов задач управления экономическими объектами в монографии изложены основные принципы построения автоматизированных систем организационного управления.

С 1972 г. начал издаваться Всесоюзный научно-производственный журнал «Управляющие системы и машины», главным редактором которого был В. М. Глушков. В 1974—1975 гг. вышла в свет 2-х томная «Энциклопедия кибернетики» инициатором, организатором и главным редактором которой был В. М. Глушков.

Многолетние исследования В. М. Глушкова в области макроэкономики и системного анализа в 1975 г. завершились выходом в свет монографии «Макроэкономические модели и принципы построения ОГАС». Это был очередной этап его

деятельности по разработке основных концепций ОГАС. В указанной работе представлены методы прогнозирования и управления дискретными процессами, макроэкономические модели для предплановых ориентировок, модели планирования и оперативного управления, показана структура ОГАС и этапы ее создания.

За цикл работ по теории дискретных преобразователей и методов автоматизации проектирования ЭВМ, нашедших применение в действующих системах в 1977 г. В. М. Глушков в коллективе авторов удостоен Государственной премии СССР.

За выдающиеся заслуги в развитии отечественной науки, в подготовке научных кадров и активную общественную деятельность в 1978 г. В. М. Глушкову присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки УССР».

В 1979 г. за работу по теории перспективных ЭВМ и созданию высокопроизводительных средств вычислительной техники и систем управления ему присуждается премия АН УССР им. С. А. Лебедева.

В 1981 г. В. М. Глушков подготовил к изданию монографию «Основы безбумажной информатики».

В. М. Глушков проводил большую работу по пропаганде достижений советской науки за рубежом и утверждению ее приоритета в решении важнейших научно-технических проблем. Его работы получили широкое международное признание, о чем свидетельствуют факты избрания его почетным членом академий наук ГДР, НРБ, ПНР, «Леопольдина» (ГДР) и других организаций.

Прекрасный педагог, блестящий и неутомимый пропагандист новейших достижений науки, даровитый лектор, он щедро отдавал свои знания ученикам, увлекая их к творческому дерзанию и поискам.

В настоящий сборник включены 40 работ В. М. Глушкова из общего списка, содержащего более, чем 600 наименований. Эти работы сгруппированы по пяти направлениям. В разделах работы следуют в хронологическом порядке.

В раздел I включены работы, в которых обсуждаются вопросы содержания предмета и методов исследований кибернетики, ее связей с вычислительной техникой, математикой и другими научными дисциплинами. Утверждается такое толкование предмета и задач кибернетики, в котором делается акцент на решении практических задач создания и исследования кибернетических систем как сложных систем переработки информации. Обсуждаются социальные и другие аспекты

использования кибернетических систем и средств вычислительной техники.

В. М. Глушков внес существенный вклад в разработку и практическую реализацию новых концепций построения средств вычислительной техники. Некоторые интересные в методологическом отношении работы этого плана составляют содержание раздела II.

Раздел III составляют работы В. М. Глушкова, содержащие результаты исследований в области создания различного класса систем управления, методологии их построения, использования их и влияния на научно-технический прогресс.

В. М. Глушков считал проблему искусственного интеллекта одной из наиболее перспективных в кибернетике. Представление о его идеях и результатах в этом направлении дают работы, помещенные в раздел IV.

Некоторые оригинальные идеи В. М. Глушкова в области использования кибернетического подхода к исследованию проблем биологии представлены в последнем разделе настоящего сборника.

Влияние идей и результатов исследований, проводимых В. М. Глушковым на научную общественность, было велико. На его научных книгах воспитывались поколения исследователей и разработчиков в области кибернетики, прикладной математики и вычислительной техники. Многие идеи, высказанные им в прошлом, не только не потеряли актуальности и жизненности на сегодняшний день, но являются путеводными в решении многих трудных проблем.

Виктор Михайлович Глушков был страстным исследователем, обаятельным человеком, обладал высоким интеллектом и огромными знаниями, которыми он щедро делился с окружающими. Его творческое научное наследие окажется ценным еще для многих ученых и исследователей.

*В. С. Михалевич
Ю. В. Капитонова*

1. ФИЛОСОФСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ КИБЕРНЕТИКИ

МЫШЛЕНИЕ И КИБЕРНЕТИКА *

Для понимания природы процесса мышления большое значение имеют достижения современной кибернетики и математической логики. Одна из основных задач, которые ставят перед собою эти области знания, состоит в исследовании законов мышления с помощью точных математических методов и методов моделирования. Разумеется, ни кибернетика, ни математическая логика не претендуют на полное объяснение столь сложного процесса, как процесс мышления. Вне рамок кибернетики и тем более математической логики остается физиологический аспект, связанный со спецификой жизни как формы существования белковых тел. Кибернетика, как и логика, не подменяет и не может подменить общественные науки и объяснения специфики социального аспекта процесса мышления.

Для кибернетики и математической логики характерен подход к изучению мышления в его информационном аспекте. Информационный аспект мышления относится ко всему мышлению в целом так же, как абстрактные математические модели различных явлений реального мира относятся к самим этим явлениям. Основой информационного подхода к изучению мыслительных процессов является абстрагирование. При этом отвлекаются, как правило, от физической, а тем более от биологической и социальной сущности мыслительного процесса, рассматривая его лишь как процесс преобразования информации.

Понятие информации является одним из основных понятий современного естествознания. Информация в самом общем ее понимании представляет собой меру неоднородности распределения материи и энергии в пространстве и во времени, меру изменений, которыми сопровождаются все протекающие в мире процессы. Совершенно не обязательно непременно связывать с понятием информации требование ее

* Вopr. философии, 1963, № 1, с. 36—48.

осмысленности, как это имеет место при обычном, житейском понимании этого термина. Информацию несут в себе не только испещренные буквами листы книги или человеческая речь, но и солнечный свет, складки горного хребта, шум водопада, шелест листвы и т. д.

Информационный подход к изучению явлений предполагает абстрагирование от многих свойств реальных носителей информации, хотя границы такого абстрагирования весьма условны и определяются спецификой решаемых задач. Так, оперируя с письменной информацией, обычно отвлекаются от характера шрифта или материала, с помощью которого осуществлена запись информации. Информационная сущность букв, как средства выражения лексической информации, не зависит от того, написаны ли они от руки, напечатаны в типографии или высечены на камне. Тем не менее существуют случаи, например, в криминалистике, когда основную роль играют не сами буквы, а информация о почерке и даже о составе чернил, которыми произведена запись.

Возможность отвлекаться от многих свойств реальных носителей информации дает широкий простор для моделирования информационных процессов одной природы процессами совершенно другой физической природы, имеющими, однако, ту же самую информационную сущность. Именно на этом пути и возникает абстрактное понятие информации. Так, информация, передаваемая обычно в виде звуков, может быть без ущерба для ее абстрактно-информационной сущности представлена в виде записи этих звуков на магнитную ленту или даже в виде графика, задающего силу звука в какой-либо точке пространства как функцию времени.

В указанных случаях мы имеем дело с информацией, задаваемой в так называемой непрерывной форме, когда не существует элементарных порций информации — своеобразных информационных атомов. Для анализа информационной сущности процесса мышления особую роль приобретают дискретные формы задания информации, при которых информация естественным образом разделяется на подобные элементарные порции. Примерами дискретных форм информации могут служить разнообразные формы письменности. Роль информационных атомов играют при этом буквы, иероглифы и другие символы, служащие для обозначения различных элементов того или иного реального человеческого языка.

Обобщая различные реально употребляемые дискретные формы задания информации, кибернетика и математическая логика приходят к понятию абстрактного алфавита. Абстрактный алфавит представляет собою совокупность конечного числа символов — абстрактных букв, служащих для обозначения отдельных элементарных порций информации. Обычно в кибернетике говорят просто об алфавитах и составляющих их буквах. Добавлением термина «абстрактный» применительно к понятиям алфавита и букв мы подчеркиваем, что при употреблении этих понятий, как правило, отвлекаются от реальной природы букв, а зачастую даже и от способа их обозначения. Значение имеет лишь конечность числа букв в алфавите и возможность отличать различные буквы. Всегда можно также просто перенумеровать все буквы алфавита и употреблять в последующем вместо самих букв их номера.

При использовании абстрактных алфавитов необходимо отрешиться от обычного житейского представления о буквах даже в том случае, когда речь идет об изучении реальных человеческих языков. В число букв оказывается удобным в ряде случаев включать знаки препинания и даже типографский знак раздела между словами. Можно вводить алфавиты, содержащие в качестве букв отдельные (а может быть, и все) слова того или иного реального человеческого языка. В случае числовой информации роль букв играют цифры.

Подобно тому как обычные русские слова и весь русский язык строятся из отдельных букв, из букв абстрактных алфавитов строятся абстрактные слова и абстрактные языки. Понятие абстрактного (или формального) языка в кибернетике и в математической логике обязательно включает в себя наличие конечной системы правил, позволяющих отличать правильно написанные слова и выражения от неправильно записей, не имеющих смысла в пределах рассматриваемого языка.

Живой человеческий язык может рассматриваться как формальный язык лишь после того, как будет сформулирована строгая система правил, позволяющая отличать выражения, допустимые в языке от всех прочих выражений, т. е. осмысленные предложения от бессмысленных. Более того, необходимо еще иметь, кроме грамматических правил, также правила последовательного развертывания фраз языка. Без этого язык, очевидно, мог бы служить лишь для записи ре-

результатов мышления, но был совершенно бесполезен для моделирования самого процесса мышления.

С философской точки зрения чрезвычайно важно найти правильный ответ на следующие два вопроса: во-первых, в какой мере можно формализовать реальные человеческие языки и, во-вторых, какую часть человеческого мышления можно моделировать средствами подобных формальных языков?

Что касается первого вопроса, то необходимо прежде всего отметить колоссальную практическую трудность фактической формализации любого из реально существующих или существовавших человеческих языков. Ведь речь идет о том, чтобы найти и точно сформулировать не десятки и даже не сотни, а многие десятки тысяч (а возможно, даже многие сотни тысяч) правил, определяющих не только грамматическую, но и смысловую правильность фраз языка и последовательностей таких фраз. Не удивительно, что подобная задача не решена до сих пор. Более того, до возникновения и первых успехов кибернетики эта задача в сколько-нибудь полном объеме даже не ставилась.

Однако в поставленном выше вопросе речь идет не о практических трудностях, сколь бы огромны они ни были, а о принципиальной возможности полной формализации человеческого языка. Если говорить о задаче формализации языка путем фиксирования на какой-то момент времени всех его правил (объективно существующих в мозгу какого-либо конкретного человека, владеющего данным языком), то такая задача должна быть признана принципиально разрешимой. Признание неразрешимости этой задачи несостоятельно с гносеологической точки зрения, поскольку оно равносильно утверждению непознаваемости законов языка.

В то же время ясно, что никакой фиксированный формализованный язык не может быть адекватен живому человеческому языку, поскольку последний в отличие от первого непрерывно развивается и совершенствуется. Поэтому всякая формализация любого живого человеческого языка представляет собою лишь более или менее удачный его мгновенный слепок, утрачивающий сходство с оригиналом по мере развития последнего.

Для ответа на второй вопрос заметим прежде всего, что всякий мыслительный процесс опирается на накопленные человечеством знания. В знании же существуют более и менее устойчивые элементы.

Некоторая часть накопленных человеческих знаний, средством фиксации которых служит язык, сохраняет свое значение в течение сколь угодно длительных исторических промежутков, хотя форма языкового выражения этих знаний может за это время претерпеть существенные изменения. Естественно поэтому попытаться построить такой формальный язык, в котором раз и навсегда были бы зафиксированы некоторые элементы человеческого знания, представляющиеся неизменными и имеющие универсальную применимость. Вместе с тем этот язык должен обладать достаточными выразительными средствами, чтобы иметь возможность зафиксировать те понятия и связи между понятиями, которые употребляет человек в любых реальных мыслительных процессах.

Задача построения подобных искусственных (формальных) универсальных языков (языковых систем) решается математической логикой. В одной из таких систем — исчисления предикатов — с помощью латинских букв и некоторых дополнительных символов строятся универсальные обозначения для языковых конструкций, имеющих в качестве своих русских эквивалентов слова «и», «или», «не», «если... то», «высказывание», «объект», «свойство», «отношение», «истинно», «ложно» и выражения типа «для всех объектов (свойств, отношений) выполняется...», «существуют такие объекты (свойства, отношения), для которых выполняется...». В такой системе имеется также возможность фиксировать любые индивидуальные объекты, свойства или отношения и соединять перечисленные выше языковые конструкции в осмысленные предложения.

Возникающий таким образом язык может быть использован для построения формальных теорий и формальных доказательств, имитирующих один из наиболее важных мыслительных процессов, а именно так называемое логическое мышление. Речь идет о том, чтобы, установив некоторое число определенных фактов, получать путем формальных построений в языке все следствия из этих фактов. В связи с этим возникает заманчивая идея полной формализации (на основе одного из формальных логических языков) процесса мышления в рамках какой-нибудь дедуктивно строящейся области знания, например, математики. Однако, как показал К. Гедель, уже арифметика натуральных чисел не может быть до конца формализована ни в какой формальной языковой системе с любым фиксированным заранее конечным числом исходных фундаментальных фактов — аксиом. В любой из таких

систем наряду с фактами, которые можно получить формальным путем из аксиом, будут существовать факты, являющиеся в обычном, житейском смысле следствиями избранной системы аксиом, но недоказуемые формально. Можно, правда, всегда расширить исходную языковую систему так, чтобы любой заданный наперед факт, недоказуемый в старой системе, оказался бы формально доказуемым в новой системе. Тем не менее и в новой системе снова окажутся недоказуемые в пределах этой системы факты.

Возрастание количества знаний в ходе развития науки в этом плане можно трактовать как процесс неограниченного расширения формальной языковой системы, при котором весь объем человеческих знаний в любой фиксированный заранее момент времени может быть формализован. Но вместе с тем никакая из таких формализаций не исчерпывает весь бесконечный процесс познания в целом. Высказанное утверждение представляет собою естественнонаучную интерпретацию диалектико-материалистического гносеологического принципа: в мире нет непознаваемых вещей, любая закономерность неизвестная сегодня, может быть познана в дальнейшем, однако ни в какой момент времени не будет при этом достигнуто абсолютно полного знания.

Нами получен, таким образом, ответ на второй из поставленных выше вопросов: в пределах любой фиксированной формальной языковой системы не может быть полностью формализовано не только все мышление в целом, но даже и та его часть, которая называется обычно логическим мышлением. Связь мышления с опытом, с активным вмешательством человека в происходящие в мире процессы находятся за пределами формальных языковых систем в том виде, в котором они были описаны выше, а следовательно, за пределами математической логики. Эти стороны процесса мышления, чрезвычайно важные для понимания его природы, находятся в какой-то степени неожиданное освещение в рамках кибернетики, являющейся в этом смысле дальнейшим продолжением и развитием математической логики.

Одним из основных понятий кибернетики является понятие преобразователя информации, т. е. такой системы, которая имеет возможность получать информацию из окружающей среды, преобразовывать ее в соответствии с теми или иными правилами, определяемыми структурой преобразователя, и выдавать преобразованную информацию в целях воздействия на окружающую среду. В кибернетике подобные

преобразователи принято обычно отождествлять с различными управляющими системами, понимая в этом случае под окружающей средой объект, управляемый данной системой. В качестве преобразователей информации можно рассматривать также системы, впитывающие информацию об окружающем их мире, перерабатывающие эту информацию с целью раскрытия существующих в мире закономерностей и использующие переработанную информацию как для целей простого накопления знаний (созерцательное познание), так и для целей активного воздействия на окружающий мир (активное, деятельное познание).

Природа подобных систем может быть самой разнообразной. Это могут быть технические системы управления и регистрации, нервные системы человека или животных и, наконец, различного рода управляющие и познающие коллективы, существующие в человеческом обществе (например, система управления экономикой или система научно-исследовательских институтов).

В соответствии с общей установкой в кибернетике рассматривают управляющие и познающие системы в чисто информационном аспекте, отвлекаясь от реальной природы этих систем. При этом оказывается возможным рассматривать с общих позиций столь качественно разнородные системы, как, например, технические и биологические.

Информационный подход к управляющим и познающим системам позволяет практически без потери общности ограничиться рассмотрением лишь дискретных форм задания информации и даже таких дискретных форм, которые используют один и тот же фиксированный заранее стандартный алфавит.

Для понимания указанного факта необходимо отметить, что всякий реальный преобразователь непрерывной информации обладает по крайней мере тремя ограничениями, делающими возможным дискретный подход к описанию его работы. Это, во-первых, — ограниченная разрешающая способность преобразователя, вследствие которой преобразователь не может воспринимать раздельно информацию, поступающую от двух достаточно близких точек пространства. В результате этого любой участок пространства с точки зрения преобразователя информации может рассматриваться как состоящий из конечного числа точек, хотя в действительности число этих точек может быть бесконечным.

Во-вторых, это — ограниченность чувствительности

преобразователя, благодаря которой не различаются достаточно близкие между собой значения несущих информацию физических величин (например, яркости света, силы звука и т. п.). В силу этого ограничения информация, поступающая в преобразователь в каждый данный момент времени из некоторой точки пространства, может иметь с точки зрения преобразователя лишь конечное число различных значений.

Наконец, каждый реальный преобразователь информации обладает также третьим ограничением, а именно ограничением пропускной способности, вследствие чего он не может различать достаточно близкие между собой моменты времени. В результате информация, получаемая преобразователем за любой конечный промежуток времени, представляется в виде слова (конечной упорядоченной последовательности букв) во введенном выше абстрактном алфавите. Тем самым входная информация преобразователя оказывается представленной в дискретном виде. Аналогично представляется, очевидно, и выходная информация.

Рассматривая вопрос о введении стандартного алфавита, прежде всего отметим, что буквы любого абстрактного алфавита можно заменить их номерами, т. е. целыми рациональными числами. Путем изображения этих чисел в какой-нибудь фиксированной системе счисления мы осуществляем запись букв в рассматриваемом абстрактном алфавите (а следовательно, и любых слов в порождаемых им абстрактных языках) в виде последовательностей цифр избранной системы счисления. Таким путем осуществляется цифровое кодирование исходной информации. Совокупность цифр избранной системы счисления и будет представлять собой искомый стандартный алфавит. В качестве такого алфавита можно выбрать, например, десятичный алфавит, состоящий из десяти цифр от нуля до девяти включительно, либо так называемый двоичный алфавит, состоящий лишь из двух цифр — нуля и единицы. Последний алфавит широко используется в современных электронных цифровых машинах.

Называя для простоты любую управляющую или познающую систему кибернетической системой, мы получаем возможность оперировать с абстрактной моделью произвольной кибернетической системы. Для этой цели входную и выходную информацию, т. е., иными словами, всю информацию, которой наша система обменивается с внешним миром, закодируем словами выбранного стандартного алфавита.

Вся деятельность кибернетической системы сведется при этом к преобразованию слов в стандартном алфавите.

Изучение той или иной конкретной кибернетической системы сводится в рассматриваемом аспекте к установлению правил, по которым осуществляется указанное преобразование. Заметим, что в числе этих правил могут оказаться правила, допускающие те или иные случайные переходы, а также правила изменения тех или иных правил преобразования информации с течением времени под влиянием воздействия бесконечной окружающей среды.

Последнее обстоятельство имеет принципиальное значение для последующих выводов, поскольку именно оно отличает (с точки зрения моделирования процесса мышления) кибернетические системы от рассматривающихся ранее моделей мыслительных процессов в рамках тех или иных формальных языков. В качестве абстрактной кибернетической модели можно рассматривать не только технические устройства, реализующие какие-либо фиксированные формальные языки, но также человека и даже целые человеческие коллективы, реализующие сколь угодно сложные мыслительные процессы.

В связи с этим совершенно по-новому должен быть освещен вопрос о возможности моделирования человеческого мышления в искусственно создаваемых автоматических устройствах. В свете сказанного выше этот вопрос сливается, по существу, с чисто философским, гносеологическим вопросом о возможности познания законов мышления, т. е. правил преобразования информации, реализуемых человеком (или всем человечеством) в процессе познания мира.

Коль скоро эти правила познаны и точно сформулированы, они могут быть промоделированы на том или ином искусственно созданном преобразователе информации. На первый взгляд может показаться странным, что правила функционирования объектов биологической или даже социальной природы, качественно отличные от технических объектов (основанных, например, на принципах электроники), могут тем не менее моделироваться с их помощью. Не следует забывать, однако, что речь идет не об абсолютном, а лишь об информационном моделировании, а в этом аспекте качественное различие природы моделируемых и модулирующих объектов уже не имеет существенного значения. Если, например, моделируется человек, то ничто не мешает любому его конкретному действию (скажем, удару топором по дереву)

сопоставить в модели лишь информационный код этого действия, выражаемый рядом чисел или рядом слов, которые описывают данное действие.

Для ответа на вопрос о полноте моделирования человеческого мышления в технических кибернетических системах существенное значение имеет решение вопроса и о том, определяются ли закономерности функционирования познавательного аппарата человека (мозга) конечным или бесконечным числом правил. В случае конечного числа таких правил неизбежно наступает такой момент, когда все они будут познаны и точно описаны. Отрицание этого факта было бы равносильно, очевидно, признанию существования «вещей в себе». Но в таком случае техническая кибернетическая система, моделирующая найденную систему правил, будет вести себя в информационном плане точно так же, как и человек, при условии, что осуществлено точное моделирование всех поступающих на человека внешних воздействий.

В случае бесконечности системы правил, определяющих закономерности (в информационном аспекте) функционирования мозга, построение точной информационной модели человека оказалось бы возможным лишь за бесконечный промежуток времени, а все реально создаваемые модели отличались бы от моделируемого объекта не только абсолютно, но и в информационном смысле.

Марксистская диалектика утверждает неисчерпаемость свойств материи не только в масштабах всей Вселенной, но и в любой ее малой части. В свете этого положения, обобщающего весь опыт, накопленный естественными науками за многовековую историю их развития, не может быть сомнения также и в неисчерпаемости свойств мозга. Однако не следует забывать, что в данном случае нас интересуют не все свойства мозга, а лишь его информационные свойства. Конечность числа нейронов, составляющих мозг, и дискретный характер работы самих нейронов дают известные основания считать, что в чисто информационном плане наиболее существенные стороны функционирования мозга определяются конечным (хотя и чрезвычайно большим) числом правил. В целом закономерности деятельности мозга изучены еще столь мало, что в настоящее время более уместно воздержаться от окончательного решения поставленного вопроса.

Впрочем, и в случае бесконечности системы правил, определяющих закономерности информационной деятельности мозга, моделирование достаточно большого множества

наиболее существенных правил этой системы приведет к тому, что поведение модели на все более и более длительных отрезках времени будет (в информационном плане) совпадать с поведением мозга.

Таким образом, в рамках кибернетики в отличие от математической логики мы приходим к совершенно иному ответу на вопрос о возможности моделирования процесса мышления. Любые формы человеческого мышления принципиально могут (в информационном плане) моделироваться в искусственно создаваемых кибернетических системах.

Возникает естественный вопрос: не слишком ли абстрактным является сделанный вывод? Как обстоит дело с реальными возможностями моделирования мыслительных процессов на уже существующих кибернетических системах?

Современная кибернетика дает полный и несколько неожиданный ответ на этот вопрос. Оказывается, моделирование любых мыслительных процессов принципиально возможно на имеющихся уже сегодня кибернетических устройствах, а именно, на так называемых универсальных электронных цифровых машинах. Это поразительное свойство универсальных электронных цифровых машин называется обычно их алгоритмической универсальностью.

Дело заключается в том, что еще в рамках математической логики была установлена возможность представления любой системы правил преобразования алфавитной информации в виде различных комбинаций одних и тех же раз и навсегда выбранных элементарных правил преобразования информации. Иначе говоря, можно выбрать (и притом не единственным способом) такую конечную систему элементарных правил преобразования информации, что любое преобразование алфавитной информации, выполняемое на основе произвольной конечной системы правил любой природы, может быть представлено в виде программы (конечной комбинации правил), составленной только из исходных элементарных правил. В этом случае говорят, что исходная система элементарных правил алгоритмически полна.

Тщательный анализ показал, что системы элементарных правил (операций), реализуемых современными универсальными электронными цифровыми машинами, алгоритмически полны. Это означает, что на таких машинах можно запрограммировать и выполнить любое преобразование информации, осуществляемое в соответствии с точно описанной системой правил. Напомним, что в числе правил такой системы

могут быть правила, определяющие случайные переходы, и правила, с помощью которых производятся те или иные изменения в самой системе правил.

Иными словами, любая управляющая система по мере познания закономерностей ее работы может (в информационном плане) моделироваться на существующих уже сегодня универсальных цифровых (вычислительных) машинах. Таким образом, вопрос о возможности моделирования мыслительных процессов даже с помощью средств автоматики сегодняшнего дня переносится в чисто гносеологическую сферу и сводится к вопросу о возможности познания закономерностей мыслительных процессов.

Необходимо отметить, однако, что постановка на универсальные вычислительные машины достаточно сложных программ часто бывает затруднена ввиду ограниченности размеров запоминающего устройства (памяти) машины. Ведь для правильного функционирования машина должна полностью вместить в свою память всю программу. Выход из этого затруднения заключается в том, что помимо быстродействующей (так называемой оперативной) памяти относительно небольшого объема современные универсальные вычислительные машины снабжаются так называемой внешней памятью на магнитных лентах. Правда, внешняя память при ее использовании резко снижает быстродействие машины, но зато имеет практически неограниченную емкость. Учитывая, что современные вычислительные машины могут автоматически вводить в свою оперативную память любые куски информации, записанной на ленте, мы приходим к выводу о принципиальной возможности моделирования с помощью таких машин любых мыслительных процессов.

Разумеется, в общении с внешним миром современные универсальные вычислительные машины не используют обычно того богатства конкретных форм представления информации, которое доступно человеку. Большинство машин оперирует лишь с числовой, а некоторые также и с произвольной буквенной информацией, в то время как человек способен воспринимать любые зрительные образы, перерабатывать звуковую информацию и т. п. Как уже отмечалось выше, при чисто информационном подходе к вопросу о моделировании мыслительных процессов отмеченная бедность средств информационного общения машин с внешним миром не имеет никакого значения.

Впрочем, современная техника уже располагает принци-

пами создания устройств, позволяющих вычислительным машинам не только достичь, но и значительно превзойти в качественном и в количественном отношениях те средства информационного общения с окружающей средой, которыми располагает человек. Уже сейчас некоторые из больших вычислительных машин, как, например, вычислительная машина «Киев» Института кибернетики АН УССР, располагают устройствами для восприятия произвольных рисунков. Производятся успешные эксперименты по оборудованию вычислительных машин «органами слуха» и «органами речи» для общения с внешним миром посредством звуковой информации. На пути полного решения проблем подобного рода имеется еще целый ряд технических трудностей, однако принципиальная их разрешимость сегодня ни у кого уже не вызывает сомнений.

Практически неограниченные возможности моделирования мыслительных процессов с помощью современной кибернетической техники выдвигают чрезвычайно важные специально-научные и философские проблемы. Одной из них является задача автоматизации умственной деятельности человека.

Исторически необходимость создания машин для умножения физических сил человека возникла давно, в то время как задача умножения интеллектуальной мощи человечества во всей ее полноте ставится только сейчас. Разумеется, отдельные, наиболее простые стороны интеллектуальной деятельности человека давно уже пользовались услугами различного рода искусственных средств. Например, изобретение письменности и книгопечатания позволило резко улучшить такую сторону умственной деятельности человека, как накопление знаний и взаимный обмен знаниями. С помощью механических средств (различного рода вычислительных машин и приборов) восполняются ограниченные возможности человека в отношении счета и особенно сложных вычислений.

Указанные примеры никого не могут удивить не только потому, что они общеизвестны, но и потому, что речь в них идет о механизации таких сторон умственной деятельности, которые играют сугубо подсобную роль по отношению ко всему процессу мышления в целом. Однако сегодня все большую и большую актуальность приобретают задачи автоматизации гораздо более высоких сторон мыслительного процесса.

Одной из таких важнейших задач является задача автома-

тизации управления экономикой. Уже при имеющихся в настоящее время масштабах производства рациональное управление и планирование производства ограничивается вследствие слабости информационных возможностей человека. Любой человек, входящий в качестве составной части в систему управления экономикой страны (совнархозы, госпланы и т. п.), способен в течение рабочего дня переработать вполне определенный объем информации (прочитать и составить определенное число докладных записок и сводок, поговорить с определенным числом людей, продумать определенное число вариантов планирования и т. д.) Объем же подлежащей переработке информации громаден и увеличивается по мере роста производства.

В связи с этим возникает дилемма: либо неограниченно увеличивать число людей, занятых в сфере управления, либо мириться с неизбежными потерями информации, ухудшающими качество управления и планирования. Если принять за эталон уровень качества планирования, имевший место в 1960 г. то для переработки информации при объеме производства, запланированном на 1980 г. потребовалось бы занять в сфере управления все взрослое население Советского Союза. Конечно, известная экономия может быть достигнута за счет дальнейшего улучшения организационных форм управления экономикой, однако ограниченные информационные возможности человека ставят определенные пределы и в этом направлении.

Где же выход? Выход может быть только один: внедрение средств современной техники, средств автоматизации не только в сферу материального производства, но и в сферу управления. Только этим путем можно резко улучшить качество планирования и управления, не увеличивая, а даже уменьшая число людей, занятых в сфере управления.

Вторая задача — это задача автоматизации процессов научного творчества. До настоящего времени рост темпов научных исследований обеспечивался главным образом за счет роста числа научных работников. Подсчеты показывают, что при сохранении имеющейся в настоящее время закономерности роста числа научных сотрудников через 100—150 лет пришлось бы увеличить их число в тысячу раз, т. е. иными словами, занять научной работой все население земного шара. Ограниченность информационных возможностей человека уже сегодня начинает сказываться на темпах развития науки. Существует большое число научных проблем, на ре-

шение которых ученые вынуждены тратить многие годы и десятилетия даже в том случае, когда все экспериментальные факты, необходимые для их решения, уже получены. Требуется много времени, чтобы собрать воедино весь необходимый материал, разбросанный по бесчисленным научным изданиям, и продумать многие варианты дедуктивных построений, обобщающих эти факты.

Такого рода работа также поддается автоматизации, несмотря на то, что сложные дедуктивные построения (включающие создание новых теорий) издавна принято относить к высшим формам творческой деятельности человека. Использование для этой работы даже современных универсальных электронных цифровых машин позволит намного ускорить темпы развития науки.

Практические успехи в области автоматизации процессов научного творчества пока еще невелики по сравнению с имеющимися успехами в области автоматического планирования. Тем не менее первые сдвиги в этом направлении уже наметились. Так, в 1958 г. в Вычислительном центре (ныне в Институте кибернетики) АН УССР проверялась правильность доказательств теорем, полученных за год до того в одной новой области математики. Не так давно известному математику Хао Вангу удалось построить программу, с помощью которой был автоматически доказан ряд теорем математической логики, в том числе и ряд новых, неизвестных ранее теорем.

В свете сказанного необходимо по-новому подойти к анализу возможностей управляющих кибернетических устройств, в частности, к решению вопроса о том, может ли машина быть «умнее» своего создателя. Отрицательный ответ на этот вопрос, даваемый большинством неискушенных людей, носит скорее эмоциональную, чем рациональную окраску.

Приведенные нами примеры в задаче автоматизации умственной деятельности человека показывают, что возможность для машины превзойти своего создателя в определенном смысле действительно реализуется.

В самом деле, нетрудно понять, что не было бы никакого смысла создавать машину для целей автоматизации того или иного мыслительного процесса, если бы она выполняла этот процесс хуже, чем ее создатель. Но как же быть в этом случае с тем несомненным фактом, что машина работает по программе, составленной для нее человеком? Иногда усматривают в этом факте доказательство того, что машина никогда не сможет превзойти своего создателя. В действительности

же диалектика процесса обучения (как машины, так и человека) такова, что из умения обучить чему-либо не обязательно вытекает с необходимостью умение обучающего самому выполнять программу, закладываемую им в обучаемого.

Применительно к обучению человека это ни у кого не вызывает сомнений. Действительно, в противном случае ученики никогда не смогли бы превзойти своих учителей и, следовательно, вопреки очевидным фактам наука, как и искусство, могла бы лишь деградировать или в лучшем случае оставаться на неизменном уровне. А если мы имеем дело с машиной? Оказывается, что процесс обучения машины с этой стороны принципиально ничем не отличается от процесса обучения человека. Современные кибернетические машины по крайней мере в одном отношении превосходят самого способного ученика, а именно в скорости и в точности выполнения тех элементарных операций, из которых складываются в конечном счете все мыслительные процессы. Это приводит к тому, что машина — «ученик» оказывается способной выполнить за короткое время такую программу, которую ее «учитель» — программист не выполнил бы за всю свою жизнь.

На первый взгляд указанное преимущество машины перед человеком имеет чисто количественную природу. Но, увеличив в соответственное число раз скорость преобразователя информации (т. е. чисто количественный показатель), мы приходим к новому качественному результату. Машина, например, воспользовавшись лишь теми знаниями, которые есть у любого начинающего шахматиста, сможет обыгрывать гроссмейстеров и, уж конечно, того, кто вложил в нее эти знания.

Нетрудно заметить, однако, что в данном случае не происходит открытия машиной новых фактов, неизвестных (хотя бы чисто теоретически) ее создателю. Может быть, именно в этом кроется преимущество человека перед машиной? Детальный анализ заставляет дать отрицательный ответ на этот вопрос.

Возможность открытия новых фактов, совершенно неизвестных создателям машины, и программа ее работы заложены в уже существующих универсальных электронных цифровых машинах. Рассмотрим сначала совсем тривиальный пример. Хорошо известно, что в числе операций, выполняемых современными универсальными цифровыми машинами, имеется так называемая операция условного перехода, поз-

воляющая машине автоматически менять порядок вычислений в зависимости от полученных ею промежуточных результатов. Не зная точно характера решаемых задач, программист закладывает в машину несколько вариантов возможного их решения, представляя машине самой выбрать тот вариант, который ей потребуется. Может случиться, что некоторые варианты машины никогда не будут использованы, но программист не знает этого и никогда не узнает, если не предусмотрит, чтобы машина сообщила ему об этом.

Легко понять, что найденный факт является совершенно новым для программиста и, несомненно, обогащает его первоначальные знания. Составляя программу заново, программист может воспользоваться этим новым знанием, исключив ненужные варианты и упростив тем самым метод решения рассматриваемого класса задач. Можно, впрочем, сделать и так, чтобы машина самостоятельно произвела соответствующие упрощения. Этот пример может показаться неубедительным ввиду крайней простоты найденного машиной нового факта, а также вследствие того, что здесь производится лишь упрощение уже известного, а не создание нового метода. Рассмотрим поэтому более сложный пример.

Известно, что для нахождения общего метода решения квадратных уравнений человечеству потребовалось несколько сотен лет. Нетрудно, однако, совершенно не зная этого метода, составить программу, пользуясь которой, современная универсальная электронная цифровая машина за несколько минут работы найдет этот метод и сообщит программисту соответствующую формулу. Для этой цели нужно заставить машину перебрать различные последовательности своих элементарных операций, автоматически проверить правильность получаемых в результате их применения решений путем подстановки этих решений в исходное квадратное уравнение и зафиксировать последовательность операций, приводящую к правильному решению.

Приведенный пример представляет собою один из наиболее простых случаев так называемых самообучающихся программ, с успехом реализующихся на современных универсальных цифровых машинах. Усложняя программу за счет использования в процессе поиска нового метода из уже найденных машиной методов, можно с успехом моделировать творческую деятельность все более высокого порядка. При таком моделировании можно заставить машину автоматически ставить новые проблемы и находить их решения.

В указанных примерах в машину в какой-то мере все же вводились отдельные элементы знаний, добытых человечеством на довольно высоких ступенях его развития (например, идея последовательного перебора вариантов в последнем примере). Можно, однако, в моделировании процессов самообучения пойти еще дальше. Так, в Институте кибернетики АН УССР успешно моделировался процесс познания довольно сложного закона природы группой автоматов, в первоначальную структуру которых была заложена информация лишь о чисто биологических закономерностях, присущих любому эволюционному процессу.

Принципиально возможно также, заложив в машину информацию об основных закономерностях развития жизни (наследственность, мутации, естественный отбор) и пропустив через нее информацию о физических процессах, происходивших на Земле с момента возникновения на ней жизни, заставить машину пройти все стадии эволюции (разумеется, в чисто информационном плане), начиная от первичной протоплазмы вплоть до возникновения и развития весьма высоких форм работы мозга. При этом начальная информация, вкладываемая программистом в машину, была бы сведена к минимуму, а весь огромный объем информации, который отличает (не только количественно, но и качественно) высшие формы сознания от простейших способов отражения действительности, присущих низшим формам жизни, был бы получен из закономерностей окружающего мира. Разумеется, подобная возможность в настоящее время практически не может быть реализована как ввиду недостаточной изученности истории Земли и механизма наследственности, так и ввиду недостаточного быстродействия и объема памяти современных электронных цифровых машин.

Подводя итог сказанному, можно констатировать, что кибернетические машины могут не только моделировать (в информационном плане) процесс интеллектуальной деятельности человека, но и значительно превосходить человека в этом отношении. Задача построения машин, неограниченно умножающих интеллектуальную и, в частности, творческую мощь человечества, представляет собой в настоящее время важнейшую практическую задачу.

Но не умаляет ли все это достоинство человеческого разума и нашу убежденность в неограниченных возможностях человеческого гения? Нет! И тысячу раз нет! Именно признание невозможности для человечества умножать свою ин-

теллеktуальную мощь с помощью средств технического прогресса льет воду на мельницу идеалистов, агностиков и скептиков всех мастей. Величие человеческого разума как раз и состоит в том, что он находит способы преодолеть рамки, поставленные ему природой, воплотив в кибернетических машинах волю, труд и разум многих поколений человечества.

Вряд ли можно сомневаться, что в будущем все более и более значительная часть закономерностей окружающего нас мира будет познаваться и использоваться автоматическими помощниками человека. Но столь же несомненно и то, что все наиболее важное в процессах мышления и познания всегда будет уделом человека. Справедливость этого вывода обусловлена исторически.

Никакой последующий прогресс кибернетической техники не сможет отменить тот непреложный исторический факт, что именно человек создал машины, а не наоборот. Тем самым машины, в том числе и самые «умные» из них, с социальной точки зрения низводятся до положения простых орудий, призванных умножить могущество человека, а не подменять его. Поэтому хотя кибернетические машины в принципе сами способны ставить себе задачи, постановка важнейших задач, определяющих бесконечно развивающиеся и совершенствующиеся интересы общества, всегда останется прерогативой человека.

Развитие кибернетики, в значительных масштабах увеличивающей интеллектуальную мощь человека, показывает, что достаточно совершенные кибернетические машины — и те, которые уже имеются, и, особенно, те, которые будут созданы в будущем, — могут превосходить человека в отношении переработки информации. Принципиально возможно создание кибернетической машины, которая будет в этом смысле «умнее» любого данного человека или группы людей.

Однако не следует забывать, что в социальном, историческом плане человечество не представляет собой простую сумму людей. Интеллектуальная и физическая мощь человечества определяется не только суммой человеческих мускулов и мозга, но и всеми созданными им материальными и духовными ценностями. В этом смысле никакая машина и никакая совокупность машин, являясь в конечном счете продуктом коллективной деятельности людей, не могут быть «умнее» человечества в целом, ибо при таком сравнении на одну чашу весов кладется машина, а на другую — все чело-

вещество вместе с созданной им техникой, включающей, разумеется, и рассматриваемую машину.

Следует отметить также, что человеку исторически всегда будет принадлежать окончательная оценка интеллектуальных, равно как и материальных ценностей, в том числе и тех ценностей, которые создаются машинами, так что и в этом смысле машина никогда не сможет превзойти человека.

Таким образом, можно сделать вывод, что в чисто информационном плане кибернетические машины не только могут, но и обязательно должны превзойти человека, а в ряде пока еще относительно узких областей они делают это уже сегодня. Но в плане социально-историческом эти машины есть и всегда останутся не более чем помощниками и орудиями человека. Аналогичное положение имеет место применительно к биологическому аспекту. Хотя с помощью кибернетических машин можно моделировать в информационном плане любые стороны эволюционного процесса, в реальном процессе эволюции, имеющем место на Земле, жизнь и сознание возникли и не могли возникнуть иначе, как форма существования белковых тел. Формы же отражения действительности, присущие кибернетическим машинам, могли возникнуть и действительно возникают лишь на достаточно высоком уровне развития человеческого сознания.

ГНОСЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ *

В понятие моделирования современная наука вкладывает гораздо более широкое и глубокое содержание, чем то, которое вкладывалось в это понятие ранее. Еще и теперь в обычной жизни под моделированием понимают обычно копирование тех или иных внешних свойств объекта, чаще всего его пространственных форм. Именно такое содержание вкладывается, например, в такие понятия, как «модель здания», «модель судна» и т. п.

Однако в современной науке все большее и большее значение приобретает более глубокое толкование слова «модель», при котором основное внимание уделяется моделированию скрытых внутренних свойств объекта.

* Вopr. философии, 1963, № 10.

Подобные модели существуют обычно лишь в описаниях и, как правило, не нуждаются в изготовлении их в виде тех или иных физически ощутимых объектов. Так, говоря о модели атомного ядра, современный физик вовсе не предполагает, что речь идет о демонстрационной модели, изготовленной из дерева или из металла, которую можно подержать в руках, измерить, взвесить и т. п. Под моделью ядра он понимает прежде всего совокупность научных гипотез о строении ядра, позволяющих не только правильно описать то, что уже известно об этом предмете, но и предсказать новые, еще не открытые наукой факты.

В этом же смысле можно говорить о модели солнечной системы, предложенной Коперником в противовес ранее существовавшей модели Птолемея. Ясно, что моделирование любого объекта в подобном смысле не что иное, как фиксация того или иного уровня познания этого объекта, позволяющая описывать не только его строение, но и предсказывать (с той или иной степенью приближения) его поведение. В отличие от обычного физического моделирования подобное моделирование естественно называть *и н ф о р м а ц и о н н ы м*, подчеркивая тем самым, что речь идет об информации о данном объекте, имеющейся в нашем распоряжении.

Будучи органической составной частью процесса познания, информационное моделирование выполняется человеком и для человека. Средством фиксации любой конкретной информационной модели являются *я з ы к и*, причем не только те человеческие языки, которые изучаются традиционным языкознанием, но и любые искусственные языки, строящиеся в процессе накопления и передачи знаний (например, символический язык алгебры или язык чертежей).

Зафиксированная в том или ином языке информационная модель сама по себе мертва: будучи представлена сама себе, она неспособна дать большее число выводов о поведении смоделированного объекта, чем те выводы, которые были в ней зафиксированы с самого начала. Даже если модель содержит внутри себя правила, с помощью которых могут быть сделаны все необходимые выводы, эти выводы не будут получены, пока эта модель имеется лишь в виде некоторой языковой схемы.

Для перехода от подобной, статической в своей основе модели к модели динамической, раскрывающей все свое истинное содержание, необходимо еще некоторое активное начало. Мозг человека, овладевшего этой моделью, может

служить таким началом. Действительно, овладев, например, уравнениями механики и способами их решения, человек (если он располагает достаточно большим временем) может мысленно проследить все стадии движения любой механической системы, например, движущейся ракеты. При этом в его голове как бы возникает и реализуется динамическая информационная модель соответствующей системы. Человеческий мозг осуществляет не только статическое запоминание информации о заданной ему модели, но и преобразует эту информацию в соответствии с теми или иными правилами преобразования, заложенными в эту модель. Именно в наличии подобных преобразований и заключается прежде всего различие между старой (статической) моделью и ее новым (динамическим) воплощением.

При таком подходе мозг человека может рассматриваться как универсальный инструмент динамического информационного моделирования. Универсальность здесь означает принципиальную возможность реализации в мозгу произвольных, а не только каких-нибудь определенных динамических информационных моделей. В такой универсальности мозга заключается одна из важнейших сторон способности к безграничному познанию человеком окружающего его объективного мира.

Отдавая должное огромным возможностям мозга как инструмента для информационного моделирования, нельзя не видеть также ряд его существенных ограничений и прежде всего недостаточную скорость его работы. Желая восполнить эти ограниченности, человек начал создавать различного рода автоматические устройства для реализации тех или иных информационных моделей. Первоначально такие устройства были специализированными, т. е. пригодными для моделирования относительно узких классов явлений.

Принципиально новый шаг был сделан в связи с созданием универсальных электронных цифровых машин. Как показал подробный анализ, эти машины, подобно мозгу, являются универсальными инструментами для информационного моделирования: на них (при условии наличия достаточного объема памяти) может быть реализована любая динамическая информационная модель. Не следует, конечно, думать, что строение современных электронных цифровых машин копирует строение человеческого мозга. Совсем наоборот, в их строении чрезвычайно

мало общего с мозгом. Тем не менее с точки зрения возможностей информационного моделирования эти машины не только не уступают мозгу человека, но и существенно его превосходят по ряду показателей (прежде всего по скорости работы).

Как же доказывается свойство универсальности электронных цифровых машин? В основе этого доказательства лежат две основные идеи. Первая идея — это идея кодирования алфавитов любых языков в алфавите какого-нибудь одного языка. Чтобы понять сущность этой идеи, рассмотрим два языка — обычный русский язык и «язык» чисел. На первый взгляд, между ними весьма мало общего. Нетрудно, однако, указать один общий прием для записи любых выражений первого языка во втором «языке». С этой целью достаточно каждой букве русского алфавита сопоставить двузначное десятичное число, а именно ее номер в алфавите. Все слова русского языка представятся тогда очевидным образом в виде чисел (точнее — в виде последовательности цифр). Например, слову «дом» будет сопоставлено число «051412», ибо буква «д» является пятой буквой русского алфавита, буква «о» — четырнадцатой, а буква «м» — двенадцатой. Аналогичным образом могут быть закодированы (представлены в виде чисел) также знаки препинания и любые другие знаки, встречающиеся в различных русских текстах.

Легко показать, что информационная модель, представленная в каком угодно языке (естественном или искусственном), может быть очень просто закодирована в любом другом языке, если только этот последний язык содержит в своем алфавите более чем одну букву. Правила такого кодирования чрезвычайно просты. С помощью соответствующего кодирования любая информационная модель может быть представлена в виде последовательности чисел и в таком виде введена в память электронной цифровой машины.

Однако одного запоминания информационной модели недостаточно. Необходимо еще привести в действие заложенные в модель правила преобразования информации. А эти правила отличаются бесконечным многообразием; ведь одно дело — информационная модель простых механических объектов, и совсем другое дело — информационные модели объектов биологических или социальных.

Тем более удивительно, что современная наука нашла способ единообразного представления правил преобразования информации в информационных моделях любой при-

роды. В основе этого способа лежит идея разложения правил преобразования информации на элементарные правила. Оказалось, что все многообразие правил преобразования информации может быть получено в результате различных комбинаций конечного (и притом весьма небольшого) числа типов элементарных правил. Подобно тому, как качественно различные материальные тела складываются из относительно небольшого числа типов элементарных частиц, точно так же из небольшого числа типов элементарных правил преобразования информации складываются в конечном счете правила преобразования информации в информационных моделях любых (в том числе и качественно отличных друг от друга) объектов.

Идея разложения произвольных правил преобразования информации на элементарные правила и есть как раз вторая из упомянутых выше идей, на которых базируется доказательство универсальности современных электронных цифровых машин. Оказывается, что набор операций в этих машинах содержит все типы элементарных правил. Поэтому с помощью таких операций может быть представлена (или, как принято говорить, запрограммирована) любая система правил преобразования информации, которая может встретиться при информационном моделировании любого объекта.

Следует отметить, что универсальные цифровые машины были открыты чисто теоретическим путем около 30 лет тому назад, задолго до их практического воплощения в электронные схемы. За это время была доказана принципиальная возможность реализации в подобных машинах всех известных в настоящее время видов информационных моделей. Более того, виднейшими математиками специально предпринимались попытки теоретического построения таких информационных моделей, которые нельзя было бы реализовать на уже существующих универсальных цифровых машинах. Все эти попытки оказались безрезультатными.

Таким образом, в настоящее время факт принципиальной возможности программирования на современных электронных цифровых машинах любых информационных моделей установлен не менее твердо, чем факт возможности разложения любого материального объекта на элементарные частицы. Важно еще раз подчеркнуть, что речь идет здесь именно о моделях любой (а не только математической) природы.

Очень важным в теоретико-познавательном отношении является вопрос об информационной модели мозга. Поскольку информационная модель представляет собой просто описание строения и закономерностей поведения моделируемого объекта, то в чисто принципиальном плане мы должны признать возможность построения в будущем сколь угодно точных информационных моделей мозга. Отрицать этот факт — значит отрицать безграничные возможности человеческого познания.

Но как только та или иная модель построена, ее можно запрограммировать и тем самым реализовать в виде динамической (действующей) модели на уже существующих универсальных электронных цифровых машинах. При достаточно точном информационном моделировании будут промоделированы, в частности, и все основные функции мозга и прежде всего функция мышления. Как и мозг, подобная модель должна в будущем «самопрограммироваться» на любые виды умственной деятельности, не исключая и ее самые высокие творческие формы.

Нужно сразу подчеркнуть, что речь идет здесь о принципиальной возможности, а не о том, что может быть сделано сегодня или завтра. В настоящее время описание закономерностей работы мозга, закономерностей процессов мышления находится еще в самом зачаточном состоянии. Те закономерности, которые в достаточной мере изучены (например, закономерности образования условных рефлексов или механизм возникновения языковых понятий), уже сейчас успешно моделируются на электронных цифровых машинах. В целом же по этой проблеме предстоит еще столь много работы, что говорить о сколько-нибудь удовлетворительной информационной модели мозга пока совершенно преждевременно.

Однако и в чисто принципиальном плане вывод о возможности моделирования на машине всех видов деятельности мозга может вызвать недоумение. Не кроется ли в этом выводе заключение о тождественности высших форм движения с низшими? Легко, однако, понять, что оснований для такого рода опасений в действительности нет. По самому определению модели она должна в чем-то непременно отличаться от объекта, иначе она не будет моделью, а просто совпадет с самим объектом. В отношении информационных моделей это общее свойство моделирования проявляется особенно ярко. Ведь существо всякой информационной модели состоит не в

копировании объекта, а в описании его поведения.

Предположим, например, что кому-либо удалось построить более или менее точную информационную модель всех процессов, происходящих в том или ином живом организме, скажем, в обыкновенной корове. Будучи реализована на машине, такая модель описывала бы, в частности, процесс образования молока. Но употреблять подобное «информационное молоко» в качестве пищи было бы, разумеется, невозможно. Возможно, правда, что глубокое проникновение в суть происходящих в организме коровы процессов (необходимое для сколько-нибудь точного информационного моделирования) позволит химикам разработать способ производства искусственного молока, вполне заменяющего естественное, однако к проблеме информационного моделирования это уже не имеет прямого отношения.

Другой пример — из области моделирования социальных отношений. Предположим, что какой-нибудь клерк досконально изучил жизнь, характер и привычки своего хозяина-банкира. Ему нетрудно в мечтах воспроизвести с достаточной точностью поведение своего хозяина в тех или иных условиях. В соответствии с нашей терминологией это будет означать, что в мозгу клерка реализована информационная модель банкира. Каждому ясно, однако, что наш клерк не станет от этого богаче ни на один цент, а его положение в обществе останется таким же, каким оно было и раньше.

Приведенные примеры при всей своей примитивности позволяют понять существо одного весьма распространенного заблуждения. Дело в том, что при популяризации достижений современной науки, и прежде всего достижений кибернетики, очень часто совершается ошибка отождествления информационной модели объекта с самим объектом. Рассуждают здесь примерно таким образом: если в принципе можно построить информационную модель любого объекта (а это, как уже отмечалось выше, сегодня неоспоримый факт), то такая модель будет в каждый данный момент «знать», что должен делать моделируемый объект, например, человек. Имея подобную информацию, кажется уже чисто техническим делом создать устройства, приводимые в движение на основе этой информации и имитирующие моделируемый объект уже не в информационном, а в прямом смысле. В конечном счете приходят к выводу о возможности создания

«искусственного человека», общества, состоящего из машин, и т. п.

В абстрактно-техническом плане подобные проекты, какими бы далекими от реализации при современном уровне знаний они ни были бы, нельзя считать абсолютно беспочвенными. Однако они сразу же становятся несостоятельными, как только с абстрактно-технической точки зрения мы переходим на позиции реальной действительности. Ведь с абстрактной, внеисторической точки зрения и рассмотренный нами выше клерк имеет все возможности, чтобы стать миллионером (он не глупее своего хозяина, обладает не меньшими, чем он, знаниями и т. п.). Однако хорошо известно, что в реально существующем капиталистическом мире клерки, как правило, не становятся миллионерами, несмотря на все свои способности и достоинства.

Точно так же обстоит дело и с проектами машинных обществ, создания «искусственных людей» и другими подобными проектами, вокруг которых часто создается атмосфера нездоровой сенсации. Необходимо совершенно ясно представлять себе, что возможность реализации подобных проектов решается не в чисто техническом, а прежде всего в историческом плане и лежит поэтому вне компетенции кибернетики или любой другой естественной науки. Ответы на подобные вопросы следует искать не в естественных, а в социальных науках. И этот ответ уже давно дан историческим материализмом, а именно: во всяком реально существующем и развивающемся человеческом обществе все созданное руками человека, в том числе и самые совершенные автоматы, является не более чем орудиями производства и не может быть в социальном плане равнозначным человеку.

Разумеется, в условиях капитализма техника вообще и кибернетическая техника в частности используется в интересах правящих классов. Поскольку эти интересы враждебны интересам трудящихся, зачастую создается иллюзия техники как некоей самодовлеющей силы, противостоящей человеку, вытесняющей его из жизни. Достаточно вспомнить безработицу, которой сопровождается в капиталистических странах внедрение новейших средств автоматизации. Существенно, что внедрение автоматизации в сферу учета (на базе электронных цифровых машин) вызывает безработицу не только среди рабочих, но и среди так называемых средних слоев капиталистического общества. Не в этом ли причина тех пессимистических пророчеств об «окончательном вытесне-

нии человека машиной», которые стали частыми на страницах популярных и научно-фантастических изданий Запада?

В условиях социалистического общества нет места для подобных мрачных пророчеств, равно как и для бездумных утверждений о знаке равенства между человеком и машиной. Мы уверены, что в наших условиях любые достижения человеческого гения, в том числе и самые совершенные кибернетические машины, будут служить интересам человека. И как бы ни совершенствовалась в будущем техника, какие бы умные и могущественные машины ни создавались, ими в конечном счете будет управлять коллективная воля и мысль человечества. Машины решали и будут решать задачи в интересах человека, а не наоборот. Именно это, а не какие-либо чисто технические причины исключают возможность постановки знака равенства между человеком и машиной.

Что же касается кибернетических (прежде всего электронных цифровых) машин, то они способны неизмеримо повысить интеллектуальную мощь человечества. Те задачи (в том числе и задачи творческого характера), которые недоступны «невооруженному» человеческому мозгу, станут доступны человеку, вооруженному всей мощью кибернетической техники. Моделирование все больших и больших областей абстрактного мышления на электронных цифровых машинах раздвинет границы его возможностей до невиданных сегодня пределов. Ведь абстрактное мышление является именно той областью, где информационные модели наиболее близко подходят к объекту моделирования. А учитывая возможность убыстрения в моделях элементарных мыслительных актов в миллионы (уже сегодня) и даже в миллиарды раз, мы имеем все основания говорить о возможности в ближайшем будущем во много раз увеличить производительность труда человека в области абстрактного мышления.

Разумеется, такой итог может быть достигнут лишь в результате упорного труда по созданию информационных моделей во всем огромном числе областей, которые составляют предмет интеллектуальных усилий человека. Но хотя в будущем все более и более будет возрастать доля интеллектуального труда (в том числе и самых высоких его форм), выполняемого автоматическими помощниками человека не только не хуже, но и лучше, чем человеком, это не дает никаких оснований ставить знак равенства между человеком и машинами, которые в конечном счете являются продуктом его мысли и творчества.

О ГНОСЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВАХ МАТЕМАТИЗАЦИИ НАУК*

В настоящее время мы являемся свидетелями значительного роста темпов математизации целого ряда наук, которые ранее либо совсем не пользовались математикой, либо пользовались ею в относительно небольшом объеме. В качестве примеров можно указать лингвистику, биологию, экономические науки. В чем состоит причина этого явления? Здесь можно выделить не одну, а целых три основные причины. Первая причина состоит в естественном процессе развития и углубления соответствующих конкретных наук, приводящем на каком-то этапе к необходимости широкого привлечения математического аппарата. Как хорошо известно, К. Маркс считал, что «наука только тогда достигает совершенства, когда ей удастся пользоваться математикой» [1].

Вторая причина заключается в расширении границ самой математики, возникновении и развитии новых ее разделов. Этот процесс обеспечивает возможность математизации все новых и новых разделов знания. Наконец, третья причина — это развитие кибернетики и электронной вычислительной техники, позволяющей претворить указанную возможность в действительность. Последнее обстоятельство является существенным, поскольку применение математики в новых областях требует все более и более сложных вычислений и выкладок, зачастую просто недоступных человеку, если он не применяет соответствующих технических средств.

Разумеется, перечисленными причинами вскрывается лишь внешняя сторона интересующего нас явления. Более глубокие и тонкие его стороны вскрываются при анализе известной ленинской формулы, определяющей сущность процесса познания: «От живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике...» [2]. Переход к этапу абстрактного мышления в любой науке — первый шаг на пути к ее математизации. Характерной чертой этого этапа является создание специального языка, т. е. системы понятий и связей между ними, выражающих сущность предмета исследования данной конкретной науки. Такой язык создается сначала как средство для их классификации и выражения внутренних закономерностей между объектами, явлениями и свой-

* Диалектика и логика научного познания. М., 1966, с. 406—412.

ствами, изучаемыми рассматриваемой наукой. С помощью указанного языка наука строит информационную модель изучаемого ею круга объектов и явлений. Необходимо подчеркнуть, что эта модель вовсе не обязана быть классической математической моделью (скажем, быть выраженной системой алгебраических или дифференциальных уравнений). Например, классификационные системы в ботанике или в минералогии не в меньшей степени заслуживают наименования информационных моделей (в рамках соответствующих языков), чем системы уравнений механики точки или гидродинамики.

Информационная модель, с которой оперирует каждая наука, может быть в первом приближении разделена на собственно информационную и так называемую исчисленческую часть. Информационная часть включает в себя фактический материал, классифицированный тем или иным способом. Исчисленческая часть, или просто исчисление, есть не что иное, как совокупность правил вывода, позволяющих получать дедуктивным путем те или иные следствия из совокупности основных научных положений.

В процессе развития науки соотношение между указанными частями постепенно меняется. С одной стороны, происходит непрерывное обогащение как информационной, так и исчисленческой части информационной (языковой) модели. С другой стороны, по мере развития модели многие научные положения, входившие ранее в число основных, попадают в разряд следствий и могут быть поэтому исключены из информационной части языка. Иными словами, развитие информационной части соответствующей модели идет не только по пути простого накопления основных положений, но и по пути замены разрозненных мелких научных положений более фундаментальными, обобщенными научными положениями. Ясно, что подобный путь развития науки приводит к увеличению удельного веса исчисленческой части модели, повышению роли дедуктивных построений и тем самым к увеличению возможностей для математизации науки.

Следует отметить, что на этапе абстрактного мышления информационные модели, используемые во всех науках (в том числе и в так называемых описательных науках), содержат не только собственно информационную, но и исчисленческую часть. В самом деле, в явной или неявной форме здесь обязательно используются те или иные части современных логических исчислений (хотя бы на уровне простых

силлогизмов). Поскольку соответствующие исчисления в формализованном виде развиваются теперь как часть математики, каждая наука, включая и описательные науки, представляет уже сейчас какие-то возможности (пусть временно скрытые) для применения математических методов.

Почему же, однако, далеко не во всех науках математические методы приобрели к настоящему времени столь же существенное значение, как, скажем, в механике или в физике?

Обычно в качестве причины указывают на относительно большую простоту объектов, с которыми имеют дело механика и физика, по сравнению, скажем, с биологическими объектами. Этот факт сам по себе, разумеется, не вызывает сомнения. Действительно, информационные модели биологических объектов должны включать в себя не только физические и химические модели, но и нечто еще, отражающее специфические свойства живой материи, сложной организации живого организма, истории его происхождения и др.

Однако неверно было бы считать, что сложность биологических объектов создает непреодолимое препятствие на пути математизации биологии. Более того, неверно ограничивать сферу математизации биологии одними лишь физико-химическими сторонами биологических процессов. Можно видеть уже сейчас, что будущее развитие биологии сольет воедино дедуктивные модели для описания локальных процессов (на молекулярном и клеточном уровне) с моделями, описывающими живой организм как единое целое, как большую, сложно организованную систему. При этом может оказаться, например, возможным выводить строго математическим путем те или иные следствия о путях эволюции органического мира в различных условиях, предсказывать существование и давать достаточно точное описание неизвестных видов живых организмов, которые мы можем встретить на других планетах, и т. п. Достигнув такого уровня развития, биология вполне может сравниваться в смысле точности, скажем, с астрономией, для которой уже давно не в диковинку открывать новые планеты «на кончике пера».

Не следует, однако, думать, что при этом вся сложность биологических процессов будет сведена к небольшому числу основополагающих уравнений, как это имеет место в физике или механике. Живой организм есть сложная система по своему своему существу, а не только лишь в силу низкого уровня наших знаний о нем. Для описания подобных систем классические математические методы оказываются, как пра-

вило, непригодными. Поэтому задача математизации биологии, равным образом как аналогичная задача для экономики и других плохо поддававшихся математизации наук, требует изменения лица самой математики.

Но именно этот процесс и происходит сейчас в связи с развитием так называемой машинной математики. Если раньше математика изучала только частные виды языков, такие, как формульный язык алгебры и анализа или язык геометрических построений, то теперь объектом ее изучения является общая теория языков, теория исчислений произвольной природы. Создается математический аппарат, позволяющий изучать структурные соотношения и правила вывода в произвольных языках. На первый план выдвигаются новые разделы математики, многие из которых возникли буквально у нас на глазах — математическая логика, теория алгоритмов и автоматов, теория моделей, общая теория алгебраических систем, теория структур, теория графов, методы исследования операций и др. Резко возрастает роль вероятностных и статистических методов.

Таким образом, естественный процесс углубления любой науки приводит к открытию все более и более фундаментальных положений. Большая же фундаментальность положений с чисто информационной точки зрения есть не что иное, как возможность получения из него большего числа следствий. А это означает, в свою очередь, увеличение не только абсолютного объема, но и относительной доли той части науки, которая может быть охвачена дедуктивными построениями.

В то же время развитие математики подготавливает математический аппарат для эффективных дедуктивных построений в новых областях, где классические математические приемы, основанные на аналитических формульных представлениях, оказываются мало пригодными. Переход от частных аналитических к более общим алгоритмическим методам уже сегодня позволили значительно расширить область приложения математики в экономике, лингвистике и в ряде других наук. Даже в столь далекой от математики описательной науке, как эволюционная биология, за последние годы сделаны успешные попытки построения дедуктивных математизированных моделей. Эти модели позволяют обнаруживать ряд интересных свойств эволюционных процессов не эмпирически, а путем вывода из аксиом, подобно тому, как доказываются теоремы в математике.

Новый алгоритмический аппарат наряду со многими достоинствами обладает также и одним довольно неприятным свойством: его применение отличается, как правило, гораздо меньшей наглядностью и большей громоздкостью по сравнению с традиционными примерами применения старой «формульной» математики. Отчасти это объясняется новизной и сравнительно малой изученностью нового аппарата (ведь многие формулы математического анализа тоже далеко не сразу обрели нынешнюю простоту и наглядность). Однако есть и причины, лежащие в самом существе дела, поскольку основной целью создания нового аппарата является изучение предметов и явлений, существенно более сложных, чем те, что изучались ранее.

Поэтому эффективное применение нового аппарата оказывается, как правило, возможным лишь при условии привлечения мощных технических средств, позволяющих автоматизировать соответствующие выкладки и дедуктивные построения. Таким средством являются современные электронные вычислительные машины. Без них математизация многих новых разделов науки оставалась бы в рамках чисто теоретических возможностей, не находя эффективных путей для проникновения в практику. Электронные вычислительные машины замыкают, таким образом, цепь причин и следствий, делающую проникновение математических методов в другие науки не только возможным, но и практически крайне важным.

В связи со всем сказанным возникает естественный вопрос. А не приведет ли математизация различных наук к потере их специфики, к поглощению их математикой? Нетрудно понять, что для опасений подобного рода нет никаких оснований. Об этом убедительно свидетельствует хотя бы пример столь сильно математизированных наук, какими являются современная механика и физика. Ведь математизация относится только к методам, используемым в соответствующей науке, и никоим образом не затрагивает ее предмета, который, во всяком случае, остается специфическим для каждой отдельной науки. Да и в части методов математизация затрагивает лишь область дедуктивных построений. Что же касается методов получения экспериментального материала, выработки соответствующей системы понятий, методов практического использования получаемых результатов, то все это определяется в первую очередь объектом изучения и также имеет свои специфические для каждой отдельной науки

черты. Наконец, специфика различных наук проявляется и в используемом ими математическом аппарате. Пример все той же механики убеждает нас в том: известная часть используемого в ней математического аппарата имеет не общематематическое, а лишь «внутримеханическое» значение и развивается поэтому не математиками, а механиками. Таким образом, несмотря на все свое огромное значение, математизация науки вовсе не приводит и не может привести к подмене всех наук математикой, к превращению математики в некую науку наук или сверхнауку.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Лафарг. О Карле Марксе и Фридрихе Энгельсе. М., 1936. 17 с.
2. В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 29, с. 152—153.

КИБЕРНЕТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СИЛ*

Кибернетика и электронная вычислительная техника представляют собой одно из основных направлений развития разветвляющейся на наших глазах научно-технической революции. Будучи молодой наукой, кибернетика, как и другие грандиозные научно-технические завоевания нашего времени, имеет свои корни далеко в прошлом. Революция в естествознании, произошедшая на рубеже XIX и XX столетий, была прелюдией современной научно-технической революции. В гениальном труде «Материализм и эмпириокритицизм» В. И. Ленин дал исчерпывающий анализ причин и сущности «новейшей революции в естествознании». Ясным взором мыслителя-диалектика он увидел неисчерпаемость задач науки, наметил пути ее дальнейшего развития.

Стремительные темпы развития науки, непрерывно увеличивающаяся роль точных математических методов, все возрастающая сложность практических задач, решаемых наукой, явились причиной автоматизации сначала расчетных,

* Ленин и современная наука: Ленинские идеи и современное естествознание. Расцвет науки в союзных республиках. М.: Наука, 1970, кн. 2, с. 257—277.

вычислительных работ, а затем и более сложных элементов научного творчества. Революция в естествознании и научно-техническая революция вызвали не только количественный рост, но и резкое качественное усложнение производственных процессов. Как следствие этого, процессы управления производством стали более емкими, что привело к необходимости автоматизировать их.

Таким образом, возникновение кибернетики как теоретической основы автоматизации в области науки, техники и производства было подготовлено всем ходом развития научно-технического прогресса.

Научно-технический прогресс продиктовал не только рождение кибернетики и электронной вычислительной техники, но и возможность их становления. «Неисчерпаемость свойств электрона и атома», гениально предугаданная В. И. Лениным, породила в конечном счете современную электронику, без которой создание и дальнейшее совершенствование электронных вычислительных машин было бы невозможно. А ведь именно машины и средства электроники представляют собой техническую базу кибернетики.

Концепция материального единства мира при его огромном качественном разнообразии, отстаивавшаяся В. И. Лениным, как нельзя более ярко проявилась в самом предмете кибернетики. Как известно, кибернетика изучает общие законы преобразования информации в сложных управляющих системах. Примеры подобных систем она находит в таких качественно различных объектах, как системы управления производственными процессами, нервная система человека и животных и различные системы управления, существующие в человеческом обществе. Философская основа, на которой зиждется нахождение общего в столь различных объектах, это — материальное единство мира.

Кибернетика и вычислительная техника принадлежат к числу таких научно-технических отраслей, которые имеют особо глубокие социальные последствия. Хорошо известно, что В. И. Ленин первый оценил социальные последствия научно-технической революции. Именно В. И. Ленин с особой яркостью показал несовместимость огромных возможностей, открываемых перед человечеством бурным ростом науки и техники, с узкими рамками капиталистических производственных отношений. В кибернетике этот вопрос встает особенно остро при решении задач управления экономикой в государственном масштабе.

Кибернетика, являясь составной органической частью научно-технического прогресса, не мыслится иначе как действенная производительная сила нашего социалистического общества.

В любой сфере деятельности человеческого коллектива — в области науки, техники, производства — методы и средства кибернетики направлены на повышение производительности труда. Это, в свою очередь, способствует эффективному и целесообразному использованию материальных и людских резервов общества, развитию планомерной организации всего общественного хозяйства.

Каковы же основные направления развития кибернетики и электронной вычислительной техники в наше время? За последние годы произошли существенные изменения в технической базе кибернетики. По-прежнему основу этой базы составляют универсальные электронные вычислительные машины. Однако нынешние машины, так называемые машины третьего поколения, значительно отличаются от машин первого и второго поколений. Перечислим важнейшие из этих отличий.

1. Современные универсальные цифровые машины ориентируются не только на простую вычислительную работу, но и на обработку произвольной буквенно-цифровой информации. Особое значение при этом приобретают такие операции, как переупорядочивание и сортировка данных, операции редактирования и обмена информацией с различного рода внешними устройствами.

2. Устройства ввода и вывода, игравшие ранее вспомогательную роль, приобретают значение важнейшей составной части машины. С развитием техники они становятся более разнообразными. Принимаются специальные меры для повышения их производительности за счет улучшения параметров самих устройств, а также резкого улучшения организации управления их работой. Важное место отводится устройствам, позволяющим принимать и передавать информацию от ЭВМ к линии связи, а также различным устройствам, способным организовать эффективное взаимодействие машины и человека в процессе решения сложных, не до конца формализованных задач.

3. Принимаются специальные меры не только для ускорения работы центрального процессора, но прежде всего для увеличения производительности всей системы в целом. Поэтому существенно меняется организация вычислительного

процесса. Предусматривается одновременное решение нескольких задач с целью максимальной загрузки различных устройств системы (мультипрограммирование), использование нескольких процессоров для решения особо сложных задач. Большое значение придается увеличению быстродействия и емкости запоминающих устройств. Причем имеются в виду не только оперативные запоминающие устройства, но и различные внешние накопители (магнитные диски, ленты и т. п.), а также специальные сверхбыстродействующие запоминающие устройства.

4. Решается целый ряд технических задач для существенного упрощения общения человека с машиной. В машину встраивают специальные операционные системы, позволяющие организовать эффективную трансляцию или интерпретацию заданий на многих алгоритмических языках. Предусматривается специальный режим работы машины (так называемое разделение времени), при котором одновременный (с точки зрения потребителя) доступ в машину могут иметь несколько десятков или даже сотен потребителей, работающих на выносных пультах (в ряде случаев удаленных от машины на сотни километров).

5. Меняется элементная база машин. Вместо навесных элементов (диоды, сопротивления, транзисторы) употребляются так называемые интегральные схемы, содержащие в одном элементе схемы, сравнимые по сложности со схемой радиоприемника. Использование интегральных схем повышает быстродействие и надежность ЭВМ и создает перспективы их заметного удешевления и упрощения эксплуатации.

6. В настоящее время важное значение приобретает создание комплексов из многих ЭВМ для их совместной работы. Намечились два основных направления. Первое из них — так называемые однородные комплексы, составляемые из однотипных машин. Главное их назначение — увеличение вычислительной мощности системы при решении особо сложных задач в результате параллельной работы нескольких машин. Второе направление — комплексы, составляемые из машин разных типов. Назначение у них то же самое — увеличение производительности системы. Однако достигается оно другими методами — за счет функциональной специализации различных машин на различных типах задач (первичная обработка данных, связь с внешними устройствами, большие вычислительные процедуры, трансляция и т. п.).

К этому направлению примыкают так называемые гибри-

ные машины, сочетающие в едином комплексе цифровую и аналоговую машины. То же самое относится к иерархическим системам разделения времени. В таких системах конечные пульта подсоединяются к малым ЭВМ, которые удовлетворяют большинство требований потребителей (в решении задач малого объема) самостоятельно. Лишь в случае, если поступивший запрос превышает возможности малой машины, он передается на следующий уровень, где устанавливается гораздо более мощная машина. В таких системах мощные машины могут быть использованы более эффективно, поскольку им приходится реже прерывать процесс переработки информации для удовлетворения мелких запросов.

В связи с усовершенствованием технической базы ЭВМ резко возросла роль систем математического обеспечения машин. Большинство перечисленных задач решается специальными программами или системами программ (трансляторами, диспетчерами и т. п.). Системы математического обеспечения современных ЭВМ насчитывают многие десятки тысяч машинных команд и являются достаточно дорогой составной частью. В стоимостном выражении они представляют зачастую половину стоимости оборудования систем обработки данных. В связи с этим большое значение приобретают системы автоматизации проектирования математического обеспечения ЭВМ. Вопрос здесь не сводится к обычной задаче автоматизации программирования. Дело в том, что при автоматизации составления разовых программ не так важен вопрос об их оптимизации. Большинство же отдельных частей математического обеспечения ЭВМ находится в постоянной работе. Поэтому вопрос о их качестве приобретает особое значение.

В настоящее время наметился ряд путей для решения задач автоматизации проектирования такого рода программ. Один из наиболее естественных путей — создание такого промежуточного машинно-ориентированного языка, чтобы транслирование с этого языка на внутренние языки различных ЭВМ было бы относительно простой задачей. Тогда составные части математического обеспечения могут быть запрограммированы навсегда на этом языке. Причем трансляторы, записанные на данном промежуточном языке, также осуществляют трансляцию с различных проблемно-ориентированных языков (Алгол, Кобол и др.) на этот же язык. При таком подходе проблема математического обеспечения для новой ЭВМ сводится в основном к созданию достаточно

эффективного транслятора с промежуточного языка на язык данной ЭВМ.

За последние годы стала развиваться теория оптимизации программ, позволяющая существенно улучшить качество программ, получаемых в результате трансляции. В перспективе это направление позволит получать программы лучшего качества по сравнению с программами, написанными опытными программистами.

Наметилось еще одно направление, суть которого состоит в том, что структура ЭВМ соответствует отдельным проблемно-ориентированным языкам или даже семействам таких языков. Трансляция в таких машинах сводится к минимуму или вообще отсутствует. Значение этого направления не ограничивается упрощением трансляции. Возможно, даже большее значение имеет то, что усовершенствование структур машин служит стимулом для дальнейшего развития языков, на которых выдается задание ЭВМ, и резко упрощает средства общения человека с машиной.

При проектировании машин со структурной реализацией развитых алгоритмических языков еще более возрастают трудности в проектировании машин, которые уже для машин с традиционной структурой были достаточно серьезными. Важное значение поэтому приобретает создание систем автоматизации проектирования ЭВМ.

Различают четыре основных уровня, или этапа, проектирования ЭВМ. На первом, так называемом системном, этапе происходит выбор общей компоновки структуры ЭВМ, фиксируются параметры отдельных ее устройств и осуществляется общая организация вычислительного процесса. На втором, алгоритмическом, этапе определяются алгоритмы функционирования всех блоков ЭВМ. На третьем этапе выбранные алгоритмы воплощаются в соответствующих логических схемах и на четвертом — в монтажных схемах.

В настоящее время успешно решаются задачи автоматизации проектирования на третьем и четвертом этапах. Частично автоматизирован и первый этап, в основном на уровне моделирования и выбора лучшей структуры из ряда альтернатив. Создан научный задел, позволяющий успешно решать задачи автоматизации второго этапа проектирования. Наконец, в связи с развитием интегральных схем успешно решаются задачи автоматизации изготовления элементов и узлов ЭВМ. Особенно перспективной в этом смысле является так называемая элионная технология. Суть ее состоит в изготов-

лении микросхем электронными или ионными пучками. Уже созданы машины, позволяющие автоматизировать процесс управления такими пучками.

Большое значение для развития кибернетики и ЭВМ имеет теория распознавания образов. На базе этой теории уже созданы читающие автоматы, позволяющие осуществлять надежное считывание печатных текстов в условиях помех, а также рукописных знаков, написанных с соблюдением некоторых ограничений. На очереди — чтение произвольных рукописных текстов, распознавание сложных полутоновых рисунков. Первые шаги, сделанные в области автоматизации ввода в ЭВМ звуковой информации — человеческой речи, позволяют надеяться на полное решение этой важной проблемы.

Развитие математической лингвистики, происходившее вначале лишь в связи с задачей автоматизации перевода с одного (человеческого) языка на другой, в настоящее время имеет другое направление. Установив тесные связи с теорией автоматов, она стала одной из основ, на которой зиждется автоматизация проектирования ЭВМ и систем математического обеспечения. На базе теории так называемых контекстно-свободных языков удастся построить количественную меру для оценки уровня «интеллигентности» многих алгоритмов обучения и самообучения как для ЭВМ, так и для живых существ. Успехи в этом направлении позволяют надеяться на создание в будущем такого языка для ЭВМ, который по своему богатству и выразительной силе не будет уступать естественным человеческим языкам.

В связи с задачей автоматизации справочно-информационных систем большое значение приобрело развитие специальных языков информационного поиска. Самостоятельный раздел науки представляют вопросы организации массивов информации в запоминающих устройствах различных видов и быстрого доступа к ним.

Весьма сильно видоизменилась теория автоматического управления. Ранее объектом ее изучения были в основном системы, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями (причем, как правило, невысоких порядков). В настоящее время центр тяжести сместился в сторону больших систем управления. Эти системы, в отличие от классических, уже не имеют простых аналитических описаний. Даже их отдельные элементы описываются сложными алгоритмами, зависящими к тому же от большого числа случайных параметров. Функционалы, определяющие качество работы

таких систем, также, как правило, не имеют простых аналитических описаний, а их вычисление не только требует выполнения огромного числа элементарных операций, но и применения специальных приемов статистического моделирования.

В этих условиях большой проблемой становятся уже сами способы фактического описания таких систем в реализуемых ими алгоритмах управления. Тем более сложными являются задачи исследования динамики процессов управления и оптимизация управляющих алгоритмов. Современная теория оптимального управления и точные математические оптимизационные методы (линейное программирование, динамическое программирование и др.) охватывают только небольшую часть задач в простейших либо сильно идеализированных ситуациях.

Неудивительно поэтому, что практика проектирования сложных систем управления ищет различные обходные пути решения задач оптимизации управления в таких системах. Здесь находят широкое применение различного рода эвристические приемы. Особо большое значение приобрели методы построения самоусовершенствующихся и самообучающихся систем управления. В связи с этим повысился интерес к изучению алгоритмов управления и переработки информации, реализуемых в такой сложной системе, какой является нервная система человека и животных. В свою очередь, успехи в развитии теории больших систем управления в широком смысле этого слова позволяют глубже проникнуть в разгадку одной из самых увлекательных тайн природы — принципов работы мозга и организации мыслительных процессов.

Во второй половине 60-х годов существенно изменился подход к принципам применения кибернетики и электронной вычислительной техники в различных областях человеческой деятельности. Если ранее ЭВМ применяли главным образом для решения отдельных сложных задач, в основном вычислительного характера, то теперь используется системный подход. При системном подходе вопрос об автоматизации той или иной области человеческой деятельности решается в комплексе, начиная от сбора и первичной обработки исходных данных до автоматического изготовления различного рода выходной документации.

Возьмем, например, естественные науки. До внедрения системного подхода обычная схема получения и обработки экспериментальных данных была следующей. Эксперимен-

тальные установки представляли собой самостоятельные объекты, оторванные от средств обработки данных. Полученные в результате эксперимента данные в лучшем случае автоматически фиксировались специальными самопишущими измерительными приборами. После этого наступал период ручной обработки: построенные самописцами графики и диаграммы измерялись и фиксировались в цифровом виде. Затем осуществлялась первичная обработка — усреднение, определение экспериментальных аналитических зависимостей, описывающих построенные графики, и т. п.

Этот этап характерен тем, что исходных данных очень много, а количество вычислений, приходящееся на единицу данных, относительно невелико. В досистемный период применение больших ЭВМ на этом этапе было мало целесообразным. Действительно, основные затраты труда и времени падают при этом не на вычисление, а на подготовку данных для ввода в машину (набивка перфокарт) и сам процесс ввода. Большая часть первичной обработки производилась в этот период вручную с использованием простейших вычислительных средств. Лишь после окончания этапа первичной обработки в случае вычислительных задач большого объема на втором этапе использовались крупные ЭВМ. Полученные цифровые данные снова подвергались ручной обработке: по ним строили графики, таблицы и другие документы, фиксирующие результаты работы в окончательной форме.

В настоящее время уже имеются примеры успешной комплексной автоматизации экспериментальных работ на основе системного подхода. Сложились два основных направления решения задачи такой комплексной автоматизации. Если экспериментальные установки являются сложными и дорогостоящими (большие ускорители, аэродинамические трубы и т. п.), то электронная вычислительная машина (или даже комплекс таких машин) становится органической составной частью этих установок. Данные измерительных приборов автоматически преобразуются в цифровой код и передаются в ЭВМ, которая снабжается комплексом программ, осуществляющих все стадии обработки поступающих данных.

Набор выводных устройств и соответствующих программ вывода обеспечивает получение выходной информации в готовой для публикации форме (вплоть до типографских клише).

Преимущество подобной организации обработки данных заключается в том, что исключаются наиболее трудоемкие операции многократного ввода и вывода промежуточных

данных. Кроме того, подобная организация обеспечивает не только возможность автоматизации обработки экспериментальных данных, но и автоматическое управление экспериментом.

Первые системы, основанные на непосредственном соединении ЭВМ с экспериментальными установками, строились уже на готовых установках.

Однако наилучшие результаты получаются тогда, когда сложная экспериментальная установка проектируется вместе с системой обработки. Системный подход означает, в частности, изменение критерия качества экспериментальных установок. Оценка здесь производится по окончательным, а не промежуточным критериям. Ускоритель, например, нужно рассматривать не просто как устройство для получения пучка частиц с заданной энергией и плотностью, а как инструмент для получения конкретных научных результатов (например, деталей строения атомных ядер). Промежуточные параметры (например, энергия частиц) могут оказаться высокими, но если все части установки (включая систему обработки данных) не спроектированы и не увязаны в комплексе, результаты ее эксплуатации будут плохими.

Второе направление комплексной автоматизации обработки экспериментальных данных относится к области сравнительно недорогих экспериментальных устройств и приборов. В этом случае может оказаться невыгодным включать ЭВМ в качестве органической составной части установки. Выход состоит в том, чтобы способы регистрации результатов измерений измерительными приборами были стандартными, а ЭВМ, установленные в вычислительных центрах, снабжены специальными вводными устройствами для автоматического чтения подобной информации. Система же специализированного математического обеспечения (комплекса программ обработки) строится точно так же, как и в первом случае. Различие проявляется лишь в том, что при таком режиме работы удается автоматизировать не только обработку экспериментальных данных, но и управление ходом эксперимента.

Существуют и промежуточные случаи, когда большие многоцелевые ЭВМ имеют связи с экспериментальными установками в режиме разделения времени посредством специальных устройств. При этом ЭВМ могут быть использованы и для других вычислительных работ, не связанных непосредственно с обработкой экспериментальных данных.

Примером комплексной автоматизации обработки экспериментальных данных может служить система, созданная на исследовательском судне «Михаил Ломоносов». Первичные данные получаются с помощью измерительных приборов, спускаемых в глубины океана. Эти данные, преобразованные в цифровую форму, специальный передатчик транслирует на борт корабля. Здесь они автоматически вводятся в вычислительную машину «Днепр». Использование подобной системы привело к тому, что корабль возвращается из рейса с полностью обработанными данными, в то время как раньше их обработка длилась полтора-два года после возвращения корабля в порт.

Весьма большое значение имеет создание подобных систем в метеорологии, геофизике и других областях знания. В таких науках, как, например, геология, накопление исходных данных — весьма трудоемкий и дорогостоящий процесс. Вместе с тем их использование носит зачастую разовый, одноцелевой характер. Предположим, что было проведено комплексное исследование некоторого района под углом зрения какой-либо одной задачи, например, поисков нефти. Полученные в результате геофизической разведки данные обрабатываются с точки зрения именно этой задачи. Всякая обработка состоит прежде всего в своеобразном «просеивании» данных. Отбирается и концентрируется та информация, которая отвечает на главный вопрос, с целью решения которого предпринято данное исследование. Остальная же часть информации, содержащая не менее ценные сведения о других полезных ископаемых, может быть при этом отброшена. Происходит это по разным причинам: или сама задача поиска не была сформулирована, так как не казалась в то время важной, или не были еще созданы соответствующие методы обработки.

Но, как правило, количество сделанных выводов (на основании результатов обработки) не исчерпывает всей информации, содержащейся в исходном экспериментальном материале. Нынешние формы хранения этого материала (бумажные архивы) таковы, что делают поиск и обработку нужной информации трудным, а иногда и просто безнадежным делом. Следовательно, при возникновении новых задач приходится повторять дорогостоящие эксперименты и исследования, вместо того чтобы воспользоваться уже имеющимися данными.

Поэтому следует решить проблему создания электронных систем хранения и поиска необходимой информации. Задача

не сводится к одной лишь установке ЭВМ с большим объемом запоминающих устройств. Необходимо разработать формы организации и кодирования информационных массивов, унифицировать порядок подборки и записи материалов. Требуется далее разработать систему служебных программ, обеспечивающих быструю подборку и упорядочивание материала в такой форме, чтобы он мог непосредственно обрабатываться соответствующими рабочими программами. Желательно, чтобы такие системы работали в режиме разделения времени с удаленными пультами. Дело должно быть организовано таким образом, чтобы с построенным «электронным архивом» и системой программ могло бы работать возможно большее число исследователей. Наконец, должна быть продумана система непрерывного пополнения системы новыми экспериментальными материалами и обновления устаревшей информации.

Создание подобных информационно-справочных систем важно не только для геологии. По существу, уже сегодня ни одна наука не может успешно развиваться без хорошо поставленной справочно-информационной службы. Существующие методы решения этой задачи (реферативные журналы, указатели, справочники) делаются с каждым днем все более громоздкими и все менее эффективными. Только автоматизация информационной службы с помощью ЭВМ на базе системного подхода может коренным образом изменить положение.

Весьма интересные перспективы открываются в области автоматизации дедуктивных наук и, прежде всего, математики. В настоящее время делаются попытки автоматизировать процесс создания программ, позволяющих, в свою очередь, автоматизировать доказательство теорем в тех или иных областях математики. Обнадеживающие результаты на этом пути есть пока лишь в начальных разделах математической логики (исчислении высказываний в узком исчислении предикатов). Попытки создать «универсальные решатели проблем» не дали тех результатов, на которые рассчитывали их авторы. Да иначе и быть не могло. Ведь в гораздо более простой области вычислительных алгоритмов задача создания «универсального вычислительного алгоритма» не только не решена, но в сколько-нибудь полном объеме даже и не сформулирована. Тем более невероятно ожидать быстрого решения такой проблемы в более трудной области, какой является доказательство теорем.

В настоящее время наметился другой, более практичный

путь к решению проблемы автоматизации доказательства теорем в математике. Основная его идея состоит в том, чтобы вместо попыток создания универсальных доказывающих программ разрабатывать операционную систему для совместной работы человека и машины по доказательству сложных теорем. Базу такой системы составляют два языка. Один из них служит для записи различных математических предложений и их доказательств в виде, более близком к обычному языку математиков, чем это обеспечивается языком математической логики. Второй язык — это язык поиска доказательства. На нем математик сообщает машине направление поиска доказательства и сужает тем самым перебор вариантов. В операционную систему входят трансляторы и интерпретаторы с этих языков, программы для построения дерева логических конструкций и так называемый машинный алгоритм очевидности, позволяющий машине устанавливать относительно простые следствия из известных ей фактов.

Помимо указанной алгоритмической части система должна включать также большую информационную часть. Ее составляют все известные предложения какого-нибудь одного или нескольких разделов современной математики вместе с их доказательствами. Доказательства должны быть приведены настолько подробно, чтобы каждый их шаг был «понятен» машинному алгоритму очевидности. Должно быть организовано непрерывное пополнение системы новыми результатами.

Уже на этой стадии система может принести существенную пользу. Во-первых, она позволяет организовать формальную проверку найденных человеком доказательств. Во-вторых, она является не просто справочно-информационной системой, а способна выводить простые логические следствия из накопленного ею материала. В-третьих, она предоставляет математiku возможность полнее использовать его интуицию для более быстрого получения результатов, окончательное оформление которых она берет на себя. Наконец, открываются неисчерпаемые возможности для непрерывного совершенствования машинного алгоритма очевидности и тем самым появляется возможность перекладывать на машину все большую и большую часть работы по доказательству теорем.

Весь ход работ в области автоматизации развития науки вообще и доказательства теорем в особенности представляет собой блестящую иллюстрацию марксистско-ленинской теории познания. Знаменитая формула В. И. Ленина — «от

живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике» утверждает недостаточность абстрактно-логического этапа для процесса познания. Абстрактное мышление должно подкрепляться двусторонней связью с практикой, и этот процесс по самой своей сути непрерывен.

Между тем уже после выхода в свет «Материализма и эмпириокритицизма» рядом ученых делались попытки разорвать непрерывность процесса познания. Так, знаменитый немецкий математик Д. Гильберт хотел реализовать следующую программу развития математики и теоретической физики: сначала, исходя из реальных практических задач, формулируются системы основных постулатов-аксиом, а затем все развитие науки идет в рамках абстрактно-логического этапа, уже без непосредственной связи с практикой.

В настоящее время несостоятельность подобной программы показана чисто математическими методами. Установлено, что для сколько-нибудь широкой области знания нельзя построить замкнутую формальную систему, в рамках которой можно было бы доказать любое верное и опровергнуть любое ложное предложение. Иными словами, даже чисто теоретические разделы науки нельзя развивать бесконечно долго под стеклянным колпаком, полностью отгородившись от реальной действительности. Между тем для системы, сохраняющей канал связи с внешним миром, такого рода ограничений не существует.

Многое из того, что уже было сказано применительно к задаче автоматизации научных исследований, относится и к автоматизации инженерно-конструкторского труда. Здесь также осуществляется переход от решения отдельных задач к комплексной автоматизации на базе системного подхода.

При автоматизации проектирования сколько-нибудь сложных объектов наиболее перспективной в настоящее время является человеко-машинная система. Такая система организуется на базе мощной ЭВМ, снабженной специальными пультами для двусторонней связи с работающими за этими пультами конструкторами. Пульт состоит из электрифицированной пишущей машинки и экрана со световым пером. На экран из ЭВМ может выводиться графическая или другая наглядная информация о проектируемом объекте. Конструктор может делать на этом же экране различные пометки, которые немедленно считываются машиной и используются для организации ее дальнейшей работы.

Для ЭВМ разрабатывается система программ, позволяю-

шая осуществлять различные преобразования графической информации (повороты, изменение масштаба, преобразование из одной системы проекций в другую и т. п.). В состав математического обеспечения системы входят, кроме того, формальные языки для описания проектируемого объекта на разных уровнях, трансляторы с таких языков, программы, позволяющие осуществлять перевод описаний с одного уровня на другой и выполнять различные преобразования объекта на данных уровнях. Наконец, необходимы программы для подсчета значений различных функционалов, оценивающих качество проектируемого объекта.

Предположим для определенности, что проектируемый объект есть корабль. Проектирование начинается с того, что конструктор вводит в ЭВМ описание внешних обводов корабля, его внутреннюю планировку и расположение тяжелого оборудования. По этим описаниям ЭВМ составляет и запоминает трехмерное изображение проектируемого корабля и выдает по запросу конструктора те или иные чертежи, рисунки для отображения на экране. По требованию конструктора могут включаться программы, подсчитывающие различные характеристики проектируемого корабля, например, вес корпуса, гидродинамическое сопротивление, устойчивость и т. п.

В случае, если эти характеристики не устраивают конструктора, он вносит те или иные изменения в чертеж с помощью светового пера или в описание, заменяя отдельные элементы этого описания, после чего снова подсчитываются значения интересующих его характеристик. Например, при недостаточной устойчивости конструктор может с помощью стрелки, наносимой на экран световым пером, указать направление смещения какой-либо тяжелой установки, а величину этого смещения напечатать на пишущей машинке. В случае, когда это возможно, конструктор может прибегать к помощи различного рода оптимизирующих программ.

Найдя оптимальное решение или по крайней мере существенно улучшив первоначально введенное описание, конструктор переводит его на следующий уровень. Он может приступить, например, к более детальному проектированию двигателя, гребных валов и винтов или же к проектированию системы управления корабля. В случае необходимости он может вернуться к предыдущему уровню описания для апробирования других вариантов изменения.

После того как найдены и согласованы между собой до-

статочны удовлетворительные описания на различных уровнях, ЭВМ на основе этих описаний с помощью специальных графикопостроителей и печатающих устройств автоматически изготавливает необходимую техническую документацию (чертежи, спецификации и т. п.). В ряде случаев удается совершить непосредственный переход к автоматическому изготовлению спроектированных деталей или узлов, в частности, это касается деталей, изготавливаемых на станках с программным управлением. При этом в системе может быть предусмотрено автоматическое приготовление магнитных лент или перфолент для станков с программным управлением.

Примером такого решения может служить система «Авангард». Она предназначена для автоматизации проектирования и изготовления судокорпусных деталей.

За последние годы важное значение приобрели автоматизированные системы испытаний сложных технических объектов и отдельных устройств. Действующие системы такого рода позволяют одновременно измерять и анализировать многие сотни параметров испытуемого объекта. Благодаря этому удается не только резко ускорить проведение испытаний, но и существенно улучшить их качество. Наличие в системе быстродействующей ЭВМ позволяет также прогнозировать поведение испытуемого объекта на некоторое время вперед и избегать аварийных ситуаций.

Все большее распространение получают основанные на использовании ЭВМ системы автоматического управления различными технологическими процессами. В отличие от классических систем автоматического регулирования системы, использующие ЭВМ, позволяют производить полную или частичную оптимизацию управления весьма сложными процессами в трудных и быстро меняющихся условиях. Широкое распространение для управления технологическими процессами получили универсальные управляющие машины («Днепр», УМ-1 и др.).

Эти машины управляют самыми различными процессами: выплавкой стали в бессемеровских конверторах, ректификационными колонками на нефтеперегонных заводах и др. Такие системы дают большой экономический эффект и быстро окупаются.

Одно из главных направлений применения ЭВМ и создания автоматизированных систем управления — это экономика. В настоящее время уже накоплен известный опыт в создании и эксплуатации систем управления крупными промыш-

ленными предприятиями и прежде всего в машино- и приборостроении.

В чем состоит значение таких систем и каков круг решаемых ими задач?

За последние десятилетия в связи с научно-технической революцией резко усложнилась продукция, выпускаемая этими отраслями производства. Для того, чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить электронный микроскоп с обычным оптическим микроскопом или современный радиолокатор с продукцией радиопромышленности 30-х годов.

Изменение характера продукции вызывает естественное увеличение комплекса задач управления производством. Одна из труднейших задач управления — это согласование работы многих производственных линий и участков. Ведь прежде чем деталь попадает в сборочный цех, она должна пройти многие участки: литье или штамповку, обработку на металлорежущих станках, гальванику, покраску и т. п. Если количество деталей в изделии невелико, то планирование их изготовления представляет собой относительно несложную задачу, хотя и в этом случае при ручном планировании не удастся, как правило, обеспечить наиболее рациональное использование имеющегося оборудования.

Когда же количество наименований деталей исчисляется многими тысячами или даже десятками тысяч, а число типов выпускаемых изделий — многими сотнями, то при планировании старыми методами не удается избежать большого числа элементарных ошибок. Скажем, деталь № 217 запланирована для обработки на станке в начале квартала, а операция отливки заготовок этих деталей планируется лишь на конец квартала. Аналогичное положение наблюдается с планированием подготовки инструмента, заказа материалов и т. п. Нужно еще добавить ко всему этому, что технический прогресс приводит к необходимости часто менять выпускаемые изделия или отдельные их детали. Обеспечить в таких условиях точное согласование работы всех участков и единиц оборудования — задача поистине титаническая.

Решение задачи облегчается, если создать промежуточные запасы заготовок деталей на разных стадиях обработки. Однако подобное увеличение незавершенного производства чревато другими неприятными последствиями. Во-первых, оно замораживает большие средства. Во-вторых, создание запасов деталей является как бы своеобразным скрытым тормозом на пути технического прогресса. Действительно, не-

прерывно протекающий процесс совершенствования изделий может сделать тот или иной запас ненужным. И тогда перед руководством предприятия возникает дилемма: или задерживать введение технических усовершенствований, или примириться с потерей средств, уже вложенных в запасы, становящиеся ненужными в новых условиях.

Разумеется, некоторые запасы, которые могли бы компенсировать различные случайные отклонения от идеального плана, являются необходимыми. Однако их размер оказывается, как правило, намного меньшим, чем в том случае, когда эти запасы призваны компенсировать недостатки в планировании.

Автоматизированные системы управления производством позволяют уже сегодня успешно решать вопросы о согласовании работы отдельных производственных участков и рассчитывать необходимые уровни запасов. Правда, точное решение оптимизационных задач в современной теории расписаний является настолько трудоемким, что не может быть получено для большинства реальных задач даже на сверхбыстродействующих ЭВМ. Однако существуют и успешно применяются приближенные методы решения этих задач, обеспечивающие достаточно хорошее приближение к оптимуму. Это позволяет фактически ликвидировать все ошибки, неизбежные при планировании без применения ЭВМ и резко улучшить использование имеющихся ресурсов.

На первых порах развития применения ЭВМ в экономике на машинах решались лишь отдельные, наиболее трудные задачи. Сбор сведений, необходимых для решения каждой такой задачи, осуществлялся отдельно. При ныне установившемся системном подходе ЭВМ должна автоматизировать весь документооборот. Машина получает необходимую первичную информацию в тот момент, когда эта информация рождается, и выдает результаты в виде готовых документов (план производства по цеху, ведомость на получение заработной платы и т. п.).

Сбор первичной информации можно осуществлять различными средствами. Один из наиболее распространенных способов — использование перфокарт. При этом постоянная информация (например, фамилия рабочего и его табельный номер) может быть заранее нанесена на перфокарту без использования ручного труда. Переменная же часть информации наносится на карту на рабочих местах при помощи простейших ручных перфораторов или карандашных отме-

ток с последующей автоматической пробивкой на специальных перфораторах, считывающих эти отметки.

Второй способ — это использование специальных пишущих машинок (флексорайтеров), которые одновременно с изготовлением обычных печатных копий того или иного документа осуществляют копирование этих документов на перфоленту. Вместо пишущей машинки может быть использован телетайп, который не только копирует документы на перфоленту, но и может осуществлять их непосредственный ввод в ЭВМ по линии связи.

Третий способ — использование различных устройств, позволяющих считывать и вводить в ЭВМ информацию непосредственно с документов, заполненных обычным печатным шрифтом или рукописным шрифтом с некоторыми дополнительными требованиями к качеству вписываемых символов. При этом могут применяться специальные магнитные краски или чернила, облегчающие процесс чтения документа.

Четвертый способ — использование различного рода датчиков (например, датчика, отсчитывающего перемещения сборочного конвейера). При обмене документами между различными ЭВМ с успехом используются такие носители, как магнитные ленты или даже линии связи одной машины с другой.

Для обеспечения необходимой достоверности первичной информации используется принцип совмещения в одном действии приготовления очередной порции информации для ЭВМ с изготовлением соответствующего отчетного первичного документа. Кроме того, применяются обычные способы увеличения избыточности информации (например, введение контрольных сумм) и ее логической проверки при вводе в ЭВМ.

Вводимая в машину информация с помощью специализированной программы-диспетчера собирается в специальные блоки, называемые массивами. Для решения задач планирования и управления производством необходимо прежде всего иметь массивы всех ресурсов предприятия (оборудование, рабочая сила, финансы, состояние запасов). Далее формируются различные плановые массивы (календарные планы выпуска изделий, расписания работы всех единиц оборудования, технологические карты, различного рода нормативы и т. п.).

Программа-диспетчер организует вызов в соответствующее упорядочение массивов информации для решения различных задач, входящих в комплекс специального математи-

ческого обеспечения системы. Эта же программа осуществляет прием и проверку входной информации, организует на ее основе массивы изменений и периодически вносит соответствующие изменения в основные информационные массивы.

Задачи по планированию и управлению производством целесообразно решать методом дедукции, от общего к частному. Прежде всего более высокая управляющая инстанция (министерство, главк и т. п.) составляет первый вариант перспективного и текущего планов выпуска продукции. На ближайший период планирования устанавливается точный календарный план поставок выпускаемой предприятием продукции. Затем начинается детализация этого плана внутри предприятия и выработка соответствующего календарного плана материально-технического снабжения. На этом этапе решаются главные задачи согласования работы отдельных производственных участков, оптимизации использования ресурсов и расчеты уровней запасов.

При выявлении несогласованности возможностей предприятия с первым вариантом планов поставок готовой продукции производится (вместе с вышестоящей инстанцией) пересчет этого плана. Наличие автоматизированных систем во всех необходимых инстанциях позволит осуществлять такие пересчеты многократно как в период первоначального составления плана, так и при его последующих корректировках. Таким и только таким методом можно не только учесть наилучшим образом возможности данного предприятия, но и решить задачу согласования работы всех звеньев народного хозяйства в целом.

После того как планы составлены и доведены в виде соответствующих документов до рабочих мест, система осуществляет контроль за выполнением плана, регистрирует возникающие отклонения и вырабатывает проекты решений по ликвидации этих отклонений. Попутно система решает комплекс задач по материальному и финансовому учету, подготовке различных отчетных документов, начислению зарплаты и т. п. Система может также автоматически по требованию руководства выдавать те или иные справки о состоянии управляемых объектов и предприятия в целом, производить экономический анализ с целью выявления дополнительных резервов и источников различного рода потерь.

Большинство из указанных идей реализовано в автоматизированной системе управления на Львовском телевизионном заводе, созданной Институтом кибернетики АН УССР

совместно с заводскими специалистами. Введение в действие п.рвой очереди системы позволило снизить уровень запасов за год на 20% (на сумму около 1,5 млн. руб.). Более чем на 10% ускорилась оборачиваемость оборотных средств (что высвободило более 500 тыс. руб.). Резко возросла ритмичность производства, что позволило увеличить выпуск продукции (при тех же самых ресурсах) дополнительно на 7%. Только дополнительной прибыли, получаемой предприятием (не считая налога с оборота), получено свыше 700 тыс. руб.

Кроме того, был приостановлен рост штата административного персонала. После введения системы удалось даже перевести на производство 33 человека из административного персонала. Только лишь снижение уровня запасов и ускорение оборачиваемости оборотных средств значительно перекрывают расходы на создание системы.

Расчеты показывают, что для Львовского телевизионного завода эффективность вложения средств в автоматизированную систему управления в 3 раза превышает эффективность вложения средств в основное производство.

Значительный экономический эффект достигнут и на других заводах, где внедряются автоматизированные системы управления производством (заводы «Фрезер» в Москве, «Светлана» в Ленинграде, «Им. 15-летия ЛКСМУ» в Донецке и многие другие).

Одна из особенностей автоматизированных систем управления заключается в том, что чем сложнее автоматизируемый объект, тем выше экономический эффект от их внедрения. Поэтому проводимая в настоящее время работа по созданию автоматизированных систем управления целыми отраслями промышленности должна привести к несравненно более существенным результатам. Помимо задач согласования работы отдельных предприятий и управления запасами огромное значение в отраслевых системах приобретает задача приведения в соответствие ресурсов отдельных предприятий со структурой получаемых плановых заданий. Если удастся решить круг таких задач, то это уже может привести к удвоению темпов развития нашей промышленности. Речь идет о небольшой части задач, которые будут решаться отраслевыми системами. Еще больший эффект следует ожидать от решения межотраслевых задач.

Задача создания глобальных автоматизированных систем управления экономикой в национальных масштабах особенно ярко подчеркивает мысль В. И. Ленина о вопиющем несо-

ответствии огромных возможностей техники с капиталистическими производственными отношениями в эпоху научно-технической революции. Действительно, о какой оптимизации в национальных масштабах может идти речь в условиях жесткой конкуренции и различий интересов отдельных фирм и корпораций? Взять хотя бы такое характерное для капитализма понятие, как промышленная тайна. Ведь даже для создания системы оптимального управления в рамках одной фирмы необходимо знать планы конкурентов. Но капиталистические производственные отношения не дают возможности для свободного обмена информацией такого рода. Не потому ли внедрение автоматизированных систем управления на Западе сопровождается созданием новой отрасли «деловой деятельности» — промышленного шпионажа? А новые миллионы безработных, которых рождает процесс автоматизации в США и других капиталистических странах?

В условиях социализма нет социальных препятствий для создания автоматизированных систем управления экономикой в национальных и даже в межнациональных масштабах. Техническую базу такой системы должна составить сеть из нескольких тысяч вычислительных центров, соединенных между собой каналами связи. В низовых центрах системы будет сосредоточена вся экономическая информация об управляемых ими объектах (крупных предприятиях, объединениях мелких предприятий, магазинов, колхозов и т. п.). Отдельные центры при этом выполняют свою собственную работу, а также участвуют в организации обмена информацией и (совместно с другими вычислительными центрами) в решении задач общегосударственного характера. Создание подобных систем поможет выявить в полном объеме огромные преимущества, которые заложены в социалистическом способе ведения хозяйства, и построить техническую базу управления, достойную будущего коммунистического общества.

Дальнейшие успехи кибернетики и электронной вычислительной техники во всех областях человеческой деятельности связаны с созданием специальной отрасли индустрии по хранению, переработке и передаче информации. Современная система связи решает пока только последнюю из перечисленных задач. Ее развитие в будущем органически связано со сращиванием системы связи и системы вычислительных и справочно-информационных центров. Кибернетическими пультами таких систем можно будет снабдить каждое рабочее

место, каждую семью, подобно нынешним телефонам, радио-приемникам, телевизорам.

Конструктор, например, сможет быстро получить любой справочный материал, любую имеющуюся в системе расчетную программу, равно как и воспользоваться соответствующими вычислительными мощностями. С помощью подобных устройств может быть существенно облегчена и ускорена работа всех людей, занимающихся умственным трудом. Совершенные автоматизированные системы управления технологическими процессами окончательно сотрут грани между физическим и умственным трудом.

В отличие от современных средств передачи информации «кибернетические телевизоры» будущего будут воспринимать вопросы индивидуальных потребителей и давать исчерпывающие ответы на эти вопросы. Такого рода устройства помогут совершить настоящую революцию в педагогике. Они дадут возможность организовать индивидуальный процесс обучения одновременно со многими десятками миллионов учащихся. Причем такое обучение может осуществляться как в школе, так и в домашних условиях.

Открывая эру автоматизации не только физического, но и умственного труда, кибернетика и электронная вычислительная техника будут способствовать гармоническому развитию человеческой личности, увеличению власти человека над природой. Но для достижения всех этих светлых целей человечество должно навсегда покончить с эксплуатацией, насилием, войнами и окончательно утвердить на Земле великое общество разума и свободы, о котором мечтал и во имя которого боролся и работал великий вождь трудящихся всего мира В. И. Ленин.

КИБЕРНЕТИКА *

Кибернетика (от древнегреческого слова *κυβερνητική* — искусство кормчего) — наука об управлении, связи и переработке информации. Основным объектом исследования в кибернетике являются так называемые **кибернетические системы**. В общей (или теоретической) кибернетике такие системы рассматриваются абстрактно, безотносительно к их реальной физической природе. Высокий уровень абстракции позволяет кибернетике находить общие методы подхода к

* Энциклопедия кибернетики, 1974.

изучению систем качественно различной природы — технических, биологических и даже социальных.

Абстрактная кибернетическая система представляет собою множество взаимосвязанных объектов, называемых элементами системы, способных воспринимать, запоминать и перерабатывать информацию, а также обмениваться информацией между собой. Примерами кибернетических систем могут служить разного рода автоматические регуляторы в технике (например, автопилот или регулятор, обеспечивающий поддержание постоянной температуры в помещении), электронные вычислительные машины (ЭВМ), человеческий мозг, биологические популяции, человеческое общество.

Элементы абстрактной кибернетической системы представляют собой объекты любой природы, состояние которых может быть полностью охарактеризовано значениями некоторого множества параметров. Для подавляющего большинства конкретных приложений кибернетики оказывается достаточным рассматривать параметры двух родов. Параметры первого рода, называемые *непрерывными*, способны принимать любые вещественные значения на том или ином интервале, например, на интервале от -1 до 2 или от $-\infty$ до $+\infty$. Параметры второго рода, называемые *дискретными*, принимают *конечные* множества значений, например, значение, равное любой десятичной цифре, значения «да» или «нет» и т. п.

С помощью последовательностей дискретных параметров можно представить любое целое или рациональное число. Вместе с тем дискретные параметры могут служить и для оперирования величинами *качественной* природы, которые обычно не выражаются числами. Для этой цели достаточно перечислить и как-то обозначить (например, по пятибалльной системе) все различимые состояния соответствующей величины. Таким образом могут быть охарактеризованы и введены в рассмотрение такие факторы, как темперамент, настроение, отношение одного человека к другому и т. п. Тем самым область приложений кибернетических систем и кибернетики в целом расширяется далеко за пределы строго «математизированных» областей знаний.

Состояние элемента кибернетической системы может меняться либо самопроизвольно, либо под воздействием тех или иных *входных сигналов*, получаемых им либо извне (из-за пределов рассматриваемой системы), либо от других элементов системы. В свою очередь, каждый элемент систе-

мы может формировать выходные сигналы, зависящие в общем случае от состояния элемента и воспринимаемых им в рассматриваемый момент времени входных сигналов. Эти сигналы либо передаются на другие элементы системы (служат для них входными сигналами), либо входят в качестве составной части в передаваемые вовне системы выходные сигналы всей системы в целом.

Организация связей между элементами кибернетической системы носит название **структуры** этой системы. Различают системы с постоянной и с переменной структурой. Изменения структуры задаются в общем случае как функции от состояний всех составляющих систему элементов и от входных сигналов всей системы в целом.

Таким образом, описание законов функционирования системы задается тремя семействами функций: функций, определяющих изменения состояний всех элементов системы, функций, задающих их выходные сигналы, и, наконец, функций, вызывающих изменения в структуре системы. Система называется **детерминированной**, если все эти функции являются обычными (однозначными) функциями. Если же все или хотя бы часть этих функций представляет собою случайные функции, то система носит название **вероятностной** или **стохастической**. Полное описание кибернетической системы получается, если к указанному описанию законов функционирования системы добавляется описание ее начального состояния, т. е. начальной структуры системы и начальных состояний всех ее элементов.

Кибернетические системы различаются по характеру циркулирующих в них сигналов. Если все эти сигналы, равно как и состояния всех элементов системы, задаются непрерывными параметрами, система называется **непрерывной**. В случае дискретности всех этих величин говорят, что мы имеем дело с **дискретной** системой. В **смешанных** или **гибридных** системах приходится иметь дело с обоими типами величин.

Следует подчеркнуть, что разделение кибернетических систем на непрерывные и дискретные является до известной степени условным. Оно определяется глубиной проникновения в предмет, требуемой точностью его изучения, а иногда и удобством использования для целей изучения системы того или иного математического аппарата. Так, например, хорошо известно, что свет имеет дискретную, квантовую природу. Тем не менее такие параметры, как величина светового пото-

ка, уровень освещенности и др., принято обычно характеризовать непрерывными величинами постольку, поскольку обеспечена возможность достаточно плавного их изменения. Другой пример — обычный проволочный реостат. Хотя величина его сопротивления меняется скачкообразно, при достаточной малости этих скачков оказывается возможным и удобным считать изменение сопротивления непрерывным.

Обратные примеры еще более многочисленны. Так, выделительная функция печени на обычном (неквантовом) уровне изучения является непрерывной величиной. Современная медицина, однако, довольствуется пятибальной характеристикой этой функции, рассматривая ее тем самым как дискретную величину. Более того, при любом фактическом вычислении значений непрерывных параметров приходится ограничиваться определенной **точностью** вычислений. А это означает, очевидно, что соответствующая величина рассматривается как дискретная.

Последний пример показывает, что дискретный способ представления величин является **универсальным** способом, ибо, имея в виду недостижимость абсолютной точности измерений, любые непрерывные величины сводятся в конечном счете к дискретным. Обратное сведение для дискретных величин, принимающих небольшое число различных значений, не может привести к удовлетворительным (с точки зрения точности представления) результатам и поэтому на практике не употребляется.

Таким образом, дискретный способ представления величин является в определенном смысле более **общим**, чем непрерывный. Этот факт имел большое значение для истории развития кибернетики.

Разбиение кибернетических систем на непрерывные и дискретные имеет большое значение с точки зрения используемого для их изучения математического аппарата. Для непрерывных систем таким аппаратом является обычно теория систем **обыкновенных дифференциальных уравнений**, а для дискретных систем — **теория алгоритмов и теория автоматов**. Еще одной базовой математической теорией, используемой как в случае дискретных, так и в случае непрерывных систем (и развивающейся соответственно в двух аспектах), является **теория информации**.

Сложность кибернетических систем определяется двумя факторами. Первый фактор — это так называемая **размерность системы**, т. е. общее число параметров, характеризую-

щих состояния всех ее элементов. Второй фактор — сложность структуры системы, определяющаяся общим числом связей между ее элементами и их разнообразием. Простая совокупность большого числа не связанных между собой элементов, равно как и множество однотипных элементов с повторяющимися от элемента к элементу простыми связями, еще не составляют сложной системы. **Сложные (или большие) кибернетические системы** — это системы со сложными описаниями, не сводящимися к описанию одного элемента и указанию общего числа таких (однотипных) элементов.

При изучении сложных кибернетических систем помимо обычного разбиения системы на элементы используется метод укрупненного представления систем в виде совокупности отдельных блоков, каждый из которых является отдельной системой. При изучении систем большой сложности употребляется целая иерархия подобных блочных описаний: на верхнем уровне подобной иерархии вся система рассматривается как один блок, на нижнем уровне в качестве составляющих систему блоков выступают отдельные элементы системы.

Необходимо подчеркнуть, что само понятие элемента системы является до известной степени условным, зависящим от ставящихся при изучении системы целей и от глубины проникновения в предмет. Так, при феноменологическом подходе к изучению мозга, когда предметом изучения является не строение мозга, а выполняемые им функции, мозг может рассматриваться как один элемент, хотя и характеризуемый достаточно большим числом параметров. Обычный подход заключается в том, что в качестве составляющих мозг элементов выступают отдельные нейроны. При переходе на клеточный молекулярный уровень каждый нейрон может, в свою очередь, рассматриваться как сложная кибернетическая система, и т. д. и т. п.

Если обмен сигналами между элементами системы полностью замыкается в ее пределах, то система называется **изолированной** или **замкнутой**. Рассматриваемая как один элемент, такая система не имеет ни входных, ни выходных сигналов. **Открытые системы** в общем случае имеют как **входные**, так и **выходные каналы**, по которым они обмениваются сигналами с **внешней средой**. Предполагается, что всякая открытая кибернетическая система снабжена **рецепторами (датчиками)**, воспринимающими сигналы из внешней среды и передающими их **внутрь системы**. В случае, когда в качестве

рассматриваемой кибернетической системы выступает человек, такими рецепторами являются различные органы чувств (зрение, слух, осязание и др.). **Выходные сигналы** системы передаются во внешнюю среду через посредство **эффекторов** (исполнительных механизмов), в качестве которых в рассматриваемом случае выступают органы речи, мимика, руки и др.

Поскольку каждая система сигналов, независимо от того, формируется ли она разумными существами или объектами и процессами неживой природы, несет в себе ту или иную информацию, то всякая открытая кибернетическая система, равно как и элементы любой системы (открытой или замкнутой), могут рассматриваться как **преобразователи информации**. При этом понятие информации рассматривается в очень общем смысле, близком к физическому понятию энтропии, «и не обязательно связывается с осмысленными сообщениями, как это принято в обычном «житейском» подходе к определению информации».

Рассмотрение различных объектов живой и неживой природы как преобразователей информации или как систем, состоящих из элементарных преобразователей информации, составляет сущность так называемого **кибернетического** подхода к изучению этих объектов. Этот подход (равно как и подход со стороны других фундаментальных наук — механики, химии и т. п.) требует определенного уровня абстракции. Так, при кибернетическом подходе к изучению мозга как системы нейронов обычно отвлекаются от их размеров, формы, химического строения и др. Предметом изучения становятся состояния нейронов (возбужденное или нет), вырабатываемые ими сигналы, связи между нейронами и законы изменения их состояний.

Простейшие преобразователи информации могут осуществлять преобразование информации лишь одного определенного вида. Так, например, исправный дверной звонок при нажатии кнопки (рецептора) отвечает всегда одним и тем же действием — звонком или гудением зуммера. Однако, как правило, сложные кибернетические системы обладают способностью **накапливать** информацию в той или иной форме и в зависимости от этого менять выполняемые ими действия (преобразование информации). По аналогии с человеческим мозгом подобное свойство кибернетических систем называется иногда **памятью**.

«Запоминание» информации в кибернетических системах

может производиться двумя основными способами — либо за счет **изменения состояний элементов системы**, либо за счет **изменения структуры системы** (возможен, разумеется, и смешанный вариант). Между двумя этими видами «памяти», по существу, нет принципиальных различий. В большинстве случаев это различие зависит лишь от принятого подхода к описанию системы. Например, одна из современных теорий объясняет долговременную память человека изменениями проводимости синаптических контактов, т. е. связей между отдельными составляющими мозг нейронами. Если в качестве элементов, составляющих мозг, рассматриваются лишь сами нейроны, то изменение синаптических контактов следует рассматривать как изменение структуры мозга. Если же наряду с нейронами в число составляющих мозга элементов включить и все синаптические контакты (независимо от степени их проводимости), то рассматриваемое явление сводится к изменению состояний элементов при неизменной структуре системы.

Из числа сложных технических преобразователей информации наибольшее значение для кибернетики имеют **электронные вычислительные машины (ЭВМ)**. В более простых вычислительных машинах — **цифровых электромеханических или аналоговых** — перенастройка на различные задачи осуществляется с помощью изменения системы связей между элементами на специальной коммутационной панели. В современных **универсальных ЭВМ** такие изменения производятся с помощью «запоминания» машиной в специальном накапливающем информацию устройстве той или иной **программы** ее работы.

В отличие от аналоговых машин, оперирующих с непрерывной информацией, ЭВМ имеют дело с дискретной информацией. На входе и выходе ЭВМ в качестве такой информации могут выступать любые последовательности десятичных цифр, букв, знаков препинания и других типографских символов. Внутри машины эта информация обычно представляется (или, как принято говорить, кодируется) в виде последовательности сигналов, принимающих лишь два различных значения.

В то время как возможности аналоговых машин (равно как и любых других искусственно созданных устройств) ограничены преобразованиями строго ограниченных типов, современные ЭВМ обладают свойствами **универсальности**. Это означает, что любые преобразования буквенно-цифровой

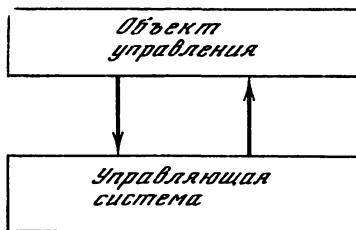
информации, которые могут быть определены произвольной конечной системой правил любой природы (арифметических, грамматических и др.), могут быть выполнены ЭВМ после введения в нее должным образом составленной программы. Эта способность ЭВМ достигается за счет универсальности ее системы команд, т. е. элементарных преобразований информации, которые закладываются в структуру ЭВМ. Подобно тому, как из одних и тех же деталей собираются любые дома, любые, сколь угодно сложные преобразования буквенно-цифровой информации могут складываться из этих элементарных преобразований. Программа ЭВМ как раз и представляет собой последовательность таких элементарных преобразований.

Свойство универсальности ЭВМ не ограничивается одной лишь буквенно-цифровой информацией. Как показывается в теории кодирования, в буквенно-цифровой (и даже просто в цифровой) форме может быть представлена (закодирована) любая дискретная информация, а также с любой заданной степенью точности произвольная непрерывная информация. Таким образом, современные ЭВМ могут рассматриваться как универсальные преобразователи информации. Другим известным примером универсального преобразователя информации (хотя и основанного на совершенно других принципах) является человеческий мозг.

Свойство универсальности современных ЭВМ открывает возможность моделирования с их помощью любых других преобразователей информации, в том числе любых мыслительных процессов. Такая возможность ставит ЭВМ в особое положение: с момента их возникновения они представляют собой основное техническое средство, основной аппарат исследования, которым располагает кибернетика.

В рассмотренных до сих пор случаях изменение поведения ЭВМ определялось человеком, меняющим программу ее работы. Возможно, однако, составить программу изменения программы работы ЭВМ и организовать ее общение с внешней средой через соответствующую систему датчиков и исполнительных механизмов. Таким образом, можно моделировать различные формы изменения поведения и развития, наблюдающиеся в сложных биологических и социальных системах. Изменение поведения сложных кибернетических систем есть результат накопления соответствующим образом обработанной информации, которую эти системы получили в прошлом.

В зависимости от формы, в которой происходит запоминание этой информации, различают два основных типа изменения поведения систем — **самонастройку** и **самоорганизацию**. В самонастраивающихся системах накопление опыта выражается в изменении значений тех или иных параметров, в самоорганизации — в изменении структуры системы. Как уже указывалось выше, это различие является до известной степени условным, зависящим от способа разбиения системы на элементы. На практике обычно самонастройка связывается с изменениями относительно небольшого числа непрерывных параметров. Что же касается глубоких изменений структуры рабочих программ ЭВМ (которые можно трактовать как изменения состояний большого числа дискретных элементов памяти), то их более естественно рассматривать как пример самоорганизации.



Целенаправленное изменение поведения кибернетических систем происходит в результате наличия управления. Цели управления сильно варьируются в зависимости от типа систем и степени их сложности. В простейшем случае такой целью может быть поддержание постоянства значения того или иного параметра. Для более сложных систем в качестве целей возникают задачи приспособления к меняющейся среде и даже познания законов таких изменений.

Наличие управления в кибернетической системе означает, что ее можно представить в качестве двух взаимодействующих блоков — **объекта управления** и **управляющей системы**. Управляющая система по каналам связи через соответствующее множество эффекторов (исполнительных механизмов) передает управляющие воздействия на объект управления. Информация о состоянии объекта управления воспринимается с помощью рецепторов (датчиков) и передается по каналам **обратной связи** в управляющую систему (см. рисунок).

Описанная система с управлением может, как и всякая кибернетическая система, иметь также каналы связи (с соответствующими системами рецепторов и эффекторов) с окружающей средой. В простейших случаях среда может выступать как источник различных помех и искажений в системе (чаще всего в канале обратной связи). В задачу управ-

ляющей системы входит тогда фильтрация помех. Особо важное значение эта задача приобретает при дистанционном (телемеханическом) управлении, когда сигналы передаются по длинным каналам связи.

Основная же задача управляющей системы состоит в таком преобразовании поступающей в систему информации и формировании таких управляющих воздействий, при которых обеспечивается достижение (по возможности наилучшее) целей управления. По виду таких целей и характеру функционирования управляющей системы различают следующие основные типы управления.

Одним из простейших видов управления является так называемое **программное управление**. Цель такого управления состоит в том, чтобы выдать на объект управления ту или иную строго определенную последовательность управляющих воздействий. Обратная связь при таком управлении отсутствует. Наиболее простым примером подобного программного управления является светофор-автомат, переключение которого происходит в заданные заранее моменты времени. Более сложное управление светофором при наличии счетчиков подъезжающих машин может включать простейший «пороговый» сигнал обратной связи: переключение светофора происходит всякий раз, когда количество ждущих автомашин превысит заданную величину.

Весьма простым видом управления является также классическое **авторегулирование**, цель которого состоит в поддержании постоянного значения того или иного параметра (или нескольких независимых параметров). Примером может служить система автоматического регулирования температуры воздуха в помещении: специальный термометр-датчик измеряет температуру воздуха T , управляющая система сравнивает эту температуру с заданной величиной T_0 и формирует управляющее воздействие $-k(T - T_0)$ на задвижку, регулирующую приток теплой воды в батареи центрального отопления. Знак минус при коэффициенте k означает, что регулирование происходит по закону отрицательной обратной связи, а именно: при увеличении температуры T выше установленного порога T_0 приток тепла уменьшается, при ее падении ниже порога приток тепла возрастает.

Отрицательная обратная связь необходима для обеспечения **устойчивости** процесса регулирования. Устойчивость системы означает, что при отклонении от положения равновесия (когда $T = T_0$) как в одну, так и в другую сторону сис-

тема стремится автоматически восстановить это равновесие. При простейшем предположении о линейном характере зависимости между управляющим воздействием и скоростью притока тепла в помещение работа описанного регулятора описывается дифференциальным уравнением $dT/dt = -k(T - T_0)$, решением которого служит функция $T = T_0 + \delta e^{-kt}$, где δ — отклонение температуры T от заданной величины T_0 в начальный момент времени.

Поскольку рассмотренная нами система описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка, она носит название линейной системы первого порядка. Более сложным поведением обладают линейные системы второго и более высоких порядков и особенно нелинейные системы.

Возможны системы, в которых принцип программного управления комбинируется с задачей регулирования в смысле поддержания устойчивого значения той или иной величины. Так, например, в описанный регулятор комнатной температуры может быть встроено программное устройство, меняющее значение регулируемого параметра. Задачей такого устройства может быть, скажем, поддержание температуры $+20^\circ\text{C}$ в дневное время и снижение ее до $+16^\circ\text{C}$ в ночные часы. Функция простого регулирования перерастает здесь в функцию слежения за значением программно изменяемого параметра.

В более сложных следящих системах задача состоит в поддержании (или возможно более точном) некоторой фиксированной функциональной зависимости между множеством самопроизвольно меняющихся параметров и заданным множеством регулируемых параметров. Примером может служить система, непрерывно сопровождающая лучом прожектора произвольным образом маневрирующий самолет.

В так называемых системах оптимального управления основной целью является поддержание максимального (или минимального) значения некоторой функции от двух групп параметров, называемой критерием оптимального управления. Параметры первой группы (внешние условия) меняются независимо от системы, параметры же второй группы являются регулируемыми, т. е. их значения могут меняться под воздействием управляющих сигналов системы.

Простейший пример оптимального управления дает все та же задача регулирования температуры комнатного воздуха при дополнительном условии учета изменений его влажности. Величина температуры воздуха, дающая ощущение наиболь-

шего комфорта, зависит от его влажности. Если влажность все время меняется, а система может управлять лишь изменением температуры, то естественно в качестве цели управления выставить задачу поддержания температуры, которая давала бы ощущение наибольшего комфорта. Это и будет задача оптимального управления. Системы оптимального управления имеют очень большое значение в задачах управления экономикой.

В простейшем случае оптимальное управление может сводиться к задаче поддержания наибольшего (или наименьшего) возможного при заданных условиях значения регулируемого параметра. В этом случае говорят о системах экстремального регулирования.

В случае, когда нерегулируемые параметры в системе оптимального управления на том или ином отрезке времени не меняются, функция системы сводится к поддержанию таких постоянных значений регулируемых параметров, которые обеспечивают максимизацию (или минимизацию) соответствующего критерия оптимального управления.

Здесь, как и в случае обычного регулирования, возникает задача устойчивости управления. При проектировании относительно несложных систем подобная устойчивость достигается за счет соответствующего выбора параметров проектируемой системы. В более сложных случаях, когда количество возмущающих воздействий и размерность системы очень велики, иногда оказывается удобным для достижения устойчивости прибегать к самонастройке и самоорганизации систем. При этом определенная часть параметров, определяющая характер существующих в системе связей, не фиксируется заранее и может изменяться системой в процессе ее функционирования. Система имеет специальный блок, регистрирующий характер переходных процессов в системе при выведении ее из равновесия. При обнаружении неустойчивости переходного процесса система меняет значения параметров связей, пока не добьется устойчивости. Системы такого рода принято называть **ультраустойчивыми**.

При большом числе изменяемых параметров связей случайный поиск устойчивых режимов может занимать слишком много времени. В таком случае применяются те или иные способы ограничения случайного перебора, например, разбиение параметров связей на группы и осуществление перебора лишь внутри одной группы (определяемой по тем или иным признакам). Такого рода системы называются обычно **мульт-**

тиустойчивыми. Большое разнообразие ультраустойчивых и мультиустойчивых систем предоставляется биологией. Примером может служить хотя бы система регулирования температуры крови у человека и других теплокровных животных.

Задача группировки внешних воздействий, необходимая для успешного решения способа самонастройки в мультиустойчивых системах, входит в число задач **узнавания**, или, как теперь принято говорить, задач **распознавания образов**. Для определения вида поведения (способа управления) у человека особую роль играют зрительные и звуковые образы. Возможность их распознавания и объединения в те или иные классы позволяет человеку создавать абстрактные понятия, являющиеся неременным условием сознательного познания действительности и началом абстрактного мышления. Абстрактное мышление позволяет создавать в управляющей системе (в данном случае в человеческом мозге) модели различных процессов, осуществлять с их помощью экстраполяцию действительности и определять свои действия на основе такой экстраполяции.

Таким образом, на высших уровнях иерархии управляющих систем задачи управления оказываются тесно переплетенными с задачами познания окружающей действительности. В чистом виде эти задачи проявляются в абстрактных познающих системах, также являющихся одним из классов кибернетических систем.

Существенное место в кибернетике занимает теория **надежности кибернетических систем**. Ее задачей является разработка методов построения систем, обеспечивающих правильное функционирование систем при выходе из строя части их элементов, разрыве тех или иных связей и других возможных случайных сбоях или неисправностях.

Имея в качестве основного объекта изучения кибернетические системы, кибернетика использует для их изучения три принципиально различных метода. Два из них — математико-аналитический и экспериментальный — широко применяются и в других науках. Сущность первого состоит в описании изучаемого объекта в рамках того или иного математического аппарата (например, в виде системы уравнений) и последующего извлечения различных следствий из этого описания путем математической дедукции (например, путем решения соответствующей системы уравнений). Сущность второго метода состоит в различных экспериментах, проводимых либо с самим объектом, либо с его реальной физиче-

ской моделью. В случае уникальности исследуемого объекта и невозможности существенного влияния на него (как, например, в случае солнечной системы или процесса биологической эволюции) активный эксперимент переходит в пассивное наблюдение.

Одним из важнейших достижений кибернетики является открытие нового метода исследования, получившего название математического эксперимента или математического моделирования. Смысл его состоит в том, что эксперименты производятся не с реальной физической моделью изучаемого объекта, а с его описанием. Описание объекта вместе с программами, реализующими изменения характеристик объекта в соответствии с этим описанием, помещаются в память ЭВМ, после чего становится возможным проводить с ним различные эксперименты: регистрировать поведение объекта в тех или иных условиях, менять те или иные элементы описания и т. п. Огромное быстроедействие современных ЭВМ зачастую дает возможность моделировать многие процессы в более быстром темпе, чем они происходят в действительности.

Первым этапом математического моделирования является разбиение изучаемой системы на отдельные блоки и элементы и установление связей между ними. Эту задачу решает так называемый системный анализ. В зависимости от целей исследования глубина и способ такого разбиения могут варьироваться. В этом смысле системный анализ представляет собою скорее искусство, чем точную науку, ибо при анализе действительно сложных систем приходится априори отбрасывать несущественные (с точки зрения поставленной цели) детали и связи.

После разбиения системы на части и описания их характеристик теми или иными множествами параметров (количественных или качественных) к установлению связей между ними привлекаются обычно представители различных наук. Так, при системном анализе человеческого организма типичные связи имеют следующую форму: «При переходе органа A из состояния k_1 в состояние k_2 и сохранении органа B в состоянии m_1 орган C через N месяцев с вероятностью p перейдет из состояния n_1 в состояние n_2 ». В зависимости от вида органов, к которым относится указанное высказывание, оно может быть сделано эндокринологом, кардиологом, терапевтом и другими специалистами. В результате их совместной работы возникает комплексное описание организма, представляющее искомую математическую модель.

Так называемые системные программисты переводят эту модель в машинное представление, программируя одновременно средства, необходимые для экспериментов с нею. Проведение самих экспериментов и получение различных выводов из них составляет предмет так называемого исследования операций. Впрочем, исследователи операций в случае, когда это оказывается возможным, могут применить дедуктивно-математические построения и даже воспользоваться натурными моделями всей системы или ее отдельных частей. Задача построения натурных моделей, равно как и задача проектирования и изготовления различных искусственных кибернетических систем, составляет задачу специалистов по системотехнике.

Краткие исторические сведения.

Первым, кто применил термин «кибернетика» для управления в общем смысле, был, по-видимому, древнегреческий философ Платон. Однако, реальное становление кибернетики как науки произошло много позже. Оно было предопределено развитием технических средств управления и преобразования информации. Еще в средние века в Европе стали создаваться так называемые андронды — человекоподобные игрушки, представлявшие собой механические программно управляемые устройства. Первые промышленные регуляторы уровня воды в паровом котле и скорости вращения вала паровой машины были изобретены Ползуновым и Уаттом. Во второй половине XIX в. требовалось построение все более и более совершенных автоматических регуляторов. Наряду с механическими блоками в них все больше и больше начинают применяться электромеханические и электронные блоки. Существенную роль в развитии теории и практики автоматического регулирования сыграло изобретение в 1925 г. дифференциальных анализаторов, способных моделировать и решать системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Они положили начало быстрому развитию аналоговой вычислительной техники и ее широкому проникновению в автоматизацию.

Немалое влияние на становление кибернетики оказали успехи нейрофизиологии и особенно классические труды И. П. Павлова по условным рефлексам. Можно отметить также оригинальные работы Я. Грдины по динамике живых организмов.

В 30-х годах XX столетия все большее влияние на становление кибернетики начинает оказывать развитие теории

дискретных преобразователей информации. Два основных источника идей и проблем направляли это развитие. Во-первых, это — задача построения оснований математики. Еще в середине прошлого века Д. Буль заложил основы современной математической логики. В 20-е годы XX в. были заложены основы современной теории алгоритмов. В 1936 г. А. М. Тьюринг описал гипотетический универсальный преобразователь дискретной информации, получивший впоследствии название машины Тьюринга. В 1934 г. К. Гедель показал ограниченность возможностей замкнутых познающих систем. Эти результаты, как и результат А. М. Тьюринга, будучи полученными в рамках чистой математики, оказали и продолжают оказывать огромное влияние на становление основных идей кибернетики.

Вторым источником идей и проблем служила практика создания реальных дискретных преобразователей информации. Простейший механический арифмометр был изобретен Б. Паскалем еще в XVII в. Лишь в XIX в. Ч. Бэббидж предпринял первую попытку создания автоматического цифрового вычислителя — прообраза современных ЭВМ. К началу XX в. были созданы первые образцы электромеханических счетно-аналитических машин, позволяющих автоматизировать простейшие преобразования дискретной информации. Резкое усиление интереса к теории дискретных преобразователей информации в 30-х годах было обусловлено необходимостью создания сложных релейно-контактных устройств прежде всего для нужд автоматических телефонных станций. В 1938 г. К. Шэннон (а в 1941 г. В. И. Шестаков) показал возможность использования для синтеза и анализа релейно-контактных схем аппарата математической логики. Тем самым было положено начало развитию современной теории автоматов.

Решающее значение для становления кибернетики было создание в 40-х годах XX в. электронных вычислительных машин (Дж. фон Нейман и др.). Благодаря ЭВМ возникли принципиально новые возможности для исследования и фактического создания действительно сложных управляющих систем. Оставалось дать название новой науке об управлении и связи, которая объединила бы весь полученный к этому времени материал. Этот шаг был сделан Н. Винером, опубликовавшим в 1948 г. свою знаменитую книгу под названием «Кибернетика».

Н. Винер предложил называть кибернетикой «науку об

управлении и связи в живом и машине». В этой и во второй своей книге («Кибернетика и общество» — 1954 г.) Н. Винер уделил большое внимание общефилософским и социальным аспектам новой науки, трактуя их зачастую произвольно и весьма спорным образом.

В результате дальнейшее развитие кибернетики пошло двумя различными путями. В США и в Западной Европе стало преобладать узкое понимание кибернетики, концентрирующее внимание на спорах и сомнениях, поднятых Винером, на аналогиях между процессами управления в технических средствах и живых организмах. В СССР после первоначального периода отрицания и сомнений, вызванных философскими ошибками Н. Винера и его последователей, утверждалось более естественное и содержательное определение кибернетики, включившее в нее все достижения, накопленные к тому времени в теории преобразования информации и управляющих систем. При этом особое внимание уделялось новым проблемам, возникающим в связи с широким внедрением ЭВМ в теорию управления и теорию преобразования информации.

На Западе подобные вопросы развивались в рамках специальных разделов науки, получивших название «информатика», «вычислительная наука», «системный анализ» и др. Лишь к концу 60-х годов наметилась тенденция расширения понятия кибернетики и включения в нее всех указанных разделов.

Современная кибернетика в широком понимании состоит из большого числа разделов, представляющих собой самостоятельные научные направления. Теоретическое ядро кибернетики составляют такие разделы, как теория информации, теория кодирования, теория алгоритмов и автоматов, общая теория систем, теория оптимальных процессов, методы исследования операций, теория распознавания образов, теория формальных языков. На практике центр тяжести интересов кибернетики сместился в область создания сложных систем управления и различного рода систем для автоматизации умственного труда. В чисто познавательном плане одной из наиболее интересных перспективных задач кибернетики является моделирование мозга и его различных функций.

Основным техническим средством для решения всех указанных задач являются ЭВМ. Поэтому развитие кибернетики как в теоретическом, так и в практическом аспекте тесно связано с прогрессом электронной вычислительной техники.

Требования, которые предъявляет кибернетика к развитию своего математического аппарата, определяются указанными выше основными практическими задачами.

Определенная практическая целенаправленность исследований по развитию математического аппарата как раз и является той гранью, которая отделяет общематематическую и собственно кибернетическую части подобных исследований. Так, например, в той части теории алгоритмов, которая строится для нужд оснований математики, стремятся по возможности уменьшить число типов элементарных операций и сделать их достаточно мелкими. Возникающие таким образом алгоритмические языки удобны как объект исследования, но в то же время ими практически невозможно пользоваться для описания реальных задач преобразования информации. Кибернетический аспект теории алгоритмов имеет дело с алгоритмическими языками, специально ориентированными на те или иные классы подобных практических задач. Имеются языки, ориентированные на задачи вычислительного характера, на формульные преобразования, на обработку графической информации и т. п.

Аналогичное положение имеет место и в других разделах, составляющих общетеоретический фундамент кибернетики, которые представляют собой аппарат для решения практических задач изучения кибернетических систем, их анализа и синтеза, нахождения оптимального управления.

В прикладном плане кибернетику принято делить в соответствии с теми или иными конкретными типами изучаемых ею кибернетических систем. Так, техническая кибернетика имеет в качестве своего основного объекта автоматизированные системы управления технологическими процессами, системы автоматического управления различными машинами и механизмами.

Биологическая кибернетика изучает объекты живой природы от отдельной клетки до целых популяций и биологических сообществ. Ее отличие от других биологических дисциплин состоит в том, что она рассматривает объект изучения в кибернетическом аспекте как кибернетическую систему и концентрирует свое внимание на происходящих в таких системах различного рода процессах преобразования информации и управления. В отдельный раздел науки выделилась медицинская кибернетика, изучающая человеческий организм в патологии и использующая ЭВМ и другие технические средства для автоматизации различных информационных

процессов в медицине (автоматическая диагностика, автоматизация анамнеза и др.).

Экопомическая кибернетика изучает экономические системы, занимается вопросами автоматизации управления отдельными элементами экономики и всей экономикой в целом. Впрочем, задачи реального создания сложных управляющих систем (в первую очередь в экономике), а также основанных на использовании ЭВМ сложных справочно-информационных систем, систем автоматизации проектирования, систем для автоматического сбора и обработки экспериментальных данных и др. относятся обычно к разделу науки, получившему название системотехники. При широком толковании предмета кибернетики значительная часть системотехники органически входит в нее. То же самое положение имеет место в электронной вычислительной технике. Разумеется, кибернетика не занимается расчетами элементов ЭВМ, конструктивным оформлением машин, технологическими проблемами и т. п. Вместе с тем подход к ЭВМ как к системе, общеструктурные вопросы, организация сложных процессов переработки информации и управление этими процессами относятся, по существу, к прикладной кибернетике и составляют один из ее важных разделов.

РОЛЬ МАТЕМАТИКИ В СОВРЕМЕННОЙ НАУКЕ*

Утверждение, что математика в современном мире играет огромную роль, превратилось в достаточно банальную истину. Общеизвестно, что многие отрасли науки и техники своими успехами в значительной степени обязаны широкому использованию математических методов. Прежде всего это относится к так называемым точным наукам — механике твердого тела, теоретической физике, квантовой химии и др. Мы являемся свидетелями проникновения математики и в такие разделы науки, где до недавнего времени господствовали в основном качественные методы исследования. На наших глазах возникли и бурно развиваются математическая экономика, математическая биология, математическая лингвистика и многие другие математизированные и математизируемые области знания.

* Лестн. АН СССР, 1974, № 9, с. 3—10.

Что же делает математику столь универсальным и мощным инструментом исследования? Одно из самых глубоких и точных высказываний, определяющих ее место в системе наук, принадлежит знаменитому физiku Нильсу Бору: «Математика — это больше, чем наука, — это язык». На первый взгляд может показаться, что в этом определении нет ничего особенного. В конце концов каждая наука создает свой собственный язык в виде специальной терминологии, сокращенных символических обозначений и т. п. Достаточно сослаться на специфическое терминологическое богатство языков современной медицины, геологии, биологической систематики, вспомнить о символических химических формул, языке чертежей и схем в машиностроении и электротехнике.

Однако язык математики имеет одну отличительную, ставящую его в особое положение черту: над ним усилиями многих поколений математиков воздвигнуто огромное стройное здание дедуктивных построений. Потому всякий раз, когда та или иная задача в любой области науки может быть сформулирована на данном языке, к услугам исследователя оказывается и определенная часть здания в виде соответствующего математического аппарата. Благодаря этому, как правило, удается сэкономить массу абстрактной мыслительной работы (дедуктивных построений), затрачиваемой на получение нужных выводов. Например, сформулировав задачу на языке дифференциальных уравнений, специалист любой отрасли знания получает в руки готовый аппарат для численного решения задачи, изучения качественных особенностей этого решения и т. п.

Таким образом, высказывание Бора можно дополнить: «Математика — это больше, чем язык, это язык с воздвигнутым над ним зданием дедуктивных построений. Возможности и перспективы применения математики в других науках оказываются тем самым тесно связанными с двумя внутриматематическими проблемами — дальнейшим развитием ее языка и непрерывным наращиванием и совершенствованием всыщающегося над ним здания. Работа в обоих направлениях стимулируется как задачами, возникающими в рамках самой математики, так и прикладными, поставляемыми другими науками. В различные периоды развития математики относительное значение этих двух групп стимулов (внутреннего и внешнего) менялось, однако во все времена существовало их органическое единство, обеспечивающее единство

чистой и прикладной математики. Успехи чистой математики, расширяя и укрепляя здание дедуктивных построений, способствуют в конце концов укреплению мощи математики как аппарата прикладных исследований. В свою очередь, успехи прикладной математики, расширяя язык математики и круг решаемых ею задач, предопределяют создание новых областей математических исследований и достижений чистой математики. Сегодня зачастую невозможно определить, где кончается прикладная математика и начинается чистая, и наоборот.

Одним из важных внутренних стимулов, обуславливающих развитие математики в наши дни, продолжает оставаться доставшийся нам от предыдущих поколений ученых ряд трудных проблем. Решение многих из них было найдено в последние годы, но наряду с тем возникли и возникают новые проблемы. Решение каждой трудной математической проблемы представляет интерес и само по себе, но значение такого события многократно возрастает, если при этом (как чаще всего и бывает) создается новый математический аппарат, имеющий широкую область применений. История развития математики в Академии наук СССР может дать тому немало примеров. Достаточно указать на метод тригонометрических сумм, предложенный академиком И. М. Виноградовым для решения известных проблем Варинга и Гольдбаха в аддитивной теории чисел, или на созданный академиком Л. С. Понтрягиным новый мощный аппарат (теория характеров с принципом двойственности) для изучения коммутативных локально компактных групп (стимулом для создания этого аппарата послужили исследования по так называемой пятой проблеме Гильберта).

Есть также много примеров, когда обобщающие результаты и новые постановки задач в рамках старых разделов математики приводили к возникновению в ней новых разделов. Так, локальная теорема академика А. И. Мальцева привела к общей теории моделей (А. И. Мальцев, А. Тарский и др.). Работа академика С. Л. Соболева, в которой при решении задачи Коши для линейных дифференциальных уравнений гиперболического типа были впервые введены обобщенные функции, послужила отправной точкой для развития современной теории обобщенных функций — мощного аппарата исследований как в чистой, так и в прикладной математике (Л. Шварц и др.).

Новые теории, вытекающие из внутриматематических

нужд, служат, как мы уже говорили, прежде всего для укрепления и расширения здания самой математики, но нередко случаи, когда математический аппарат, первоначально предназначенный для достаточно абстрактных, далеких от практики целей, впоследствии приобретал важное прикладное значение. Так, теория групп, созданная в прошлом столетии для изучения вопроса о разрешимости алгебраических уравнений в радикалах, в наши дни стала играть важную роль в теоретической физике и кристаллографии. Математическая логика, служившая вначале для подведения прочного фундамента под математические построения и выводы, стала мощным практическим инструментом при проектировании электронных вычислительных машин и средств дискретной автоматики.

Другой внутриматематический источник совершенствования здания математики — развитие языка, на котором формулируются математические понятия и результаты, приводящие к перестройке тех или иных ее разделов с позиций как большей общности и строгости, так и ясности и простоты изложения. В течение последнего столетия здание математики подвергалось серьезной перестройке по меньшей мере три раза. Прежде всего это была перестройка математического анализа на теоретико-множественной основе. Затем основания математики были пересмотрены с формально-аксиоматических позиций (с привлечением конструктивных методов). Третья перестройка, завершающаяся в наши дни, связана с общим процессом алгебраизации математики и подведением под многие ее разделы единообразного алгебро-топологического фундамента (в результате появилось много-томное издание «Элементы математики», подготовленное коллективом французских математиков под псевдонимом Н. Бурбаки).

Всякая разумная перестройка и совершенствование языка математики приводит к новому росту ее возможностей как инструмента исследования. Повышается степень обоснованности применений этого инструмента, расширяются их границы. С новым языком приходит, как правило, и новая интуиция, а также новое понимание очевидности и ценности результатов. О том, в какой степени создание нового языка увеличивает прикладную мощь математического аппарата, можно судить по той большой роли, которую сыграл язык векторного и тензорного анализа в становлении и развитии теории относительности и современной теории гравитации.

Немалое значение для понимания проблем, выдвигаемых астрофизикой и космогонией, имеют и будут иметь современные алгебро-топологические методы изучения свойств многообразий в целом.

По-прежнему важнейшим стимулом развития математики остаются прикладные задачи, возникающие в рамках других наук. Со времен Л. Эйлера ученые нашей Академии не только решали прикладные задачи, но и создавали на их основе новые разделы математики, оттачивали необходимый для этого математический аппарат. Имена академиков П. Л. Чебышева, А. М. Ляпунова, В. А. Стеклова и др. сияют как звезды первой величины далеко за пределами собственно математики. Эта традиция сохранена и умножена математиками Академии наук СССР. Так, решая задачи гидродинамики, академик М. А. Лаврентьев создал новое направление в теории приближенных конформных отображений на основе использования вариационных методов. Работы академика М. В. Келдыша по гидродинамике, аэродинамике и автоматическому регулированию органически связаны с полученными им фундаментальными математическими результатами в теории функций комплексного переменного, теории приближений в комплексной области, теории несамосопряженных операторов и пр.

С помощью предложенных им новых математических методов М. А. Лаврентьев добился практически важных результатов в области теории волн и струй, разработал гидродинамическую теорию кумуляции, нашел неожиданные возможности применения теории аналитических функций для изучения явлений детонации и направленного взрыва. Им и М. В. Келдышем построена теория движения крыла под поверхностью жидкости. М. В. Келдыш создал теорию подъемной силы крыла самолета с учетом сжимаемости воздуха, теорию флаттера крыла и теорию автоколебаний колес самолета.

Работы академика Н. И. Мусхелишвили по применению теории функций комплексного переменного в теории упругости естественным образом перешли в русло нового раздела математики — теории сингулярных интегральных уравнений, в разработку которой им внесен определяющий вклад.

Академик А. Н. Колмогоров, отправляясь от практических задач теории диффузии, пришел к общему понятию марковских процессов и создал аналитический аппарат для их изучения. Выросшая из этих работ общая теория случайных

процессов стала мощным исследовательским инструментом в современной теории управления и связи, в радиоэлектронике и других областях науки и техники. Важнейший вклад сделан А. Н. Колмогоровым в теорию турбулентности.

Исследования академика Л. В. Канторовича по оптимизации использования ресурсов в области экономики привели его к общим постановкам задач линейного программирования. Теория линейного программирования, развитая им и Дж. ван Данцигом, нашла применение далеко за пределами экономической науки. Из практических задач теории управления родился принцип максимума Л. С. Понтрягина. Наряду с теорией динамического программирования, предложенной Р. Беллманом, результаты Л. С. Понтрягина служат основой для решения многочисленных задач в математической экономике, теории оптимальных процессов и т. п.

Много примеров создания новых математических методов и теорий для решения прикладных задач связано с именем академика Н. Н. Боголюбова. Назовем, в частности, асимптотические методы исследования нелинейных дифференциальных уравнений, нашедшие важные практические приложения в разных областях (например, для расчета ускорителей элементарных частиц). Его результаты по аналитическим продолжениям обобщенных функций сыграли важную роль в развитии теории сильных взаимодействий квантовой теории поля. Н. Н. Боголюбову принадлежит математическое осмысление техники перенормировки в квантовой электродинамике. Им построена микроскопическая теория сверхтекучести, создан новый метод изучения явления сверхпроводимости.

Немало сделано для развития математических методов и их применений учеными, основные работы которых относятся к областям науки, тесно связанным с математикой (механика, геофизика и др.). Так, академиком А. А. Дородницыным предложен метод интегральных соотношений, выполнены работы по приближенным методам исследования гиперзвуковых течений. Интересные результаты получены академиком Н. Н. Красовским по линейным уравнениям с запаздывающим аргументом, по теории устойчивости «в целом» и т. д.

Сочетание глубоких теоретических исследований с важными практическими приложениями их результатов характерно для деятельности большинства членов Отделения математики Академии наук СССР. Помимо названных нами имен,

в этом ряду могут быть с полным правом упомянуты академики И. Н. Векуа, В. С. Владимиров, Ю. В. Прохоров, А. Н. Тихонов, члены-корреспонденты АН СССР А. В. Битцадзе, И. М. Гельфанд, М. М. Лаврентьев, А. А. Самарский, С. В. Яблонский и др.

При решении прикладных задач в последнее время возник целый ряд новых областей математики: теория массового обслуживания, теория игр, теория автоматов, прикладная теория алгоритмов и др.

Принципиально новая страница в истории математики и ее приложений к другим наукам открылась в связи с изобретением ЭВМ. Здесь человек впервые встретился с устройствами, потенциальные возможности которых в области дедуктивных построений значительно превосходят его собственные. Это обстоятельство будет иметь решающее значение для дальнейшего развития математики и комплекса дедуктивных наук вообще, а не для одних лишь «вычислительных» их разделов, как это обычно принято считать.

Следует сразу оговориться, что сегодня подобная узкая точка зрения в какой-то мере оправдана. Ибо, хотя современные ЭВМ могут в принципе выполнять любые дедуктивные построения, их нынешняя архитектура и состав математического обеспечения ориентированы в основном на сравнительно небольшой класс дедуктивных построений типа обычных процедур вычислительного характера, хотя и более общих, чем обычные вычисления. Чтобы полнее охарактеризовать класс задач, которые можно с успехом решать на имеющихся ЭВМ, приведем один характерный пример.

Предположим, что нам нужно изучить поведение системы с множеством качественных параметров, т. е. параметров, каждый из которых может принимать определенное конечное число различных значений — «хорошо», «удовлетворительно», «плохо» или 1, 2, 3, 4 и т. д. К таким системам принадлежит организм человека или животного, человеческое общество и т. п. В целях определенности будем считать, что мы имеем дело с человеческим организмом. Параметры, о которых идет речь, касаются состояния различных органов, их отдельных частей, систем регулирования, индивидуальных свойств характера, а также различного рода внешних воздействий (режим работы и отдыха, питание, физические упражнения, прием лекарств и лечебных процедур и т. п.).

Далее, предположим, что учеными различных специальностей найдены логико-временные зависимости между пара-

метрами. Обычная форма представления таких зависимостей — это совокупность утверждений типа: «Если в какой-то момент времени параметры $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{je}$ имели значения $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ik}, b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{je}$, то через промежуток времени t параметр x_i перейдет с вероятностью p в состояние a_i . Имея все возможные зависимости подобного рода для каждого из внутренних параметров x_1, x_2, \dots, x_n , характеризующих систему, зная их начальные значения, а также то, как изменяются во времени все параметры y_1, y_2, \dots, y_m , характеризующие внешние воздействия на систему, в принципе оказывается возможным шаг за шагом установить законы распределения вероятностей значений всех внутренних параметров для моментов времени $t, 2t, 3t$ и т. д.

Таким образом, в принципе решается задача прогноза состояния организма (с учетом индивидуальных свойств человека) при различных вариантах внешних воздействий. Следует, однако, принять во внимание одно немаловажное обстоятельство. Дело в том, что для сколько-нибудь реальной постановки указанная задача должна иметь многие тысячи параметров и многие десятки (и даже сотни) тысяч элементарных логико-временных соотношений. Поэтому человеку, не использующему никакие технические средства, кроме арифмометра, карандаша и бумаги, может не хватить всей его жизни для просчета даже одного варианта такого прогноза.

Современные ЭВМ, ускоряя процесс вычислений (и другие операции, необходимые для решения приведенной нами задачи) в десятки миллионов раз, превращают годы в секунды (в году насчитывается немногим более 30 млн. сек). Таким образом, описанная схема решения задачи, совершенно бесполезная в домашнюю эпоху, при использовании ЭВМ становится действенным средством дедукции. Поскольку в указанную схему укладывается большое число различных задач из сферы биологических и социальных наук, становится ясным, почему применение ЭВМ приводит к возможности математизации этих наук.

Язык классической вычислительной математики — это прежде всего язык формул алгебры и анализа, причем формул, достаточно простых для ручного счета. Язык современной вычислительной математики — это язык алгоритмов и программ, включающий старый язык формул в качестве частного случая. При этом ограничения в сложности, уже сегодня

неизмеримо меньшие по сравнению с классической математикой, благодаря быстрому прогрессу электронной вычислительной техники становятся с каждым днем все слабее и слабее.

Классическая вычислительная математика была нацелена на изучение относительно простых систем. Ее язык ориентировался на описание непрерывных параметров и специальных зависимостей, характерных прежде всего для механики и физики. Современная вычислительная математика дает возможность эффективного изучения сложных (многопараметрических) систем. Ее язык универсален в том смысле, что он пригоден для описания параметров и зависимостей любого характера. Тем самым создается основа для исследования дедуктивными методами объектов и явлений в науках, не принадлежащих к числу точных. Да и в самих точных науках многие задачи удавалось доводить до числа только при таком огрублении их условий, что решение годилось разве лишь для качественной ориентировки. Для более точного решения нужно было прибегать к дорогостоящим экспериментам на реальных объектах или их физических (натурных) моделях. Благодаря появлению и развитию ЭВМ круг задач, решаемых расчетными способами и при помощи математического моделирования, непрерывно расширяется, отвоевывая у классических экспериментальных и наблюдательных методов все новые и новые области.

Сам эксперимент сегодня также радикальным образом меняет свое лицо. Сложные экспериментальные установки снабжаются встроенными в них ЭВМ, которые автоматически считывают и обрабатывают получаемые данные, осуществляют управление экспериментом. Более простые установки и приборы обслуживаются коллективно одной ЭВМ, общей для целой лаборатории или даже группы лабораторий. Постепенно пробивает себе дорогу точка зрения, что качество экспериментальной установки должно оцениваться не по физическим параметрам, а по количеству и качеству получаемой от нее информации.

Развитие ЭВМ приводит к тому, что естествоиспытатели-теоретики начинают пересматривать свой традиционный девиз «мир устроен просто», сослуживший науке огромную службу в домашинную эпоху. Ведь, по существу, они не имели в то время альтернативы, а испытанный девиз нацеливал их внимание на те области, где он действительно оправдывался. Разумеется, и сейчас его рано сдавать в ар-

хив. Однако в наше время его целесообразно дополнить: «в некоторых своих частях мир все же устроен сложно». Ведь только под этим новым девизом могут широко развиваться дедуктивные методы исследования сложных биологических и социальных систем.

Да и современные технические системы, применяемые в управлении экономикой, космическими полетами, сложными технологическими процессами, вряд ли можно эффективно изучать и тем более проектировать под старым девизом. Создание таких систем и самих вычислительных машин сегодня возможно лишь при условии автоматизации процессов проектирования с помощью ЭВМ в диалоговом (человек—машина) режиме. Развиваются специальные машинные языки для моделирования на ЭВМ сложных технических систем (в первую очередь систем управления).

Успехи вычислительной математики бесспорны. Однако все еще имеет место существенное различие между аналитическим (формальным) и численным (в виде машинной программы) решением задачи. Помимо большей сжатости и наглядности формульного языка по сравнению с языком произвольных алгоритмов и программ, между ними есть еще два, гораздо более существенных различия. Во-первых, когда решение представлено в виде формулы, можно дедуктивным путем выводить его некоторые общие (например, асимптотические) свойства. Во-вторых, формулы можно преобразовывать из одного вида в другой, в зависимости от предъявляемых к ним требований.

Нетрудно понять, что указанные преимущества формульного языка вызваны причинами чисто исторического характера и рано или поздно исчезнут в результате развития теории языков программирования. Прежде всего есть возможность введения систем макрооператоров и кратких обозначений для них, которые были бы ориентированы на определенные классы применений (подобно тому, как формульные мак-

рооператоры $\sin x$, $\int_a^b f(x) dx$ и др. ориентированы на приме-

нение в традиционных точных науках, например, механике и физике). В результате частого употребления они сделаются в конце концов столь же привычными и наглядными, как и классические макрооператоры алгебры и анализа. Исследование свойств этих макрооператоров и правил их композиции позволит (как и в случае формул) изучить по записи ал-

горитма общие свойства представляемых им решений. Наконец, уже сегодня заложены основы алгебры алгоритмов и программ, с помощью которой можно осуществлять их формальные эквивалентные преобразования, подобно тому, как это делается применительно к формулам.

Иными словами, над языком алгоритмов и программ должно быть возведено здание дедуктивных построений, аналогичное тому, которое было сооружено над обычным формульным языком трудами многих поколений математиков. Когда первое здание догонит в своем росте второе и поглотит его, принципиальная качественная разница между аналитическими и численными решениями исчезнет.

Что же касается количественного различия, определяемого степенью сложности изучаемых объектов и описывающих их программ, то и здесь намечается вполне естественный выход. Разумеется, далеко не одно и то же определить асимптотическое поведение решения, представляемого простой или сложной формулой. Количество нужных дедуктивных построений во втором случае будет, естественно, больше. Не следует забывать, однако, что ЭВМ — это потенциальный дедуктор, гораздо более мощный, чем человеческий мозг. При условии автоматизации соответствующих дедуктивных построений качественное исследование решений, представляемых сложными программами, может оказаться не более трудной задачей, чем аналогичная задача для простых формул сегодня.

Вообще, поскольку дедуктивные построения над языком математики будущего по необходимости должны быть гораздо сложнее, успешное развитие математики и ее приложений в других науках станет невозможным (или по крайней мере будет сильно затруднено) без автоматизации этих построений. Сейчас есть достаточно интересные примеры подобной автоматизации, выполненной на базе универсальных доказывающих процедур в рамках обычной математической логики. К сожалению, построенные на этой основе программы обладают одним существенным недостатком: хорошо служа доказательству теорем в самой математической логике, они оказываются довольно беспомощными за ее пределами. Причину подобного явления понять нетрудно. Дело в том, что математическая логика развивалась до сих пор как аппарат для обоснования математики, а не как практическое орудие формализации математических рассуждений. Применяемые в ней строительные блоки мелки, а их ассортимент слишком

ограничен, чтобы можно было с их помощью достаточно легко и просто описывать построения, применяемые в содержательных разделах математики. Для такого описания в настоящее время разработан язык практической математической логики. Формулировки определений и теорем, равно как и доказательства, в этом языке достаточно близки к тем, которые используют математики в своих исследованиях. Правила вывода в этой логике объединяются в алгоритм (так называемый алгоритм очевидности), доказывающая сила которого соответствует примерно уровню, который вкладывается в понятие очевидности в математических монографиях.

Дальнейшее развитие алгоритма очевидности и разработка специального языка «подсказок» приведет к эффективно совместной работе математика с ЭВМ по доказательству новых теорем. По мере совершенствования этой системы ученым станут доступными все более и более сложные дедуктивные построения. Тем самым будут неограниченно расширяться возможности применения математических методов исследования в других науках.

ИНДУСТРИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ *

Новый огромный скачок, который предстоит совершить нашей стране в десятой пятилетке, требует дальнейшего ускорения темпов научно-технического прогресса как решающего условия повышения эффективности общественного производства и улучшения качества продукции. Последовательно решать задачу органического соединения достижений научно-технической революции с преимуществами социалистической системы хозяйства — такова директивная установка Коммунистической партии.

Одним из главных инструментов современного научно-технического прогресса служит электронная вычислительная техника. Решениями XXV съезда КПСС в текущем пятилетии предусмотрено увеличить выпуск средств вычислительной техники в 1,8 раза. Поставлены большие задачи по дальнейшему применению электронно-вычислительных машин (ЭВМ) в научных исследованиях, на производстве, в экономике. Од-

* Коммунист, 1977, № 12.

на из первоочередных задач, которая ставится перед наукой, — развитие работ, направленных на широкое и эффективное использование ЭВМ, насыщение наших научных учреждений современной вычислительной техникой, внедрение автоматизированных систем различных классов.

Наша страна имеет значительный опыт решения сложных научных, проектно-конструкторских, планово-экономических и других задач на ЭВМ. Однако этот опыт накоплен в основном на ЭВМ второго поколения (БЭСМ-6, М-220, «Минск»-32 и др.), а его уже недостаточно, поскольку, как известно, в минувшей пятилетке наша промышленность перешла на выпуск единой системы электронно-вычислительных машин третьего поколения, машинный язык которой (т. е. система выполняемых ею элементарных операций) существенно отличается от языка всех предшествующих машин. Важно и то, что переход к единой системе ЭВМ коренным образом меняет условия использования вычислительной техники, включая технику программирования, обработку данных, организацию вычислительного процесса, характер взаимодействия потребителя с ЭВМ и т. д. Все это обусловлено тем, что электронно-вычислительная техника из «полуэкзотических» научных инструментов для решения особо сложных задач перешла в разряд средств, обслуживающих массовых (притом весьма разнообразных) потребителей в режиме поточного производства.

Мировой опыт показывает, что переход этот явился мощным фактором нового роста темпов научно-технического прогресса. Он не ограничивается лишь рамками научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, а охватывает ныне автоматизацию промышленного производства, управление экономикой и другие сферы общественной практики. Научно-техническая революция обусловила необходимость создания новой отрасли индустрии — переработки информации.

Начало формированию ее в нашей стране было положено в предыдущих пятилетках (главным образом в девятой). Это сложный процесс, сопряженный с большими трудностями.

Назовем основные из них.

Продолжает остро ощущаться недостаток электронно-вычислительных машин ряда важных классов, прежде всего ЭВМ большой мощности, а также дешевых малогабаритных мини- и микро-ЭВМ. Недопустимо задержалось решение вопросов унификации последних и четкой специализации

министерств (радиопромышленности, приборостроения, средств автоматизации и систем управления, электронной промышленности и др.) в деле разработки и производства мини- и микро-ЭВМ различных классов. Отсюда — неоправданное удорожание всего цикла ЭВМ (разработка — производство — эксплуатация). Медленно решаются вопросы соединения электронно-вычислительных машин различных классов в системы (комплексы) для совместной работы для достижения таких возможностей, которыми эти машины порознь не обладают. Особенно это касается комплексирования больших универсальных систем ЭВМ со специализированными мини- и микро-ЭВМ. В большинстве случаев подобные комплексы создаются самими потребителями, что распыляет усилия, приводит к значительному удорожанию разработок и затягиванию их сроков.

Как и всякое поточное производство, современный вычислительный центр представляет собой сложную систему, состоящую из множества различных узлов (от центральных устройств, реализующих собственно процесс переработки информации и электронной памяти, до автоматических устройств для резки бумаги, специальных стеллажей для хранения магнитных лент, дисков, перфолент, перфокарт, тележек для их перевозки и т. д.). Как и на всяком производстве, количество этих устройств и их пропускные способности должны быть строго сбалансированы. Одно узкое место, один плохо автоматизированный или механизированный участок могут резко снизить эффективность работы всей системы. Между тем до сих пор министерства — производители вычислительной техники нередко поставляют электронно-вычислительные машины в такой комплектации, которая не позволяет достаточно эффективно использовать их возможности.

Дефицитно общесистемное периферийное оборудование (необходимое для вычислительных центров всех классов). Неважно обстоит дело и с производством специального периферийного оборудования вычислительных центров, предназначенных для комплексной автоматизации управления производством, сбора и обработки массовых экспериментальных данных для автоматизации проектно-конструкторских работ и т. д. В то же время создавать сегодня вычислительные центры, не оснащая их полным комплексом современного периферийного оборудования, все равно, что строить заводы, скажем, без необходимой подъемно-транспортной техники. Можно себе представить, сколько потребовалось бы рабочих

и какова была бы эффективность, например, прокатного производства, если бы заготовки к современному прокатному стану подавались вручную.

Для индустрии переработки информации положение усугубляется тем, что управление ею намного сложнее управления любой известной сферой материального производства. Дело здесь не только в сложности самих процессов информационного производства, но и в огромной скорости, с какой они протекают и изменяются. Поэтому все оборудование вычислительных центров останется мертвой грудой металла до тех пор, пока не будет разработана и приведена в действие сложная система программ (так называемая операционная система), которая управляет всеми процессами, реализуемыми на этом оборудовании, организует поиск данных и обмен данными между устройствами, диалог системы с человеком и т. д.

Операционная система относится к так называемому внутреннему математическому обеспечению ЭВМ или комплексов ЭВМ. К нему сегодня принято относить также системы автоматизации программирования. Смысл этих систем заключается в том, чтобы конкретные программы обработки данных могли быть представлены в форме, удобной для тех, кто обращается к машине, а затем автоматически преобразованы в форму, понятную для ЭВМ, но крайне неудобную для человека. Без таких конкретных программ и исходных данных к ним вычислительный центр уподобляется заводу, на котором смонтировано все оборудование и налажено управление, но которому не задано самое главное: какую продукцию и в какое время он должен выпускать (нет ни рабочих чертежей изготавливаемых изделий, ни календарного плана их производства), а также не указано сроков, когда и какое материально-техническое снабжение (при наличии вычислительных центров — исходные данные) он должен получать.

Степень автоматизации программирования (а следовательно, и простота составления программ для тех, кто пользуется ЭВМ) зависит от уровня специализации вычислительного центра. Ясно, что если здесь решается строго ограниченный круг задач, то их программы должны быть написаны заранее — раз и навсегда — и введены в память ЭВМ (сформировав так называемую «библиотеку программ»). В этом случае достаточно указать наименование требуемой программы и ввести в машину необходимые данные.

Нередко (например, в автоматизированных системах уп-

правления) удается частично или полностью автоматизировать и процесс подготовки исходных данных. Поступая в систему от различного рода источников (автоматических датчиков, других вычислительных центров или, наконец, от людей), данные автоматически формируются в так называемый банк данных. В таком банке вводится система условных обозначений (имен) для групп данных, необходимых для решений тех или иных задач. Для решения задач в специализированном вычислительном центре с банком данных достаточно сообщить операционной системе имя рабочей программы (или последовательности таких программ), имена необходимых групп данных из банка (а также, возможно, некоторые дополнительные данные) и указать желательную форму выдачи результатов.

Процесс программирования для тех, кто непосредственно пользуется ЭВМ, здесь почти полностью упразднен, разумеется, благодаря огромной предварительной работе программистов. Выгодность такого подхода очевидна: программы, созданные один раз высококвалифицированными программистами (и потому, как правило, высококачественные и эффективные), могут многократно эксплуатироваться работниками, практически не имеющими никакой специальной подготовки. В ряде случаев, например, при автоматизации многих технологических процессов удается полностью исключить вмешательство человека в работу системы: исходные данные, поступаая в систему, сами включают программы для своей обработки.

Другой крайний случай — вычислительный центр общего пользования с широким (заранее не прогнозируемым) спектром решаемых задач. Однако даже здесь оказывается возможным создать и эффективно использовать библиотеку программ, которые часто применяются либо сами по себе, либо в качестве модулей в более сложных программах. Такие программы объединяются в соответствии с их целевой направленностью в так называемые пакеты. Фактически это предварительные программные заготовки, которые системой автоматизации программирования могут быть превращены в рабочие (машинные) программы. Библиотека программ в процессе работы ее вычислительного центра сможет непрерывно пополняться новыми пакетами, которые немедленно будут становиться достоянием всех аналогичных вычислительных центров. Тем самым мощность системы автоматизации программирования будет неуклонно нарастать, последо-

вательно упрощая программирование для потребителей и способствуя тем самым как росту их числа, так и расширению круга решаемых задач.

Использование предварительных программных заготовок, поставка вместе с ЭВМ и централизация процесса последующего программирования и обмена программами — все это своеобразная форма унификации и стандартизации в среде информационной индустрии. Эта задача неразрывно связана с унификацией и стандартизацией форм представления данных не только на входе и выходе, но и внутри ЭВМ. Поэтому, например, пакет программ, созданный применительно к одним формам планово-учетных документов, может оказаться бесполезным при других формах документов. Кроме того, формы документов, рассчитанные на людей, оказываются часто плохо приспособленными для ЭВМ, неоправданно усложняящими работу с ними. Решение же задач унификации и тем более изменения форм документов упирается в многочисленные межведомственные препоны, особенно если принять во внимание, что оно не входит в функции министерств, производящих вычислительную технику.

Одно из важнейших условий преодоления перечисленных трудностей — решительный отказ министерств (производителей вычислительной техники) от укоренившейся тенденции поставлять потребителям отдельные ЭВМ (с минимальным математическим обеспечением). Необходимо как можно быстрее переходить к практике разработки, поставки, сборки и наладки у потребителей полных комплексов технических и программных средств, составляющих законченные автоматизированные системы обработки данных различных классов, в частности, вычислительные центры общего и специального назначения. К этому нужно добавить также централизацию службы технического обслуживания, ремонта и модернизации созданных систем, организацию обучения технического персонала потребителей с целью наиболее эффективного использования поставляемых им систем, создание действенной службы для заказов, регистрации и распространения программ у пользователей.

Хотя известные шаги в направлении решения некоторых из этих задач уже сделаны, в целом проблемы перехода к политике комплексных разработок и поставок автоматизированных систем обработки данных еще далеки от решения. Большинство потребителей создает сегодня такие системы не сразу на основе полного проекта, с помощью одной головной

подрядной организации, а в результате мучительного процесса «проб и ошибок», взаимодействия последовательно с десятком (а то и с несколькими десятками) независимых поставщиков и подрядчиков. Приобретая ЭВМ в минимальной комплектации и с минимальным математическим обеспечением, потребитель обычно убеждается в том, что он не может с ее помощью успешно решать стоящие перед ним задачи. Кроме того, у него чаще всего (особенно, когда ЭВМ новейшей конструкции) нет своих кадров, способных эффективно использовать это оборудование. И вот начинается долгий и нелегкий процесс доработки системы, оснащения ее всем необходимым, обучения кадров, создания недостающих программ. Поскольку же обязанности по производству и поставке многих видов оборудования и программ для систем обработки данных между ведомствами, предприятиями и институтами строго не распределены, потребитель вынужден размещать свои заказы, где придется, и мириться с тем, что его система остается не вполне укомплектованной, а следовательно, и не вполне эффективной.

Ясно, что подобными методами нельзя создать полноценную индустрию переработки информации. Они пригодны в лучшем случае для организации кустарных мастерских, а не современного поточного производства. Комплексная разработка и поставка законченных систем обработки данных (особенно в том случае, когда ответственность за это будет возложена на одно специализированное министерство) — вот что кардинальным образом может улучшить положение с разработкой и внедрением новейших средств вычислительной техники.

Тоже самое можно сказать и о соединении ЭВМ в целостные комплексы различных классов. Что же касается электронно-вычислительных машин большой мощности, то одна из причин недостаточного объема их выпуска заключается в том, что при нынешнем положении министерства, производящие эту технику, часто бывают убеждены сами (и убеждают в этом плановые органы) в возможности удовлетворения нужд большинства потребителей с помощью ЭВМ средней мощности.

Важно тут подчеркнуть еще одно обстоятельство. Отвечая за конечный результат, разработчики и производители ЭВМ были бы вынуждены устранять недостатки своей техники, выявившиеся при работе в реальных системах, и соответствующим образом ее совершенствовать. Мировая практика убе-

дительно свидетельствует, насколько такая необходимость ускоряет научно-технический прогресс электронно-вычислительной техники.

Иногда высказывается опасение, что проведение предлагаемой технической политики помешает недостаточность имеющейся проектно-конструкторской и производственной базы. Разумеется, если ответственность за разработку и производство всех устройств, необходимых для создания систем, возложить на специализированные НИИ, КБ и предприятия, входящие в состав двух основных производителей вычислительной техники — министерств радиопромышленности и приборостроения, то с возложенными на них заданиями им трудно будет справиться. Однако ничто не мешает узаконить плановую кооперацию их с другими министерствами (что, кстати сказать, уже делается сейчас, но, увы, лишь стихийно, без должной специализации и постоянной ответственности соответствующих ведомств).

Аналогичное положение и при производстве программ. У нас нет даже полного учета их, не говоря уже о разумной специализации и кооперации коллективов, способных разрабатывать современное математическое обеспечение ЭВМ и их систем. Кроме того, далеко не все эти коллективы (особенно вузы) своевременно получают ЭВМ новейших конструкций, хотя именно они в первую очередь нуждаются в хорошем техническом обеспечении. По-видимому, пора создать региональные центры разработки математического обеспечения новых ЭВМ, закрепив за ними соответствующие коллективы Академии наук СССР, Министерства высшего и среднего специального образования СССР и отраслевых министерств. Первые образцы ЭВМ необходимо устанавливать в этих центрах, а после накопления достаточного объема математического обеспечения поставлять эти машины потребителям.

Между прочим, правом первоочередного получения ЭВМ новейших образцов должны пользоваться также крупные вузы, готовящие программистов. Тогда те организации и предприятия, которым недостает квалифицированных кадров для эксплуатации новейшей вычислительной техники, смогли бы своевременно получать их. Кстати, нецелесообразно готовить программистов в малых вузах (у которых нет собственных мощных вычислительных центров), если они не смогут обеспечить работу студентов на вычислительных центрах других учреждений.

Организовав таким образом работу поставщиков ЭВМ и автоматизированных систем обработки данных, на мой взгляд, можно было бы гораздо эффективнее, чем сейчас, создавать последовательно, шаг за шагом отдельные участки, цехи и предприятия по обработке информации в других ведомствах, выступающих в данном случае в качестве заказчиков. Эти первичные ячейки информационной индустрии разделяются на ряд типов в соответствии с областями применения. Рассмотрим некоторые из них.

«Основными направлениями развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы» предусмотрено резкое увеличение выпуска программно-управляемого оборудования (станков с числовым программным управлением, автоматических манипуляторов и др.) Применение такого оборудования (наряду с соответствующей системой обработки данных) позволит поднять производительность труда в мелкосерийном и серийном производствах в 4—5 раз.

Система обработки данных, о которой идет речь, имеет несколько уровней в своем развитии. Первый уровень — это обычный специализированный вычислительный центр для подготовки машинных носителей (перфолент или магнитных лент) с программами, по которым должны работать отдельные единицы программно-управляемого оборудования. В предыдущих пятилетках такой вычислительный центр сводился в основном к ЭВМ того или иного типа, которая снабжалась специальным математическим обеспечением. Процесс его работы заключается в следующем. Технологи на разработанном для этой цели языке описывают этап за этапом работу, которую должна выполнять та или иная единица оборудования (обычно станок). Затем эти описания соответствующий персонал в вычислительном центре переносит на перфокарты или перфоленты и вводит в ЭВМ. С помощью специальной программы-транслятора машина переводит описание в последовательность элементарных команд, которые должен выполнять станок. А сама последовательность команд (программа для станка) переносится машиной на перфоленту или магнитную ленту. Ленты передаются в цех, где их вставляют в простейшие программные устройства, управляющие работой станка.

Тут еще много ручных операций. Эффективность функционирования всей системы относительно невысока. Более высокий уровень ее обеспечивается в том случае, когда технологи, готовые программы, снабжаются специальными

пультами, непосредственно связанными с ЭВМ. Операционная система электронно-вычислительной машины (или комплекса ЭВМ) должна обеспечивать возможность одновременной работы всех пультов. Тут и до сих пор остается узким местом один из участков, требовавший ранее большого объема ручного труда, а именно перенос информации на машинные носители.

Далее, ЭВМ непосредственно связывается с оборудованием, устраняя еще один этап ручного труда — перенос носителей в цех и установку их на соответствующем оборудовании. Особенно важно отметить, что здесь решается задача координации работы отдельных единиц оборудования. Возникает автоматизированный участок или цех. Автоматизация становится полной, когда участок (цех) снабжается универсальным программно-управляемым подъемно-транспортным оборудованием. В качестве него могут выступать роботы или программно-управляемые манипуляторы. С помощью такого оборудования осуществляются перемещение деталей от станка к станку (прессу и т. д.), замена резцов, штампов и т. п. Тут наиболее узким местом в системе оказывается труд технологов, готовящих первоначальные описания программ обработки и перемещения изделий. Подъем его производительности требует повышения уровня автоматизации программирования прежде всего за счет создания банка программ, описывающих стандартные приемы обработки, а также специальных программ-координаторов, согласующих программы работы отдельных единиц оборудования.

Наконец, в систему вводится обратная связь, контролирующая работу всего оборудования и позволяющая автоматизированной системе во-время реагировать на различного рода отклонения от заданной программы. В конечном счете возникает сложная система с центральным заводским вычислительным центром, координирующим деятельность цехов и участков и решающим наиболее трудные задачи по подготовке программ, и цеховыми вычислительными центрами, оборудованными дешевыми мини-ЭВМ, которые осуществляют непосредственное управление программно-управляемым оборудованием.

Математическое обеспечение системы (за исключением наполнения банка программ стандартных приемов обработки) может быть сделано один раз применительно к системам, обслуживающим любые производства.

Приблизительно так же обстоит дело и в специализиро-

ванных вычислительных центрах, имеющих другое назначение. Возьмем, например, вычислительные центры, предназначенные для автоматизации проектно-конструкторских работ. Такие центры в их начальной (довольно примитивной) форме давно уже существуют во многих конструкторских бюро и научно-исследовательских институтах. При этом, однако, технология работы конструкторов мало менялась. Вычислительный центр давал им возможность (в режиме ручной подготовки в процессе ввода в ЭВМ исходных данных и программ их обработки) решать те или иные сложные расчетные задачи.

Совершенно новый уровень автоматизации проектирования возникает в том случае, когда конструкторы пользуются особыми рабочими устройствами, непосредственно связанными с ЭВМ. Набрасывая на специальном экране эскиз, инженер-проектант тем самым сразу вводит его в ЭВМ, которая автоматически переводит его в чертеж. Используя свои собственные наброски и хранящиеся в памяти ЭВМ чертежи стандартных деталей и узлов, он на экране «собирает» чертеж за короткое время (при этом за согласованием масштабов следит ЭВМ). Специальные чертежные автоматы с большой скоростью и точностью вычерчивают все необходимые чертежи, а автоматические пишущие машинки печатают спецификации и другую буквенную или цифровую информацию. В специальную библиотеку расчетных программ заранее записываются все программы расчетов, которые изучаются так называемыми общепромышленными дисциплинами (теоретическая механика, сопромат, теоретическая электротехника и т. д.). Специальная же система автоматизации программирования позволяет потребителям пополнять библиотеку расчетными программами, специфичными для их области.

Созданные к настоящему времени образцы таких систем (правда, пока еще недостаточно совершенные) показывают, что с их помощью производительность труда проектантов в машиностроении и строительстве повышается от 5 до 20 раз! Применительно к большим научно-исследовательским институтам и конструкторским бюро такие системы должны строиться по иерархическому принципу: крупный вычислительный центр как ядро системы и небольшие ЭВМ на ее периферии (по одной на небольшую группу рабочих мест).

Вычислительные центры общего назначения также имеют тенденцию обеспечивать работу потребителей в режиме коллективного пользования непосредственно с рабочих мест.

Эффективность использования электронно-вычислительной техники возрастает при этом в несколько раз.

Автоматизированные системы сбора и обработки экспериментальных данных и системы автоматизации испытаний сложных объектов существенно поднимают производительность труда экспериментаторов (в отдельных случаях в несколько сотен и даже тысяч раз). Несмотря на огромное разнообразие получаемых данных и способов их обработки, удается, используя описанный выше подход, заблаговременно выполнять значительную часть работы по созданию системы обработки. Разумеется, при этом потребитель сможет сам сочетать нужным образом технические средства, специальная система автоматизации программирования позволит относительно просто и быстро создавать любые, специфические для круга его задач программы обработки данных.

То же самое можно сказать и о программно-технических комплексах, предназначенных для автоматизации непрерывных технологических процессов. Что же касается интегрированных автоматизированных систем обработки данных для управления предприятиями и организациями как единым целым, то здесь возможностей заготовки программных пакетов впрямь еще больше. Ведь многие процедуры учета и планирования оказываются общими либо для всех, кто обращается к ЭВМ (например, кадровый учет), либо для больших групп потребителей (например, технико-экономическое планирование). Разумеется, для автоматизации управления в разных отраслях народного хозяйства целесообразно использовать различные технические (прежде всего периферийные) устройства (специальные кассовые аппараты в торговле, регистраторы производства в машиностроении и т. п.). Однако эти отрасли нетрудно объединить в относительно небольшое число групп, требующих одинаковых технических средств, а также большой степени общности программного обеспечения.

При должной организации работы отрасли, производящей ЭВМ и автоматизированные системы обработки данных (программно-технические комплексы), рассчитанные на разные классы применений, можно эффективно решать разнообразные проблемы внедрения вычислительной техники. Однако простая сумма пусть даже значительного числа участков, цехов и предприятий по автоматизированной обработке информации еще далеко не является той новой отраслью (информационной индустрией), о которой мы здесь говорим. При объединении всех этих ячеек в единую систему рождается новое

качество и неизмеримо возрастает эффект автоматизации обработки информации. Но, к сожалению, на пути к такому объединению немало своих трудностей, которые не могут быть преодолимы в рамках описанных выше мероприятий.

Одна из них — трудность унификации документации для должного использования уже имеющихся программных пакетов. Еще сложнее решить вопрос о полном отказе от обычных (бумажных) документов при обмене данными между отдельными автоматизированными системами (особенно если они принадлежат различным ведомствам). Потери времени и довольно значительная доля ручного труда при таком обмене почти сводят на нет преимущества автоматизированной обработки данных. Нередко случается, что одна система крайне нуждается в информационных данных или вычислительных ресурсах, которые есть в системе другого ведомства. Однако отсутствие единой общегосударственной диспетчерской службы управления данными и ресурсами не позволяет скоординировать усилия.

Мировая практика показывает, какие огромные возможности открываются в том случае, когда отдельные очаги автоматизации обработки информации сливаются в сети, работающие (через систему автоматической связи) под единым управлением. Однако у этой сети (точнее, у ее диспетчерской службы) должен быть один хозяин. То же самое относится к мощным территориальным вычислительным центрам коллективного пользования, обслуживающим по каналам связи отдаленных потребителей, не имеющих собственной мощной вычислительной техники.

Наконец, планирование очередности автоматизации по отраслям производится сегодня без глубокого учета существующих между ними взаимосвязей. В результате зачастую работа автоматизированного цеха и даже целого предприятия, в которых производственные операции рассчитываются по минутам и даже секундам, то и дело срывается по вине поставщика, который по старинке обходится месячными и даже квартальными планами производства и поставок продукции. Естественно, что окончательно такие вопросы должен решать Госплан СССР. Однако он не может этого сделать без мощной научной базы. Применительно к планированию развития других отраслей Госплан решает подобные проблемы через сами отрасли с помощью их институтов, информационная же отрасль организационно не оформлена и своих институтов не имеет.

Из сказанного напрашивается вывод, что информационную отрасль необходимо организационно оформить, быть может в качестве специального ведомства со своими специфическими функциями, иными, нежели у отраслей, производящих ЭВМ и автоматизированные системы обработки данных. По отношению к ним эта отрасль должна выступать в роли генерального заказчика, не только направляющего и объединяющего заказы других отраслей, но и формирующего свой собственный заказ на объекты, поступающие непосредственно под его юрисдикцию (автоматизированная общегосударственная информационно-диспетчерская служба, сеть вычислительных центров коллективного пользования и т. д.). Тем самым была бы создана надежная основа для успешного выполнения поставленной партией задачи: обеспечить дальнейшее развитие и повышение эффективности автоматизированных систем управления и вычислительных центров, последовательно объединяя их в единую общегосударственную систему сбора и обработки информации для учета, планирования и управления. Органическое единство развития технической базы автоматизированной обработки информации с дальнейшим совершенствованием экономических механизмов и организационных структур управления существенно повысит эффективность АСУ и всей информационной отрасли в целом. Обеспечение такого единства — важнейшая задача.

В функции информационной отрасли должны входить поиск новых областей эффективного применения ЭВМ и оказание помощи тем отраслям, которые не имеют достаточного потенциала для такого поиска. Заметим, что исследованиями последних лет открыты новые огромные возможности применения ЭВМ в здравоохранении, спорте, экологии, для изучения и прогнозирования социальных процессов и т. д.

У производителей ЭВМ и систем тоже немало забот. В десятый пятилетке необходимо осуществить переход на новую техническую базу — ЭВМ четвертого поколения на больших интегральных схемах. Технология таких схем позволяет решить две важнейшие задачи: во-первых, создание супермашин, производительность которых составит многие десятки миллионов операций в секунду; во-вторых, массовое производство дешевых и высоконадежных микрокомпьютеров для широкого применения. Последние благодаря своим миниатюрным размерам и дешевизне открывают совершенно новые пути в автоматизации.

Следует отметить, что создание и производство ЭВМ и систем четвертого поколения невозможны без комплексной автоматизации как процесса их проектирования, так и изготовления больших интегральных схем, монтажа и контроля их на всех этапах технологического процесса. В этом направлении советскими учеными обеспечен большой научный задел, который уже в значительной мере воплощен в действующие системы.

В десятой пятилетке предстоит выполнить значительный объем научных работ, который явится основой создания ЭВМ пятого и последующих поколений и откроет новые возможности для их эффективного применения.

МАТЕМАТИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ЗНАНИЯ И ТЕОРИЯ РЕШЕНИЙ *

Математизация знания есть исторически неизбежный процесс, обусловленный двумя обстоятельствами. Во-первых, это — необходимость дальнейшего углубления знания во всех областях человеческой деятельности, будь то изучение природных явлений или теория принятия решений в экономической или социальной сфере. Ведь еще К. Маркс указывал, что наука только тогда достигает совершенства, когда ей удастся пользоваться математикой. Второе обстоятельство, делающее процесс углубления и расширения математизации знания не только необходимым, но и возможным, заключается в непрерывном развитии как самой математики, так и технических средств, расширяющих сферу ее применения.

Математика, которую ныне принято называть классической, включает в свой состав элементарную, аналитическую и дифференциальную геометрию, алгебру полиномов с вещественными и комплексными коэффициентами, классическую теорию вероятностей с математической статистикой и математический анализ. Эти разделы математики родились и выросли из практических потребностей геодезии, астрономии, механики и таких классических разделов физики, как геометрическая оптика, акустика, термодинамика, электродинамика и др.

* Вopr. философии, 1978, № 1, с. 28—34.

Классическая математика оказалась полезной также при исследовании некоторых простейших аспектов биологических, экономических и даже социальных процессов. Однако в целом глубокое исследование биологических и социальных явлений оказалось за пределами возможностей классической математики. Традиционными алгебраическими формулами даже с дополнительными возможностями, предоставляемыми математическим анализом, оказалось невозможным выразить законы человеческого мышления, грамматические правила и исключения, классификацию биологических видов и многое другое.

Новые разделы математики, способные описывать явления подобного рода, начали развиваться еще в XIX в. Однако подлинного расцвета эта новая математика, оперирующая не фигурами и числами, а любыми абстрактными, различными друг от друга понятиями, достигла лишь в наше время. Громадный толчок развитию новой математики дало появление и быстрое распространение электронных вычислительных машин — так называемых компьютеров.

Развитие новых разделов математики с этого момента пошло столь быстрыми темпами и в столь необычных для традиционной математики формах, что в отношении многих из них до сих пор не выработано единого мнения: «а математика ли это вообще?» Более того, развитие компьютеров породило принципиально новый метод научного познания — математический эксперимент, занимающий промежуточное место между классическим дедуктивным и классическим экспериментальным методами исследования. Его появление привело к новой философской проблеме — необходимости переосмысления не только предмета математики, но и методов математического исследования.

Сущность метода математического эксперимента состоит в том, что эксперименты проводятся не с самим объектом, как это имеет место в классическом экспериментальном методе, а с его описанием на языке соответствующего (пригодного для этой цели) раздела математики. Как правило, эти эксперименты требуют проведения столь огромного количества вычислительных, логических и других элементарных операций, что их практически невозможно выполнить вручную или даже с простыми средствами автоматизации вычислений. Жизнь методу математического эксперимента дали современные компьютеры, превосходящие человека по скорости выполнения элементарных операций во много миллионов раз.

Математический эксперимент может выполняться с описаниями как на языке классической математики, так и современных ее разделов. Чтобы точнее провести грань между математическим экспериментом и дедуктивным методом, рассмотрим два примера. Предположим, что нам необходимо выбрать форму обводов корпуса корабля, обеспечивающую наименьшее гидравлическое сопротивление при его движении с заданной скоростью. Описание процесса обтекания корпуса задается с помощью дифференциальных уравнений движения вязкой жидкости (с учетом явлений турбулентности в пограничном слое). Для проведения эксперимента с подобным описанием необходимо располагать методом решения заданных уравнений, восстанавливающим шаг за шагом во времени движение отдельных элементарных объемов жидкости. Восстанавливая таким образом процесс обтекания для различных форм корпуса, выбирают ту форму, которая показала в эксперименте наилучшие результаты. Заметим, что решение уравнений гидродинамики для реальных форм корпуса требует колоссальной вычислительной работы. Для проведения эксперимента требуется повторять эти расчеты десятки и сотни раз. Ясно, что без компьютера здесь не обойтись.

Отличие дедуктивного подхода к решению указанной задачи от метода математического эксперимента состоит, во-первых, в большей общности описания явления: уравнения гидродинамики записываются не для данной конкретной формы корпуса, а для более или менее широкого класса таких форм. Второе отличие, представляющее собою главную суть дедуктивного метода, состоит в следующем: не решая до конца заданную систему уравнений, а лишь преобразуя описание к более удобной форме (в частности, находя, если удастся, аналитическое решение системы в общем виде), пытаются с помощью аппарата логического вывода установить те или иные свойства решения и доказать, что именно эта, а не какая-нибудь иная форма корпуса дает наименьшее сопротивление.

Следует отметить, что решить последнюю задачу (найти наилучшее решение) дедуктивным способом удастся далеко не всегда. Для сколько-нибудь сложных объектов и явлений это скорее исключение, чем правило. В то же время метод математического эксперимента, хотя и не приводит, как правило, к наилучшему решению из всех возможных (а лишь из числа опробованных) вариантов, зато применим (с теми или иными разумными ограничениями) практически всегда.

Для того, чтобы лучше продемонстрировать особенности метода математического эксперимента, рассмотрим еще один пример. Допустим, что нам нужно проанализировать совместное развитие двух популяций (например, зайцев и волков) в том или ином ограниченном пространстве. Описание объекта в этом случае должно включать в себя всю совокупность взаимосвязанных процессов размножения, питания, борьбы и гибели отдельных индивидуумов, составляющих популяцию, или тех или иных их групп. Должны быть точно описаны тем или иным способом все мыслимые ситуации, возникающие в пространстве обитания популяции (например, погоня волка за зайцем), оценены вероятности переходов от одних ситуаций к другим. В эксперименте, в соответствии с этими описаниями, последовательно, шаг за шагом развертываются соответствующие ситуации, исходя из некоторой заданной начальной ситуации. В памяти компьютера при этом просматриваются последовательно все эпизоды, из которых составляется жизнь леса и его обитателей.

Особенностью этого примера, отличающей его от ранее рассмотренного, является недетерминированность (вероятностный характер) описания объекта. Вследствие этого даже при одних и тех же начальных ситуациях результаты экспериментов оказываются различными. Обработка этих результатов и необходимые выводы из них делаются точно так же, как если бы эксперименты производились с реальными объектами (а не с их описаниями).

Второй особенностью примера является необычность (с точки зрения классической математики) описания объекта. В этом описании могут полностью отсутствовать какие-либо формулы или уравнения. Их заменяют логико-временные связи, определяющие, при каких условиях, за какое время и с какой вероятностью одни ситуации могут переходить в другие. При этом в описании ситуаций, помимо количественных параметров (например, числа особей в популяциях), могут входить и качественные параметры (например, характеристика погодных условий — суровая или мягкая зима).

Важной особенностью математического эксперимента, наглядно демонстрируемой последним примером, является то, что математический эксперимент работает и в тех случаях, когда эксперименты с реальными объектами сильно затруднены, а порой и вовсе невозможны.

Возникает законный вопрос, можно ли относить метод математического эксперимента (или, как часто говорят, мате-

математического моделирования) к математике? На этот вопрос, разумеется, не может быть однозначного, единственно правильного ответа. Попытка дать такой ответ неизбежно приводит к порочному кругу: любой ответ должен базироваться на предварительном определении предмета и метода математики, а пытаясь дать такое определение, мы в явной или неявной форме должны предварительно решить вопрос о включении тех или иных предметов или методов в сферу действий математики. Разорвать этот порочный круг можно лишь одним способом, решив вопрос большинством голосов специалистов.

Современная ситуация такова, что большинство специалистов относят к математике лишь чисто дедуктивный метод исследования. Ввиду этого обстоятельства автор в своих более ранних публикациях (в частности, в статьях, помещенных в последних изданиях Большой Советской и Британской энциклопедий) предложил относить метод математического эксперимента к кибернетике.

Сложнее обстоит дело с вопросом о расширении предмета математики. Некоторые разделы науки, например, математическую логику, имеющую дело с объектами не только геометрической, или количественной, а и качественной природы (в математической логике это высказывания любой природы), математика уже давно включила в свой состав. В то же время большинство из современных математиков вряд ли согласится (во всяком случае, без существенных оговорок) включить в математику описание объекта во втором из рассмотренных выше примеров.

Подобное различие обусловлено, на наш взгляд, лишь одним обстоятельством. Для объектов, изучаемых математической логикой, сегодня уже создан достаточно развитый аппарат дедуктивных построений. Поэтому относительно этих объектов оказывается возможным доказывать различные утверждения более или менее общего характера — теоремы и леммы. Для объектов же, рассмотренных во втором примере, подобный аппарат практически отсутствует. И поэтому вместо утверждений общего характера в тех или иных классах объектов приходится с помощью математического эксперимента исследовать индивидуальные объекты, что чуждо духу современной чистой математики.

Но отсутствие аппарата сегодня отнюдь не означает невозможности его создания в будущем. Более того, весь опыт развития науки показывает, что процесс математизации зна-

ния рано или поздно неизбежно приводит к созданию такого аппарата. Таким образом, на огромное качественное разнообразие объектов исследования в различных областях знания математика отвечает адекватными возможностями расширения используемого ею аппарата дедуктивных построений.

Однако, помимо качественной стороны, в применении аппарата дедуктивных построений существенную роль играет и количественная сторона. Любое дедуктивное построение можно условно характеризовать двумя числовыми параметрами — его шириной и глубиной. Под шириной мы понимаем количество исходных положений, вовлеченных в дедуктивное построение, а под глубиной — количество элементарных (с точки зрения используемого аппарата) шагов вывода, отделяющих начальный этап логического вывода от его конца. В классических разделах математики, имевших дело с объектами со сравнительно простыми описаниями, широта дедуктивных построений, как правило, была невелика. Аппарат дедукции оттачивался главным образом для получения все более и более глубоких построений. Главным направлением такого оттачивания является укрепление элементарных шагов вывода за счет соответствующей специализации применяемого аппарата. Несмотря на определенные возможности дальнейшего продвижения в этом направлении, сложность дедуктивного построения (принимаяемая условно равной произведению его ширины на глубину) уже сегодня ограничивается реальными возможностями человека по запоминанию и переработке информации. Особенно остро эта проблема стоит при математизации областей знания со сложными объектами биологической и социальной природы, которые требуют непривычно большой для классической математики ширины дедуктивных построений.

Путь решения этой проблемы — автоматизация дедуктивных построений на основе использования современных компьютеров с соответствующей программной и информационной базой. Следует особо подчеркнуть, что задача, как она ставится сегодня реальными нуждами процесса математизации знания, вовсе не состоит в полной замене при сложных дедуктивных построениях человека компьютером. Этот путь, по которому до сих пор шли практически все специалисты в области автоматизации дедуктивных построений, на наш взгляд, не может обеспечить быстрых практических успехов. Практическая постановка задачи состоит в увеличении производительности труда ученых, занимающихся дедуктивными

построениями. С этой целью необходимо строить человеко-машинные системы, позволяющие использовать лучшие возможности как человека, так и компьютера. По мере совершенствования таких систем относительная доля работы, выполняемая компьютером, должна непрерывно повышаться. Тем самым будет обеспечиваться непрерывный рост возможностей человечества в области дедуктивных построений, необходимой для обеспечения процесса математизации знания.

В результате развития процесса математизации знания в широком спектре естественных, технических и общественных наук возникла возможность поставить на серьезную математико-кибернетическую основу процесс принятия решений при управлении сложными системами. Сегодня очень часто человеку при принятии решений приходится сталкиваться со сложными системами, объединяющими в себе объекты различной природы. Так, при решении вопросов охраны природы приходится принимать во внимание и технические, и биологические, и экономические, и социальные, и даже физико-географические факторы. В современной армии вопросы управления людьми тесно переплетаются с вопросами управления сложнейшими техническими системами. Непрерывно возрастающая сложность объектов управления делает абсолютно бесперспективной практику принятия решений на основе лишь опыта и интуиции, без использования всей мощи современного знания, помноженного на возможности современных средств переработки информации. Родившаяся в последние десятилетия теория решений рассматривает процессы управления сложными системами как последовательности человеческих решений, основанных на оценке некоторой совокупности параметров (количественных и качественных), характеризующих как состояние системы в настоящий момент, так и предысторию ее развития.

В современной теории управления сложными системами (частью которой является теория решений) имеется два основных класса задач. Первый из них связан с изучением (идентификацией) системы. Конечной целью изучения является получение математической модели системы, т. е. такого детерминистского или вероятностного описания системы, которое сделало бы возможным проведение с системой математических экспериментов, а также (в случае наличия соответствующего аппарата) дедуктивных методов изучения ее поведения.

Второй круг задач включает в себя собственно задачи управления. Различают прямые и обратные задачи управления. В прямой задаче требуется по заданному управлению (последовательности решений) описать поведение системы в тех или иных условиях. В обратных задачах требуется найти управление, обеспечивающее заданное поведение системы или заданные свойства ее поведения. Основным методом решения прямых задач управления сложными системами сегодня является математический эксперимент с использованием компьютеров (как правило, большой мощности). Обратные задачи можно решать приближенно методом подбора нужного управления в серии специально или случайно подбираемых математических экспериментов.

Поскольку для сложных систем проведение даже одного математического (машинного) эксперимента требует, как правило, немало времени, метод подбора управления в серии машинных экспериментов приводит к необходимости резко ограничивать длину серии. Тем самым приходится ограничивать себя выбором не самого лучшего из всех возможных вариантов (так называемого оптимального) управления, а лишь лучшего из рассмотренных в проведенной серии экспериментов.

Впрочем, даже такой простой, казалось бы, метод подбора управления приводит на практике к гораздо лучшим результатам по сравнению с решениями лишь на основе опыта интуиции. Особенно хорошие результаты получаются в человеко-машинных системах, где опыт и интуиция человека направляются не непосредственно на выбор решений по управлению системой, а на формирование серии машинных экспериментов, иными словами, на управление машинным экспериментом.

Широкое развитие сегодня получила теория оптимальных решений. В этой теории разработаны методы, позволяющие для относительно простых ситуаций различных классов сразу (без экспериментов) находить оптимальное решение. В нынешнем своем состоянии теория оптимальных решений не может сколько-нибудь полно решить задачи оптимизации управления действительно сложными системами. На практике для решения этих задач приходится строить комбинированные человеко-машинные системы, в которых возможности современной теории оптимальных решений соединяются с человеческим опытом и интуицией, с одной стороны, и с возможностями машинного эксперимента — с другой. Примером

подобной системы может служить разработанная под руководством автора диалоговая система планирования народного хозяйства в национальных масштабах (система «Дисплан»).

Крупным недостатком современной теории решений является отсутствие достаточно эффективных методов решения комбинированной задачи, когда в едином процессе производится как изучение системы, так и оптимизация управления ею. На практике это обычно приводит к тому, что процессы изучения системы и оптимизации управления ее разделяются во времени, а момент перехода от этапа изучения к этапу оптимизированного управления определяется интуитивно. Развитие техники совмещения этапов изучения и оптимизации управления сложными системами значительно расширит возможности теории решений.

Одна из попыток решения одного из классов такого рода задач была предпринята автором в разработанной им методике «коллективного мозга». Суть этой методики состоит в том, что задача сбора информации, описывающей систему, распределяется в соответствии с определенной процедурой между большим коллективом людей — экспертов в области тех или иных частных явлений, объектов и взаимоотношений между ними, которые входят в качестве составных частей в описание заданной системы. Первоначально эти описания основываются на априорных знаниях экспертов. В процессе же управления системой происходит одновременно процесс целенаправленного (и в каком-то смысле оптимизированного) совершенствования этих знаний.

Оптимизация процесса совершенствования описания системы базируется на двух основных идеях. Во-первых, подбор экспертов осуществляется таким образом, чтобы максимальным образом был выявлен разброс мнений об устройстве любой части системы, оцениваемом фиксированной для этой части группой экспертов. Вторая идея состоит в том, чтобы ранжировать степени влияния этих разбросов на энтропию распределения характеризующих поведение системы параметров с учетом их относительного значения для конкретной поставленной задачи оптимизации управления системой. Усилия по совершенствованию элементов знания, из которых складывается описание системы, распределяются в соответствии с этим ранжированием.

Оптимизация управления делается на основе детерминации системы (перехода к математическим ожиданиям зна

чений параметров), после чего применяются уже описанные выше методы подбора оптимального управления на основе комбинации методов порции оптимальных решений, машинных экспериментов, а также человеческого опыта и интуиции.

Применительно к задаче математизации процесса принятия решений, применительно к сложным социальным системам описанный метод является сегодня не только наиболее эффективным, но и, по-видимому, единственно возможным.

МАТЕМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА

Развитие абстрактной математики, равно как и ее классических прикладных разделов (дифференциальные уравнения, теория функции и др.), во второй половине 20-го столетия проходит под знаком все большей и большей их алгебраизации и топологизации. Благодаря этому удается не только глубже обосновать и обобщить математические построения, но и усилить мощностъ математического аппарата, получить принципиально новые результаты. В особенности это касается исследования геометрической структуры многообразий, возникающих в результате решения дифференциальных и интегральных уравнений, а также различного рода вариационных задач.

Качественные сдвиги происходят в математической логике. Раньше ее основной целью было обоснование математики. Поэтому строились и изучались прежде всего такие формальные логические теории, количество базовых объектов (аксиом и правил вывода) у которых является по возможности малым. Появление и развитие ЭВМ поставило перед математической логикой другую задачу — служить основой автоматизации логического вывода в реально действующих практических системах. Для этих целей «строительные блоки», которыми пользуется классическая математическая логика, оказываются чересчур мелкими. Поэтому возникла необходимость развития практической математической логики или, точнее, практической системы логического вывода «крупноблочной» структуры. Такие системы должны пользоваться специальными алгебрами (типа обычных формульных алгебр из курсов элементарной алгебры и математического анализа), позволяющими в одном блоке преобразований поместить кусок логического вывода, соответствующий поня-

тию «очевидно», употребляемому при изложении доказательств в монографиях по различным разделам математики.

К концу нынешнего столетия будут созданы диалоговые (человеко-машинные) системы автоматизированного вывода в большинстве ведущих разделов современной математики, а также, возможно, теоретической физики и других дедуктивных наук. Эти системы, в процессе непрерывного расширения и совершенствования будут позволять все в большей и большей мере увеличивать производительность труда математиков и других ученых, пользующихся математическими методами в дедуктивных построениях. В результате: во-первых, значительно ускорятся темпы развития дедуктивных наук; во-вторых, появится возможность строить столь сложные теории и получить столь сложные результаты, которые практически невозможно построить и получить используемыми сейчас безмашинными методами; в-третьих, значительно расширятся границы математизации человеческого знания. Помимо так называемых «точных» наук, давно охваченных процессом математизации, этот процесс захватил и другие науки, носящие сегодня в основном описательный характер (экология, геология, социология, языкознание и др.).

Подобное расширение области математизации знания, помимо автоматизации вывода, потребует и будет опираться на развитие новых разделов математики, прежде всего — новых разделов дискретной математики. В этих новых разделах должны быть созданы формальные языки и соответствующие алгебры преобразований выражений в этих языках, которые адекватным образом отображали бы закономерности сложных технических биологических и социальных систем. Некоторые из этих разделов (теория алгоритмов и автоматов, общая теория дискретных преобразователей, теория формальных языков и др.) уже начали развиваться, другим — такое развитие еще предстоит. Многие разделы еще предстоит создать в будущем.

В результате описанных процессов математика в начале XXI в. сильно изменит свое лицо. Во-первых, это будет в большей мере математика дискретных, а не непрерывных величин. Во-вторых, развитие алгебры алгоритмов и методов качественного изучения описываемых ими объектов вместе с автоматизацией логического вывода приведут к тому, что фактически исчезнет принципиальное различие между аналитическими и численными (точнее, обобщенноалгоритмическими) методами решения задач. Ведь, подобно формулам, произ-

вольные алгоритмы и программы можно будет преобразовывать (с помощью формальных правил) из одного вида в другой. А качественные методы их исследования позволят на основе изучения алгоритма, не производя никаких вычислений по нему, устанавливать и обосновывать общие свойства описываемых им объектов (например, асимптотику определяемых им зависимостей). Разумеется, поскольку объекты, описываемые средствами новой математики, как правило, значительно сложнее, чем в случае классической математики, для получения подобных результатов «невооруженного» человеческого мозга может оказаться недостаточно. Поэтому принципиально важно, чтобы одновременно с развитием новой математики в соответствующем темпе развивалась бы и автоматизация логического вывода. На темпы автоматического вывода будет влиять не только интенсивность исследований и разработок в этом направлении, но и темпы совершенствования необходимой технической базы, т. е. ЭВМ и сетей ЭВМ.

В развитии ЭВМ принципиальное значение имеет процесс микроминиатюризации. Здесь важно не только уменьшение при этом размеров ЭВМ (пока, в основном, за счет электронной части), но также и увеличение быстродействия и надежности электронных схем, а также уменьшение энергопотребления и стоимости. Важно то, что все эти факторы, вместе взятые, позволяют коренным образом изменить идеологию построения ЭВМ. Если раньше роль ЭВМ в процессе переработки информации можно было уподобить роли автоматического станка в материальном производстве, то теперь становится возможным (и необходимым) превратить ЭВМ в целый завод по переработке информации. Это означает прежде всего широкое распараллеливание вычислительных и других информационных процессов за счет использования одновременно большого числа процессоров (мультипроцессорование). Возникает возможность специализации и кооперации различных частей ЭВМ, создание конвейеров и т. п.

Правда, специализация и даже конвейеры использовались уже в сверхбыстродействующих ЭВМ 3-го и даже 2-го поколений. Однако возможности специализации и конвейеризации были ограничены размерами и стоимостью ЭВМ, надежностью ее работы, а также, в какой-то мере, и увеличением электропотребления. Значение микроминиатюризации для ЭВМ большой мощности состоит поэтому прежде всего в увеличении (во многие сотни и тысячи раз) их производитель-

ности (при одновременном упрощении их обслуживания и пользования ими) при сохранении в разумных пределах перечисленных параметров ЭВМ и даже при повышении надежности их работы.

Для малых ЭВМ значение микроминиатюризации имеет другую направленность. Здесь на первый план выступает резкое снижение стоимости, размеров и энергопотребления (при одновременном значительном росте надежности) с сохранением (а иногда и некоторым ростом) производительности. Благодаря уменьшению стоимости и размеров микро-ЭВМ приобретают с каждым годом все более и более широкое применение. Во второй половине 70-х годов были созданы однокристалльные микропроцессоры, представляющие собой эквиваленты центральной части малоразрядной ЭВМ (8—16 двоичных разрядов) без оперативной памяти. На одном кристалле помещается также блок оперативной памяти объемом в 1000 слов и более. Несомненно, появятся однокристалльные микро-ЭВМ, представляющие собой эквивалент всех электронных устройств современной полноразрядной ЭВМ. В дальнейшем процесс микроминиатюризации позволит строить однокристалльные ЭВМ более сложной структуры, позволяющей не только повышать быстродействие путем распараллеливания вычислительных процессов, но и резко повысить машинный «интеллект», удобство обращения к машине.

Большие вычислительные системы к концу столетия достигнут производительности, эквивалентной сотням и тысячам миллиардов операций современных ЭВМ в секунду. Это произойдет как за счет увеличения скорости работы элементов, в том числе и в результате использования новых физических принципов их построения, так и за счет качественного изменения структуры ЭВМ. Помимо уже упоминавшегося глубокого распараллеливания обычных вычислительных процессов на большое число процессоров многие части ЭВМ приобретут принципиально новую, мозгоподобную структуру. Это позволит организовать общение с ЭВМ на обычных (неформализованных) языках в формах, удобных для человека (письменной и речевой).

В ЭВМ будет встраиваться большинство разделов вычислительной математики и других разделов знания, необходимых для различных процессов переработки информации. Программирование для удобства пользователей будет вестись на естественных человеческих языках с широким исполь-

зованием диалога человек — машина, а также на основе развитых методов обучения и самообучения ЭВМ.

Для проектирования подобных интеллектуальных ЭВМ и их математического обеспечения будут созданы высокоавтоматизированные диалоговые системы, использующие наряду с естественными также формализованные языки. Формализация языковых средств и развитие алгебр языков будет давать возможность осуществлять глубокую оптимизацию проектируемых схем и программ.

Громоздкие устройства внешней памяти на магнитных дисках и лентах заменят малогабаритные и недорогие электронные устройства. Объем такой памяти для больших ЭВМ будет исчисляться десятками и сотнями миллиардов байт. Для автономной подготовки данных будут широко использоваться малогабаритные сменные электромагнитные запоминающие блоки (с использованием магнитодоменных и других физических эффектов).

Дисплеи (алфавитно-цифровые и графические) станут плоскими и, полностью избавившись от аналоговых принципов формулирования изображения, станут высоконадежными и недорогими устройствами. Операции с чертежами и рисунками станут для ЭВМ (за счет соответствующего прогресса их структуры) столь же обычными и простыми (с точки зрения программиста), какими являются сегодня вычислительные операции.

Все больше ЭВМ будут объединены в сети с помощью систем быстрой автоматической связи. По мере увеличения доли информационных обменов между ЭВМ, а также между ЭВМ и удаленными терминалами через каналы связи (по сравнению с долей обмена информацией между людьми) системы связи все в большей мере будут использовать дискретные принципы организации. Поскольку такие принципы открывают неограниченные возможности микроминиатюризации и удешевления связной аппаратуры, они будут постепенно вытеснять применяющиеся ныне в связи аналоговые принципы.

В состав сетей ЭВМ будут включаться центры накопления (и постоянного обновления) информации разного рода — так называемые банки данных. С помощью терминалов с дисплеями (которые станут к концу века столь же распространенными, как сегодня телефоны) любой пользователь, независимо от его места нахождения, может быстро, получить любую нужную ему информацию. В автоматизированных банках данных будет храниться подавляющее большинство

научно-технической, экономической и социально политической информации. Причем объемы этой информации значительно вырастут.

Услуги, предоставляемые подобной информационной сетью, могут быть весьма разнообразными: от сводки погоды или справки о новых потребительских товарах до содержания новейших публикаций или любых справок о состоянии экономики, от вывода на цветной графический дисплей копии какой-либо картины из любого музея до доступа в архивы технических чертежей. Потребителями подобных услуг станет все население независимо от специальности и квалификации. Разумеется, при этом будут определены виды информации, к которым обеспечивается доступ пользователям разных категорий.

Развитие микропроцессорной техники приведет к тому, что практически все приборы, механизмы и машины будут снабжаться встроенными в них микро-ЭВМ. Какие возможности это даст, можно рассмотреть на трех примерах, которые реализованы (хотя пока и в ограниченных масштабах) уже сегодня. Первый пример — геодезический лазерный дальномер. При встраивании в него микропроцессора этот прибор способен после наведения на соответствующий визир в результате нажатия кнопки за считанные секунды произвести не одно, а несколько сотен или даже несколько тысяч измерений, вычислить среднеквадратичную ошибку определения расстояния и выдать результаты в уже обработанном виде.

Второй пример — автомобильный мотор. Если снабдить его системой датчиков, измеряющих скорость и ускорение вращения коленчатого вала, температуру наружного воздуха и бензина, температуру масла и воды в радиаторе и, возможно, еще некоторые дополнительные величины, то с помощью соединенного с этими датчиками микрокомпьютера можно для любого момента времени вычислять оптимальный состав бензо-воздушной смеси, которую надо подавать в цилиндры двигателя. Управляя устройством, готовящим такую смесь, микропроцессор способен обеспечить уменьшение расхода бензина (до 10—15% в условиях частых изменений скорости) и существенно уменьшить загрязнение окружающей среды продуктами неполного сгорания топлива.

Третий пример — телефон. Встраивая в этот хорошо известный аппарат микропроцессор с небольшой памятью, мы придаем ему новые полезные свойства: во-первых, микропроцессор запоминает номер набранного телефона и, если этот

номер занят, осуществляет требуемое соединение без повторного набора после того, как номер освободится; во-вторых, в память микропроцессора абонент может записать таблицу, позволяющую ему вместо длинных номеров набирать короткие (например, двузначные), что очень удобно для сокращения набора часто вызываемых абонентов. При некоторых дополнительных усовершенствованиях в АТС встроенный микропроцессор позволяет переадресовать нужный вызов с данного телефона на любой другой.

Приведенные примеры показывают поистине неограниченные возможности эффективного использования микропроцессоров не только на производстве, но и в быту.

Развитие микропроцессорной техники будет способствовать широкому распространению и качественному совершенствованию программно-управляемого оборудования. От отдельных программно-управляемых единиц оборудования (например, металлорежущих станков) осуществляется переход к созданию полностью автоматизированных программно-управляемых производственных участков, цехов и целых предприятий. Причем, в отличие от автоматики 50-х — 60-х годов, автоматика, основанная на ЭВМ, сохраняет за производством большую гибкость, возможность быстрой перестройки на выпуск новой продукции. С этой целью отдельные единицы обрабатывающего (программно-управляемого) оборудования связываются между собой не с помощью жестких транспортных линий, а с помощью более или менее универсальных подъемно-транспортно-установочных программно-управляемых механизмов — так называемых роботов-манипуляторов. На смену первому поколению таких роботов, созданному в 10-й пятилетке на основе решений XXV съезда КПСС, придут следующие поколения все более и более интеллектуальных роботов.

К концу столетия программирование таких роботов на производстве будет сводиться к выдаче соответствующих устных приказов на естественных человеческих языках. Роботы будут наделяться «зрением», «слухом» и «осознанием», которые позволят им свободно ориентироваться в производственной обстановке. Они смогут работать на сборочных конвейерах, у проверочных стендов, осуществлять подъемно-транспортные, установочные и наладочные операции. Станет возможным использование подобных роботов в сельскохозяйственных, строительных работах, в коммунальном хозяйстве, на уборке улиц, а также в быту. Причем универ-

сальные роботы будут применяться наряду с более дешевыми и более производительными специализированными роботами, имеющимися и теперь.

ЭВМ получают более или менее широкое применение практически во всех областях человеческой деятельности. Рабочие места работников промышленности, транспорта, строительства, сельского хозяйства, торговли, науки, культуры, сферы управления и других областей человеческой деятельности все в большей и большей мере будут превращаться в так называемые АРМы; т. е. в автоматизированные рабочие места. Смысл АРМа состоит не только в том, чтобы обеспечить использование работником отдельных компьютеризованных инструментов и устройств, но прежде всего в том, чтобы организовать его эффективный диалог в составе соответствующей автоматизированной системы (АС).

Подобные автоматизированные системы используют, как правило, достаточно сложные комплексы программно-технических средств, включаемые или подсоединяемые к национальным и даже межнациональным сетям соответствующей специализации. Люди, работающие на АРМах, составляют неотъемлемую часть соответствующих автоматизированных систем — их человеческое звено. Опишем перспективы развития некоторых наиболее важных систем такого рода.

Автоматизированная система научных исследований (АСНИ) должна оборудоваться АРМами, обеспечивающими доступ в диалоговом режиме к объектам следующих видов.

1. Экспериментальные установки, снабженные в общем случае двумя автоматизированными системами. Первая система обеспечивает планирование, подготовку и управление экспериментом, вторая — сбор и обработку получаемых экспериментальных данных.

2. Вычислительные мощности (объединенные в сеть), позволяющие производить необходимые расчеты, выполнять машинные эксперименты, осуществлять дедуктивные построения и, наконец, помогать оформлению готовых результатов. Об автоматизации дедуктивных построений уже говорилось выше. То же самое касается автоматизации расчетов, которые, как указывалось выше, будут производиться в результате диалога на естественных человеческих языках. Машинный эксперимент — это эксперимент не с самим объектом, а с его описанием в памяти ЭВМ. Этот новый метод научного исследования (промежуточный между классическим экспериментальным и дедуктивным методами) получил путевку в

жизнь в результате развития кибернетики и электронной вычислительной техники. К концу столетия этим методом будут широко пользоваться в биологии, медицине, экономике, социологии и в ряде других наук, не принадлежащих к разряду так называемых точных наук.

Система, помогающая оформлять готовые результаты, представляет собой дисплей, соединенный с ЭВМ и (через нее) с автоматической пишущей машинкой, графопостроителем, а в идеале — с автоматизированным типографским оборудованием. Научный работник, получивший в результате обработки экспериментальных данных, расчетов и других видов своей работы на АРМЕ те или иные кривые, числовые и другие (например, библиографические) данные, печатает связующий их текстовый материал, пользуясь дисплеем и ЭВМ для его корректировок (вставки или вычеркивания отдельных кусков текста, изменения порядка и т. п.). Переписывание «набело» текста на дисплей после каждой корректировки осуществляется при этом автоматически. После окончания корректировок полученный текст с необходимыми графиками и рисунками автоматически печатается, брошюруется и т. п.

3. Различного рода автоматизированные справочно-информационные системы (локальные, национальные и международные), которые развиваются у нас сегодня. Обращаясь к ним, можно быстро подобрать литературу по любому интересующему исследователя вопросу. Причем из системы можно получать не только чисто библиографические данные о соответствующих книгах, журналах, статьях и т. п., но также их рефераты, а если потребуются — и полные тексты. Другой вид автоматизированных справочно-информационных систем может представлять данные о свойствах конструкционных материалов, лекарственных веществ, минералов и т. п. Такие системы будут получать все более и более широкое распространение.

4. Административные системы, осуществляющие учет, планирование и управление научными исследованиями и разработками. Через такие системы исследователь может получать информацию о состоянии дел у соисполнителей, делать заявки на новые работы или материальные поставки, которые необходимо включать в план и т. д.

Системы автоматизации проектно-конструкторских работ (САПР), строящиеся сегодня (как и АСНИ) локально, будут постепенно приобретать только что описанный (на примере

АСНИ) облик. Отличие заключается главным образом в том, что для САПР особо большое значение имеет графическая информация, которая, как правило, значительно сложнее и объемнее, чем в случае АСНИ. Поэтому в САПР необходимо организовать быстрый ввод и вывод чертежной информации. АРМ САПРа в общем случае должно снабжаться тремя дисплеями для представления трех проекций проектируемого объекта. Важно иметь возможность быстрого ввода эскизов, рисуемых проектантом, и их автоматического превращения в чертежи в памяти ЭВМ (и на дисплеях) с учетом дополнительно вводимых проектантом данных о формулах, размерах и масштабе. В САПР необходимо предусмотреть также возможность хранения и быстрого вызова из автоматизированного архива ранее спроектированных деталей и узлов, а также различного рода стандартных комплектующих изделий, и организации процесса быстрой сборки из них проектируемого изделия.

Автоматизированные системы организационного управления экономикой развиваются сегодня в значительной мере разрозненно, создаются АСУ для отдельных предприятий и объединений, отраслей народного хозяйства территориальных объектов (города, области, республики). Однако в соответствии с решениями XXIV и XXV съездов КПСС в конце концов все эти системы должны быть объединены в Общegosударственную систему сбора и обработки информации для нужд учета, планирования и управления (ОГАС). Опишем вкратце, как будет выглядеть ОГАС после полного завершения работ по ее созданию.

Технической базой ОГАС является Государственная сеть вычислительных центров (ГСВЦ), объединяющая все ВЦ, занятые переработкой экономической информации. Наибольшее число ВЦ в сети занято обслуживанием предприятий: они составляют основу технической базы автоматизированных систем управления предприятиями (АСУП). Крупные предприятия при этом могут и должны иметь свои ВЦ, мелкие предприятия, как правило, должны использовать для своих АСУП кустовые ведомственные ВЦ или государственные ВЦ коллективного пользования.

Одной из важнейших задач АСУП является ведение интегрированных баз данных, содержащих все самые подробные сведения о соответствующих предприятиях. Оборудование, предприятия, кадры работающих, материальные запасы, планы, нормативы, цены, описание конструкций и техно-

логии производства производимой продукции и т. п. — все должно не только быть представлено в памяти ЭВМ во всех подробностях, но и непрерывно оперативно обновляться в соответствии с происходящими на предприятиях изменениями. Для быстрого отлаживания таких изменений автоматизируется документооборот: подавляющее большинство данных вводится в систему либо с помощью автоматических датчиков, либо с автоматизированных мест кладовщиков, нормировщиков, проектантов, конструкторов, а также руководящего персонала предприятий. И в том, и в другом случае информация будет поступать в систему в основном без предварительного оформления ее в виде бумажных документов. В случае необходимости любые требуемые документы должны готовиться системой автоматически. Роль людей при этом будет заключаться, помимо выдачи задания и, возможно, работы с системой в диалоговом режиме в некоторых не до конца формализованных процедурах, прежде всего в окончательной оценке готовящихся системой документов и в придании им юридической силы (окончательного утверждения).

За счет роста производительности труда (в результате автоматизации) количество административно-управленческого персонала будет существенно сокращено. Математическое обеспечение информационной базы АСУП должно предусматривать возможность быстрого подбора и выдачи информации в любых разрезах, включая подсчеты любых вторичных показателей, и создания (и проигрывания) имитационных моделей работы предприятия не только в настоящем, но и в будущем, лежащем в пределах имеющихся на данный момент планов и прогнозов.

Аналогичным образом будут строиться интегрированные информационные базы АСУ низовыми территориальными объектами (область, город, крупный район). Органы управления (как отраслевого, так и территориального) через свои ВЦ, или терминалы ВЦКП, должны иметь автоматический доступ к первичным базам данных подчиненных им объектов. Опираясь на них, органы управления более высоких рангов должны создавать и, в случае необходимости, быстро перестраивать свои собственные вторичные базы данных. В этих базах данные будут агрегированы в той мере, в какой это соответствует целям и задачам создавших их органов управления. Заметим, что создание и ведение (непрерывное обновление) любых вторичных баз данных при правильном построении системы и в первую очередь — первичных баз

данных, будет выполняться почти автоматически, и без обычных бумажных документов.

Для управления подобным процессом агрегации информации по вертикальным связям (линиям взаимоподчиненности) целесообразно иметь автоматизированную общегосударственную территориальную диспетчерскую службу. Это центральное звено ГСВЦ, состоящее примерно из 200 информационно-диспетчерских пунктов, опирающихся на мощные общегосударственные ВЦКП, должно обладать всей полнотой информации о состоянии технической базы, математического обеспечения всех ВЦ, входящих в ГСВЦ, а также о планах их работы. Они должны также вести подробные каталоги информационных баз всех звеньев ГСВЦ с тем, чтобы в любой момент быть готовым к нахождению и оперативной выдаче информации, необходимой для подготовки и принятия решений во всех звеньях управления экономикой.

Особую роль информационно-диспетчерская служба призвана сыграть в автоматизации горизонтальных связей между предприятиями по линии кооперации и взаимных поставок. Наличие такой службы вместе с возможностями автоматической связи между любыми ВЦ, независимо от ведомственной принадлежности и месторасположения, позволит решать любые задачи синхронизации выпуска продукции и соответствующих материальных поставок. Решение этих задач вместе с задачами оптимального планирования и управления по линии вертикальных связей позволит резко повысить эффективность общественного производства, особенно в таких сложных областях, как машиностроение и строительство.

На базе комплексной автоматизации торговли будет построена система точного учета потребностей населения в условиях непрерывного возникновения новых потребительских товаров, роста благосостояния населения и меняющихся вкусов.

Важное значение будет иметь комплексная автоматизация здравоохранения и создание национальных банков данных здоровья. Помимо решения практических задач, связанных с улучшением качества медицинского обслуживания, такие банки будут способствовать развитию медицинской науки.

Развитие автоматизации на базе ЭВМ коренным образом изменит телевидение, систему обучения (от начальной школы до ВУЗа) и многие другие области человеческой деятельности.

РАЗВИТИЕ АБСТРАКТНОГО МЫШЛЕНИЯ И ЗАПРЕТ ГЕДЕЛЯ

Как известно, марксистско-ленинская гносеология рассматривает абстрактное мышление лишь в качестве одного из звеньев процесса познания действительности. В соответствии с ленинской теорией отражения абстрактное мышление возникает и развивается в результате непрерывного взаимодействия человека с окружающей действительностью. Начиная с простого созерцания и наблюдения простейших закономерностей окружающего мира, абстрактное мышление проверяет и оттачивает себя в практической деятельности человека, направленной на изменение этого мира. Повторяясь вновь и вновь, этот процесс способен неограниченно расширять области человеческого познания и, в частности, совершенствовать формальные приемы абстрактного мышления.

Будучи оторванной от животворного источника взаимодействия с окружающей действительностью, любая формальная система неизбежно застывает в своем развитии и становится способной описывать и объяснять лишь ограниченный круг предметов и явлений.

Все сказанное является для марксистско-ленинской философии азбучной истиной. Однако многие выдающиеся ученые в разные периоды развития науки верили в то, что возможно создать законченные формальные системы, которые в принципе способны доказать любое правильное утверждение в математике, физике и в других дедуктивных науках. В начале 20-го столетия, уже после появления ленинской теории отражения, такие взгляды высказывал, например, известный немецкий математик Д. Гильберт. Авторитет Гильберта среди математиков в первой трети 20-го столетия был исключительно велик. Его взгляды на основание математики осмеливались оспаривать лишь немногие. Поэтому математический мир был буквально потрясен, когда другой известный (но далеко не столь знаменитый в то время, как Гильберт) немецкий математик К. Гедель в 1931 г. доказал, что уже для арифметики натуральных чисел нельзя построить формальную теорию, которая могла бы доказать любую верную арифметическую теорему. По существу, Геделем было доказано даже нечто большее. А именно он показал, что любая доста-

точно богатая формальная математическая теория будет непременно обладать возможностью сформулировать (на языке этой теории) больше проблем, чем она способна решить содержащимися в ней формальными средствами вывода.

Этот, сразу ставший знаменитым результат Геделя явился естественнонаучным подтверждением указанного выше положения марксистско-ленинской философии об ограниченности возможностей чисто формального знания. Вместе с тем он породил и немало неверных выводов, особенно в области возможностей ЭВМ и границах моделирования человеческого интеллекта. Многие до сих пор полагают, что Гедель нашел некоторое принципиальное различие, отличающее любую информационную машину от человеческого мозга. Подобные заблуждения связаны с тем, что в изложении доказательств теоремы Геделя в монографиях по математической логике присутствует огромное число специальных, технически весьма трудных для неспециалиста деталей, за которыми совершенно теряется основная идея доказательства. Поэтому с этой идеей (в сущности достаточно простой) не знакомы сколь-нибудь подробно не только философы, но и большинство математиков, не являющихся специалистами в математической логике.

Имея в виду принципиальную роль теоремы Геделя в определении границ возможностей абстрактного мышления, настоящая статья преследует две основные цели. Первая — дать столь простое и наглядное изложение идейной стороны доказательства теоремы Геделя, чтобы оно было понятно не только математикам, но и всем другим специалистам, интересующимся гносеологическими проблемами. Вместе с тем принципиальная сторона доказательства теоремы Геделя излагается таким образом, чтобы любой специалист, владеющий аппаратом теории рекурсивных функций, но незнакомый ранее со строгим доказательством этой теоремы, мог бы при желании восстановить его самостоятельно.

Вторая (главная) цель статьи — показать границы применимости теоремы Геделя при анализе возможностей абстрактного мышления. Особый упор делается на то, чтобы показать, как налагаемый теоремой Геделя запрет снимается, когда формальные системы абстрактного мышления рассматриваются не изолированно, а в процессе непрерывного развития во взаимодействии с окружающим миром.

Приступая к достижению первой цели, остановимся прежде всего на понятии формальной теории. В основе каждой

формальной теории заложен некий формализованный язык с конечным алфавитом A элементарных символов. В качестве таких символов чаще всего выступают буквы (русские, латинские, греческие и др.), десятичные цифры, знаки препинания, знак пробела, отделяющий в тексте одни слова от других, и некоторые специальные символы, как, например, знаки арифметических и логических операций, скобки, знаки: отношений ($>$, $<$), равенства ($=$), включения (\subset), является элементом (\in), не является элементом (\notin), логически следует (\Rightarrow) и др.

В принципе ничто не мешает использованию в подобных формальных алфавитах любых других символов (картинок, нотных знаков и др.). Важно лишь, чтобы число символов, составляющих алфавит, оставалось всегда **конечным**.

Имея алфавит, можно составлять с его помощью различные **тексты**. Для того чтобы адекватно отражать реальное абстрактное мышление, формальная теория должна иметь дело только с **конечными** текстами, хотя длина таких текстов в процессе работы с ними может расти неограниченно. В состав формальной теории мы будем включать **генераторы текстов**, способные генерировать описания различных объектов, с которыми имеет дело рассматриваемая теория. Каждый из таких генераторов должен обязательно описываться **конечным** числом правил.

Как известно, главным объектом изучения в арифметике является **натуральный ряд чисел** $1, 2, \dots, n, \dots$. Для натуральных чисел устанавливается ряд отношений: больше, меньше, равно, непосредственно следует за, непосредственно предшествует. Вводятся также **элементарные операции** над числами: сложение, умножение, вычитание и деление (последние две операции определены не для любых пар чисел). Для описания общих свойств натуральных чисел используются **буквенные переменные**, принимающие натуральные числовые значения.

Следующими важными объектами рассмотрения являются **функции** и **предикаты**. Функция $f(m_1, \dots, m_k)$ для любой комбинации значений (числовых) переменных m_1, \dots, m_k либо принимает определенное числовое значение n , либо оказывается неопределенной. То же самое имеет место для предиката $P(m_1, \dots, m_k)$, за исключением того, что его значениями являются не числа, а специальные логические константы: И (истина) и Л (ложь). Связывая **свободные переменные** m_1, \dots, m_k в предикате P связками $\exists m_i$ (существует такое число

m_i , что ...) и $\forall m_j$ («для всякого числа m_j ...») или подставляя вместо этих переменных определенные числовые значения, мы превращаем предикат в **высказывание**, относительно которого имеет смысл говорить истинно ли оно или ложно.

Каждый предикат с числовыми переменными однозначно соответствует некоторому множеству натуральных чисел (или множеству их пар, троек и т. п.), а именно такому множеству, во всех точках которого данный предикат истинен.

Например, предикат $P(n) = \exists x \exists y \exists z (x^n + y^n = z^n)$ задает множество M всех показателей n , для которых уравнение $x^n + y^n = z^n$ имеет решение в натуральных числах. Хорошо известно, что 1 и 2 входят в M . В то же время доказано, что 3, 4 и многие другие числа не содержатся в M . Для многих же n вопрос об их принадлежности или непринадлежности к множеству M до сих пор остается открытым. Утверждение, что $P(n)$ ложно для всех $n > 2$, представляет собой высказывание, известное под именем великой теоремы Ферма.

Этот пример показывает, что не для всякого определенного неким формальным выражением множества натуральных чисел мы можем (в рассмотренном случае по крайней мере сегодня) фактически установить принадлежность того или иного элемента этому множеству. Чтобы решить подобный вопрос, необходимо ограничить класс рассматриваемых множеств и соответствующих им предикатов. Не вдаваясь в технические подробности, дадим не вполне строгие, но интуитивно достаточно ясные определения.

1. Множество M (и соответствующий ему предикат) называется **рекурсивным**, если существует **конструктивная** (т. е. задаваемая конечным числом правил) процедура, позволяющая для любого данного элемента m определить за конечное число шагов, входит ли он в данное множество ($m \in M$) или нет ($m \notin M$).

2. Множество M называется **рекурсивно-перечислимим**, если существует конструктивная процедура, позволяющая **перечислить** (т. е. породить в каком-то порядке, может быть, с повторениями) все его элементы. Иными словами, должна существовать заданная конечным числом правил функция $m = f(n)$, при последовательном вычислении которой для значений $n = 1, 2, \dots$ через конечное число шагов окажется вычисленным любой наперед заданный элемент $m \in M$, а элементы $m \notin M$ в процессе таких вычислений никогда не появятся.

Легко понять, что любое рекурсивное множество натуральных чисел M является рекурсивно-перечислимим. Дей-

ствительно, применяя процедуру определения входимости последовательных натуральных чисел $n = 1, 2, \dots$ в M , мы будем оставлять в этой последовательности лишь те числа n_i , которые входят в M . Тем самым мы получим требуемое перечисление n_1, n_2, \dots элементов множества M .

Обратное утверждение оказывается неверным: можно построить рекурсивно-перечислимое множество, которое не является рекурсивным. Следует заметить, что понятие рекурсивного и тем более рекурсивно-перечислимого множества является весьма общим, так что нахождение примеров множеств, не входящих в эти классы, является нелегким делом. Действительно, все конечные множества являются очевидным образом рекурсивными, а значит, и рекурсивно-перечислимыми. Рекурсивными оказываются практически все те конкретные числовые множества натуральных чисел, которые используют в большинстве разделов математики (множество всех простых чисел, множество квадратов целых чисел и др.).

Имеется несколько общих методов, с помощью которых устанавливается рекурсивная перечислимость различных множеств. Для дальнейшего изложения важны следующие два метода.

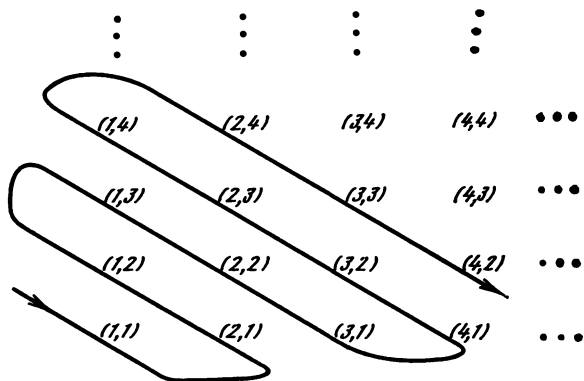
1-й метод. Пусть некоторые объекты имеют конечные описания в виде текстов, использующих формальные алфавиты с фиксированным раз и навсегда числом различных символов (букв, цифр, специальных знаков). Если эти описания позволяют однозначно и конструктивно воспроизвести соответствующий объект, то вместо конструктивного перечисления объектов достаточно конструктивно перечислить их описания.

Для выполнения последнего описания достаточно взять тексты минимальной длины и упорядочить их лексикографически (как это делается со словами в алфавитных словарях). Ввиду конечности алфавита, таких текстов будет лишь конечное число, в силу чего их нетрудно конструктивно пронумеровать последовательными числами $1, 2, \dots, n_1$. Затем нужно проделать то же самое (с числами $n_1 + 1, \dots, n_2$) для текстов следующей по порядку большей длины и т. д.

2-й метод, называемый обычно диагональным, позволяет конструктивно перечислять множество пар (m, n) элементов двух конструктивно перечислимых множеств. Идея этого метода состоит в последовательном перечислении всех пар (m, n) , сумма перечисляющих номеров которых в их индивидуальных перечислениях равна последовательно $2, 3, 4$

и т. д. Этот процесс схематично показан на рисунке, где перечисление пар идет в направлении, показанном сплошной линией со стрелкой.

Рассмотрим теперь произвольное рекурсивно-перечислимое множество натуральных чисел M . Его конструктивное перечисление задается некоторой функцией $m = f(n)$ ($n = 1, 2, \dots$). В теории рекурсивных функций доказывается, что каждая такая функция задается конечным текстом, состоящим из комбинаций ограниченного числа правил. В число



этих правил, помимо правил выполнения элементарных арифметических операций, включаются еще рекурсии, использующие для определения значений функции в новых точках ее ранее вычисленного значения в других точках. Пример простейшей (так называемой примитивной) рекурсии может быть задан в виде: $f(1) = 1$, $f(n+1) = (n+1)f(n)$. Этими правилами задается функция $n!$. Применяя теперь метод 1, мы получаем возможность эффективно перечислить не только все рекурсивно-перечислимые множества M_i натуральных чисел, но и соответствующие процедуры конструктивного перечисления элементов этих множеств!

Теперь оказывается возможным, применив диагональный процесс (метод 2), конструктивно перечислить множество Q , состоящее из всех таких n только таких натуральных чисел n , для которых $n \in M_n$.

Покажем теперь, что дополнение \bar{Q} множества Q (т. е. множество всех натуральных чисел, не входящих в Q) не является рекурсивно-перечислимым множеством. Действи-

тельно, если \bar{Q} рекурсивно-перечислимо, то оно должно совпасть с одним из множеств M_i . Пусть $\bar{Q} = M_k$. Тогда, если $k \in \bar{Q}$, то $k \in M_k$, и, следовательно, по определению множества Q , $k \in Q$. Так как множества Q и \bar{Q} имеют пустое пересечение, невозможно, чтобы одновременно $k \in \bar{Q}$ и $k \in Q$. Итак, предположение о том, что $k \in \bar{Q}$, привело нас к противоречию.

Поскольку Q и \bar{Q} , вместе взятые, содержат в себе все натуральные числа, мы приходим к выводу, что k должно входить в Q , т. е. $k \in Q$. Но тогда, по определению множества Q , $k \in M_k$. А так как $M_k = \bar{Q}$, то $k \in \bar{Q}$, что опять приводит к противоречию.

Тем самым нам удалось определить средствами формальной арифметической системы множество натуральных чисел, не являющееся рекурсивно-перечислимым*.

Возвращаясь снова к нашей формальной системе, заметим, что в соответствии с принятыми правилами логических исчислений доказательство правильности тех или иных высказываний в них делается с помощью последовательного (в различных комбинациях) применения некоторого фиксированного конечного набора правил вывода из некоторого фиксированного конечного набора высказываний — аксиом, истинность которых принимается априори.

В силу описанного выше первого метода эффективного перечисления элементов множества, множество A всех получаемых таким образом высказываний рекурсивно перечислимо. Все его элементы (высказывания) назовем теоремами, доказуемыми в данном исчислении.

Возьмем теперь построенное выше множество \bar{Q} . Для любого $q \in \bar{Q}$ высказывание $\neg (q \in Q)$ (неверно, что q принадлежит Q) будет истинным.

Множество R всех высказываний $\neg (q \in Q)$ при $q = 1, 2, \dots$ очевидным образом рекурсивно перечислимо. Пересечение $B = A \cap R$ этого множества с множеством A всех теорем, доказуемых в этом исчислении, состоит только из высказываний $P(q) = \neg (q \in Q)$, где q пробегает все множество \bar{Q} . Будучи пересечением двух рекурсивно-перечислимых множеств, множество B также рекурсивно-перечислимо.

Действительно, чередуя процедуры перечисления элементов множеств A и R , мы будем строить одновременно два списка элементов обоих множеств раздельно. Введем теперь

* Операция дополнения множества соответствует операции отрицания для соответствующего предиката и поэтому обязательна в системе.

третью процедуру, которая после каждого дополнения одного из списков новым элементом a_n производит его сравнение с уже построенными элементами r_j второго списка (процедура эта конструктивна ввиду конечности списков). В случае совпадения $a_n=r_j$ получаем, очевидно, элемент $b_k=a_n=r_j$ из пересечения $A \cap R$. Занося его на очередное место в третий список, получим конструктивную процедуру перечисления множества B .

Поскольку каждый элемент $P(q)=\neg(q \in Q)$ множества B однозначно и конструктивно (выделение числа в тексте, где кроме этого числа цифры не используются) определяет элемент q из множества Q , то из рекурсивной перечислимости множества B вытекает рекурсивная перечислимость множества \bar{Q} , что противоречит ранее установленному факту о невозможности его конструктивного перечисления.

Следовательно, предположение о том, что все высказывания $P(q)$ для $q \in \bar{Q}$ (являющиеся содержательно истинными), выводимы в нашем исчислении неверно.

По существу, нами доказано (правда, не вполне строго), что для любой формальной системы, средствами которой можно определить рекурсивно-неперечислимое множество, будут обязательно существовать содержательно истинные высказывания об элементах этого множества, не выводимые в рамках этой системы.

Заметим, что доказательство теоремы опирается всего лишь на три основных положения. Первое из них заключается в том, что рассматриваемая нами формальная система является конструктивно-конечно-порожденной, т. е. она строится из конечного числа начальных объектов (букв алфавита, аксиом) с помощью конечного числа правил вывода (логических следствий) из ранее доказанных предложений. Даже те объекты системы, число которых потенциально бесконечно (числа, предикаты, высказывания), или даже объекты, бесконечные сами по себе (бесконечные числовые множества), предполагаются порождаемыми конструктивно (т. е. с помощью конечного числа правил).

Второе положение заключается в том, что рассматриваемая система предполагается достаточно богатой, чтобы в ней можно было формально определить некоторое рекурсивно-перечислимое множество объектов N (в рассмотренном случае множество натуральных чисел), а в нем — некоторое подмножество (в рассмотренном примере \bar{Q}), не являющееся рекурсивно перечислимим. Третье положение заключается

в том, что применительно к высказываниям в системе допускается конструктивная с точки зрения логического исчисления операция отрицания, которая при теоретико-множественной ее интерпретации может выводить за пределы класса конструктивных (рекурсивно-перечислимых) множеств. При этом предполагается, что теория непротиворечива, т. е. в ней не могут быть выводимы два противоположных друг другу высказывания P и $\neg P$.

Третье положение как раз и есть та «изюминка», на которой зиждется приведенное выше упрощенное доказательство теоремы Геделя.

Заметим еще, что существуют относительно бедные выразительными средствами формальные системы, для которых второе положение не выполняется. К их числу относится, например, классическое исчисление высказываний, в котором содержание высказываний не раскрывается, а высказывания рассматриваются просто как переменные, могущие принимать два значения И и Л. Средствами этой теории вообще нельзя определить ни одного бесконечного множества. Поэтому она оказывается разрешимой, т. е. для нее существует конструктивная процедура, позволяющая за конечное число шагов не только доказать любое истинное предложение теории, но и опровергнуть любое ложное предложение.

К числу разрешимых теорий относится базисная часть (не использующая понятия предела) евклидовой планиметрии и некоторые другие теории. Однако подавляющее большинство содержательных теорий, с которыми имеет дело современная математика, являются конструктивно неразрешимыми в том смысле, что для них имеет место аналог теоремы Геделя.

Как нетрудно видеть, устранить препятствие, создаваемое наличием в теории недоказуемого формально истинного предложения, простыми средствами не так просто. Например, добавляя это предложение в список аксиом, получим новую теорию, в которой опять справедлива теорема Геделя. Более того, легко показать, что в рассмотренном выше случае (а значит, и для всякой достаточно богатой теории) теорема Геделя будет справедливой и в том случае, когда множества аксиом и правил вывода являются бесконечными, но рекурсивно-перечислимыми.

Для преодоления запрета Геделя в формальные системы необходимо ввести развитие. Однако и этот путь не является столь простым, как может показаться на первый взгляд.

Если формальная система развивается (за счет дополнения и изменения множеств аксиом и правил вывода) в отрыве от окружающего мира, за счет лишь своих внутренних причин, то естественно постулировать, что это развитие осуществляется на основе конечного числа правил. В этом случае, как нетрудно показать, теорема Геделя опять сохраняет свою силу. Не помогает и введение новых правил, которые определяют развитие правил, меняющих формальную систему, правил, меняющих эти новые правила и т. д.

Может быть поэтому сформулирован следующий тезис. Любая развивающаяся под влиянием внутренних причин конечно-порожденная формальная теория, которая превосходит в своем развитии некоторый порог сложности, становится неразрешимой в том смысле, что в ней можно сформулировать бесконечное множество истинных высказываний, которые не могут быть формально доказаны (выведены из аксиом) средствами этой системы.

Запрет Геделя снимается лишь в том случае, когда рассматриваемая формальная система развивается не изолированно, а в тесном взаимодействии с окружающим миром при условии, что этот мир, в свою очередь, не может быть описан в виде конечно-порожденной системы.

Лишь такой, по существу бесконечный (не в смысле физического объема, а в смысле разнообразия описывающих его закономерностей) мир способен породить бесконечную рекурсивно-неперечислимую последовательность сигналов. Преобразуя сигналы этой последовательности с помощью конечных систем правил, рассматриваемая формальная система способна осуществлять конструктивное перечисление не только множества элементов этой последовательности, но многих других рекурсивно-неперечислимых множеств. В число этих множеств может попасть, в частности, построенное нами выше множество \bar{Q} , после чего приведенное нами доказательство теоремы Геделя теряет силу.

Вопрос об изучении конструктивных логических исчислений, взаимодействующих с актуально бесконечным внешним миром и развивающихся в процессе такого взаимодействия, является интересным не только для философии, но и для математической логики.

Приведенные факты и доказательства с достаточной убедительностью показывают, что налагаемые теоремой Геделя ограничения относятся к процессам абстрактного мышления как к таковым, безотносительно к тому, где эти процессы

реализуются — в мозгу человека или в достаточно совершенной ЭВМ. Развитие формальных систем как под влиянием внутренних, так и внешних причин также легко осуществляется в машинах. Более того, современные универсальные ЭВМ оказываются в этом отношении, возможно, даже более гибкими, чем человеческий мозг: ведь при моделировании на ЭВМ правила логического вывода вкладываются не в конструкцию машины, как это, по-видимому (по крайней мере отчасти), имеет место в мозгу, а в ее оперативную память. Любые же процедуры изменения информации, заложенной в память ЭВМ, осуществляются весьма легко и быстро. Важно лишь знать сами эти процедуры, т. е. конкретные правила развития абстрактного мышления (точнее, соответствующих формальных систем) в процессе взаимодействия с окружающим миром. Сегодня мы еще плохо знаем эти правила и это — одна из главных причин, сдерживающих развитие теории и практики «искусственного интеллекта».

МАТЕМАТИЗАЦИЯ ЗНАНИЯ В ОБЛАСТИ ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Математизация знания есть процесс, объективно обусловленный двумя группами фактов. Во-первых, это необходимость углубления и уточнения знаний в любых областях, вызываемая как внутренними закономерностями развития этих областей, так и прямыми запросами практики. Ясно, что привлечение такого мощного дедуктивного аппарата, как аппарат математики, в большой степени способствует решению подобной задачи. Вторая группа фактов связана с возможностями самого математического аппарата, с уровнем его развития. Так, возникновение в XVII столетии аппарата алгебры и математического анализа позволило математизировать большинство разделов физики и особенно такую актуальную уже в те годы область знаний, как механика.

Принципиально новые возможности математизации знания обусловили появление и широкое распространение компьютеров. Роль компьютеров здесь двоякая. Во-первых, они резко расширили границы применимости обычного, традиционного математического аппарата. Ведь многие области знания имеют дело с объектами столь большой сложности,

что при сколько-нибудь адекватном их представлении в виде традиционной математической модели (например, в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений) объем необходимых вычислений намного превосходит обычные человеческие возможности. Современные компьютеры ускоряют процесс вычислений в сотни миллионов раз, делая возможным рассчитывать сложные быстродействующие процессы со скоростями, намного превышающими скорости самих этих процессов. Для примера можно указать, что даже на компьютерах первого поколения (50-е годы) траектория полета снаряда рассчитывалась гораздо быстрее, чем летел снаряд. А с тех пор быстродействие наиболее мощных компьютеров увеличилось не менее чем в тысячу раз.

Вторая сторона роли компьютера в процессе математизации знания с принципиальной точки зрения еще важнее. Речь идет о том, что появление компьютеров дало мощный толчок развитию самого математического аппарата. На наших глазах рождается новая математика, резко расширяющая границы своих применений. Понятие математической модели, связанное ранее непременно с числами и формулами, претерпело качественный скачок, включив в себя принципиально новый класс так называемых имитационных моделей. В виде имитационных моделей можно представлять, а затем (с помощью компьютера) эффективно изучать сложные системы биологической и социальной природы, в том числе и такие, которые не имеют традиционных математических описаний.

Вместо традиционных чисел в имитационных моделях появляются параметры произвольной природы, в том числе качественные параметры, описывающие, например, характер человека (сильный, мягкий и др.) или взаимоотношения людей (хорошие, плохие и т. п.). Вместо традиционных формул используются логико-временные зависимости весьма широкого класса. Возможно, например, просто перечислить все ситуации, когда тот или иной параметр может претерпеть определенные изменения, оценив при этом вероятное время для осуществления этих изменений. Следует подчеркнуть, что сами по себе имитационные модели ввиду их большой громоздкости не могут служить эффективным аппаратом для дедуктивных построений. Они становятся таковыми лишь тогда, когда их вкладывают в компьютеры, способные за достаточно короткое время (с помощью специальной системы программ) провести изучение поведения этих моделей и сде-

лать необходимые выводы. Подобный метод исследования, получивший наименование математического (кибернетического) моделирования, является принципиально новым методом научного познания. Он лежит между классическим экспериментальным и классическим дедуктивным методами. Этот метод расширяет возможности математизации знания практически неограниченно.

С другой стороны, резкое ускорение роста сложности науки, техники и экономики, вызванное научно-технической революцией, делает крайне необходимой математизацию все новых и новых областей знания, процессов подготовки и принятия управленческих решений. Особый интерес приобретает в наше время вопрос об организации управления экономической как в сфере материального производства, так и в сфере распределения и потребления произведенных продуктов. Несколькими лет тому назад автору удалось найти интересный подход к объективной периодизации основных этапов развития «технологии» управленческих решений в управлении экономическими системами. Сущность этого подхода состоит в следующем.

Рассмотрим историческую эволюцию замкнутых экономических систем. Под экономической системой здесь понимается сообщество, включающее в себя не только производителей, но и потребителей материальных благ. Свойство замкнутости означает возможность длительного существования системы без сколько-нибудь заметного взаимодействия с другими системами. Общее направление развития экономики состоит в переходе от большого числа малочисленных замкнутых экономических систем ко все более крупным системам национального и международного масштабов, а в конце концов — к единой всемирной экономической системе.

С каждой экономической системой s связывается величина $\Phi(s)$ — суммарной сложности управления этой системой. Под сложностью управления здесь понимается количество элементарных операций, необходимых для выработки правильных решений по управлению рассматриваемой системой s в течение какого-либо фиксированного промежутка времени t , например, в течение одного года. Понятие «правильности» управленческих решений означает, что, следуя им, система s будет функционировать с достаточно малыми потерями и отклонениями от максимально возможного уровня удовлетворения запросов потребителей в данной системе. В качестве экспериментальных операций могут служить, например,

арифметические и логические операции, предусматриваемые системами инструкций современных компьютеров.

По мере исторического развития экономических систем, помимо уже отмеченного выше процесса их интеграции, имеют место еще два важных процесса. Во-первых, это процесс увеличения сложности индивидуальных человеческих решений в отношении с окружающими вещами (предметами потребления, орудиями труда и др.). Это происходит как в силу количественного роста номенклатуры вещей, так и качественного их усложнения. Второй процесс — усложнение процессов общения с другими людьми, вызываемое прежде всего развитием процессов специализации и кооперации в производственной сфере, увеличением числа взаимосвязей между отдельными частями экономических систем (рабочие места, цехи, предприятия и т. д.).

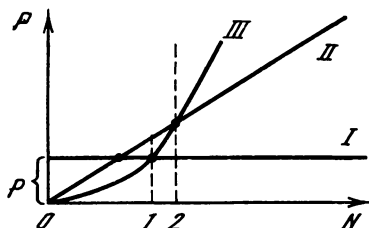
В результате указанных процессов сложность $P(s)$ управления любой замкнутой экономической системой s растет быстрее, чем число людей $N(s)$, составляющих эту систему. Более того, темпы этого роста увеличиваются с течением времени ввиду ускорения научно-технического прогресса. Отсюда следует важный вывод, что сложность задач управления замкнутой экономической системой, приходящихся на каждого человека — члена этой системы, увеличивается с течением времени со все более нарастающими темпами. В то же время биологическая эволюция человека протекает настолько медленно, что на протяжении тысячелетий, отделяющих нас от начала развития экономических систем (в виде совокупности мелких замкнутых систем в масштабах отдельных родов и племен), скорость работы его мозга существенно не изменилась. Поэтому по мере развития экономики неизбежно наступает момент, когда нагрузка по выработке управленческих решений, приходящаяся на каждого члена экономического сообщества, превысит возможности его мозга. С этого момента любые формы управления экономическими системами, не применяющие методы автоматизации подготовки управленческих решений, будут приводить к прогрессивному ухудшению качества управления. Автоматизация же процессов управления экономическими системами невозможна без математизации знаний о закономерностях их развития.

Для иллюстрации сказанного рассмотрим рисунок. По горизонтальной оси здесь откладывается число людей в (развивающейся) замкнутой экономической системе. По верти-

кальной оси — сложность задач управления. Кривая *III* показывает рост суммарной сложности задач управления системой по мере ее развития (выраженного ростом числа ее членов N). Горизонтальная прямая *I* показывает максимальное количество управленческих задач p , которые способен решить (в единицу времени) один человек. Прямая *II* (задаваемая уравнением $P = pN$) определяет максимальное количество управленческих задач, которое способны решить все члены данной экономической системы без применения автоматизации.

Из приведенных выше рассмотрений следует, что кривая *III* обязательно пересечет обе прямые *I* и *II*. Точки пересечений *I* и *2* представляют собой два замечательных момента в развитии любой замкнутой экономической системы, названных мною 1-м и 2-м информационными барьерами. До достижения 1-го информационного барьера экономическая система может эффективно управляться одним человеком. После перехода этого барьера происходит процесс вовлечения в задачи управления многих людей. Это вовлечение происходит как прямым путем (построение иерархических систем управления), так и косвенным — путем введения рынка и товарно-денежных отношений. Последний путь особенно интересен тем, что он позволяет вовлечь в задачи управления (правда, косвенным и потому не вполне эффективным способом) все взрослое население, составляющее рассматриваемую экономическую систему. После же перехода через 2-й информационный барьер традиционный рыночный механизм (как и любой другой неавтоматизированный экономический механизм) не может обеспечить эффективного управления экономикой. При этом важно подчеркнуть, что неизбежность перехода через 2-й информационный барьер обуславливается объективными факторами, связанными с научно-техническим прогрессом (увеличение номенклатуры, усложнение технологии производства, рост специализации и кооперации в производстве, ускорение сменяемости оборудования и изделий и т. п.).

Проведенный анализ показывает главный результат, который может дать математизация знаний в области организа-



ционных решений, — сохранение возможности оптимального управления экономическими системами после перехода через 2-й информационный барьер. Для превращения этой возможности в действительность необходимо наличие такой организации управления, которая во главу угла ставила бы не частные задачи и косвенные критерии (прибыль отдельных предприятий и фирм), а глобальную задачу наилучшего удовлетворения материальных и духовных потребностей членов общества. Советский Союз и другие социалистические страны, строящие управление экономикой по этому принципу, имеют неограниченную перспективу совершенствования организационных решений на базе математизации знаний и автоматизации управления экономикой в национальных и в межнациональных масштабах. При этом предусматривается широкое применение математизированных процедур для оперативного выявления и взаимоувязки меняющихся потребностей, правильной балансировки задач улучшения материального и психологического комфорта. На базе математизации подготовки управленческих решений (с помощью общегосударственных сетей компьютеров) открываются новые возможности для дальнейшего расширения прямого участия населения в управлении экономикой. Подобные сети с законченными в них информационными моделями всех социальных и экономических процессов, работая во взаимодействии с людьми — носителями творческого начала в управлении, дадут возможность децентрализовать процесс применения многих управленческих решений без потери глобальной целостности и единого планового начала развития экономики.

Если говорить в более общем плане, то математизация (и компьютеризация) знаний открывает принципиальные возможности для анализа сложных социальных, экономических, технических и биологических экономических систем, предвидения далеких последствий тех или иных решений, принимаемых в связи с развитием таких систем и управления ими. Точность такого предвидения зависит не только от уровня математизации и компьютеризации, но и от возможностей информационного обмена. Ведь взаимосвязанность всех процессов делает неизбежно ограниченной возможность предвидения развития отдельно взятых процессов. Высшая форма предвидения возможна на пути объединения в сетях компьютеров формализованного знания и непрерывного потока новых идей от всех творчески мыслящих членов общества. Процесс

создания подобного «коллективного мозга», соединяющего лучшие черты человеческого и машинного интеллектов, уже начался. Его дальнейшее развитие будет непрерывно расширять возможности предвидения будущего, гармонической увязки человеческих решений в организационном и экзистенциальном плане.

Математизация знаний и компьютеризация информационного обмена сильно изменит жизнь человека. Ему будет обеспечен быстрый и удобный доступ ко всем сокровищам человеческой культуры и информации всех видов, будут созданы принципиально новые возможности для индивидуального обучения, новые формы услуг и т. д. и т. п. Компьютеры будут находить все более и более широкое применение в быту, оказывая помощь в решении повседневных вопросов, из которых складывается не только общественная, но и личная жизнь каждого человека.

2. ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ КИБЕРНЕТИКИ

О НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И СВЯЗАННЫХ С НИМИ ЗАДАЧАХ МАТЕМАТИКИ *

Огромный прогресс науки и техники в XX столетии вызвал резкое увеличение потребностей в различного рода вычислениях. Задачи, требующие для своего решения многих миллионов арифметических операций над многозначными числами, стали в настоящее время довольно обычным явлением. На очередь дня поставлены задачи с миллиардами операций. Появление таких задач предъявляет высокие требования к вычислительной технике и прежде всего требование полной автоматизации процесса вычислений.

Современная вычислительная техника располагает тремя основными видами автоматических вычислительных устройств: машинами непрерывного действия, счетно-аналитическими машинами и цифровыми машинами с программным управлением. Каждое из этих устройств имеет свои преимущества и недостатки. Так, машины непрерывного действия, имеющие большую скорость и относительно высокую надежность в работе, обладают вместе с тем малой точностью и приспособлены для решения лишь сравнительно узкого круга задач. Счетно-аналитические машины обладают высокой надежностью и практически неограниченной точностью вычислений, но в то же время имеют недостаточную гибкость и быстродействие. Наконец, цифровые (электронные) машины с программным управлением, сочетая высокую точность и огромную скорость работы с универсальностью применений, требуют больших затрат труда квалифицированных математиков (программистов) и пока все еще весьма дороги в эксплуатации. В соответствии с этим каждый из названных видов автоматических вычислительных устройств имеет свою область применения. Машины непрерывного действия служат главным образом для решения с небольшой степенью точ-

* Укр. мат. журн., 1957, т. IX, № 4, с. 369—376.

ности научных и технических задач, сводящихся к тем или иным типам дифференциальных уравнений. В случае необходимости решения тех же задач с высокой степенью точности, а также для решения большого числа других математических и логических задач с относительно небольшим количеством исходных данных и со значительным объемом действий над этими данными с успехом применяются цифровые машины с программным управлением. Наконец, счетно-аналитические машины, обладающие в целом гораздо меньшими возможностями, чем универсальные цифровые машины, оказываются хорошо приспособленными для обработки статистических данных, а также для различного рода бухгалтерских и планово-экономических расчетов.

Таким образом, в настоящее время необходимо развивать и использовать все виды автоматических вычислительных устройств. Вместе с тем нельзя не видеть, что наиболее перспективными являются электронные цифровые машины с программным управлением. По мере их развития и совершенствования они будут занимать все большее и большее место среди других вычислительных машин. Однако даже простейшие вычислительные средства (таблицы, номограммы, арифмометры и т. п.), по-видимому, еще долго не утратят своего значения и, во всяком случае сегодня, нуждаются в дальнейшей разработке и совершенствовании.

Следует отметить, что число высококвалифицированных специалистов в области вычислительной математики и вычислительной техники продолжает оставаться крайне недостаточным. Поэтому широкое внедрение современных вычислительных машин и всемерное расширение круга лиц, занимающихся вычислительной техникой и вычислительной математикой, представляет собою важнейшую научно-организационную задачу. При решении этой задачи нужно иметь в виду, что одним из основных путей пополнения кадров специалистов в области вычислительной техники и вычислительной математики в ближайшие годы будет переквалификация специалистов, работающих в смежных областях науки и техники.

Переходя к собственно научным задачам, я остановлюсь лишь на тех из них, которые связаны с электронными цифровыми машинами, выделив три основные группы таких задач.

Первую группу составляют задачи дальнейшего усовершенствования и развития электронных цифровых машин с

установившимися в настоящее время операционно-адресными принципами управления. Важнейшей из таких задач является задача построения оперативных быстродействующих запоминающих устройств с простым управлением, позволяющих запоминать десятки и даже сотни миллионов двоичных цифр. Решение этой задачи подняло бы всю вычислительную технику на качественно новую ступень, позволив, в частности, с помощью применения более совершенных методов автоматизации программирования свести к минимуму работу программистов. Огромные перспективы открылись бы для различных неарифметических применений электронных вычислительных машин (автоматический перевод, управление производственными процессами и т. п.).

Основными видами оперативных запоминающих устройств, используемыми в настоящее время, являются ламповые регистры, электровакуумные трубки, различного рода линии задержки (включая магнитный барабан), диодно-конденсаторная память и память на магнитных матрицах. Из этих систем памяти линии задержки обладают относительно малым быстродействием и могут использоваться в качестве оперативной памяти лишь в сравнительно медленных машинах. Из остальных систем наиболее перспективной считается обычно память на магнитных матрицах. Однако, хотя этот вид памяти и будет, несомненно, основным для машин ближайшего будущего, все же некоторые присущие ему недостатки (большая величина токов перемagnetизации и связанная с этим сложность управления) заставляют искать другие пути для решения поставленной выше задачи.

Несмотря на то, что применяемые на многих действующих машинах системы памяти на электронно-лучевых трубках в настоящее время сильно устарели, сам принцип коммутирования элементов памяти с помощью управляемого электронного луча далеко не исчерпал своих возможностей. О том, что это действительно так, свидетельствует хотя бы сообщение о разработанной в США так называемой сотовой памяти, использующей для записи и чтения информации весьма тонкий электронный луч в сочетании с системой микроскопических конденсаторов, образуемых металлическими вкраплениями в диэлектрике. Эта система позволяет запоминать до 800 000 двоичных цифр на площади в 1 кв. дюйм и знаменует собою несомненный качественный скачок в возможностях быстродействующих запоминающих устройств. Еще большие возможности открывает сочетание ферроэлектрических

матриц с управляемыми электронными лучами; такое сочетание дает возможность разработать относительно простые быстродействующие запоминающие устройства на многие сотни миллионов двоичных цифр.

Второй важной задачей является дальнейшее увеличение быстродействия электронных цифровых машин, что может быть достигнуто прежде всего путем увеличения скорости работы отдельных их элементов. В ряде случаев большой эффект может быть получен за счет улучшения логических схем, позволяющего избежать значительного повышения частоты работы отдельных наиболее узких мест машины. Другими путями повышения быстродействия являются совмещение операций во времени (например, выполнение арифметических действий во время ввода данных) и дублирование медленно работающих частей машины.

Признавая всю важность задачи повышения скорости работы электронных цифровых машин, следует отметить опасность превращения быстродействия в самый важный и чуть ли не единственный критерий качества машины. Не нужно забывать, что в отличие, например, от ускорителей заряженных частиц, увеличение скорости вычислительных машин в 2—3 раза не приводит к резкому изменению качественного эффекта применения, качественный скачок достигается лишь при весьма значительном увеличении быстродействия (в несколько сот или даже в несколько тысяч раз). Повышение быстродействия приводит, как правило, к усложнению машины, влекущему за собой, в свою очередь, удорожание и уменьшение надежности. Поэтому для решения весьма большого числа задач менее скоростные машины могут оказаться экономически более выгодными. Если к тому же учесть, что разработка высокоскоростных машин затягивается часто на многие годы, отвлекая значительные научные и производственные силы, то следует признать необходимым наряду с рекордными по скорости машинами разрабатывать и строить также более медленные, но зато значительно более дешевые и надежные машины. Вместе с тем имеется потребность в некотором сравнительно небольшом числе весьма быстродействующих электронных цифровых машин для решения уникальных задач, насчитывающих многие миллиарды операций.

Чрезвычайно большое значение имеет задача повышения надежности электронных цифровых машин. Один из путей решения этой задачи состоит в разработке и использовании более надежных элементов. В связи с этим большую роль при-

званы сыграть полупроводниковые элементы, решающие одновременно и другую важную задачу — уменьшение габаритов машин и значительное снижение потребляемой ими мощности.

Другим, более интересным с точки зрения математиков способом повышения надежности является построение надежно работающих схем из сравнительно мало надежных элементов. В этом направлении сделаны пока лишь первые шаги. Наиболее простое решение состоит в удвоении или даже утроении основных узлов машины — арифметического устройства, устройств управления, памяти, вводных и выводных устройств. По такому пути пошла, например, американская фирма ИБМ, разработавшая для системы противовоздушной обороны «Сейдж» электронную цифровую машину AN/FSQ-7. Эта машина имеет 58 000 электронных ламп, все ее основные узлы дублированы. Гораздо более интересно, но вместе с тем и значительно труднее разработать такие схемы, в которых достаточно экономным образом осуществлялась бы автоматическая замена вышедших из строя элементарных ячеек. Возможно, что такие схемы потребуют значительного отступления от принятых в настоящее время принципов построения электронных цифровых машин.

С проблемой надежности машины тесно связан вопрос о контроле за ее работой. Контроль может осуществляться с помощью как особых контрольных устройств, так и набора специальных тестовых программ. Задача состоит в том, чтобы разработать такие методы автоматического контроля, которые позволяли бы локализовать место неисправности с точностью до отдельной элементарной ячейки. При решении этой задачи необходимо разработку схемы машины вести одновременно с разработкой системы тестовых программ и вводить, в случае необходимости, такие изменения в схему, которые позволяли бы распознавать неисправную ячейку с помощью соответствующего набора тестов.

Большое значение имеет правильный выбор системы элементарных операций, реализуемых в машине. Он должен основываться на детальном статистическом анализе большого числа задач, с тем чтобы обеспечить не только универсальность применений машины, но и возможно более простую (с точки зрения программирования) реализацию чаще всего встречающихся операций. Вместе с тем необходимо уже сейчас думать об известной стандартизации наборов элементарных операций в универсальных машинах, чтобы можно

было осуществить универсальное программирование независимо от типа машины.

В связи с ростом числа действующих электронных цифровых машин все большую актуальность приобретают задачи возможно более полной автоматизации программирования, с тем чтобы свести к минимуму первоначально вводимую в машину информацию. На пути решения этой задачи в настоящее время достигнуты известные успехи, с одной стороны, в результате создания библиотек стандартных программ, с другой — за счет предложенного А. А. Ляпуновым операторного метода и разработанных на его основе универсальных программирующих программ. Принципиально возможно достигнуть такого уровня автоматизации программирования, при котором первоначально вводимая в машину информация сводилась бы, например, к закодированному тем или иным способом уравнению и кратким словесным указаниям о методе его решения. Наиболее целесообразным способом решения подобной задачи является, по-видимому, разработка системы специализированных программирующих программ и особой программы, обеспечивающей поиск и выбор нужной программирующей программы. Необходимо отметить, что возможность достижения указанного высокого уровня автоматизации программирования упирается в проблему построения быстродействующей памяти весьма большого объема. Однако соответствующие математические вопросы можно и нужно разрабатывать, не дожидаясь окончательных технических решений.

В связи с чрезвычайной сложностью современных электронных цифровых машин огромное принципиальное и практическое значение приобретает задача автоматизации синтеза и расчета таких машин. Известные в настоящее время методы формального синтеза управляющих и вычислительных схем являются с практической точки зрения весьма несовершенными. Основной недостаток этих методов, например метода переключательных функций и минимизирующих карт, заключается, во-первых, в произвольности критерия минимизации схем, а во-вторых (и это главное), в игнорировании реальных условий работы схемы, в частности переходных процессов. Нетрудно понять, что при таком подходе к делу достигнутая в результате формального синтеза минимизация может оказаться фиктивной, ибо построенная схема не будет удовлетворять необходимым техническим требованиям (крутизна фронтов, мощность импульсов и т. п.). В ре-

зультате для технической реализации схемы ее пужно будет дополнить формирователями, катодными повторителями и другими дополнительными устройствами, которые сведут на нет достигнутую первоначально минимизацию. Наоборот, схема, не являющаяся минимальной с чисто логической точки зрения, может в результате учета всех технических факторов оказаться наилучшей. Таким образом, задача состоит в том, чтобы найти такие методы формального синтеза электронных управляющих схем и алгоритмы их минимизации по рационально выбранным критериям, которые учитывали бы реальные условия работы схемы.

Более простой, но тоже чрезвычайно важной задачей является разработка рациональных методов радиотехнического расчета уже выбранных схем электронных вычислительных машин в целом (а не только поэлементно) с учетом возможных отклонений от номиналов отдельных элементов схемы (сопротивлений, конденсаторов и т. п.). Ясно, что такой расчет, а тем более расчет, соединенный с синтезом и минимизацией, потребует выполнения огромного числа арифметических и логических операций. В связи с этим возникает задача постановки таких расчетов на универсальные электронные цифровые машины. Решение этой задачи дало бы громадный эффект, намного сократив сроки разработок новых вычислительных машин и значительно улучшив их качество.

Имея в виду возможность случайных сбоев в работе отдельных ячеек машины, представляется целесообразным при синтезе схем в качестве одного из исходных параметров иметь требуемый коэффициент надежности машины, а в синтезирующем алгоритме предусмотреть необходимость обеспечения заданной надежности. Большое значение в связи с такой постановкой вопроса имеют работы Дж. Неймана по вероятностной логике.

Вторая группа задач связана с поиском новых принципов построения электронных цифровых машин. Особое значение приобретает здесь задача детального изучения механизма высшей нервной деятельности, в частности, процесса образования понятий и их связи с языком. Как известно, механизм действия современных цифровых машин с программным управлением весьма сильно отличается от работы человеческого мозга. Не подлежит сомнению, например, что в мозгу нет ничего похожего на арифметическое устройство последовательного, а тем более параллельного действия. Говоря не вполне точно, машина сводит логические операции к ариф-

метическим, тогда как в мозгу это происходит как раз наоборот. Поэтому, намного превосходя человека в скорости выполнения арифметических операций, машина не имеет столь же значительного превосходства над ним в скорости выполнения операций логического характера. В свете всего сказанного становится ясным огромное практическое значение глубокого проникновения в закономерности работы мозга. Ведь, познав хотя бы некоторые важнейшие из таких закономерностей и реализовав их в той или иной мере на основе электронных схем, можно рассчитывать получить машины, гораздо более приспособленные к выполнению сложных логических операций, чем любая современная вычислительная машина. В случае необходимости производить громоздкие расчеты такая машина могла бы сопрягаться с электронным арифмометром какого-нибудь из существующих в настоящее время типов. Следует отметить, что для некоторых специальных целей, связанных с неарифметическими применениями (перевод, библиографическая работа и т. п.), по-видимому, уже сейчас целесообразно строить универсальные машины без арифметических устройств в настоящем смысле этого слова. В случае необходимости такие машины могли бы выполнять и арифметические операции с помощью введенных в их запоминающие устройства таблиц сложения и умножения одностанных чисел.

Большое значение для создания новых принципов построения цифровых машин имеет рассмотрение различных идеализированных схем машин Тьюринга и особенно конечных автоматов. В частности, для практических приложений представляет интерес исследование возможностей машины Тьюринга, у которой бесконечная лента заменена кольцевой (идеализированный магнитный барабан). Для такой «финитизированной машины Тьюринга» желательно разыскать и запрограммировать алгоритмы, позволяющие находить первоначальное заполнение ленты по заданным во времени потокам входной и выходной информации. Принципиальный интерес представляет также исследование автоматов со случайными элементами, начатое Муром, Шэнноном и др.

Решение всех этих задач требует дальнейшего развития аппарата математической логики, особенно теории алгоритмов. Представляется целесообразным, в частности, пересмотр марковской теории нормальных алгоритмов с точки зрения приближения их к тем алгоритмам, которые фактически реализуются в цифровых машинах. Некоторые пред-

варительные соображения по этому поводу были недавно высказаны Л. А. Калужниным.

Третья и последняя группа задач, на которой я хочу остановиться, связана с использованием уже существующих и перспективных вычислительных устройств. Из задач этой группы особый интерес представляет задача программирования поиска доказательства новых теорем в тех или иных областях математики. Для всякого, кто знаком с возможностями электронных цифровых машин, ясно, что в этой задаче нет ничего принципиально невозможного, однако при практическом ее решении обнаруживается целый ряд трудностей. Дело прежде всего в том, что цепи умозаключений, составляющие доказательство, будучи разложены на элементарные акты, оказываются, как правило, весьма длинными, поэтому для бессистемного поиска требуется огромное число проб, превышающее в сколько-нибудь интересных случаях возможности машины. Задача состоит в том, чтобы отыскать и запрограммировать стратегию поиска, позволяющую заранее отбросить подавляющее большинство комбинаций, которые заведомо не могут привести к цели. Такая стратегия призвана заменить то, что принято называть математической интуицией. Она должна, разумеется, использовать сильную сторону машин, заключающуюся в более быстром по сравнению с человеком просмотре тех или иных вариантов. Благодаря этому последнему обстоятельству машинная стратегия может быть более грубой, чем обычная человеческая интуиция, и оставлять большую область для окончательных поисков. Это, в свою очередь, позволяет надеяться, что машина может существенно расширить возможности человека в области установления новых математических (да и не только математических) фактов. Немного фантазируя, можно говорить о том времени, когда плодотворная творческая работа в области математики и других точных наук без применения электронных вычислительных машин будет невозможной, а успех исследования будет определяться прежде всего его искусством в программировании стратегии научного поиска.

Важное значение имеет также задача программирования различных неарифметических (точнее, не вполне арифметических) методов вычислительной математики, например, аналитических методов решения дифференциальных уравнений, интегрирования в конечном виде и т. п. Одна из простейших задач такого рода — машинное дифференцирование,

использующее таблицу дифференцирования простейших элементарных функций, — была недавно решена на малой электронной машине Академии наук УССР.

Одной из самых актуальных задач является применение электронных цифровых машин для управления производственными процессами. Решение этой задачи на современном этапе требует больших усилий как от инженеров, которые должны создать надежные, экономичные и малогабаритные типы электронных цифровых машин, так и от математиков, которые должны заняться изучением и программированием процессов управления различными производственными объектами. Особый интерес представляет программирование самонастраивающихся и «самообучающихся» процессов. В связи с тем, что управляющие машины являются, по существу, однопрограммными, большое значение приобретает задача построения алгоритмов для преобразования программ и для их минимизации. Ясно, что для управляющих машин, повторяющих одну и ту же программу десятки, а тем более сотни тысяч раз за короткое время, уменьшение программы даже на одну команду может дать заметный эффект. Минимизация сколько-нибудь сложных программ представляет собою, разумеется, нелегкое дело. Выход из положения и в этом случае может быть найден в постановке задачи минимизации на универсальные электронные вычислительные машины.

Существенное значение для дальнейшего развития вычислительной техники имеет вопрос о сочетании машин дискретного счета с машинами непрерывного действия. Одним из примеров возникающих здесь математических задач может служить хотя бы задача использования грубого решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, полученного на машине непрерывного действия, для максимального убыстрения процесса нахождения точного ее решения на машине дискретного счета.

Появление электронных цифровых машин с программным управлением привело к изменению взгляда на предмет и методы всей вычислительной математики. В состав предмета вычислительной математики теперь естественно включать всю теорию программирования, благодаря чему устанавливаются прочные связи между вычислительной математикой и математической логикой. Что же касается методов, то и здесь электронные цифровые машины внесли много существенных изменений: значение методов, использующих тригонометри-

ческие ряды, уменьшилось; наоборот, для статистических методов (методов Монте-Карло) появление электронных цифровых машин означало фактически второе рождение; сильно возросло значение итерационных методов. Переоценка всего арсенала средств вычислительной математики с точки зрения возможностей современной вычислительной техники еще не окончилась. Быстрейшее завершение этого процесса наряду с разработкой новых методов наиболее полно использующих возможности электронных цифровых машин, представляет собой важнейшую задачу вычислительной математики на современном этапе. Особенно большое значение имеет разработка новых эффективных методов решения многомерных задач математической физики.

Не менее важна задача всестороннего исследования новых методов, изобретаемых и применяемых (часто без достаточного обоснования) в процессе повседневной текущей работы действующих вычислительных центров.

Лаборатория вычислительной техники Института математики АН УССР в настоящее время также имеет ряд таких эмпирически найденных методов. Необходимо провести большую и кропотливую работу по сравнению различных методов с точки зрения объема и точности вычислений, а также относительной сложности программирования.

Интересным с точки зрения машинной математики является также и вопрос о таблицах. Как известно, таблицы тригонометрических функций, например, для электронных цифровых машин, практически не имеют ценности, ибо машине проще и быстрее посчитать значение тригонометрической функции с помощью какого-нибудь аналитического выражения (например, разложения в степенной ряд), чем искать это значение по таблицам. Вместе с тем в ряде случаев пользование таблицами может оказаться целесообразным. Более того, не исключена возможность, что при использовании машин окажутся выгодными новые виды таблиц. В качестве примера можно указать на задачу составления таблиц коэффициентов чебышевских приближений в том или ином классе задач.

В заключение кратко остановлюсь на работе в области вычислительной техники и вычислительной математики на Украине. В 1948—1951 гг. под руководством С. А. Лебедева в лаборатории вычислительной техники АН УССР была построена первая в Советском Союзе электронная цифровая машина (МЭСМ). В последующие годы коллективом лабора-

тории была сооружена специализированная цифровая машина для решения систем линейных алгебраических уравнений и выполнен ряд работ по применению электронных цифровых машин в народном хозяйстве. В настоящее время в лаборатории разрабатывается большая универсальная цифровая электронная машина «Киев» со скоростью около 5 000 умножений 40-разрядных двоичных чисел в секунду и повышенной надежностью. По инициативе Б. В. Гнеденко начата и успешно проводится исследовательская работа в области программирования (программирующая программа, использование статистических методов и т. п.). Большая работа по теории чебышевских приближений проводится в Институте математики АН УССР под руководством Е. Я. Ремеза.

ПРОБЛЕМНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ И ДРУГИЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭВМ*

В начальный период развития электронной вычислительной техники и систем математического обеспечения преобладала тенденция к универсализации. Крупный шаг в данном направлении был сделан с созданием ЭВМ третьего поколения (система ИБМ-360, единая система ЭВМ и др.), в которых слились два класса машин, применяемых для научных и для коммерческих целей.

Наряду с этим проявилась и тенденция к специализации прежде всего в так называемых системах реального времени (управляющие ЭВМ, в частности бортовые). Сейчас в связи с расширением применения ЭВМ и переходом к использованию их преимущественно в различного рода системах возникает острая необходимость разумной специализации машинных комплексов и соответствующих систем математического обеспечения. Реальность такой специализации подкреплена появившейся благодаря успехам микроэлектроники возможностью передавать все большую часть задач, решавшихся прежде с помощью программ, специализированным схемам и односторонней (пассивной) машинной памяти, используя принцип микропрограммирования. Ранее этому препятствовали недостаточная надежность и высокая стоимость

* Вестн. АН СССР, 1975, № 3, с. 18—24.

логических электронных цепей, затруднявшие создание хороших схем с большим числом логических элементов.

Сущность специализации, о которой идет речь, состоит прежде всего в том, что для разных классов применений ЭВМ должны снабжаться различными периферийными устройствами, а следовательно, и особыми системами математического обеспечения, делающими работу этих устройств взаимосогласованной. Разные классы применений требуют дифференцированного подхода к созданию комплексов из многих ЭВМ, к ориентации отдельных процессоров на те или иные специальные функции (коммутация, первичная обработка информации, работа с графической информацией и т. п.). Это, в свою очередь, оказывает влияние на организацию систем данных, систем команд и макрокоманд, на организацию прерываний и, конечно, на структуру и функции операционных систем. Как показывает практика, разумная специализация операционных систем может в несколько раз повысить эффективность работы ЭВМ в определенных классах системных применений. Наконец, специализация технико-математических комплексов влияет на состав и организацию библиотеки стандартных программ, так как в число стандартных попадают многие достаточно специализированные программы. Что же касается управления данными, то в специализированных комплексах автоматизируются все процессы пополнения, обновления и контроля банков данных, а также процессы создания временных рабочих массивов, передачи данных от одних программ к другим и т. п.

Первоначально подобные комплексы целесообразно создавать на базе обычных универсальных процессоров единой системы ЭВМ, комбинируя их, в случае необходимости, с миникомпьютерами и управляющими ЭВМ. На этом этапе формируется состав периферийного оборудования и осуществляется специализация операционных систем, прежде всего в части управления данными и ресурсами. Должны быть, разумеется, решены вопросы стандартизации набора миникомпьютеров и управляющих ЭВМ, их сопряжения с единой системой ЭВМ. В дальнейшем требования к увеличению эффективности оборудования, упрощению программирования и облегчению «общения» человека с машиной приведут к специализации процессоров, хотя каждый из них будет оставаться алгоритмически универсальным и потому в принципе пригодным для других применений.

Уровень специализации технико-математических комплек-

сов должен быть разумным в том смысле, чтобы была обеспечена возможность их эффективного использования в достаточно широкой области. Как известно, прогресс электронной вычислительной техники определяется, с одной стороны, возможностями технологии, а с другой — требованиями, вытекающими из практики использования ЭВМ. К сожалению, у нас до сих пор существует искусственный барьер между задачами, которые стоят перед конструкторами ЭВМ общего назначения, и задачами, диктуемыми системным применением ЭВМ. В результате при создании систем математического обеспечения пользователи зачастую понапрасну тратят силы, средства и время на решение программным путем тех задач, которые могли быть легко и просто решены при соответствующем усовершенствовании схем. Для устранения этого барьера было бы весьма полезно, чтобы разработкой проблемно-ориентированных технико-математических комплексов занялись не пользователи, а конструкторы ЭВМ. Это, во-первых, позволило бы изготавливать многие трудоемкие части будущих систем более квалифицированными силами и один раз для всех, а во-вторых (что, может быть, еще важнее), конструкторы ЭВМ благодаря более тесной и прямой связи с практикой получили бы новый мощный источник идей для совершенствования разрабатываемой ими техники.

Какие же типы проблемно-ориентированных технико-математических комплексов сейчас необходимо создавать?

В качестве первого типа или класса назовем комплексы, ориентированные на автоматизацию управления технологическими процессами, сбора и обработки экспериментальных данных, испытания сложных технических объектов. Среди задач, которые предстоит решить при разработке таких комплексов, следует назвать создание (на унифицированной элементной базе) ряда управляющих мини- и микрокомпьютеров, а также устройств связи с объектами, стандартизацию интерфейса (сопряжения) с датчиками и исполнительными механизмами и конструирование соответствующей аппаратуры, стандартизацию форм представления аналоговой информации, поступающей от различного рода самопишущих регистрирующих приборов, и разработку гаммы быстродействующих устройств для ввода этой информации в ЭВМ. Требуется также разработать эффективные операционные системы для иерархических многомашинных комплексов и принципы включения в системы аналоговых вычислительных устройств. Следующая задача — создание пакетов программ для

первичной обработки данных (сглаживание, интерполяция и т. п.). Нужны будут также устройства для убыстрения обработки информации в новых комплексах, например устройства для быстрого преобразования Фурье, параллельного опроса датчиков и т. п.

В отдельный класс можно выделить комплексы, предназначенные для подготовки данных и группового цифрового программного управления станками и другим оборудованием. Выделение этих комплексов в самостоятельный класс связано не только с их специфическими программно-языковыми средствами, но и с особыми перспективами их дальнейшего развития: имеется в виду широкое использование данных комплексов при создании промышленных роботов. Для роботов, снабжаемых «органами зрения» и системами тактильных («осязующих») датчиков, оказывается целесообразным разрабатывать специальные схемы, облегчающие быстрое решение задач распознавания образов. Сказанное в какой-то мере относится и к проблеме автоматической координации движений, т. е. создания набора соответствующих микрооператоров с учетом многих степеней свободы для исполнительных органов роботов.

Комплексы, предназначенные для использования в АСУ, ставят перед конструкторами ряд новых проблем. Помимо специфического набора периферийных устройств (регистраторы производства, специальные кассовые аппараты, устройства для изготовления и чтения перфоярлыков и т. п.), нужно создать специальные периферийные миникомпьютеры, ориентированные на первичную обработку больших массивов информации. Большое значение здесь, как и в предыдущих классах ЭВМ, имеет создание иерархических многомашинных комплексов и соответствующих операционных систем. Задача управления данными не ограничивается автоматической идентификацией их массивов и организацией их пересылок между внешней памятью и оперативным запоминающим устройством (ОЗУ). Необходима гибкая система управления специальным пакетом программ для любых комбинаторных преобразований и любых агрегирований, находящихся в комплексе массивов данных. Операционная система должна иметь возможность подготовки исходных данных к нужным для рабочих программ моментам времени, вместо того, чтобы начинать поиск этих данных и пересылку их в ОЗУ в процессе работы программ по соответствующей макрокоманде операционной системы (get в OS-360).

Что касается систем ведения больших информационных массивов, то здесь требуются более развитые, чем в OS-360, средства защиты информации от несанкционированного доступа.

Чрезвычайно важно организовать обмен информацией между различными комплексами как через каналы связи, так и путем прямой пересылки машинных носителей информации. При этом необходимо использовать носители более удобные, чем ленты или пакеты дисков, например, начинающие сейчас завоевывать популярность дискеты — гибкие малогабаритные диски, покрытые магнитным слоем. Отметим, что современные тенденции развития связи между ЭВМ укладываются в основном в две формы, представляющие собой аналоги обычной почтовой и телеграфной связи. Для ряда приложений в АСУ требуется аналог телефонной связи, при которой одна ЭВМ может обращаться к устройствам внешней памяти другой в обычном темпе их работы, допускающая одновременное обращение второй ЭВМ к устройствам внешней памяти первой (режим дуплексной связи).

Поскольку главная перспектива развития АСУ связана с созданием Единой государственной сети вычислительных центров по обработке экономической информации, напомним по крайней мере еще о двух моментах. Это, во-первых, разработка для указанной сети операционной системы, которая допускает создание любых временных конфигураций, входящих в сеть проблемно-ориентированных комплексов, и эффективное управление их совместной работой по решению сложных задач межведомственного характера. Такая работа, не нарушая жизненно важных функций управления, выполняемых отдельными комплексами, вместе с тем должна быть обеспечена необходимыми ресурсами. Осуществить это можно с помощью специальной сети диспетчерских ЭВМ (с централизованным управлением и соответствующими средствами связи), которые автоматически получали бы от всех подведомственных им комплексов данные о планах работы, а также о состоянии и загрузке имеющегося оборудования и выдавали бы оптимизированные планы управления создаваемыми конфигурациями.

Во-вторых, это управление распределенными банками данных, которое требует специальных автоматических каталогов информационных массивов в информационно-диспетчерской части сети и иерархического управления процессами поиска информации и формирования ее новых массивов

из любых наборов территориально удаленных машинных массивов.

Особый класс проблемно-ориентированных комплексов составляют вычислительные центры коллективного пользования с доступом для удаленных терминалов. Помимо чисто технических вопросов (комплексирование мощных ЭВМ, связь, абонентские пункты и т. п.), здесь возникает ряд специфических задач по математическому обеспечению. Это прежде всего обеспечение такого управления ресурсами, которое гарантировало бы высочайшую надежность работы комплекса, а во-вторых, создание специальных языково-программных средств для ведения диалога с комплексом в режиме разделения времени с большого числа удаленных терминалов.

При разработке комплексов, ориентированных на решение справочно-информационных задач, на первое место выдвигаются задачи создания устройств памяти большого объема (постоянные диски на сотни миллионов байт и др.), разумного сочетания машинной информации с системами микрофильмирования, библиотеками на микрофишах (сверхминиатюрное представление микрофильмов) и т. п. Возникает и много других проблем, связанных с автоматическим считыванием документов, автоматическим индексированием, общением с машиной на естественных языках, вводом и выводом информации при помощи человеческого голоса и др. Крайне существенна такая форма организации данных и управления выборкой, которая обеспечивала бы как пакетную обработку поступающих запросов, так и быстрые ответы на отдельные срочные и особо срочные вопросы.

Велика роль комплексов, ориентированных на автоматизацию проектно-конструкторских работ. Тут тоже есть свои специфические требования к периферийным устройствам и к организации работы системы. Помимо обычных графопостроителей и графических дисплеев, необходимы специальные конструкторские пульта, предоставляющие широкие возможности работы с графической информацией (одновременный вывод трех проекций, возможность изменения освещения и точки обозрения показываемых на экране объектов, получение фотокопий с экрана и т. п.). Нужны устройства для ввода графической информации, автоматического считывания координат и т. п.

Серьезная задача — стандартизация формы предоставления в ЭВМ графической информации, что должно позволить

создать стандартный пакет программ для любых геометрических преобразований чертежей и рисунков (изменение масштабов, повороты, сдвиги, перевод из одной проекции в другую и т. п.) с целью решения различного рода расчетных задач на основе выбора исходных данных непосредственно с чертежа. Таким путем могут решаться как геометрические задачи (определение площади, объема, центра тяжести и т. п.), так и задачи теоретической механики, сопротивления материалов, электротехники и др. Машинный архив чертежей стандартных деталей, блоков и устройств позволяет конструктору быстро подбирать элементы для требуемой конструкции.

Все описанные комплексы будут иметь весьма широкое поле применения. Как пример более специального комплекса назовем систему, ориентированную на задачи автоматизации перевода и редактирования. Ее основа — комплекс ЭВМ со специальными пультами для редакторов-переводчиков. На входе системы должны работать читающие автоматы, настраиваемые на различные шрифты. После прочтения первой страницы машинописного или печатного текста универсальные ЭВМ анализируют шрифт и настраивают на него входной читающий автомат. Далее происходит быстрое считывание всего текста, который отображается страница за страницей на специальном дисплее. Редактор с помощью светового карандаша и клавиатуры может осуществлять различные редакторские операции (вставить, переставить или изъять слово, изменить тот или иной знак и т. п.). Отредактированные части текста направляются в наборную машину, управляемую ЭВМ. В случае перевода с иностранного языка на пульте редактора-переводчика отображается как исходный иностранный текст, так и его перевод, выполненный каким-либо машинным алгоритмом. Улучшение качества перевода, его уточнение, если это необходимо, осуществляется переводчиком за пультом с помощью тех же операций, что и при простом редактировании.

Разумеется, работа над проблемой — ориентированными комплексами, несмотря на всю ее важность, не должна заслонять актуальные задачи развития вычислительной техники как таковой, а также исследования теоретического характера, определяющие пути совершенствования ЭВМ и систем общего математического обеспечения.

Проблема надежности ЭВМ по-прежнему продолжает оставаться весьма важной. Помимо обычных способов ее реше-

ния (повышение надежности элементов, дублирование, резервирование, аппаратный и программный контроль), в последнее время развивается и ряд новых методов. Это прежде всего применение во всех цепях машины кодов, обеспечивающих исправление ошибок, что приводит к гораздо более экономным решениям, чем, скажем, утроение аппаратуры в особо ответственных управляющих ЭВМ. Другой способ — использование блочного резервирования с самонастройкой (изменением функций блоков); при этом возникновение отказов приводит к уменьшению производительности ЭВМ, но не за счет важнейших из выполняемых ею функций, для которых уровень резервирования гораздо выше, чем для второстепенных.

Указанные два метода позволяют создавать ЭВМ со временем безотказной работы по основным функциям до десятков лет.

Повышение быстродействия ЭВМ за счет скорости действия ее элементов требует, помимо использования традиционных путей, освоения новых физических эффектов. По-видимому, весьма перспективен в этом отношении эффект Джозефсона, характеризующийся очень высоким быстродействием физический процесс, который можно использовать как в запоминающих устройствах, так и в логических цепях. В связи с тем, что сегодня уже решены многие принципиальные вопросы, позволяющие строить оптические вычислители, можно говорить о повышении частоты работы оптических элементов (имеется в виду, естественно, частота следования дискретных импульсов света, а не его несущая частота). Огромный интерес представляют физические эффекты взаимодействия полей, которые могли бы создать возможность параллельной обработки дискретной информации. Пусть, например, импульс света, несущий информацию о матрице A , которая состоит из нулей и единиц, под воздействием другого (управляющего) импульса света осуществляет определенное преобразование $A \rightarrow f(A)$ этой матрицы. Если бы в нашем распоряжении был набор управляющих импульсов, способных осуществить полную систему¹ таких преобразований, то мы могли бы построить оптическую матрицу, фактическое быстродействие которой было бы намного выше, чем частота следования импульсов.

¹ Система преобразования $A \rightarrow f_i(A)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) называется полной, если любое преобразование $A \rightarrow f(A)$ может быть получено в виде суперпозиции преобразований из этой системы.

По мере новых успехов микроэлектроники, и прежде всего технологии производства больших интегральных схем, все более приближается непосредственное практическое использование идей, развиваемых в теории вычислительных сред.

Создание недорогой оперативной памяти большого объема (порядка 10^{10} — 10^{12} байт) явилось бы настоящей революцией в вычислительной технике, полностью изменив нынешние взгляды на архитектуру и операционные системы ЭВМ. Крупные перспективы здесь может открыть использование достижений голографии (с применением быстродействующих обратимых пленок) и уже упоминавшегося эффекта Джозефсона.

Магнитодоменная память призвана заменить громоздкую и неудобную внешнюю память на магнитных лентах и магнитных дисках. Хорошо согласуясь (без применения специальных буферов) с любыми скоростями записи и чтения, такая память идеальна для различного рода автономных устройств подготовки данных и обмена информацией (путем транспортировки носителей) между ЭВМ.

По-прежнему одним из важнейших направлений совершенствования ЭВМ остается упрощение общения человека с машиной. Успехи технологии больших интегральных схем и предоставляемые ею возможности дальнейшего их усложнения позволяют по-новому подойти к решению таких проблем, как ввод в ЭВМ информации голосом, распознавание рисунков, оперирование трехмерными цветными изображениями и т. п. Одна из ближайших задач — совершенствование систем диалога человек — машина по линии как технических средств и организации системы, так и языков диалога.

Повышение «интеллекта» машин в наши дни происходит в основном за счет приближения внутренних машинных языков к проблемно ориентированным языкам высокого уровня. Это направление, зародившееся в свое время в СССР (серия машин «Проминь» — МИР), получило у нас сейчас широкое распространение. Дальнейший прогресс в этой области мы связываем прежде всего с применением ЭВМ для автоматизации доказательства теорем и других логических построений.

Известно, что работы в этом направлении шли до сих пор по пути поиска универсальных доказывающих процедур в рамках классической математической логики. Как и следовало ожидать, хорошие результаты были получены лишь в рам-

ках самой математической логики, раскладывающей доказательства на мельчайшие элементарные кирпичики. В содержательных разделах математики, где используются гораздо более крупные строительные блоки, нужен совершенно другой подход. Развивая его, в Институте кибернетики Академии наук УССР построили практическую математическую логику, которая соотносится с классической примерно так же, как современный язык программирования высокого уровня (например, Алгол или PL-1) — с языком простейшей машины Тьюринга.

Имея в виду ту роль, которую сыграла классическая математическая логика в становлении современных ЭВМ, мы рассчитываем, что наша практическая математическая логика поможет (и уже помогает сегодня) понять, в каком направлении следует развивать архитектуру ЭВМ, чтобы они в полной мере заслуживали названия искусственного мозга.

Конечно, при проектировании машин с высоким уровнем интеллекта резко возрастает объем работ на логико-алгоритмическом уровне. Особенно серьезным является тот факт, что обычная интуиция, достаточно хорошо «работавшая» при создании таких простейших схем, как сдвиговые регистры, сумматоры и т. п., теперь уже не приводит к скольконибудь удовлетворительным решениям. Необходимо поэтому иметь систему автоматизации проектирования ЭВМ, позволяющую осуществлять формальные преобразования и оптимизацию схем и алгоритмов без изменения выполняемых ими содержательных функций. Подобная система разработана в Институте кибернетики Академии наук УССР и успешно функционирует. На очереди — интеграция ее с системами технического проектирования, имеющимися сегодня во многих институтах и конструкторских бюро, а также с системой автоматического изготовления сложных микроэлектронных схем на основе специализированной ЭВМ.

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭВМ И ЗАДАЧИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ *

Хорошо известно, что первые электронно-вычислительные машины (в значительной мере это имеет место и для современных машин) были построены по принципам, которые получили название принстонских, или принципов фон Неймана, американского ученого, который руководил в Принстоне группой, разрабатывающей принципиальные основы структуры ЭВМ универсального плана с запоминаемой программой.

Первый принцип — максимальная простота операционного устройства и, как следствие, простой машинный язык, его низкий уровень. Это предопределялось тем обстоятельством, что устройства преобразования информации, например сумматоры, сдвигающие регистры и т. п., требовали для своей реализации электронных ламп и сложных схем. Память можно было реализовать более дешевыми средствами: на электронно-лучевых трубках или впоследствии на ферритовых кольцах. Устройства преобразования информации были более дорогими по сравнению с памятью. Реализация сложных операций обработки информации осуществлялась за счет усложнения программ, размещаемых непосредственно в памяти ЦВМ.

Второй принцип — последовательный командно-адресный принцип управления. При этом команда несет в себе информацию о данных, размещающихся в памяти. Команды выполняются последовательно — одна за другой, возможно, с изменением их порядка в программе, но именно одна за другой; в этом как раз и заключается последовательный принцип.

Третий принцип — линейная организация памяти, последовательная нумерация ячеек и, следовательно, представление лишь простейших структур данных в памяти. Правда, в силу универсальности машин существует принципиальная возможность организовать в памяти произвольные структуры данных. Как известно, это можно сделать, используя различные указатели, связки, но эти средства реализуются программным путем, а речь идет о структуре схемного оборудо-

* Препр. ИК АН УССР, № 77-21. Киев, 1977. 37 с.

вания (hardware). В hardware память организована как линейная структура. И это, конечно, очень ограничивает возможности применения машин для обработки информации, требующей сложных структур данных.

Наконец, четвертый принцип — «жесткая» архитектура ЦВМ, т. е. отсутствие возможностей изменения связей между устройствами, набора команд и т. п.

Следует указать, что уже в самом начале работ по созданию машин второго поколения стало ясно, что для дальнейшего развития вычислительной техники принципы фон Неймана могут быть слишком ограничительными, и были выполнены работы, в которых допускались частичные отступления от этих принципов. В Институте кибернетики родилось одно из таких направлений, связанное с повышением уровня машинного языка, повышением машинного интеллекта. В результате развития этого направления были созданы машины класса МИР, а также разработан проект машины «Украина» (который, однако, не был реализован). Тенденция отступления от принципов фон Неймана нашла дальнейшее развитие в американских машинах (B-5000, B-6700 и др.), разработчики которых пошли по пути снижения жесткости архитектуры за счет гибкой связи с внешними устройствами. Благодаря возможности доступа к различного рода периферийным устройствам не через один, а через несколько каналов в машинах третьего поколения была получена некоторая вариация структуры, правда, очень ограниченной. Однако в полной мере комплексное отступление от принципов фон Неймана предпринято еще не было и построение ненеймановской машины — это вопрос в настоящее время пока еще не решенный.

В свое время мне пришлось высказывать соображения по поводу того, что развитие микроэлектроники рано или поздно может привести к такому положению, когда реализация сложных схем переработки информации или даже таких традиционных схем, как схема типа сумматор и т. п., по стоимости в расчете на один триггер (на один бит запоминаемой информации) сравняется со стоимостью простого запоминания информации в памяти. И тогда классическая схема структурной организации ЦВМ и прежде всего первый принцип фон Неймана сделаются совершенно нерациональными. Кроме того, в плане практического применения ЦВМ все в большей мере проявляется тенденция, в соответствии с которой все более существенную роль играют не арифмети-

ческие операции, а операции, связанные с поиском информации, с работой со сложными структурами данных, с преобразованием буквенной, графической информации и т. д. Как известно, в машинах третьего поколения больше половины выполняемых операций были операции именно с такого рода данными, а не вычислительные операции. Сейчас этот процент еще больший. Отход уже от первых двух принципов фон Неймана приводит к мысли о построении мозгоподобных структур ЭВМ, в которых переработка информации может быть распределена по всей памяти. В таких структурах может отсутствовать резкая граница между устройством памяти и операционным устройством, с каждой ячейкой памяти может быть соединено свое собственное операционное устройство, которое в совокупности с другими может осуществлять простейшие, возможно, специализированные преобразования, но по всей памяти.

Сейчас мы находимся в начале такого периода, когда микроэлектроника достигла уровня, при котором реализация этих программных мозгоподобных машин становится возможной. Правда, сегодня еще мы на начальной стадии этого процесса, когда уровень схем не позволяет в полной мере осуществить эти идеи. Это будет в дальнейшем. А сейчас, как вы знаете, микроэлектроника знаменуется появлением больших интегральных схем, в которых на один кристалл приходится более десяти тысяч вентилях (по американским данным). Известно, что для построения процессора на одном кристалле, т. е. для реализации на одном кристалле операционного устройства, устройства управления и даже простейшей микропрограммной памяти достаточно около шести тысяч вентилях. Таким же образом можно реализовать блоки памяти и каналные устройства. В настоящее время есть уже такие процессоры, работающие со словами малой разрядности. Таким образом, в мировой практике имеются такие микропроцессоры, которых достаточно уже сейчас для построения управляющих машин. В этих условиях целесообразно некоторое промежуточное решение, а именно процессоры, имеющие ненеймановскую структуру и организованные в систему связями, которые осуществляются с отступлением от неймановских принципов. Это приводит к многопроцессорным системам мозгоподобного типа, в которых вместо отдельных нейронов мозга ставятся маленькие неймановские процессоры, а связи между ними в большей степени напоминают те связи, которые имеются в мозгопо-

добных структурах, чем в традиционных неймановских машинах. Цели, которые могут быть достигнуты с появлением многопроцессорных машин, следующие.

Первая и самая главная — это, конечно, увеличение быстродействия за счет распараллеливания вычислений (под вычислениями имеется в виду общая обработка информации, а не только работа с числами. Второе — повышение эффективности управления за счет его распараллеливания.

Параллельность поиска информации при решении различных информационно-справочных задач реализована, но только частично в спецпроцессорах, об этом будет сказано дальше. Кроме повышения быстродействия в тех случаях, о которых уже говорилось, по-прежнему остается актуальной задача упрощения программирования и общения с машинами, а также повышения надежности за счет возможности замены одних частей машины другими при гибкой реализации архитектуры.

Теперь рассмотрим то, что уже сделано сейчас в области построения мультипроцессорных систем и параллельных вычислений в мировой практике.

Рассмотрим прежде всего обычные мультипроцессорные системы. К ним относится большое количество различного рода систем ЭВМ, которые, например, описаны в книге «Мультипроцессорные системы и параллельные вычисления» под редакцией Энслоу. Эти многопроцессорные системы состоят из процессоров и общей памяти, и их работа организована общей программой. При этом данные помещаются в обобщенной оперативной памяти. В рассматриваемых системах, как правило, вводятся еще специализированные процессоры типа каналов, которые используются в машинах фирмы IBM, либо процессоры ввода-вывода, причем этих процессоров также может быть несколько. В результате распараллеливаются, с одной стороны, операции с внешними устройствами, а с другой — операции по выполнению основной программы или группы программ. Распараллеливание получается следующим образом. Предположим, что выполняется одна программа и имеются возможности перехода в этой программе на параллельно и одновременно выполняемые независимые ветви, средства описания которых предусматриваются в языках программирования. Распараллеливание в этом случае заключается в том, что эти ветви выполняются на соответствующих процессорах. Точно так же при использовании мультипрограммного режима в случае, когда име-

ется большое количество мелких задач, тоже используется некоторое множество процессоров. Однако как в первом, так и во втором случаях процессоры работают с общей памятью.

Недостаток мультипроцессорных систем рассмотренного типа заключается в следующем. Несмотря на то, что в таких системах пусть частично, но решается задача распараллеливания вычислительного процессора, практическая реализация распараллеливания тем не менее связана с большими трудностями, особенно при решении одной сложной задачи. Разрешение этих трудностей в первую очередь влечет резкое усложнение операционных систем. Кроме того, затрачивается время на разрешение конфликтных ситуаций, когда разные процессоры обращаются к одному и тому же участку оперативной памяти, например, за теми же данными, которые нужны для параллельных ветвей, или за стандартными подпрограммами. Разрешение этих конфликтов снова приводит к усложнению операционной системы в части создания средств обработки очередей и др., что в целом ведет в конце концов к снижению быстродействия системы.

Чем больше процессоров в системе работает в таком режиме, тем в большей степени указанные сложности становятся заметными. Поэтому в итоге мультипроцессорные системы с общей памятью, на практике, как правило, содержат небольшое количество процессоров. В результате повышение быстродействия оказывается не очень большим. Например, построенная по такому принципу машина СДС-6600 в одном из первоначальных вариантов содержала десять периферийных процессоров. Ее истинное быстродействие в среднем по статистике почти что на порядок ниже, чем суммарное быстродействие всех процессоров. То же самое касается таких машин, как Burroughs D-825, Burroughs B-6700 и B-7700, Cyber-72, -73, -74, -76 и т. д. Рассмотренная форма организации мультипроцессорных систем показывает, что отказ от одного из принципов фон Неймана с одной какой-то целью, например с целью повышения быстродействия, не может быть использован в полной мере для достижения этой цели, если при этом не изменить должным образом все остальные принципы. Поэтому речь должна идти об одновременном изменении всех принципов. Об этом будет сказано ниже, а сейчас рассмотрим некоторые другие подходы, связанные с построением мультипроцессорных систем.

Несколько лучшие результаты получаются в том случае, когда мультипроцессорные системы строятся на принципах

обобщения ресурсов не только по памяти, но и по устройствам переработки информации. Это значит, что при построении мультипроцессорной системы строятся обобщенные ресурсы одного типа из всех используемых в системе процессоров, которые изымаются из состава этих процессоров, например обобщенная группа сдвиговых регистров, обобщенная группа сумматоров и т. д. В результате в системе образуется общий вычислительный ресурс, который используется в процессе переработки информации по мере надобности. Следовательно, использование процессора осуществляется не столько целиком, сколько в каком-то смысле по частям. В таких системах, с одной стороны, происходит дальнейшее усложнение операционной системы, поскольку появляется необходимость обращения к дополнительному ресурсу, и это, конечно, является недостатком таких систем. Но, с другой стороны, появляются несколько большие возможности в ускорении процессов вычислений. Надо сказать, что такой принцип — принцип общего ресурса — не нов: он впервые был реализован, правда, в довольно примитивном виде, еще во французской машине «Гамма-60», разработка которой относится к началу 60-х годов. Затем этот принцип был применен в американских работах, прежде всего в работах Флинна. В 1966—1972 гг. этот принцип получил развитие в виде так называемой «карусельной» структуры машины, которая была реализована Флинном в одном экземпляре. Экспериментальный образец этой машины содержал четыре кольца по восемь процессоров. В машине были использованы самые простые процессоры, предназначенные для выполнения только операций чтения из памяти, засылки на регистр, чтения с регистров и засылки в оперативную память. Было организовано последовательное подключение этих простейших процессоров к буферам, созданным в общем поле памяти и содержащим управляющую информацию и данные. В качестве вычислительных элементов здесь использовались сумматоры, умножающие устройства, причем устройства не типа параллельного умножителя, который был в машине «Стрела», а типа умножителя со своим собственным микропрограммным устройством управления. В одном процессоре одной из каруселей может выполняться обращение к ОЗУ, т. е. считывание или засылка туда операндов, производится «накачка» буфера и т. д. Такая организация в целом оказалась более эффективной с точки зрения повышения быстродействия, чем обычные, традиционные, мультипроцессорные системы. Однако здесь

возникли другие сложности, которые в свое время оказались труднопреодолимыми, в частности связанные с большим расходом аппаратуры. При переходе к БИСам — схемам большой интеграции — этот недостаток в значительной мере исчезает, поскольку в наше время стоимость биполярных схем на БИСах быстро снижается. Становится возможной достаточная избыточность аппаратуры, а значит, и упомянутых выше принципов организации.

Представляет интерес повышение быстродействия отдельных процессоров. Такие процессоры могут обладать внутренним распараллеливанием вычислительного процесса. Можно указать три различных подхода к организации соединения этого распараллеливания.

Первый подход связан с тем, чтобы распараллелить векторно-матричные операции, выполняемые над двумерными операндами. Естественно, что если распараллеливаются двумерные операнды, то такое распараллеливание можно использовать и для работы с многомерными массивами. Этот принцип реализован в машинах SOLOMON и ILLIAC-IV. В машине SOLOMON использовались 1024 процессорных элемента, а в ILLIAC-IV в одном процессоре — 64 процессорных элемента. Правда, SOLOMON — более ранняя машина и в этой машине использовались очень простые операции, а сама машина служила для решения сравнительно узкого класса задач. В машине ILLIAC-IV в процессорных элементах реализуются более сложные операции, которые позволяют достаточно эффективно распараллеливать произвольные матрично-векторные операции. Естественно, принимаются меры к тому, чтобы ускорить процесс вычислений в каждом процессорном элементе. В частности, в ILLIAC-IV каждый процессорный элемент имеет среднее быстродействие (по тем операциям, которые он выполняет) около 3 млн. оп./с и при одновременной работе всех 64-х элементов получается около 200 млн. оп./с.

Недостаток такой матричной организации параллельных вычислений состоит в том, что эта параллельность используется только тогда, когда приходится работать с векторами и с матрицами, т. е. когда реализуются операции линейной алгебры. Поскольку в современных ЦВМ более половины операций — это вообще не вычислительные операции и, кроме того, в самих вычислительных операциях далеко не всегда имеют место матричные вычисления, то среднее быстродействие на случайном потоке задач в ILLIAC-IV, ко-

нечно, существенно ниже и в определенном случае доходит до скорости работы одного процессорного элемента, т. е. до 3 млн. оп./с. Поэтому ILLIAC-IV в настоящее время используется в основном в сетях, в частности в сети ARPA, в качестве спецпроцессора для выполнения подпрограмм, реализующих операции линейной алгебры.

Следующий способ распараллеливания внутри одного процессора основан на использовании так называемого конвейерного принципа переработки информации и связан с использованием метода, получившего название «синхронной накачки». Здесь процессорные элементы соединяются последовательно друг с другом, причем каждый процессорный элемент, специализируется для выполнения определенных функций. Опять-таки идея конвейерного метода довольно старая. В еще достаточно примитивном виде она впервые реализована в английской машине ATLAS, а затем в IBM-360/195 — самой быстродействующей из серии 360. Смысл конвейерного принципа переработки информации состоит в том, что процессорные элементы выстраиваются в линейку и работают над выполнением операций так же, как работают люди на конвейере. При использовании конвейерного принципа в тот момент, когда первый процессорный элемент осуществляет выборку команд, второй — занимается уже интерпретацией выбранной ранее команды, а третий — чтением операнда или операндов (возможно, также распределенных между элементами), четвертый — собственно выполнением операции, причем уже в более изощренных конвейерах само выполнение операций тоже раскладывается. В случае, например, выполнения операций с плавающей запятой на первом шаге производится сравнение порядков, на следующем этапе происходит выравнивание порядков, далее — сложение мантисс, снова нормализация — и все это отдельные операции вычислительного процесса, которые распределяются по конвейеру. И если в конвейер нагнетается соответствующий поток команд таким образом, что конвейер будет все время загружен, то в этом случае можно ожидать повышения быстродействия системы в целом. Следует отметить, что определенное ускорение в результате использования конвейерного принципа можно получить и в рамках выполнения одной команды за счет некоторого совмещения.

Такие и более сложные интерпретаторы и конвейеры для потока команд были реализованы в 70-е годы, прежде всего в машине STAR-100 фирмы Control Data, которая появилась

в 1971 г., затем в компьютере ASC фирмы Texas Instruments. В STAR-100 каждый конвейер характеризуется быстродействием в 25 млн. оп./с. В машине ASC быстродействие каждого из 4-х конвейеров — 16 млн. оп./с. В этой машине наряду с конвейером также используется мультипроцессирование в классическом виде. Благодаря этому при благоприятных условиях можно запускать четыре конвейера параллельно и получать достаточно хорошие результаты.

В процессорном элементе такой системы, естественно, используются быстродействующие и сверхбыстродействующие элементы, но за счет того, что самые простые операции осуществляются на каждом этапе конвейера, получается большое быстродействие. Скажем, цикл работы одного процессорного элемента в конвейере машины ASC составляет 16 нс. И в этом случае можно выполнять одну операцию независимо от окончания другой. Если не ждать результатов предыдущей операции, то, таким образом, скорость работы по переработке потока команд будет равняться скорости работы процессорного элемента, т. е. в данном случае каждые 16 нс. на входе конвейера получаются уже готовый результат, обработанная полностью команда и выполненная полностью операция. Но это не всегда. Классическим примером может служить векторная операция. Если операции над компонентами вектора по заданным формулам осуществляются независимо, то тогда, конечно, такой конвейер работает очень хорошо. Если же, как это часто встречается, результат выполняемой команды зависит от предыдущих, скорость работы конвейера снижается. Правда, при этом результаты остаются на регистрах конвейера и могут быть использованы следующими командами без дополнительных обращений в оперативную память.

При конвейерном принципе возникает вопрос об обеспечении сверхбыстродействующих конвейеров необходимым потоком команд и данных, поскольку скорости работы оперативного запоминающего устройства и самого конвейера не равны по порядку. Обычно применяется оперативная память большого объема со временем обращения рабочего цикла не более 500 нс, в то время как один цикл работы конвейера составляет 16 нс. Существуют разные способы ускорения обращения к памяти. Ускорение обращения к памяти достигается за счет того, что употребляется так называемое перекрытие в памяти (overlapping). Принцип перекрытия состоит в следующем: память разбита на блоки, команды помещают-

ся не в последовательных ячейках, а в последовательно пронумерованных блоках. Другими словами, последовательно идущие команды программ помещаются так: первая команда программы — в первой ячейке первого блока, вторая команда программы — в первой ячейке второго блока, обращение к которому идет независимо от блока первого и т. д. В результате этого последовательные цепочки команд могут выбираться одновременно из разных блоков. Но такая возможность, естественно, существует не всегда. В случае наличия в программах команд условных переходов происходит разрушение естественных последовательностей команд и в результате этого выбранные ранее, помещенные синхронно в конвейер команды просто остаются неиспользованными, поскольку надо организовывать новую выборку команд.

Достаточно длинные линейные участки программ встречаются сравнительно часто, и в целом этот метод с точки зрения увеличения быстродействия дает неплохие результаты.

Второй способ ускорения обращения в памяти — это использование специальных сверхбыстродействующих запоминающих устройств малого объема с малым циклом обращения, равным примерно циклу работы процессорного элемента. Обычно это небольшое количество регистров, куда может быть выбрана соответствующая операция. В этом случае если в цикле имеются сравнительно короткие формульные вычисления, то в принципе все команды этого цикла и операнды можно поместить в сверхбыстродействующую память. А поскольку цикл повторяется многократно (например, когда это итерационный цикл при вычислении степенных рядов и т. д.), то в таком случае разницу в быстродействии конвейера и оперативной памяти можно компенсировать и без перекрытия в памяти. Причем здесь можно получать высокое быстродействие, особенно в случае, когда на достаточно длительный срок работы по этому циклу есть полный запас информации и команд в сверхбыстродействующей памяти. В STAR-100 имеется 4 блока по 30 процессорных элементов в каждом. На конвейере каждый процессорный элемент выполняет по 25 млн. оп./с. Таким образом, если конвейер работает не вхолостую и распараллеливание по конвейеру действительно полное, то производительность STAR-100 составляет порядка 100 млн. оп./с. Конвейерный процесс с точки зрения возможностей распараллеливания более универсальный, чем матричный, потому что он может применяться не

только для классических векторных операций, но и для формульных вычислений. В этом смысле конвейер более универсален. Глубина распараллеливания в случае, когда на конвейере осуществляются векторные операции, может оказаться намного ниже. Это связано с тем, что глубина распараллеливания операций на конвейере определяется его длиной. Конвейер настраивается на операции такого типа, и его длина может оказаться меньше, чем соответствующее количество процессорных элементов в матричных процессорах. Поэтому увеличение скорости на векторно-матричных операциях в конвейерных процессорах, как правило, меньше, чем в матричных. Зато среднее ускорение быстроедействия в конвейерах получается обычно большим.

Однако статистические данные (они получены американцами) показывают, что при произвольных программах рост производительности вычислительной машины с конвейерами изменяется примерно по логарифмическому закону. Это означает, что если через N обозначить количество процессорных элементов в конвейере, то скорость в среднем возрастает не в N раз, а в $\log_2 N$ раз. Такая скорость роста, естественно, очень мала. Именно поэтому делать длинные конвейеры нецелесообразно.

Конвейеры могут иметь гибкую структуру, т. е. часть конвейерных элементов может подключаться из одного конвейера в другой. Благодаря этому можно настраивать конвейеры на специальные вычисления. Например, если часто встречаются определенные операции, то можно ускорять выполнение именно этих операций. Это тоже резерв.

Следующий способ распараллеливания — это так называемые ассоциативные процессоры. Переходя к рассмотрению этого способа распараллеливания, следует заметить, что во всех ранее рассмотренных примерах от принципов фон Неймана все-таки отступают мало. Отступают от первого принципа, используя все более и более усложненные процессоры, частично отступают от четвертого, от жесткой структуры, потому что конвейеры или карусели могут в каком-то смысле изменять структуру машины, организацию связей в машине. Но другие принципы фон Неймана при этом не нарушаются. В частности, поток команд, которым снабжаются процессорные элементы из оперативной памяти, остается последовательным и распараллеливается только тогда, когда это предусматривается в соответствующей программе, т. е. организуется несколько независимых потоков.

Таким образом, линейная организация памяти сохраняется.

В ассоциативных процессорах делается первая попытка отойти от линейной организации памяти. Такие системы в настоящее время созданы, но они созданы главным образом как специализированные. Это, например, системы OMEN-60 и STARAN. Система STARAN была сконструирована специально для управления воздушным движением в районе крупных аэропортов. Особенность этой системы состоит в том, что в ней обрабатывается очень большое количество информации, поступающей от отдельных локаторов. Понятно, что здесь можно осуществлять в значительной мере параллельную обработку слежения за каждым движущимся воздушным объектом. В результате на этом классе задач система STARAN в среднем выполняет 500 млн. оп. с и, таким образом, характеризуется рекордным быстродействием.

О системе STARAN следует сказать более подробно. Несмотря на то, что эта система в принципе является универсальной и на ее основе можно решать любые задачи, по существу, она сугубо специализированная и ориентирована на решение задач управления прежде всего воздушным движением, системами ПВО и т. д. Существенно важной особенностью этой системы является использование в ней памяти специального вида — ассоциативной. Идея использования такой памяти в системе STARAN состоит в следующем.

Матрица памяти имеет размер 256×256 бит. К этой памяти возможны обращения как по строкам, так и по столбцам. Можно, например, выбрать одну строку из 256 бит и в этой строке разместить определенные операнды либо команды, скажем, несколько коротких 16-битовых слов, представляющих какие-то независимые объекты, предположим, те же самолеты. Могут быть, конечно, и более длинные слова, например 32-битовые и т. д. С каждой строкой матрицы соединен свой процессорный элемент. Это позволяет выполнять операции одновременно над 256 строками, т. е. в каждом процессоре только над теми операндами, которые помещаются в одной строке матрицы. В других случаях нужно осуществлять пересылки внутри этой матрицы, которые тоже организуются. Поскольку рассматриваемая система специализированная, то в процессорных элементах реализуются достаточно простые операции. Здесь совсем нет, например, таких операций, как операции над числами с плавающей запятой и т. д. Это в значительной мере упрощает и ускоряет обработку информации собственно в процессорах.

С другой стороны, в такой памяти можно обращаться к матрице по столбцам. И здесь оказывается возможным сделать то, чего не допускают никакие другие процессоры ни в мультипроцессорных системах, ни в конвейерных, ни в матричных процессорах типа ILLIAC-IV, а именно распараллеливать операции поиска информации. Потому что при обращении к матрице по столбцам можно параллельно, на тех же самых арифметических устройствах или процессорных элементах выполнять сравнение одного из разрядов или даже группы разрядов с заданным признаком сразу и сразу выделять необходимую строку. В общем это и делает применяемую память на матрицах ассоциативной. Но это и позволяет резко ускорить операции поиска информации, что всегда являлось камнем преткновения для обычных схем ускорения вычислений, когда информация помещается в линейной памяти.

Еще одно направление связано с однородными средами, которые начали развиваться также с конца 50-х годов. В нашей стране эти исследования первоначально проводились в Новосибирске. Я в свое время поддерживал эти исследования, особенно теоретические исследования, потому что идеи однородных сред уже ближе, так сказать, к мозгоподобным структурам. И поэтому я предвидел, что они смогут быть реализованы на соответствующей элементной базе пусть даже в отдаленном будущем. Определенный научный задел в области однородных вычислительных сред был сделан не только у нас. Потом этим стали заниматься почти во всех странах, где развита электроника и вычислительная техника. В чистом виде идея однородных структур состоит в том, что делается некий универсальный элемент, который может выполнять операции над однобитовой информацией: операции булевой алгебры, операции запоминания плюс операции связи с соседями. Эта среда, предположим, может помещаться в каком-то трехмерном объеме. В результате у каждого элемента среды получается по шесть соседей: два по каждой оси координат. Все элементы среды связаны соответствующими каналами, по которым может осуществляться пересылка информации. Каждый элемент еще характеризуется некоторым внутренним состоянием, которое определяет настройку каждого из элементов. Теперь элемент может просто запоминать информацию, которая приходит к нему от соседей, может передавать тот бит информации, который в нем запомнен по одному из шести направлений, может с этим битом осу-

щественно, что в такой среде имеется самая большая возможность распараллеливания вычислительных процессов, которая только возможна. Трудности состоят в том, что программирование здесь делается невероятно трудным. Фактически для того, чтобы можно было спроектировать однородную среду, нужно осуществлять не только организацию программирования, но и организацию проектирования среды. Другими словами, из этих элементов фактически надо спроектировать машину, настроить на решение задачи элементы и только после этого осуществлять требуемое преобразование информации.

Вторая трудность, возникающая при проектировании однородных вычислительных сред, заключается в том, что применительно к таким системам остаются практически неизученными вопросы, связанные с преобразованием управляющей информации, которая относится к самой настройке элементов среды. Но такая настройка должна быть органически связана с информацией, которая перерабатывается, с входными, выходными и промежуточными данными программы. Кроме того, настройка должна еще учитывать наличие свободных областей в среде, т. е. множество не занятых вычислениями среды элементов.

Однако движение такой управляющей информации в однородных средах еще должным образом не рассматривалось. В результате системы, которые можно отнести к однородным средам, до настоящего времени остаются жестко настраиваемыми. У разработчика имеется время и возможность выполнить настройку однородной среды, управляющая информация при этом циркулирует в вычислительной машине, на которой программируется решение задачи. После этого такая система имеет дело только с обрабатываемой информацией.

Таким образом, те работы, которые проводятся в нашей стране в области создания однородных вычислительных сред, связаны с разработкой сред с жесткой структурой. Поскольку каждый элемент однородной среды многофункциональный, т. е. он может служить и для связи, и для обработки информации, и для ее запоминания, то построение однородных сред связано с введением структурной избыточности. Эта избы-

точность определяется прежде всего необходимостью установления длинных связей. Но наличие таких связей снижает эффективность переработки информации не только вследствие значительных аппаратных затрат, но и вследствие того, что в длинных цепочках, в которые вместо шин включаются элементы с соответствующими электрическими характеристиками, происходят дополнительные задержки и понижение скорости работы за счет времен распространения сигналов. Поэтому однородная среда не является в полной мере мозгоподобной структурой. Мозгоподобная структура может быть устроена таким образом, что на поверхности находятся элементы активной памяти, сами нейроны, а остальная часть используется для того, чтобы обеспечить соединение нейронов, их коммутацию. Т. е. для организации коммутации в мозгоподобной структуре необходимо иметь намного большее количество элементов и возможностей. Для соединения нейронов друг с другом используется прорастание дендритов и аксонов в пределах одного полушария. Это значит, что в мозгоподобных структурах не только соседние элементы имеют возможность устанавливать быструю связь между собой, но и очень далекие. Причем если в трехмерной однородной среде для каждого элемента имеется только шесть соседей, то в мозгоподобной структуре количество таких отростков измеряется сотнями. Значит, в такой структуре каждый нейрон может установить связь с сотнями других нейронов. Таким образом, в мозгу реализуются гораздо более сложные структуры организации связи, чем в классических однородных средах. Это еще один недостаток классических сред.

В 1973—1974 гг. были высказаны принципы построения рекурсивных ЭВМ. В разработке этих принципов я тоже принял участие и хочу остановиться на них более подробно.

Я специально не рассказываю только о рекурсивных машинах по той причине, что принципы организации их в чистом виде окончательно еще не проработаны. Остаются еще нерешенными многие вопросы, и сейчас я приступаю к части не столько даже информационной, сколько к проблемной, хотя некоторые вопросы нам уже в настоящее время и ясны. Здесь я специально хочу подчеркнуть, что рекурсивный принцип организации машин, о котором пойдет речь ниже, хотя он и является универсальным, но тем не менее не исключает, а предполагает включение в систему некоторых специализированных арифметических устройств, процессорных

элементов, работающих на матричных, конвейерных или других принципах, и таких, которые выполняли бы роль быстрых арифмометров. Мозг, как известно, работает со сложными структурами данных, например, при распознавании образов, при работе с графической информацией, где требуется устанавливать очень большое количество связей. Но для простых структур данных, для быстрых вычислений именно эта универсальность мозга делает его сравнительно мало эффективным. Именно поэтому человек при решении таких задач и дополняет свои возможности различного рода калькуляторами. Точно так же целесообразно, чтобы рекурсивная машина, в которой распараллеливаются самые сложные процессы организации информационных обменов и поиска информации, преобразования сложных структур данных, сочеталась в случае необходимости с машинами, устройствами, с группами процессорных элементов, позволяющими ускорять работу над более простыми структурами данных, прежде всего над векторами, матричными структурами.

В рекурсивных машинах предусматривается отступление от всех принципов фон Неймана. Такая одновременная ревизия всех этих принципов осуществляется впервые.

Рекурсивные машины должны строиться таким образом, чтобы их процессоры (микропроцессоры) отличались от неймановских по крайней мере в двух отношениях.

Первое отличие состоит в том, чтобы память микропроцессоров имела значительно большее число видов доступа, по крайней мере четыре вида доступа, а не один, — стеки, ассоциативная, обычная адресная память и буферы.

Второе отличие процессора, используемого в рекурсивных машинах, заключается в том, что этот процессор должен обладать сменной микропрограммной памятью, с тем чтобы настраиваться на выполнение разных операций. Это необходимо для настройки разных частей такой мультипроцессорной системы на выполнение различных операций.

Особо нужно сказать о системе коммутации в рекурсивных машинах. До сих пор еще не было предложено хороших схем коммутации, таких, которые действительно нужны для перехода к мозгоподобным структурам. Как правило, пытаются исходить из двух основных видов коммутации: организации в виде пространственной, чаще всего двумерной решетки, в которой осуществляется передача от соседа к соседу (т. е. это принцип однородной структуры), либо принципа магистральных шин, т. е. передачи по магистральной

линии от одного ко всем, и использование тех или иных признаков передаваемой информации для того, чтобы мог отозваться соответствующий процессор. По-видимому, самым целесообразным в техническом плане способом организации, во всяком случае с точки зрения задач искусственного интеллекта, и построения систем элементов под него уже на новых физических принципах является такой способ, который употребляется в телефонных станциях.

Предположим, что имеется 20 абонентов, 20 процессоров с памятью и на эти 20 абонентов имеется телефонная станция, которая подключается абонентскими линиями к соответствующим коммутационным элементам. Эти элементы, в свою очередь, связываются между собой в группы, образуя некоторую иерархическую структуру точно так же, как в междугородной телефонной сети. В такой сети имеется возможность осуществлять связь между произвольными процессорами, т. е. связь, в определенной степени подобную существующей в человеческом мозгу. Однако, чтобы каждый раз при этом не набирать номер соответствующего процессора, с которым нужно связываться, необходимо предусмотреть такую систему коммутации, при которой каждый из этих коммутирующих элементов будет обладать в момент коммутации определенными знаниями о состоянии группы элементов (например, они заняты все или могут оказаться занятыми в ближайшее время, на них послана заявка и т. д.), т. е. выполнять определенные функции распределенной операционной системы, нести их в себе одновременно с функцией переключения. При переключении так или иначе нужно знать, соединять или не соединять некоторый процессор с заданным процессором, и это обычно делается при вызове. Здесь же необходимо, используя ту же самую информацию, планировать распределение загрузки между процессорами. При этом достигается двойная выгода. Эта выгода будет проявляться прежде всего в том, что по сравнению с однородными средами в системах с иерархической структурой коммутации связь между процессорами будет выполняться с меньшими задержками, потому что в однородных средах могут быть очень длинные цепочки от одного процессора к другому, а длина цепочек в таких средах растет пропорционально корню кубического из числа процессоров, если организуется трехмерная среда, или корню квадратному, если среда плоская.

При иерархической организации связей, аналогичной той, которая имеется на телефонной станции, длины цепей

растут как логарифмы, причем основание логарифма в общем случае зависит от того, какое количество элементарных цепей подключается к этой телефонной станции. Но кроме значительных задержек на коммутационных узлах, решение вопроса может затруднять сложность технической реализации самой коммутации. Поэтому нужны еще исследования и разработки, при реализации которых можно делать то, что делается в человеческом мозгу: проторять какие-то пути в телефонной сети, закреплять связи. И тогда можно будет накладывать структуру данных на соответствующую организацию связи, т. е. эта перестраиваемая телефонная быстрая связь будет в точности соответствовать структуре обрабатываемых данных, но об этом несколько позже. Не исключается при этом и использование магистральных шин, а также связей — соседей с соседями, потому что для простых структур данных это может оказаться самым эффективным.

Теперь о том, что такое рекурсивный язык. Так условно называется язык для описания программ рекурсивных машин. Как дальше мыслится развертывание самого языка, на котором пишутся программы? Здесь целесообразно использовать тот метод формализованных технических заданий, который был разработан в отделе теории цифровых автоматов нашего института, применительно к задаче автоматизации проектирования ЭВМ. Этот метод сейчас стал универсальным, он практически применяется вообще к любым программам. Речь теперь идет о том, чтобы система управления вычислительным процессом использовала не только окончательное представление программ, но и все виды промежуточного представления на разных языках, в том числе, возможно, и недостаточно формализованных. Такие языки в рамках этой программы все равно будут формализованы. Это вытекает из того, что если программа доведена до уровня, который уже понимает машина, до ее операций, то все равно тем самым проторены цепочки однозначного понимания выражений в языках всех промежуточных уровней. Это главная идея, которую я здесь высказываю относительно программирования для рекурсивных машин.

Смысл этого состоит в том, что когда мы имеем ту или иную предметную область, независимо от того, будет ли это числовая или буквенная информация, первое, что мы делаем, изобретаем для себя крупные логические условия с соответствующими структурами данных. И в этих крупных операторах, которые группа людей, работающих над программами,

понимает одинаково, составляется короткая программа. Рассмотрим, например, шахматную игру. Вместо того, чтобы сразу программировать шахматную игру в машинных операциях, мы вводим такие крупные операторы, как выделение открытой линии, выделение слабого поля, просчет форсированного размена. Соответствующие условия, предположим для выделения слабого поля или этой открытой линии, можно каждый раз сочетать с логическим условием «да» или «нет», «есть» или «нет». В этом языке мы составляем первоначальную программу, или техническое задание первого уровня, приспособивая структуру данных к этим операторам. Программа, естественно, должна быть короткой. Ведь чем более крупные операторы, тем более короткая программа. Эта программа представляется в виде графа и в нее записываются соответствующие данные.

Затем начинается разработка языка для технического задания следующего уровня, в котором используются более мелкие операторы и условия. Осуществляется перезапись программы на этот новый язык и так далее, до тех пор, пока не достигаем такого уровня языка, с которого уже можно осуществлять автоматическую трансляцию на машинный язык. В этом состоит основная идея метода формализованных технических заданий.

Если в обычную машину помещается только окончательный результат, то идея вторая состоит в том, чтобы поместить в рекурсивную машину все этапы разработки программы. Это позволит распараллеливать процессы управления. Когда имеется такое представление программы на языке технического задания верхнего уровня, то и данными для этого представления являются не отдельные байты или слова, а целые структуры данных, например структура всей позиции на шахматной доске. И в том случае, когда имеется представление программы, записанной в таких крупных блоках, возможно уже на этом уровне произвести первое планирование, распределение оборудования, т. е. определить, куда будут помещены соответствующие операторы. Особенно это хорошо, если есть специализированные процессоры, причем в необходимом количестве.

Следует еще сказать, что распараллеливание в программах целесообразно делать не всюду, а главным образом в циклах, потому что нет таких программ, суммарное количество команд которых было бы препятствием для быстрого действия машин.

Самые длинные программы в настоящее время насчитывают один — два миллиона команд. Но машина, которая делает три миллиона операций в секунду, если бы это была линейная программа без циклов, выполнит эту программу за доли секунды. Поэтому нет никакого смысла ускорять линейные участки программ, качественной выгоды здесь все равно получить нельзя. А такие системы программирования, при которых получались бы линейные программы в миллиарды операций, на сегодняшний день не существуют. В основном нагрузка на машины происходит из-за того, что некоторые последовательности команд повторяются, поэтому для повышения производительности необходимо распараллеливать выполнение циклов.

Еще на уровне первой блок-схемы программы с крупными операторами и крупными структурами данных можно определять наличие циклических вычислений. Если цикл имеется, то, естественно, сразу принимается решение о необходимости распараллеливания. Такое решение либо указывается непосредственно при программировании, либо это делается автоматически: в настоящее время имеются такие системы распараллеливания, которые по мере возможности пытаются распараллелить каждый цикл. И тогда, если есть линейные участки программы, планирование распараллеливания не работает, а просто загружается программа на один какой-то процессор, а также, где есть циклы, в этот момент производится планирование количества процессоров и других ресурсов для получения ускорения вычислений. Причем здесь важно отметить следующее: нет смысла распараллеливать один цикл, если другие в принципе не распараллеливаются. Общий смысл работы над большими программами, над сложными задачами состоит в том, чтобы сократить время решения каждой конкретной задачи. Предположим, имеется два цикла, на которых можно распараллелить программу. Один цикл мы совсем не распараллеливаем, а второй распараллеливаем до самих мелких операций; и в результате первый цикл выполняется за одну сотую секунды, а второй — за два часа. Понятно, что смысла в таком распараллеливании нет, и, значит, следует добиваться того, чтобы время исполнения длинных частей программы и циклов было примерно одинаковым и по возможности меньшим. Если выжимать быстродействие из отдельных частей программы и при этом какая-то часть остается небыстродействующей, то это значит, что мы будем выжимать доли процента или проценты из общей ско-

рости решения задачи, но в принципиальном отношении это не будет иметь никакого смысла.

Задачи планировщика распараллеливания целесообразно начинать решать с верхних уровней описания программы. Правда, далеко не всегда цикл может быть замкнут по данной структуре данных. Тем не менее по мере движения вглубь, по этапам разработки программы, все время просматривается возможность организации этого распараллеливания. Следовательно, смысл второй идеи, высказанной здесь, состоит в том, чтобы традиционную схему, которая состоит из управления и операционной системы, из управления заданиями и управления задачами, разбить на большее количество промежуточных звеньев. Я убежден, что именно здесь лежит ключ к обеспечению высокого быстродействия при реализации сложных операций переработки информации. Очень важным при этом является следующее обстоятельство.

Поскольку в рекурсивных машинах поиск выполняется сразу по всему полю, то каждый процессор должен быть наделен свойствами искать выполнимые операции, причем операции, выполняемые на разном уровне. Процессор может найти какой-то обобщенный оператор, выполнимый на данном уровне. Тогда это означает, что и все дерево сегментов расшифровки оператора, подчиненное данному оператору, тоже выполнимо, и это должно упрощать организацию вычислений. Но при этом возникает другая проблема, которую также нужно решать.

Если программа без циклов, то в этом случае вместе со структурой программы имеется и структура передачи данных и можно эти данные сопровождать признаками их соответствия тем или иным участкам программы. Как только данные выбраны, они ищут по признаку свой оператор, и после этого принимается решение о начале их обработки. Скажем, тем процессором, в котором хранится оператор, принимается решение перекачать соответствующие данные, например из общей оперативной памяти, если они туда были отосланы (потому что в системе не исключается наличие обобществленной массовой памяти), в этот процессор или в группу процессоров, если требуется организовать параллельную переработку и эти данные начинают здесь обрабатываться. А в другом месте в этот момент другие данные могут обрабатываться каким-либо другим способом. Но поскольку в группе управляющих процессоров верхнего уровня в достаточно обобщенном виде имеется описание введенных туда программ

и даже мультипрограммная система, то всегда есть возможность, обращаясь к ним, правильно планировать загрузку, т. е. оценивать, действительно ли заняты процессоры, есть ли свободные процессоры, определять степень распараллеливания, запуск программ, которые ждут своей очереди, и т. д. Все это можно делать не на самом нижнем уровне, а на всех уровнях, начиная с самого верхнего уровня планировщика заданий.

От планировщика заданий к планировщику управления операцией, таким образом, есть постепенный переход. Управление операциями может возвращаться к каким-то частям планировщика, и это тоже чрезвычайно важно, потому что управление операциями, принятие решения происходит не только тогда, когда готовы самые мелкие данные для самых мелких операторов, но и тогда, когда обобщенная структура данных подготовлена для крупного оператора соответствующего формализованного языка, созданного специально для этой задачи. Трудность тут заключается вот в чем.

Для рассматриваемой задачи распараллеливание циклов — очевидное, но, по-видимому, не очень экономное решение. Речь идет о том, что данные и операторы разные в зависимости от того, какое количество циклов выполнено. Поэтому надо уметь данным и операторам присваивать индексы соответствия. В этом случае проще всего использовать счетчик, который бы подсчитывал, сколько раз данные прошли через цикл, сколько раз оператор выполнил этот цикл. Но, по-видимому, это не экономичный способ, потому что циклы могут быть очень длинными и потребуются заносить в счетчик очень большие числа.

Если же цикл выполняется параллельно, то существует вероятность того, что мы натолкнемся на старые данные. Это значит, что могут оказаться такие данные, которые прошли, скажем, три цикла. При этом некоторые другие данные могут пройти уже три тысячи циклов, а потом эти данные где-то смешиваются и надо синхронизировать обработку этих данных. Если известно общее количество циклов, то тогда это все решается просто. В действительности при организации асинхронных процессов вычислений существуют задержки между обработкой одних и других данных. Признаки, учитывающие эти задержки, по-видимому, не будут принимать слишком большое значение. Было бы удобно иметь какой-то «хвост» слежения за выполнением циклов, укороченный счетчик этих данных. В этом случае, видимо, можно

было бы организовать более эффективные полусинхронные и полуасинхронные вычисления. Но над этой идеей нужно еще много работать.

Как говорилось ранее, теперь чрезвычайно важна задача подстройки памяти под структуры данных. Существуют различные способы такой подстройки. Рассмотрим сначала на примерах, что такое подстройка структуры памяти под структуру данных. Допустим, речь идет о том, что имеется группа однородных записей, предположим, какие-то данные о материалах, хранящихся на складах, и о том, в какие изделия эти материалы входят и т. д. Традиционная форма размещения этого массива такая: в мультипроцессорной схеме заполняется память сначала одного процессора, потом — второго, третьего и т. д. Но такая форма размещения не позволяет распараллеливать вычислительные процессы, в частности процессы поиска информации. Но если сделать так: разделить массив на части и первую, предположим, часть записи, ее первый признак, поместить в один процессор, второй признак той же самой записи — во второй процессор, третий — в первую ячейку третьего и т. д., а потом вторую часть записи соответственно поместить во второй ячейке процессоров, то в результате обработку информации можно будет в определенной степени распараллелить, если по всем процессорам или по всем записям, предположим, производить сравнение одновременно.

Можно предложить другую форму записи: одну — по строкам, а другую — по столбцам массива. Тогда в зависимости от вида задачи можно будет переформировать массивы и помещать их в память по-разному. Но это самый простой случай. Более сложный случай связан с организацией произвольных структур данных. В Институте кибернетики предложен способ описания произвольных структур данных, а также организации процесса переработки информации в сложных мультипроцессорных системах, причем не с традиционными, а с произвольными системами связи. Этот способ основан на обобщении моей старой идеи, изложенной в одной из работ в 1965 г., которая сейчас широко применяется. Речь идет о том, что можно построить так называемую базовую алгебру данных. В моих старых работах такой базовой алгеброй данных была булева алгебра, операции в которой выполняются над отдельными битами информации. Но базовая алгебра может строиться и над целыми словами. Предположим, такой базовой алгеброй может служить обычная

алгебра или арифметика целых или вещественных чисел. Из этих данных строятся определенные структуры данных, которые характеризуются графом (графом данных). На этом графе с помощью определенной полугруппы устанавливается система координат. После этого возникает вопрос о том, как можно организовать преобразование таких структур.

В том случае, когда возможна параллельная обработка таких структур независимо друг от друга, операции базовой алгебры данных реализуются достаточно простым способом — путем покомпонентных преобразований на соответствующих структурах данных.

Сложнее обстоит дело в других случаях. Применительно к традиционным машинам указанная идея сводилась к следующему. Имеется, скажем, регистр, и на этом регистре осуществляется инвертирование кода либо его сдвиг вправо или влево. Подобные преобразования осуществляются с помощью так называемой периодически определенной функции, т. е. задается некоторая операция над одним элементом структуры, которая распространяется на все ее элементы. Структура регистра определена жестко. Это значит, что если имеется сдвиговой регистр, в котором реализуется сдвиг кода, то тем самым определяется и граф сдвигов всего регистра, а преобразование в одном разряде может быть распространено на все разряды регистра. Указанный способ распространяется и на произвольные графы. На вершинах графа могут находиться уже целые слова, в свою очередь это могут быть структуры данных, операторы над которыми определены ранее не были. Это одно обобщение. Но рассмотренным способом не описываются все сложные операции над структурами данных. Не описывается даже простейшая операция сложения, потому что при сложении возникает сигнал переноса. Этот сигнал я предложил называть вспомогательной переменной и обобщил понятие переноса. При выполнении рассматриваемой периодически определенной операции система вспомогательных переменных образуется в начале регистра. После этого по специальным шинам вспомогательная информация распространяется на последующие разряды регистра и участвует в выполнении операций на этих разрядах. В результате операции на всем протяжении регистра выполняются по одной и той же форме. При этом используется информация, которая изменяется по пути, переносится с самого начала регистра на сколь угодно далекий его конец.

Эту идею предложено использовать для организации движения вспомогательных переменных и в том случае, когда имеется структура данных произвольного вида, и передается она не только по регистру либо по их группе, а по графам данных с какими угодно связями друг с другом. Для этого как раз и нужны быстрые связи типа используемых в телефонной станции, о которых я говорил. Таким образом, если введена система вспомогательных переменных, то структура данных адекватным образом накладывается на структуру памяти. Применительно к полученной структуре памяти используется та или иная группа макрооператоров с вспомогательными переменными, которые движутся по соответствующим каналам связи. Каждый оператор при этом выполняет одну и ту же операцию, но операцию не только над своим содержанием, но и над той информацией, которая ему передается от сколь угодно далеких участков этой структуры. Вот примерно в чем состоит основная идея периодически определенных преобразований. Введение вспомогательных переменных позволяет ускорять выполнение арифметических операций, переходя от булевой алгебры к алгебре целых чисел.

С точки зрения представления данных обычная арифметика, обычные данные в виде чисел фактически представляют собой структуру данных над булевой алгеброй, но без вспомогательных переменных и при использовании булевой алгебры в качестве базовой нельзя получить простые арифметические операции, даже операции сложения, не говоря уже об умножении и т. д.

Точно так же обстоит дело в случае произвольных алгебр данных. Эта идея богата тем, что она дает принципиально новые возможности распараллеливания. Покомпонентное распараллеливание векторно-матричных задач — это вещь тривиальная. Именно она была реализована и в матричных процессорах, и в конвейерных и т. д. Но если осуществляется движение вспомогательных переменных, значения которых изменяются в процессе обработки, то можно получить принципиально новые операторы, точно так же, как из булевых операций получаются операции алгебры вещественных или целых чисел. Есть все основания думать, что мы можем получать новые операторы для сложных структур данных, и прежде всего в задачах распознавания образов и обработки графической информации. Совершенно ясно, что такие операторы есть, их надо только искать. А организация этих опе-

раторов в таких сетях — это новый способ распараллеливания, который никто еще никогда не применял. Но тут требуются большие теоретические исследования по фактическому нахождению операторов для тех или иных классов задач. Это возможно тогда, когда имеется опыт работы со сложными языковыми описаниями, последовательно расшифровываемыми для фактического управления вычислительным процессом, а не только в конечную программу.

У нас в стране широко развиты методы распараллеливания вычислительных алгоритмов.

Для каждой конкретной задачи (например, обращение матрицы или умножение матрицы на вектор), исходя из содержательного смысла этой задачи, можно построить параллельный процесс ее решения. Это направление полезно для создания библиотеки стандартных программ макрооператоров в параллельных структурах. Полезно оно и применительно к рекурсивным машинам, и такие работы следует продолжать. Но значительно больший интерес сегодня все же представляют чисто формальные методы распараллеливания циклов, в которых отвлекаются от содержательного значения тех операций, которые производятся в цикле. Задача состоит в том, что требуется непосредственно по формальному описанию цикла в некотором языке программирования найти способы его распараллеливания. Имеются работы, в которых предложено несколько эффективных методов распараллеливания произвольных циклов независимо от их содержательного смысла, например метод гиперплоскости, координатный метод, предложенные Лэмпортом (L. Lamport) для Фортрана. Тем, кто работает в этом направлении, эти методы надо освоить и далее думать о том, как встраивать в операционные системы блоки-планировщики, как эффективно применять соответствующие методы распараллеливания.

Хотелось бы обратить внимание еще на одно обстоятельство. Может оказаться так, что на практике математическое распараллеливание потребует очень большого количества дополнительных операций. Тогда надо думать о расширении формальных языков этих уровней, об использовании соответствующих указателей для программиста, которые позволили бы упростить эти процессы. Такой путь решения задачи тоже возможен. Необходимо, чтобы все эти вопросы изучались не сами по себе, а в связи с новыми возможностями создания элементов. Это в особенности касается коммутационных структур и методов реализации сложных операторов перера-

ботки информации. Дело в том, что, используя в качестве носителя информации не традиционный электрический сигнал, а, предположим, световой или электронный луч, можно будет попутно, в процессе передачи информации также каким-то образом осуществлять операции параллельного преобразования информации. Это сразу подводит другую базу под идею коммутации, хотя идеи, связанные с использованием вспомогательных переменных, можно применять при построении систем на современных элементах уже сейчас. Надо думать о новых типах больших интегральных схем, причем не просто микропроцессоров.

Ближайшая задача — разработка БИСов памяти, в которых легко получать разные режимы организации этой памяти, и небольшой памяти, пристраиваемой к процессорам. Нам надо развивать, во-первых, программу теоретических работ в этом направлении, разрабатывать методы моделирования таких структур, расширять систему «Проект» в направлении автоматизации проектирования многопроцессорных структур и проводить фактическую работу по организации на рассмотренных принципах системы, состоящей хотя бы из сотни микропроцессоров, либо, возможно, миникомпьютеров. Дело в том, что в рекурсивных машинах число используемых процессорных элементов играет существенно важную роль. Действительно, производительность обычных традиционных систем организаций машин росла по закону двойного логарифма. Поэтому там и не имел большого смысла переход, скажем, от 10 процессоров к 100.

В рекурсивных машинах ожидается линейное увеличение производительности в зависимости от количества процессоров. Поэтому, предположим, переход от 8 к 65, либо к 128 уже приобретает принципиальное значение. Но переход должен быть не таким, какой был сделан в ILLIAC-IV для каких-то заданных операций, а для данных с произвольной структурой.

ОБ АРХИТЕКТУРЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ЭВМ*

Повышение производительности ЭВМ традиционной архитектуры за счет простого увеличения быстродействия элементов имеет свои пределы. Поэтому при построении ЭВМ

* Препр. ИК АН УССР № 78-65. Киев, 1978. 16 с.

высокой производительности наряду с непрерывным совершенствованием элементной базы применяются различные архитектурные средства увеличения быстродействия. Для повышения быстродействия отдельного процессора в настоящее время применяются два основных метода. Первый метод, впервые реализованный в отечественных ЭВМ серии МИР, состоит в повышении уровня внутреннего машинного языка. Увеличение быстродействия в этом случае происходит за счет двух основных причин. Во-первых, повышение уровня машинного языка приводит к сокращению длины рабочих программ и, следовательно, к уменьшению числа обращений к памяти. Во-вторых, структурная реализация сложных операторов позволяет, как правило, существенно ускорить их выполнение по сравнению с программной реализацией этих операторов на ЭВМ традиционной архитектуры с простыми внутренними языками.

Наиболее прозрачным и достаточно гибким методом структурной реализации сложных операторов является ступенчатое микропрограммирование, также впервые реализованное на ЭВМ серии МИР. Суть этого метода состоит в следующем. На некотором множестве регистров с помощью соответствующих комбинационных схем реализуется некоторый набор микроопераций (т. е. преобразований на регистрах, выполняемых за один элементарный тактовый промежуток). Примерами таких микроопераций могут служить как традиционные микрооперации поразрядного сложения, пересылки с регистра на регистр, сдвиги и др., так, возможно, и новые микрооперации, не встречавшиеся ранее в инженерной практике (например, сдвиг с инвертированием четных разрядов). Такие «необычные» микрооперации возникают при применении методов формальных преобразований в автоматизированных системах проектирования ЭВМ.

С помощью заданных таким образом микроопераций строятся микропрограммы операций первого уровня, запоминаемые в нижней ступени специального микропрограммного ЗУ (МПЗУ). Во множество этих операций могут включаться обычные арифметические операции над многозначными числами и другие операции с относительно простыми микропрограммами.

Операции второго и более высоких уровней представляют все более и более сложными микропрограммами, запоминаемыми в МПЗУ.

Отличие таких сложных операторов от программно-реали-

зуемых макрооператоров заключается, во-первых, в том, что переходы с одного уровня управления на другой осуществляются без обращения в ОЗУ за счет использования регистров, встроенных в устройство управления. Второе отличие определяется возможностью использования микропрограммами любого уровня не только машинных команд (как это имеет место при обычной программной реализации макрооператоров), но и любой микрооперации из исходного (реализованного в арифметико-логическом устройстве АЛУ) набора микроопераций.

Ясно, что указанные отличия способствуют увеличению быстродействия процессора при выполнении соответствующих макрооператоров. Например, пусть при выполнении макрооператора $y = \cos x$ значение косинуса вычисляется путем его разложения в ряд: $1 - x^2/2 + \dots$. Если сдвиг на одном из регистров АЛУ не включен в число машинных команд, то при обычной реализации в виде стандартной подпрограммы деление $x^2/2$ должно быть выполнено по полному циклу (с запоминанием константы 2 в ОЗУ). При ступенчатой микропрограммной реализации в этом случае можно использовать лишь одну микрооперацию сдвига.

В первых ЭВМ, использовавших структурную реализацию сложных алгоритмических языков, микропрограммное ЗУ выполнялось обычно в виде пассивного (одностороннего) ЗУ с неизменным набором микропрограмм. Причина такого решения заключалась в том, что в то время ПЗУ были быстрее и, самое главное, существенно дешевле, чем ОЗУ. Сейчас, в связи с появлением полупроводниковых оперативных ЗУ на БИС становится целесообразным для запоминания микропрограмм использовать не ПЗУ, а ОЗУ. Благодаря этому оказывается возможным (путем перезагрузки микропрограмм) быстро перестраивать язык (набор операций и макроопераций) процессора. Подобные процессоры получили наименование процессоров с гибкой архитектурой, хотя, разумеется, гибкость при этом имеет не весь процессор, а лишь некоторая его часть.

Второй метод повышения быстродействия отдельных процессоров был разработан в 60-х годах в США. Он получил название конвейерного, или магистрально-трубопроводного метода. Его реализация предусматривает усложнение структуры АЛУ. При этом АЛУ представляется в виде цепочки (конвейера) устройств, специализирующихся на выполнении отдельных составных частей машинных операций.

Например, после выборки операндов для очередной команды некоторым блоком конвейера исполнение команды передается на следующие блоки, а данный блок используется для выборки операндов для следующей команды. Аналогично исполнение самой команды, например, сложение чисел с плавающей запятой, может быть разложено на более мелкие операции (выравнивание порядков, сложение мантисс, нормализация результата), выполнение которых поручается различным блокам конвейера.

В предельном случае конвейер (когда каждый блок выполняет отдельную операцию) при благоприятных условиях (независимость операндов в последовательных командах) может выдавать результаты вычисления в темпе, равном времени выполнения одной микрооперации, а не машинной команды, как в обычном процессоре.

Два описанных метода повышения быстродействия отдельного процессора являются универсальными в том смысле, что их эффективность относительно мало зависит от вида решаемых задач (при предположении, что структурно реализуемый алгоритмический язык в первом случае и блоки конвейера во втором достаточно универсальны).

За счет более узкой специализации машинных языков и процессорных элементов можно строить специализированные процессоры, обладающие особо высокой производительностью на том или ином классе задач. Одним из наиболее известных типов специализированных процессоров являются векторно-матричные процессоры, позволяющие выполнять операции над отдельными элементами векторов и матриц одновременно. Служащие для выполнения таких операций процессорные элементы являются, по существу, простейшими процессорами. Поэтому векторно-матричные процессоры можно рассматривать и как специализированные многопроцессорные ЭВМ.

Повышение производительности процессоров ставит весьма остро вопрос о скорости обмена процессоров с ОЗУ. Имеется ряд способов увеличивать эту скорость. Один из простейших способов — увеличение количества разрядов в ячейках ОЗУ, позволяющих за одно обращение к ОЗУ пересылать несколько машинных слов. Хотя время цикла в ОЗУ при увеличении разрядности растёт, однако этот рост не столь быстр, и он с лихвой перекрывается краткостью выборки.

Второй способ — так называемое перекрытие (*overlapping*). При этом способе ОЗУ составляется из нескольких

блоков, к которым возможно независимое (одновременное) обращение. Поскольку в большинстве случаев (как при пересылке команд, так и данных) приходится обращаться к последовательно расположенным друг за другом ячейкам памяти, то это расположение приспособляется к возможности независимого обращения к последовательным ячейкам ОЗУ. Так, если 1-я ячейка ОЗУ совпадает с 1-й ячейкой 1-го блока ОЗУ, то 2-й ячейкой считается не 2-я ячейка 1-го блока,

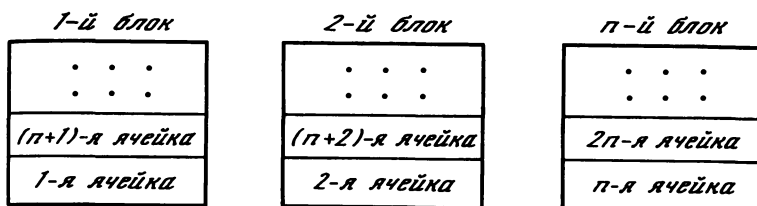


Рис. 1

а 1-я ячейка 2-го блока. При n блоках n -я ячейка совпадает с 1-й ячейкой n -го блока, а $(n+1)$ -я ячейка — со 2-й ячейкой 1-го блока (рис. 1).

Подобная нумерация ячеек памяти позволяет организовать одновременную выборку из n ячеек ОЗУ и тем самым привести в соответствие скорость обмена с ОЗУ со скоростью обработки информации в процессоре.

Параллельная выборка из ОЗУ предполагает наличие в процессоре специальной быстродействующей буферной памяти, обеспечивающей обмен информацией как с процессором, так и с ОЗУ. Минимальный размер буфера равен размеру одновременной выборки из ОЗУ. Однако имея в виду частое использование результатов предшествующих операций машинной программы в последующих, оказывается целесообразным увеличивать размер буфера до тех пор, пока это не начнет приводить к существенному уменьшению его быстродействия. Такой буфер принято называть сверхоперативной памятью (СОЗУ). Таким образом, в ЭВМ большой производительности используется фактически 4-уровневая память: регистры процессора, СОЗУ, ОЗУ и внешняя память на магнитных носителях. Иногда к ним добавляется 5-й уровень массовой памяти (mass memory), промежуточный по скорости обмена между ОЗУ и внешней памятью.

Многие задачи невычислительного характера, связанные с выборкой и переупорядочиванием больших массивов информации, требуют особой организации памяти, когда обращение к тем или иным ячейкам ОЗУ происходит не по адресам ячеек, а по признакам, закодированным определенными разрядами хранящихся в них слов. Память с возможностью такого обращения называется ассоциативной. Одна из возможных форм организации подобной памяти — матричное

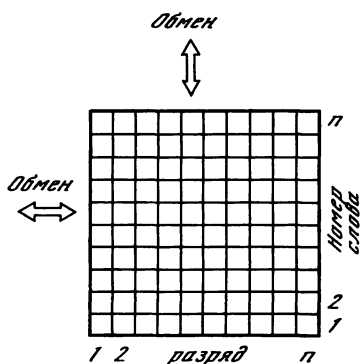


Рис. 2

ОЗУ с выборкой как по строкам, так и по столбцам. При обращении к строке выбирается отдельное (обычно достаточно длинное) слово, а при обращении к столбцу — один и тот же разряд всех слов, запомненных в матрице (рис. 2).

На базе ассоциативного ЗУ создаются специализированные ЭВМ, обладающие сверхвысоким быстродействием на задачах, связанных с сортировкой, подборкой, выборкой по признакам и другими операциями на больших информационных

массивах. Для других применений оказываются эффективными иные способы организации памяти, например, стековая.

При большой скорости обмена с ОЗУ к нему можно подключать несколько процессоров (снабженных обычно собственными небольшими сверхоперативными ЗУ). Тем самым возникают универсальные мультипроцессорные системы с общей памятью. Разумеется, при этом число процессоров бывает обычно небольшим, так что серьезного распараллеливания вычислительного процесса осуществить подобным путем не удастся. Значительно большие возможности распараллеливания возникают в том случае, когда в систему объединяются процессоры, снабженные собственными оперативными ЗУ. Теоретически в подобные системы можно объединить какое угодно число процессоров. На практике, однако, возникают трудности, связанные с эффективной коммутацией процессоров и управлением системой. Эти трудности преодолеваются относительно легко на специальных классах операций, например векторно-матричных. В общем же случае

принятые до сих пор методы построения мультипроцессорных систем дают относительно медленный (логарифмический) рост суммарной производительности системы в зависимости от составляющих ее процессоров. Это обстоятельство делало до сих пор невыгодным объединение в систему большого числа процессоров.

В то же время успехи микроэлектроники и особенно появление однокристалльных микропроцессоров делает задачу построения больших мультипроцессорных систем весьма актуальной. Для того, чтобы справиться с указанной выше трудностью и получить высокоэффективные мультипроцессорные системы, состоящие из сотен и даже тысяч микропроцессоров, предлагается существенно изменить принципы коммутации и управления в таких системах.

При создании сложных мультипроцессорных систем на базе микропроцессоров целесообразно руководствоваться принципом автономно-иерархической блочности. Суть его состоит в том, что система составляется из блоков разных уровней иерархии, каждый из которых может иметь свое собственное независимое применение в автономном режиме. Блоки, о которых идет речь, определяются сложившимися конструктивными ячейками: кристалл, плата, сборка, шкаф, система. Содержание, вкладываемое в каждый блок, определяется достигнутым уровнем интеграции. При нынешнем уровне интеграции на одной плате целесообразно реализовывать полноразрядный микрокомпьютер с гибкой архитектурой и собственным небольшим ОЗУ. На этой же плате должен быть организован выход в стандартный (скажем, 9-битовый) канал для дуплексной связи с периферийными устройствами и другими микрокомпьютерами, помещаемыми в одну сборку. Желательно иметь на этой же плате внешнее ЗУ на магнитных доменах или приборах с зарядовой связью для организации автономной виртуальной памяти каждого микрокомпьютера. Такие одноплатные микрокомпьютеры могут использоваться автономно в измерительных приборах простейших АСУ ТП. Несколько подобных компьютеров (которые мы будем называть рабочими) объединяются с помощью специальных коммутационного и управляющего процессоров в одну сборку, которая может (при оснащении ее специальной периферией) выполнять функции многопроцессорной мини-ЭВМ. С этой целью сборкам желательно придать самостоятельное конструктивное оформление, позволяющее использовать их как автономно, так и встраиваемы-

ми в следующий иерархический блок, каковым является шкаф.

Число рабочих микрокомпьютеров в сборке относительно небольшое — порядка 5—8, в крайнем случае 10—16 штук. Коммуникационный процессор должен позволять организовывать одновременную передачу информации по стандартному каналу между любыми парами микрокомпьютеров в сборке и, кроме того, обеспечивать несколькими дополнительными каналами выход на следующий (внутришкафный) уровень коммутации.

При восьми коммутируемых микрокомпьютерах для организации дуплексной связи коммутационный процессор должен иметь $18 \times 8 = 144$ входа, не считая входов для дополнительных каналов и энергопитания. Его нельзя поэтому монтировать на плате обычного типа, поскольку при этом превышаются возможности употребляемых ныне разъемов. Представляется поэтому целесообразным размещать коммуникационный процессор в операционной жесткой плате с вмонтированными в нее разъемами для плат рабочих микрокомпьютеров, помещаемых перпендикулярно к этой плате. Подобная плата, которую мы будем называть коммуникационной, крепится на конструкции сборки болтами (позволяя в случае необходимости снять и заменить ее) и снабжается дополнительными разъемами (обращенными во вне сборки) для гибкого кабеля, через которые осуществляется связь с другими сборками и подача питания.

Наряду с рабочими микрокомпьютерами в сборку помещается также управляющий процессор (с собственным ОЗУ), организующий управление вычислительным процессом внутри сборки и взаимодействие через коммуникационный процессор с управляющими процессорами более высоких уровней иерархии. Управляющий процессор может монтироваться на коммуникационной плате или на отдельной рабочей плате взамен одного из рабочих микрокомпьютеров. Внешнее конструктивное оформление сборки желательно иметь таким, чтобы подобным же образом могли бы быть оформлены внешние ЗУ мини-ЭВМ (минидиски, кассетные магнитофоны), а также устройства ввода-вывода на гибких дисках. Подобное конструктивное однообразие позволит гибко компоновать шкафы, в частности, снабжать каждую сборку мини-ЭВМ своей собственной внешней памятью, что значительно увеличивает возможности распараллеливания вычислительных процессов и, что особенно важно, процессов управления ими.

Каждый шкаф должен снабжаться коммуникационным и управляющим процессором второго уровня иерархии. Они могут монтироваться как в отдельной сборке, так и в виде специальной съемной жесткой платы с соответствующим числом кабельных разъемов. Снабженный соответствующей периферией, каждый такой шкаф может использоваться как средняя мультипроцессорная ЭВМ. Для получения ЭВМ большой производительности и супер-ЭВМ нужно объединять (в одном или нескольких уровнях иерархии) соответствующее число шкафов. Тот же принцип может быть применен при объединении удаленных ЭВМ в сети.

В описанной конструкции просматривается первая основная идея, позволяющая строить высокоэффективные мультипроцессорные системы. Она состоит в том, что в отличие от общих шин для быстрой передачи информации, применяющихся в традиционных мультипроцессорных системах, строятся более медленная, но зато гораздо более гибкая коммуникационная сеть, напоминающая обычную телефонную сеть связи.

Взятая сама по себе, эта идея еще не обеспечивает эффективной работы мультипроцессорной системы, ибо низкая скорость обмена при обычных методах распараллеливания обработки информации может свести на нет преимущества параллельной работы большого числа процессоров. Необходимо поэтому дополнить ее такой идеей организации параллельной обработки, которая уменьшила бы требования к скорости обмена информацией в системе.

Сущность второй идеи состоит в том, чтобы в качестве основного принципа параллельной обработки информации был избран принцип макроконвейера. В отличие от описанного выше микроконвейера, распараллеливающего выполнение отдельных микроопераций, макроконвейер настраивается на выполнение на каждом его рабочем месте достаточно крупных макрооператоров, способных составить серьезную загрузку для отдельных микрокомпьютеров мультипроцессорной системы.

Для настройки макроконвейера необходимо выделить соответствующее количество микрокомпьютеров, организовать необходимые связи между ними и заслат в быструю микропрограммную память каждого микрокомпьютера микропрограммы, наилучшим образом приспособившие его для предполагаемой работы. Все это требует довольно большой работы по предварительному планированию и последую-

щему управлению вычислительным процессом и нуждается в соответствующих новых идеях по организации такого планирования и управления, излагаемых далее.

Сейчас же заметим, что, исключая лишь некоторые случаи управления в реальном масштабе времени, линейные участки программ не требуют распараллеливания. Причину этого понять нетрудно. До сих пор самые длинные программы для ЭВМ не превышали 1—2 миллионов машинных команд. При современном быстродействии обычная однопроцессорная ЭВМ выполнит линейную программу такого размера за доли секунды. Ясно, что в дальнейшем рост сложности программ не может идти слишком быстрыми темпами, поскольку он в конечном счете ограничивается возможностями человека. Поэтому основное внимание при распараллеливании вычислений следует уделить циклам и особенно вложенным друг в друга циклам. Для этих последних сегодня разработаны методы распараллеливания, не опирающиеся на содержательный смысл задачи (как, например, это имеет место при принятых сейчас методах распараллеливания векторно-матричных операций). С некоторыми из таких методов можно ознакомиться, скажем, по работе Лампорта¹. Правда, техника, изложенная Лампортом, несколько удалена от практических задач распараллеливания, поскольку она не учитывает двух важных обстоятельств: ограниченности числа процессоров и необходимости достаточно полной загрузки каждого из них. При некотором усовершенствовании методов Лампорта можно устранить этот недостаток, получив методы, пригодные для практического распараллеливания. При таком усовершенствовании во многих важных для практики случаях (например, при решении краевых задач математической физики и др.) распараллеливание производится таким образом, что количество информационных обменов между составляющими макроконвейер микрокомпьютерами существенно меньше общего числа выполняемых ими операций. А это обстоятельство как раз и является решающим для получения высокой производительности конвейера при относительно медленной связи между составляющими его частями.

В тех случаях, когда подобное благоприятное обстоятельство не имеет места (например, в случае обычных методов решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных

¹ L. Lamport. «The parallel executions of Do loops». — CACM, 1974, vol. 17, N 2, p. 83—93.

уравнений), можно предложить новые методы решения задач, специально приспособленные для организации высокоэффективных макроконвейеров.

Третья основная идея состоит в распараллеливании процессов планирования и управления в многопроцессорных системах. В известных ныне многопроцессорных системах управление централизовалось в одном процессоре, в результате чего организация эффективной работы большого числа взаимосвязанных рабочих процессоров (как это требуется при создании макроконвейеров) очень замедляется и затрудняется. Кроме того, в вычислительной технике в целом исторически так сложилось, что при управлении вычислительным процессом операционная система имеет дело лишь с рабочей программой. Все же остальные материалы, получаемые (и документирующиеся) в процессе проектирования и изготовления программы (технические задания, блок-схемы, описания в алгоритмических языках и т. п.), при этом полностью забываются.

Предлагаемая идея распараллеливания управления в мультипроцессорной системе состоит в использовании в управляющих процессорах разных иерархических уровней всей полезной для управления документации, получаемой в процессе проектирования рабочих программ. Реализация этой идеи требует в значительной мере перестроить весь процесс проектирования и отладки программ, а также произвести соответствующие изменения документации с целью ее эффективного использования для улучшения управления в мультипроцессорных системах.

Распараллеливанию управления способствует также иерархическое управление ресурсами в описанной выше конструкции мультипроцессорной системы. Управляющие процессоры высших уровней могут не вести точного учета занимаемых и освобождаемых ресурсов в более низких уровнях, подведомственных более младшим управляющим процессорам. Это свойство проявляется с особой силой при включении в состав плат и сборок своих периферийных ЗУ.

Заметим еще, что описанная конструкция включает в себя только основную (базовую) аппаратуру высокопроизводительных мультипроцессорных систем. Она может дополняться различного рода спецпроцессорами (микроконвейерами, матричными и др.), обобществленными ОЗУ и другими устройствами.

Для эффективной работы с периферийными устройствами,

особенно с обобществленными внешними ЗУ, потребуется в ряде случаев менять формы организации файлов. Например, для параллельной работы рабочих процессоров с большим файлом может оказаться целесообразным размещение разных его кусков на различных внешних ЗУ. Есть и еще ряд вопросов, требующих новых по сравнению с ЭВМ традиционной архитектуры подходов и решений.

СЕТИ ЭВМ*

Сетью ЭВМ принято называть множество ЭВМ, объединенных между собой сетью электрической связи и специальной системой математического обеспечения, позволяющими отдельным ЭВМ и реализующимся на них процессам (программам, обрабатывающим ту или иную информацию) обмениваться между собой различными сообщениями.

Для организации связи между удаленными друг от друга ЭВМ определяющее значение имеет то обстоятельство, что принятая форма (как потенциальная, так и импульсная) представления сигналов внутри современных ЭВМ предполагает большую крутизну их фронтов. В результате даже при невысоких темпах посылки сигналов в их естественном (машинном) виде линия связи должна иметь весьма широкую полосу пропускания. При прямых связях (без специальной аппаратуры усиления и восстановления сигналов) для передачи машинных сигналов требуются поэтому дорогостоящие высокочастотные кабели. Но даже и по таким кабелям дальность надежной прямой связи между ЭВМ не превышает обычно несколько сотен метров.

Применяя на приемном конце специальную аппаратуру распознавания, усиления и восстановления формы сигналов, удастся увеличить длину прямых связей. Так, разработанная в Институте кибернетики АН УССР в 1975—1977 гг. аппаратура «Барс» позволяет осуществлять устойчивую передачу машинных сигналов по простым изолированным проводам (без использования специальных высокочастотных кабелей) при частоте следования посылок 20—30 кГц на расстояние до 20 км.

Для передачи машинных сигналов на большие расстояния сегодня принято использовать существующие сети теле-

* Препр. ИК АН УССР № 78—68. Киев, 1978.

графной и телефонной связи. Для обеспечения передачи информации по относительно узкополосным каналам в этих сетях используется несколько иная (и отличная от принятых в ЭВМ) форма представления сигналов. Поэтому при использовании этих каналов для передачи машинных сигналов необходимо на их концах (подсоединенных к ЭВМ или терминалам) ставить специальные устройства для преобразования формы сигналов — так называемые модемы. Для понимания возникающих здесь проблем необходимо хотя бы в общих чертах познакомиться с принципами организации современной системы местной и дальней телефонной связи.

Прежде всего оказывается, что для достаточно качественной передачи обычной человеческой речи достаточно полоса пропускания в 3 кГц (точнее, диапазон частот от 300 до 3400 Гц). Этот стандарт частоты получил наименование тональной частоты. Заметим, что он выбран на основании частотных характеристик оконечных устройств (органов речи и слуха человека), а не каких-либо характеристик самой сети связи.

Сигналы, которые передаются в местных сетях при телефонных разговорах, представляют собой простые электрические копии соответствующих звуковых сигналов. Телефонные аппараты подсоединяются к местным телефонным станциям с помощью так называемых абонентских линий, представляемых физически в виде жил многожильного кабеля. Телефонная станция осуществляет коммутацию абонентских линий, позволяя подсоединить каждого из подключенных к ней абонентов к любому другому. Кроме того, определенная часть коммутируемых кабельных линий предназначена для связи данной телефонной станции с другими телефонными станциями, составляющими местную телефонную сеть.

Для дальней (междугородней) телефонной связи подобная организация использования кабелей, при которой одна физическая линия используется для одновременной передачи многих телефонных разговоров. С этой целью тональной частотой модулируются высокочастотные сигналы, разнесенные по спектру частот так, чтобы возникающие в результате полосы частот не перекрывали друг друга. Если все эти сигналы передаются по одной физической линии одновременно, то с помощью специальных фильтров на приемном конце их можно разделить и демодулировать в исходную тональную частоту. Для надежного разделения несущие частоты долж-

ны быть разнесены по спектру с промежутками, несколько превышающими тональную частоту: в качестве такого промежутка у нас выбрана частота в 4 кГц.

В зависимости от полосы пропускания той или иной физической линии связи употребляются различные степени уплотнения исходного канала (линии связи), т. е. количество виртуальных телефонных каналов, каждый из которых может быть использован (одновременно с другими виртуальными каналами) для передачи телефонного разговора по данной физической линии.

Принятый у нас стандарт предусматривает несколько групп уплотнения. Первичная 12-канальная группа охватывает полосу частот от 60 до 108 кГц. Пять первичных групп составляют вторичную 60-канальную группу с полосой частот от 312 до 552. Пять таких групп объединяются в 300-канальную группу с полосой частот от 812 до 2044 кГц и т. д.

Поскольку для телеграфной связи требуется меньшая полоса пропускания (в принятом у нас стандарте 140 Гц), то для улучшения использования линий при передаче телеграфных сообщений используется аппаратура вторичного уплотнения, образующая в одном телефонном канале 12 телеграфных каналов.

В качестве физических линий при дальней связи, кроме устаревшей проводной связи, используются высокочастотные кабельные линии и радиосвязь в ЦКБ дециметровом и сантиметровом диапазонах. Поскольку в этих диапазонах устойчивая связь обеспечивается лишь в пределах прямой видимости (без огибания радиоволнами поверхности Земли), то линия связи представляет собой ряд вышек с прямопередающими в виде направленных зеркал антеннами, каждая из которых снабжается аппаратурой для необходимого усиления передаваемых сигналов (так называемые радиорелейные связи). Такими же усилительными станциями (расположенными на определенном расстоянии друг от друга) снабжаются также проводные и кабельные линии дальней связи.

В последние годы все большее распространение получают космические (спутниковые) линии связи, использующие в качестве ретрансляционной станции высоколетящие спутники. Особенно удобны так называемые стационарные спутники, период обращения которых вокруг Земли равен периоду обращения Земли вокруг своей оси, а плоскость орбиты совпадает с плоскостью экватора. Такой спутник будет все

время висеть над одной и той же точкой земного экватора, не меняя своего положения относительно поверхности Земли.

Спутниковая связь обладает двумя большими преимуществами. Во-первых, она уменьшает количество промежуточных ретрансляционных станций (которые устанавливаются на спутниках) до одной или в крайнем случае до двух. Во-вторых, в спутниковой связи передаваемый сигнал только малую часть расстояния проходит в непосредственной близости к поверхности Земли, в зоне, насыщенной радиопомехами от гроз и разнообразных технических источников (например, систем зажигания автомобильных двигателей). Благодаря этому надежность спутниковой связи оказывается более высокой по сравнению с другими системами связи.

Как уже отмечалось выше, стандарты, принятые для телефонных каналов, определяются частотными характеристиками оконечных устройств (органов речи и слуха человека). То же самое имеет место и в случае телеграфной связи. Казалось бы естественным, чтобы при организации связи между ЭВМ использовался тот же самый принцип. Тогда задача системы связи сводилась бы к созданию временных каналов соответствующей пропускной способности, так чтобы соединяемые ЭВМ могли обмениваться информацией в естественном для них темпе. Создание сети ЭВМ, удаленных друг от друга на любое расстояние, в принципе не отличалось бы от создания комплекса ЭВМ, расположенных в пределах прямых связей. Единственным отличием были бы необходимость модулирования и демодулирования несущих частот системы дальней связи машинными сигналами и дополнительные требования по борьбе с возникающими в линиях связи помехами.

В действительности развитие сетей ЭВМ пошло по линии вписывания системы передачи данных между машинами в уже существующие стандарты сетей телефонной и телеграфной связи. Поэтому возникает необходимость создания многоуровневой системы преобразования потоков данных, которыми обмениваются ЭВМ через сеть связей и соответствующих систем стандартов представления информации и управления для каждого уровня — так называемых протоколов.

Задачей самого нижнего, так называемого физического, уровня является преобразование стандартных одноканальных сигналов (каждый из которых принимает лишь два значения: 0 и 1) в различные друг от друга сигналы тональной частоты, а также обратное преобразование. Эта задача решается

специальными устройствами модуляции и демодуляции — так называемыми модемами. Простейшие модемы с частотной модуляцией используют для представления 0 и 1 две различные частоты в пределах полосы 300—3400 Гц. Другие типы модемов используют амплитудную или фазовую модуляцию. Возможны также и более сложные комбинированные системы.

Скорость передачи дискретной информации с помощью модемов разных типов определяется прежде всего используемым каналом связи.

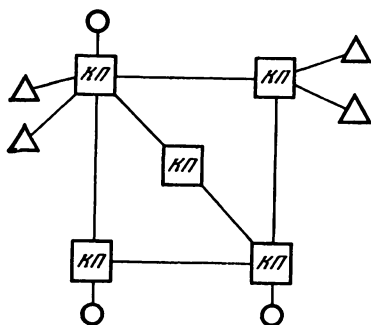


Рис. 1

Различают низкоскоростные модемы, использующие телеграфные каналы; среднескоростные, использующие первичные 12-канальные группы. Внутри этих групп установлены стандарты скорости передачи, зависящие от уровня помех в каналах связи и используемого метода модуляции.

Для низкоскоростной передачи приняты стандарты 50, 100 и 200 бод (бит/с), для среднескоростной — 600, 1200, 1800,

2400, 3000, 3600 и 4800 бод, для высокоскоростной — 19,6, 48 кбод и выше. Для каналов с малым уровнем помех в принципе возможно дополнительное увеличение скорости передачи данных (бит/с), приходящейся на 1 Гц полосы канала. Так, для низкогошумящего стандартного телефонного канала (с полосой 3,1 кГц) удастся передавать данные со скоростью 9600 бит/с. Для понимания специфики преобразования информации в сетях ЭВМ необходимо хотя бы в общих чертах познакомиться с принципами организации (или, как принято говорить, архитектурой) подобных сетей.

Пример сети достаточно простой архитектуры изображен на рис. 1. В узлах этой сети, изображенных квадратами, расположены так называемые коммутационные процессоры (КП), соединяемые между собой (через модемы) линиями дальней связи. Кругиками изображены ЭВМ, а треугольниками — терминалы пользователей. Они подсоединяются к территориально близким к ним узлам сети (через модемы или в пределах прямой связи без них) с помощью местных абонентских линий или (с модемами) — через телефонную сеть.

Коммутационные процессоры могут осуществлять функцию коммутации каналов между абонентами сети (ЭВМ и терминалами), организуя на все время работы двух абонентов друг с другом постоянный канал связи между ними. Однако подобный способ связи приводит обычно к весьма неэкономному использованию каналов связи. Дело в том, что во время сеанса связи между отдельными сообщениями, которыми обмениваются абоненты, могут быть промежутки ожидания, когда канал, будучи занятым, не используется для фактической передачи информации. Даже при непрерывной передаче информации канал может оказаться недогруженным ввиду малой скорости передачи (что, как правило, имеет место при передаче данных с терминалов).

Для более плотной загрузки каналов употребляется другой способ коммутации — так называемая коммутация сообщений. Суть его состоит в том, что сообщения, которыми обмениваются абоненты сети, могут временно запоминаться в узлах сети (в памяти коммутационных процессоров) и передаваться от узла к узлу наиболее экономным способом (как правило, на большой скорости), обеспечивая гораздо лучшее (по сравнению со способом коммутации каналов) использование дорогостоящих каналов дальней связи.

Однако коммутация произвольных сообщений имеет и свою отрицательную сторону: при варьировании длины сообщений в широких пределах память КП приходится рассчитывать на самые длинные из них. В результате происходит неоправданное увеличение стоимости памяти КП при малом среднем коэффициенте ее загрузки.

Для устранения этого недостатка в современных сетях употребляется разбивка сообщений на пакеты стандартной длины, передаваемые независимо друг от друга и зачастую даже по различным путям. Тем самым в задачу управления сетью добавляется управление разборкой и сборкой сообщений, оптимизации маршрутов их передачи в зависимости от загрузки каналов и узлов сети и многое другое.

Опишем теперь основные задачи управления и стандарты представления информации (протоколы) на различных уровнях, начиная с нижнего — так называемого протокола управления информационным каналом (ИКУП). Этот протокол может реализоваться частично в КП, но большей частью в специальных устройствах, называемых адаптерами ЛПД (линии передачи данных).

Главная задача ИКУП — обеспечение достоверности пе-

передачи информации даже при недостаточно надежном канале связи.

Эта задача может быть решена многими способами. Один из них — использование кодов с обнаружением и исправлением ошибок. Простейший из таких кодов — код с контролем по четности, который используется и в ЭВМ. Смысл его состоит в том, что к каждой посылке из заданного числа n битов (в ЭВМ обычно $n=8$) добавляется еще один двоичный

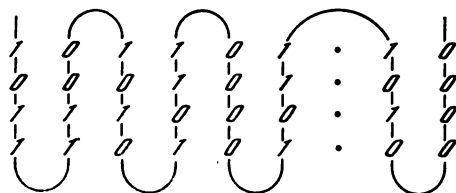


Рис. 2

сигнал (0 или 1), так чтобы общее число единиц в полученной $(n + 1)$ -битовой посылке было четным. Задачей ИКУП в этом случае будут контроль по четности на приемном конце и посылка ответного сигнала на предыдущий конец о результате этой проверки. Если проверка подтвердила правильность приема, то передается следующая посылка, если нет — то осуществляется повторная передача неправильно принятой посылки. Именно так осуществляется контроль правильности передачи информации между центральной и периферийной частями ЭВМ. В сетях связи такой простой способ не годится. Причина заключается в том, что для сетей связи наиболее характерны так называемые **групповые помехи**, которые искажают несколько битов посылки подряд.

Для обнаружения, а тем более для исправления ошибок в случае групповых помех обычные способы потребовали бы неоправданно большого числа контрольных разрядов. Поэтому способ контроля видоизменяется в соответствии с идеей, показанной на рис. 2, где КР — контрольные разряды, позволяющие обнаружить и исправлять ошибки в каждой строке. Однако передача происходит не по строкам, а по столбцам.

Если длина групповой помехи не превосходит одного столбца, а вероятность появления помехи достаточно мала, то даже при наличии такой помехи, как правило, будет искажаться не более одного разряда в каждой строке, что позволяет на приемном конце не только обнаруживать, но и ис-

правлять ошибки при относительно небольшом числе контрольных разрядов.

Необходимость переупорядочивания порядка следования сигналов в посылках до и после передачи сильно усложняет ИКУП. Поэтому на практике обычно употребляют более простой способ контроля правильности передачи посылки: передав посылку от пункта А в пункт В, немедленно передают ее обратно в пункт А, где сравнивают с запомненной копией переданной посылки. В случае совпадения в В передается сигнал правильности передачи и начинается передача следующей посылки. В противном случае процесс передачи посылки повторяется столько раз, сколько потребуется для правильной передачи. Оптимальная длина посылки (обеспечивающая максимум пропускной способности канала) зависит от вероятности искажения передаваемых сигналов. Если эта вероятность равна 10^{-2} (весьма ненадежный канал), то оптимальная длина посылки равна 5 бит. При этом за счет необходимости многократных повторений передачи посылок истинная пропускная способность канала составит всего 1,4% от номинальной. При вероятности ошибки 10^{-4} (канал средней надежности) оптимальная длина посылки равна 57 бит, а коэффициент использования канала поднимается примерно до 50%. Для каналов высокой надежности (вероятность ошибки 10^{-6}) соответствующие величины будут равны 610 бит и 75%. Важно подчеркнуть, что правильно построенный ИКУП (и соответствующая аппаратура передачи данных) позволяет осуществлять надежную передачу данных (хотя и с пониженной скоростью) по сколь угодно плохим каналам.

Еще один вопрос, связанный с ИКУП: как отличать одну посылку от другой? Один из широко употребляющихся способов решения этой проблемы заключается в использовании специальных маркеров в начале и в конце каждой посылки. Например, маркером может служить комбинация 01111110, т. е. группа из 6 последовательных цифр, обрамленных нулями. Чтобы исключить возможность случайного появления такой комбинации в теле посылки, аппаратура передачи данных производит автоматическую вставку (на передающем конце) и исключение (на приемном конце) в теле посылки символа 0 после каждой очередной группы из 5 символов. Тем самым исключается возможность появления группы из 6 единиц подряд.

Следующий (за ИКУП) уровень управления передачей информации в сетях ЭВМ регламентируется так называемым

протоколом пакетной коммутации и соответствующим математическим обеспечением, встроенным в КП сети. Протокол, во-первых, определяет длину пакета (обычно от 256 до 4096 бит), а также содержание и формат заголовка пакета. В заголовок пакета обязательно включаются адреса абонентов, обменивающихся пакетом. КП, анализируя эти заголовки, определяют, какому из узлов сети (соседнему с данным) переслать пакет.

При этом часть операционной системы сети (ОСС), встроенная в КП, решает задачу оптимизации движения пакетов от узла к узлу так, чтобы обеспечить, с одной стороны, наилучшую загрузку линий связи и самих КП и наиболее быструю передачу пакетов конечным адресатам — с другой. Для точного решения этой задачи необходим специальный управляющий процессор, непрерывно получающий информацию о состоянии всех узлов сети и всех линий связи.

Такое централизованное управление загружает сеть передачей большого количества служебной информации и предъявляет повышенные требования к надежности управляющего процессора. Поэтому на практике используют обычно упрощенные приемы приближенной локальной оптимизации, когда решение о направлении пересылки вырабатывается КП, в котором этот пакет находится, на основании информации о непосредственно прилегающих к нему участках сети.

Еще одна задача, решаемая на этом уровне, — задача идентификации и аннулирования дублей пакетов, которые могут возникнуть в результате множественности маршрутов и возможности заикливания. С этой целью в заголовке пакета должен содержаться идентификатор породившего его сообщения. Обычно он составляется из сетевого номера пославшей сообщение ЭВМ, номера процесса в этой ЭВМ (а иногда и кода пользователя), инициировавшего данное сообщение, и, наконец, идентификатора самого сообщения в этом процессе.

Следующий уровень управления имеет дело с задачей сборки и разборки сообщений на отдельные пакеты с формированием и последующим уничтожением соответствующих заголовков пакетов. Этот уровень управления регламентируется так называемым транспортным протоколом и реализуется частью ОСС, называемой обычно процессором абонентских сообщений (ПАС). В первых сетях ПАС встраивался обычно в КП. В более поздних сетях (например, во французской CYCLADES) ПАС реализуется в абонентских ЭВМ

(АВМ) и управляется их операционными системами как одна из задач пользователя. Такое решение обеспечивает большую стандартность сети и ее независимость от типа подключаемых к ней АВМ. При подсоединении АВМ к КП стандартная часть интерфейса реализуется в КП, а нестандартная — в самой АВМ и специальных сетевых адаптерах.

Еще более высокий уровень управления (реализующийся в АВМ) организует потоки сообщений от процесса к процессу, включая задачу формирования заголовков сообщений на передающем конце и их упорядочивание в правильный поток (упорядоченный по номерам сообщений). На этом уровне реализуются макрокоманды создания и уничтожения так называемых виртуальных каналов, связывающих между собой удаленные процессы. Соответствующая часть ОСС (встраиваемая в АВМ) носит название супервизора виртуальных каналов.

Дальнейшая детализация управления решается на уровне протокола процесс—процесс и соответствующей части ОСС (встроенной в АВМ) так называемым сетевым супервизором процессов (СПС). На этом уровне организуется связь портов. В качестве порта могут выступать некоторый массив данных (файл), устройство ввода — вывода, некоторая точка программы, в которой генерируются или потребляются сообщения. Это примеры индивидуальных портов (принадлежащих определенному процессу). Примером коллективных портов могут служить входы в системы управления базами данных (СУБД) с последующим уточнением адресата (файла или записи) с помощью средств самих СУБД.

Каждый порт снабжается сетевым идентификатором, состоящим из сетевого идентификатора АВМ, идентификатора пользователя этой АВМ, идентификатора, присвоенного процессу и, наконец, идентификатора порта в процессе. Порт снабжается необходимой буферной памятью для размещения формируемых и принимаемых сообщений. На уровне протокола процесс — процесс реализуются макрокоманды (связанные с ОС АВМ): «открыть порт», «закрыть порт», «соединить (или разъединить) порт с портом» (создать или аннулировать соответствующий виртуальный канал).

Еще более высоким уровнем ОСС и соответствующих протоколов является уровень управления решением задач на сети. Основная решаемая здесь задача — создание виртуальных сетей процессов (в различных АВМ). Обычно этот уровень реализуется в виде совокупности мониторов сете-

вых абонентских служб, каждый из которых предназначен для исполнения сетью той или иной определенной функции (например, справочно-информационной). Такие мониторы могут встраиваться в АВМ, либо в специальные информационно-диспетчерские ЭВМ (ИДВМ). В таких ИДВМ может, например, реализоваться функция безадресного обращения любого пользователя сети к распределенному (между абонентскими ЭВМ) банку данных через соответствующую систему сетевых каталогов. В задачу мониторов абонентских служб входит планирование и управление процессом решения задач на сети с учетом загрузки отдельных АВМ и линий связи. Все эти функции регламентируются специальными протоколами.

Помимо уже перечисленных протоколов в ряде действующих сетей используются и другие протоколы, как, например, специальные протоколы для пересылки файлов, для удаленного ввода заданий, протокол виртуального терминала и др.

В связи с развитием многих сетей национального и даже межнационального масштаба с различными системами протоколов возникает специальная задача организации межсетевых взаимодействий. Для решения этой задачи обычно устанавливается общий (межсетевой) протокол процесс — процесс, фиксируются единый формат сообщений и единый язык управления обменом сообщениями. Для преобразования подобных межсетевых сообщений в форматы, принятые в отдельных сетях, некоторые узлы (КП) объединяемых сетей соединяются друг с другом линиями связи через специальные устройства (обычно универсальные ЭВМ с адаптерами), называемые шлюзами.

Идеи создания универсальных (для решения широкого круга вычислительных и справочно-информационных задач) сетей ЭВМ возникли в конце 50-х — начале 60-х годов. В 1963 г. под руководством автора был разработан эскизный проект Единой Государственной Сети Вычислительных Центров (ЕГСВЦ), предусматривавший объединение в единую систему нескольких десятков тысяч ЭВМ и сотен тысяч терминалов, охватывающих всю территорию страны. В ней предусматривалось безадресное обращение к распределенным банкам данных, решение сложных задач на сотнях удаленных друг от друга ЭВМ в диалоговом режиме и многое другое.

Практическая реализация проекта началась в 70-е годы. За рубежом были созданы хотя и меньших масштабов, но тем не менее эффективно работающие универ-

сальные сети (сети ARPA и CYBERNET в США (1969 г.) и др.).

Следует, однако, отметить, что некоторые идеи проекта ЕГСВЦ до сих пор не нашли полного решения. В качестве такой идеи можно указать на идею иерархической структуры сети, верхний уровень которой должны были составить сверхмощные общегосударственные ВЦ с широкополосными связями (в обход обычной каналообразующей аппаратуры) и соответствующим резким упрощением протоколов обменов на этом уровне.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА В СССР*

Развитие цифровой электронной вычислительной техники в СССР началось в 1947—1948 гг., когда академик С. А. Лебедев в Институте электроники АН УССР начал работу по созданию первого в СССР электронного компьютера МЭСМ. В 1950 г. заработал макет МЭСМ, а в 1951 г. компьютер был официально введен в эксплуатацию и на нем началось регулярное решение задач. МЭСМ была построена по трехадресному принципу с быстродействием 50 оп/с. Машина оперировала с 20-разрядными двоичными числами и имела оперативную память на электронных лампах объемом в 100 ячеек. Позднее к МЭСМ был подключен магнитный барабан.

Параллельно в Москве в Институте точной механики и вычислительной техники С. А. Лебедев организовал разработку гораздо более мощного компьютера БЭСМ со средним быстродействием около 10 тыс. трехадресных операций в секунду над 39-разрядными словами. Оперативная память на электронно-акустических линиях задержки емкостью в 1024 слова вскоре была заменена памятью на электронно-лучевых трубках, а затем — на ферритовых сердечниках. Внешнее ЗУ было представлено двумя магнитными барабанами и магнитной лентой емкостью более 100 тыс. слов. БЭСМ была введена в эксплуатацию в 1952—1953 гг. и послужила основой технической базы созданного в 1955 г. Вычислительного центра АН СССР, возглавляемого со времени его основания академиком А. А. Дородницыным. Параллельно с БЭСМ в Москве велась разработка (под руководством Ю. Я. Ба-

* USSR, computing in.— In: Encyclopedia of computer science and technology. New York and Basel, M. Dekker, 1979, vol. 13, p. 498—507.

зильевского) компьютера «Стрела» с меньшим быстродействием, чем БЭСМ, но с большим объемом оперативной памяти. Разработка «Стрелы» была закончена в 1953 г. Машины БЭСМ и «Стрела» выпускались серийно.

Помимо Москвы и Киева в 50-е годы коллективы разработчиков ЭВМ сложились в ряде других городов. В Пензе под руководством Б. И. Рамеева были разработаны и выпускались серийно машины серии «Урал» («Урал-1, -2, -3, -4»). В Ереване под руководством Ф. Т. Саркисяна разрабатывались и выпускались компьютеры серии «Раздан». Сильный коллектив начал складываться в Минске (В. В. Прижиялковский и др.). Им была организована разработка и выпуск машин серии «Минск» («Минск-1, -11, -12, -14»). В Киеве была создана ЭВМ «Киев».

В качестве элементной базы у всех машин, создававшихся в 50-е годы, служили электронные лампы, полупроводниковые диоды и ферритовые сердечники. Самой мощной из компьютеров 50-х годов была машина М-20, разработанная в 1958 г. в Москве под руководством С. А. Лебедева. Среднее быстродействие ее — 20 тысяч трехадресных операций над 45-разрядными словами (с плавающей запятой) в секунду. Оперативная память на ферритовых сердечниках объемом в 4096 слов.

Все перечисленные компьютеры первого поколения предназначались в основном для научных расчетов. В 50-е годы на их базе, кроме уже упомянутого Вычислительного центра АН СССР, были созданы ВЦ в Академиях наук республик, а также в ряде крупных научно-исследовательских, проектно-конструкторских институтах и университетах.

В 50-е годы стала развиваться и компьютерная наука. В 1957—1958 гг. в Киеве был разработан первый универсальный процедурно-ориентированный язык программирования — так называемый адресный язык (В. С. Королюк, Е. Л. Ющенко). В Москве А. А. Ляпуновым и его учениками разрабатывался язык операторных схем программ. На базе адресного языка и языка операторных схем в Киеве и в Москве были созданы первые системы автоматизации программирования (компайлера для ЭВМ Киев, БЭСМ и др.).

Начались работы по теории автоматов, искусственному интеллекту и дискретному анализу (В. М. Глушков, Ю. И. Журавлев, О. Б. Лупанов, С. В. Яблонский и др.).

Мощное развитие получил численный анализ, к развитию которого были привлечены крупнейшие советские мате-

матики (И. М. Гельфанд, А. А. Дородницын, М. В. Келдыш, М. А. Лаврентьев, А. Н. Тихонов и др.).

В 60-е годы началась эпоха машин второго поколения, строящихся на базе транзисторов. На транзисторной элементной базе развивались в эти годы все сложившиеся ранее семейства машин. ЭВМ средней мощности для научных расчетов в этот период представляли московские разработки (М-220, БЭСМ-3, БЭСМ-4), пензенские («Урал-11», «Урал-14» и несколько позднее «Урал-16»), минские («Минск-22», «Минск-23», «Минск-32»), ереванские («Раздан-2», «Раздан-3») и др.

Особо следует отметить ЭВМ большой мощности для научных расчетов БЭСМ-6, созданную в 1967 г. в Институте точной механики и вычислительной техники под руководством С. А. Лебедева и В. А. Мельникова. Машина работает с 50-разрядными двоичными словами. Использует одноадресную систему команд. ОЗУ на ферритовых сердечниках емкостью от 32 тыс. до 128 тыс. слов с временем цикла 2 мкс. регистровая память на 16 слов с временем цикла 300 нс. Внешние ЗУ включают 16 магнитных барабанов по 32 тыс. слов и 32 лентопротяжки емкостью свыше миллиона слов на одно устройство. Время сложения двух чисел с плавающей запятой 1,2 мкс, умножения — 2,1 мкс. ЭВМ БЭСМ-6 имеет развитое математическое обеспечение. Операционная система компьютера организует мультипрограммную обработку нескольких задач, каждая из которых располагает полным объемом виртуальной памяти. Система автоматизации программирования использует в качестве входных языков Фортран, Алгол-60, ЛИСП. В разработке математического обеспечения БЭСМ-6 принимали участие ведущие советские программисты Л. П. Королев, М. Р. Шура-Бура, Н. Н. Говорун, Э. З. Любимский и др.

В этот период были созданы и другие системы автоматизации программирования для больших и средних ЭВМ, среди которых необходимо прежде всего отметить так называемую α -систему для ЭВМ М-20м, созданную в Новосибирске под руководством А. П. Ершова. В качестве входного языка система использует расширение языка Алгол-60. Впоследствии система была распространена на ЭВМ БЭСМ-6. Помимо БЭСМ-6 в 60-е годы получили некоторое распространение и другие типы высокопроизводительных ЭВМ, как, например, «Весна».

В 60-е годы большое развитие получили также полупроводниковые миникомпьютеры для научных расчетов.

Наибольшее распространение получили в этот период ереванские миникомпьютеры «Наири-1» (1964 г.) и «Наири-2» (1967 г.) (Г. Е. Овсепян и др.), а также киевские миникомпьютеры «Проминь» (1963 г.), МИР-1 (1965 г.), МИР-2 (1969 г.) (В. М. Глушков и др.). В машине «Проминь» была впервые реализована двухуровневая асинхронная микропрограммная система управления, получившая дальнейшее развитие в ЭВМ класса МИР. В ЭВМ МИР-1 и МИР-2 была впервые реализована идея повышения уровня «машинного интеллекта» за счет применения развитых внутренних машинных языков и высокоэффективных интерпретирующих систем, построенных на принципах иерархического микропрограммного управления. Для этих компьютеров были созданы специальные входные языки МИР и его расширение «Аналитик», в своей основе совпадающие с внутренними языками машин МИР-1 и МИР-2. Так что процесс трансляции с входного языка на внутренний практически почти исключен, сводясь в основном к операциям перекодирования.

В языке Аналитик можно оперировать не только целыми числами и десятичными дробями, но и обыкновенными дробями. Операторами языка служат операции аналитического дифференцирования и интегрирования, применения тождеств к выражениям и др. Компьютер МИР-2 обеспечивает диалог с пользователем через дисплей со световым пером.

Благодаря ступенчатой организации микропрограммного управления и оптимизации микропрограмм удалось добиться двух целей: во-первых, разместить в ограниченном объеме ПЗУ (only read memo.y) систему интерпретации сложного языка (емкость ПЗУ в компьютере «МИР-2» около 200 тыс. байт), а во-вторых, обеспечить высокую скорость интерпретации. Благодаря этому МИР-2 может успешно соревноваться в скорости выполнения аналитических преобразований с компьютерами, превосходящими его по номинальному быстродействию в десятки раз.

В 60-е годы бурными темпами стало развиваться применение ЭВМ для управления технологическими процессами, а также для сбора и обработки экспериментальных данных в реальном масштабе времени. В 50-е годы для этих целей применялись лишь специализированные вычислительные устройства. В 1958 г. автором была высказана идея создания универсальной управляющей ЭВМ, обладающей стандартизованным интерфейсом с аналого-

выми устройствами (датчики с исполнительными механизмами) и операционной системой реального времени. В 1961 г. такая машина под именем «Днепр-1» была создана в Институте кибернетики Академии наук УССР (В. М. Глушков, Б. Н. Малиновский и др.) и с этого года до начала 70-х годов выпускалась промышленностью. Она была первой серийно выпускавшейся советской полупроводниковой универсальной ЭВМ.

В 1967 г. в Институте кибернетики АН УССР была создана новая, более мощная управляющая ЭВМ «Днепр-2», также выпускавшаяся серийно. Машина имела развитую систему прерываний и обеспечивала одновременную работу более чем с 1600 входными и более чем с 1000 выходными аналоговыми устройствами различных классов.

В 1963 г. была разработана и выпускалась некоторое время серийно малогабаритная управляющая машина УМШН.

В 60-е годы впервые в достаточно широких масштабах началось применение ЭВМ для планово-экономических расчетов. На многих предприятиях старая счетно-перфорационная техника стала заменяться ЭВМ. Были созданы многие десятки вычислительных центров для коммерческих расчетов. Этот процесс сильно затруднялся тем обстоятельством, что отечественная промышленность в 60-е годы была ориентирована в основном на выпуск ЭВМ для научных расчетов и малогабаритных управляющих ЭВМ. Оборудование для автоматизированных систем управления (АСУ) и систем обработки коммерческих данных с большими объемами информации либо выпускалось в незначительных количествах, либо не выпускалось вовсе. Однако, несмотря на эти трудности, на ряде предприятий удалось уже в 60-е годы построить эффективные АСУ. В качестве примера можно указать АСУ на телевизионном заводе во Львове (В. М. Глушков, В. И. Скурихин и др.), созданную вначале на базе скомплексированных ЭВМ «Минск-22», а затем — на комплексе из двух ЭВМ «Минск-32», снабженном некоторой дополнительной (специально разработанной для этой цели) аппаратурой. Несмотря на отсутствие в системе магнитных дисков, удалось создать интегрированный банк данных с обновлением в реальном масштабе времени и решать не только учетные, но и планово-управленческие задачи, в частности, задачи оперативно-календарного планирования (теории расписаний).

В 1963 г. автором был разработан первый проект объединения АСУ в единую общегосударственную систему — государственную сеть вычислительных центров (В. М. Глушков и др.).

В 70-е годы в результате решений XXIV съезда коммунистической партии Советского Союза резко увеличились темпы создания АСУ. Начали создаваться основы государственной системы передачи данных. Промышленность была переориентирована на выпуск ЭВМ третьего поколения, пригодных как для научных, так и для коммерческих расчетов. Требования совместимости ЭВМ для работы в сетях и резко увеличившиеся потребности в обмене (в том числе международном) программами и информацией на машинных носителях вызвали необходимость в большей стандартизации и унификации выпускаемых ЭВМ. С этой целью в начале 70-х годов был разработан ряд ЭВМ средней и высокой производительности (ЕС ЭВМ). В разработке и выпуске ЕС ЭВМ, кроме СССР приняли участие также Болгария, Венгрия, Польша, Чехословакия и Германская Демократическая Республика. По соображениям облегчения международного обмена программами и информацией в ЕС ЭВМ обеспечена совместимость с наиболее распространенными в мире моделями ЭВМ третьего поколения ИБМ-360 и -370.

Архитектура и программные средства ЕС ЭВМ также близки к решениям, принятым в системах ИБМ-360 и -370, поэтому нет нужды останавливаться на них подробнее.

Приведем лишь некоторые характеристики одной из старших моделей ряда ЕС 1060: быстродействие этой машины 10° оп/с по смеси Гибсона. Емкость ОЗУ от 2048 до 8192 кбайт, элементная база (включая быструю память) — интегральные схемы. Следует отметить, что наиболее производительные ЭВМ для научных расчетов в 70-е годы создавались вне рамок ЕС ЭВМ. При их разработке предпочтение отдавалось совместимости с наиболее распространенной в СССР высокопроизводительной ЭВМ второго поколения БЭСМ-6.

В области миникомпьютеров в конце 60-х — начале 70-х годов наряду с дальнейшим развитием уже упомянутых выше систем МИР и «Наири» (МИР-31, МИР-32, «Наири-3», «Наири-4») развивались новые семейства ЭВМ, в частности ЭВМ серии АСВТ М-6000 и М-7000 (В. В. Резанов и др.). Эти миникомпьютеры нашли широкое применение

для управления технологическими процессами. На базе интегральной технологии были созданы компактные (настольные) миникомпьютеры М-180, «Электроника-100, -200» и др.

Появление микропроцессоров привело в 1975—1976 гг. к созданию и промышленному выпуску первых микрокомпьютеров.

К концу первой половины 70-х годов возникла необходимость унификации миникомпьютеров, подобно тому, как это было сделано в отношении больших и средних машин. В 1975—1976 гг. в сотрудничестве с Болгарией, Венгрией, Польшей, Чехословакией и ГДР был создан ряд миникомпьютеров третьего поколения СМ1, СМ2, и СМ3 (с соответствующей периферией), перекрывающий широкий диапазон применений, начиная от научных расчетов и кончая управлением технологическими процессами и обработкой экспериментальных данных в реальном масштабе времени.

В области технологии изготовления микросхем большой степени интеграции помимо традиционных методов успешно развивалась эллионная технология. Для управления электронными и ионными пучками были созданы специализированные миникомпьютеры «Киев-67» и «Киев-70» (В. М. Глушков, В. П. Деркач и др.). Созданные на базе «Киев-70» установки обеспечили точности изготовления микросхем порядка 0,1 мкм. Наряду с электронной литографией были разработаны методы прямого изготовления р — п-переходов методами электроннолучевого легирования (В. М. Деркач и др.).

К началу 70-х годов все ведущие организации, занимающиеся созданием новых ЭВМ, создали у себя автоматизированные системы проектирования печатных плат и междуплатных соединений. Были созданы системы автоматизированного проектирования больших интегральных схем.

Проектирование архитектуры ЭВМ и операционных систем уже в 60-е годы опиралось на системы моделирования. Широкое применение для этих целей нашел разработанный в Институте кибернетики АН УССР в 1966—1968 гг. язык моделирования дискретных систем СЛЭНГ с соответствующими системами компиляции составленных на нем программ (В. М. Глушков, Л. А. Калинин, Т. П. Марьянович и др.). В 1974 г. тем же коллективом (без Л. А. Калинин) был разработан язык и система моделирования НЕДИС, включившая в себя средства описания и модели-

рования не только дискретных, но и непрерывных систем.

В области логического проектирования наряду с традиционным математическим аппаратом булевой алгебры и теории автоматов с конца 60-х годов стали применяться более глубокие методы оптимизации микропрограмм и структур ЭВМ. Подобные применения были подготовлены работами по формальным преобразованиям схем программ (Ю. И. Янов, А. П. Ершов, Р. И. Подловченко и др.) и созданием в 1966—1967 гг. нового раздела дискретной математики — теории алгоритмических алгебр и дискретных преобразователей (В. М. Глушков, А. А. Легичевский и др.). Последние результаты позволили представлять программы и микропрограммы ЭВМ как формулы в некоторой алгебре и осуществлять любые их эквивалентные преобразования. На базе этой теории в Институте кибернетики АН УССР создана система автоматизации проектирования ЭВМ вместе с их математическим обеспечением, допускающая в диалоговом режиме глубокую оптимизацию архитектуры и программного обеспечения разрабатываемых ЭВМ (В. М. Глушков, Ю. В. Капитонова и др.). Особенно большой эффект система дает в том случае, когда приходится проектировать ЭВМ нетрадиционной структуры, как, например, ЭВМ серии МИР. Для этой системы разработан ряд оригинальных проблемно-ориентированных языков.

Автоматизация программирования в 60-е годы наряду с научными задачами стала все в большей мере затрагивать и сферу задач обработки данных в АСУ. Наряду с известными языками, применяющимися в мире для этих целей (Кобол и др.), были разработаны в 1964—1966 гг. отечественные языки АЛГЭК и АЛГЭМ, являющиеся своеобразными гибридами языков Алгол-60 и Кобол, а также соответствующие системы компиляции (М. А. Королев, А. И. Китов и др.).

Для систем программирования, созданных в 70-е годы, характерна ориентация на одновременную реализацию нескольких языков, они применяют развитые средства редактирования, отладки и контроля программ. Начали применяться синтаксически управляемые трансляторы, создаются инструментальные системы программирования (А. П. Ершов, С. С. Лавров, Е. Л. Юценко, М. Р. Шура-Бура, Г. С. Цейтин и др.). Развивалась теория программирования,

теория формальных языков, теория структур данных. Изучались проблемы параллельного (асинхронного) программирования, вопросы доказательства утверждений о программах, методы построения полных систем примеров для отладки программ (Я. М. Барздинь, А. П. Ершов, В. Е. Котов, В. Н. Редько, Е. Л. Ющенко и др.). Дальнейшее развитие получили автоматизм-алгебраические методы решения задач анализа и оптимизации алгоритмов. Были найдены подходы к составлению больших программ и систем программ, близкие к идеям структурного программирования (В. М. Глушков, Ю. В. Капитонова, А. А. Летичевский и др.).

В области архитектуры ЭВМ, помимо уже отмеченных работ, нашедших воплощение в реальных машинах, в 60-е и 70-е годы проводилась большая теоретическая работа над однородными вычислительными средами (Э. В. Евреинов и др.). Эта работа дала и практические результаты в виде разработанных методов для параллельных вычислений, которые нашли применение при решении сложных задач на созданных еще в 60-е годы многомашинных вычислительных комплексах и многопроцессорных ЭВМ второй половины 70-х годов. Отметим еще идею рекурсивной организации многопроцессорных вычислительных систем (В. М. Глушков, М. П. Игнатъев, В. А. Мясников, В. А. Торгашев) и работы по созданию квазианалоговых ЭВМ (Г. Е. Пухов и др.).

Для применения ЭВМ в 70-е годы характерно не только дальнейшее развитие вычислительных центров общего назначения, предназначенных для случайных потоков разнообразных задач от широкого круга пользователей. Преимуществом роль в этот период начинают играть специализированные информационно-вычислительные центры, предназначенные для решения задач определенных классов. Это — системы обработки экспериментальных данных, для управления сложными технологическими процессами (включая станки с числовым программным управлением), автоматизированные системы организационного управления и обработки данных различных классов, системы комплексной автоматизации испытаний сложных объектов, системы автоматизации проектно-конструкторских работ тех или иных классов и т. п.

Для таких центров характерны более регулярные потоки задач, необходимость комплексирования ЭВМ, а также

другого оборудования, в том числе и такого, которое не применяется в ВЦ общего назначения, наличие собственных банков данных коллективного пользования, возможность диалоговых режимов работы и др. Это вызывает необходимость в разработке специального математического обеспечения, включая специализированные операционные системы и специализированные системы автоматизации программирования. Подобные специализированные ВЦ в 70-е годы стали насчитываться сотнями и даже тысячами. Начиная с 1967 г. для подобных специализированных ВЦ стали создаваться типовые проектные решения, ориентированные на разные классы применений и разные конфигурации технических средств. Так, в 1967—1971 гг. была разработана типовая система автоматизации организационного управления для машиностроительных и приборостроительных предприятий, примененная затем на нескольких сотнях заводов (В. М. Глушков и др.).

Для ВЦ общего назначения в 70-е годы стали развиваться системы коллективного пользования с удаленными терминалами (в Киеве, Новосибирске, а затем и в других городах). В специализированных ВЦ удаленные терминалы использовались уже в 60-е годы.

Интенсивными темпами развивалась в 60-е и 70-е годы вычислительная математика и соответствующие пакеты прикладных программ. Помимо традиционных задач численного анализа (особенно численных методов решения задач математической физики) (А. А. Дородницын, А. Н. Тихонов, А. А. Самарский, Н. И. Яненко, Т. М. Энеев и др.) в этот период интенсивно развивались методы математического программирования — для нелинейных, стохастических, динамических и целочисленных задач большой размерности (Н. Н. Моисеев, В. С. Михалевич, Ю. М. Ермолев, В. А. Емеличев, Б. Н. Пшеничный, Н. З. Шор и др.).

Получены интересные результаты в области теории и машинных методов распознавания образов (Ю. И. Журавлев, В. А. Ковалевский и др.), в области машинного доказательства теорем (В. М. Глушков, А. А. Летичевский, Ю. В. Капитонова, С. Ю. Маслов, Н. А. Шанин и др.), методов математического моделирования сложных систем (Н. П. Бусленко, И. Н. Коваленко и др.).

ОСНОВНЫЕ АРХИТЕКТУРНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭВМ*

Реализация архитектурных принципов построения ЭВМ, известных как принципы фон Неймана, открыла эру вычислительной техники.

Первый принцип — максимально возможная простота процессора и связанная с ней простота машинного языка системы команд ЭВМ.

Второй принцип — последовательное (командно-адресное) управление вычислительным процессом, при котором команды извлекаются из оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) и исполняются (в процессоре) последовательно одна за другой. Данные (операнды) для каждой команды хранятся в том же самом ОЗУ по адресам, указываемым в команде. Взаимосвязь (интерфейс) процессора и ОЗУ ограничивает возможности этих устройств, являясь своеобразным «узким горлышком» всей архитектуры фон Неймана.

Третий принцип — адресная организация ОЗУ с последовательной (линейной) структурой адресов и фиксированным размером ячеек. Такая организация ОЗУ плохо согласуется со сложными структурами данных, которые характерны для большинства задач, решаемых на современных ЭВМ.

Четвертый принцип — использование процессора для управления всеми вспомогательными операциями, обеспечивающими вычислительный процесс: обменами между ОЗУ и внешней памятью, а также вводом/выводом информации.

Пятый принцип — жесткость архитектуры, исключающей любое изменение конфигурации совокупности устройств, входящих в состав ЭВМ как с точки зрения изменения состава устройств, так и с точки зрения изменения взаимосвязей между ними.

С позиции сегодняшнего дня недостатки архитектуры, строящейся на базе принципов фон Неймана, очевидны. Не следует забывать, однако, что они в свое время сыграли

* Проблемы ВТ: спецвыпуск МЦНТИ, 1981, с. 6—21.

весьма прогрессивную роль и при существующем тогда уровне техники были единственно возможными. Ввиду громоздкости, дороговизны и малой надежности логических элементов, строившихся на электронных лампах, конструкторы ЭВМ вынуждены были максимально ограничивать число таких элементов. Структура ОЗУ также лимитировалась имевшимися реальными техническими возможностями.

Однако уже на ранних ступенях развития электронной вычислительной техники было ясно, что прогресс электронной технологии рано или поздно приведет к возможности разработки принципиально новых архитектурных решений. Если предположить, что конструктор может объединять в систему не несколько тысяч логических элементов, как это было в эпоху электронно-ламповой технологии, а многие десятки миллионов (причем на число соединений между этими элементами практически не имеется никаких ограничений), то лучшими архитектурными решениями для ЭВМ будут мозгоподобные структуры. Характерной особенностью их является слияние памяти с обработкой данных: данные обрабатываются одновременно по всей памяти с максимально возможной степенью распараллеливания всех операций. Перспективность подобных структур при соответствующем прогрессе микроэлектроники отмечалась автором на конференции в Киеве уже в 1959 г. Подчеркнем, что речь идет именно о мозгоподобных структурах, а не о точном копировании мозга, в котором эффективно распараллеливаются далеко не все операции (в частности, в мозге плохо распараллеливаются собственно вычислительные операции).

Хотя мозгоподобные структуры с параллельными процессами, управляемыми многими потоками данных и команд, несомненно, представляют собой высший уровень развития архитектур ЭВМ, однако при нынешнем уровне электронной технологии полная и бескомпромиссная их реализация является пока еще преждевременной. Необходимы компромиссные решения, представляющие собой переходные этапы к мозгоподобным структурам будущего на основе разумного отступления от принципов фон Неймана.

Следует подчеркнуть, что повышение производительности ЭВМ в нашем понимании отнюдь не сводится к простому увеличению их быстродействия. Речь идет о производительности применительно к полному циклу решения задачи на

ЭВМ, включая программирование, а также подготовку и ввод исходных данных. С этой точки зрения любую ЭВМ можно рассматривать как своеобразную фабрику (или в простейших случаях мастерскую) по переработке информации. Эта аналогия выходит за рамки простых популяризаторских целей и является в действительности настолько глубокой, что может служить (и уже не раз послужила) источником новых идей в развитии архитектуры ЭВМ и вычислительных комплексов.

Мы используем эту аналогию для того, чтобы проследить генезис основных идей совершенствования архитектуры ЭВМ с целью повышения их производительности. Исходная неймановская архитектура при этом уподобляется примитивной кустарной мастерской, где кустарь-одиночка (процессор) сам выполняет все работы: достает исходные материалы (вводит данные) и инструкции по их обработке (программу), располагает эти материалы и инструкции по полочкам склада (ячейкам ОЗУ), выбирает в установленном порядке инструкции и материалы, подвергая их обработке в соответствии с этими инструкциями, раскладывает полученные полуфабрикаты по полочкам склада, а готовые изделия выдает во внешний мир. В случае, если емкости основного (оперативного) склада (ОЗУ) не хватает, процессор занимается перемещением менее нужных в настоящий момент материалов и инструкций на дополнительные, более емкие, но более труднодоступные склады внешних запоминающих устройств (ВЗУ), освобождая место в основном складе.

Следует подчеркнуть при этом, что в соответствии с первым принципом фон Неймана сам кустарь (процессор) весьма далек от совершенства: он владеет навыками лишь самых простых операций и не способен запоминать и исполнять несколько таких операций подряд: правила выполнения каждой из них он должен каждый раз извлечь со склада, прочесть и лишь после этого исполнить. Поэтому даже в случае очень быстрого темпа проведения отдельных операций и обращений к складу производительность подобной кустарной мастерской при выполнении сложных заданий может быть сравнительно небольшой.

Переходя к рассмотрению принципов повышения производительности ЭВМ, мы для простоты будем останавливаться лишь на основных (базовых) принципах, подразумеваемая как нечто само собой разумеющееся, что в реальных

архитектурных решениях могут использоваться самые разные комбинации этих принципов.

Первый базовый принцип повышения производительности ЭВМ — рост «интеллектуальности» процессора, т. е. придание ему способности выполнять по одной команде достаточно сложные операции. Повышая тем самым уровень машинного языка, мы сразу решаем три важных задачи. Во-первых, резко упрощаем программирование, не используя при этом дополнительных затрат машинного времени на трансляцию программ с языков высокого уровня на примитивные (неймановские) машинные языки. Во-вторых, уменьшая длину программы, мы сокращаем время на обращение процессора к ОЗУ и, экономя память, сокращаем непроизводительные пересылки между ОЗУ и ВЗУ. В-третьих, специально конструируя процессор для выполнения более сложных операций, можно принять дополнительные меры для увеличения его быстродействия.

Идея повышения «интеллектуальности» процессора была не только впервые высказана (1959 г.), но и впервые реализована в СССР в ЭВМ МИР-1 (серийный выпуск с 1965 г.). В 1966 г. Институтом кибернетики АН УССР разработан технический проект большой ЭВМ «Украина», в которой были заложены возможности схемной интерпретации многих появившихся к тому времени проблемно-ориентированных алгоритмических языков.

Примерно в это же время (1967—1968 гг.) идея повышения уровня «интеллектуальности» процессоров была воспринята американской фирмой «Burrough», а в 70-е годы она получила уже всеобщее признание и широкое распространение.

Следует отметить, что на первом этапе реализации идеи усложнению подверглось в основном лишь устройство управления (УУ) процессора за счет включения в его состав быстросействующего иерархического запоминающего устройства (ЗУ) для запоминания микропрограмм достаточно сложных операций. Уже в машине МИР-1 в УУ включались микропрограммы столь сложных операций, как вычисление определенных интегралов, факториала, не говоря уже о вычислениях простейших элементарных функций. По сравнению с обычной (программной) реализацией таких операций получен значительный прирост производительности ЭВМ.

В гораздо большей степени этот эффект проявился в ЭВМ МИР-2, где в УУ были встроены ступенчатые микро-

программные ЗУ, реализующие в качестве элементарных операций сложные аналитические преобразования. Выигрыш в производительности был так велик, что для многих конкретных аналитических задач время их решения на ЭВМ МИР-2 оказывалось (с учетом времени, необходимого для трансляции) сравнимым с временем их решения на машинах неймановской архитектуры с номинальным быстродействием (на элементарных операциях), в сотни раз превосходившим быстродействие машины МИР-2.

Второй этап реализации идеи повышения способностей процессоров связан с усложнением арифметических или (как их стали к этому времени называть) арифметико-логических устройств (АЛУ). Это позволило реализовать дополнительные возможности по распараллеливанию и ускорению выполнения сложных операций. Кроме того, развитие микроэлектроники в 70-е годы привело к возможности замены пассивных (долговременных) микропрограммных ЗУ оперативными. Это вызвало к жизни так называемую мягкую архитектуру процессоров, при которой функциональная ориентация процессоров (т. е. набор выполняемых ими операций) может оперативно меняться не только при переходе от одних классов задач к другим, но даже в процессе решения одной и той же задачи. Тем самым были задействованы дополнительные резервы увеличения производительности процессоров.

Второй базовый принцип повышения производительности ЭВМ — освобождение процессора от выполнения таких вспомогательных операций, как управление вводом/выводом данных, а также обменами между ОЗУ и ВЗУ. С этой целью в состав ЭВМ наряду с фоннеймановским центральным процессором вводятся специализированные процессоры, называемые обычно каналами, или периферийными, процессорами. Кроме того, определенная часть функций управления периферийным оборудованием (устройствами ввода/вывода и внешней памяти) передается специальным контроллерам, сопрягаемым с этим оборудованием.

С учетом «производственной аналогии» это означает появление в «мастерской» по переработке информации наряду с основным «мастером» (центральным процессором) также «вспомогательного рабочего персонала». Освобождая время центрального процессора для основных производственных операций, подобное усовершенствование вместе с тем налагает на него дополнительную функцию коорди-

нации работы всех остальных функциональных звеньев. Сюда входит не только выдача заданий специализированным процессорам, но и разрешение конфликтов при их обращении к общим ресурсам, каковыми являются ресурсы оперативной памяти и самого центрального процессора. Для осуществления подобной координации строится сложная система управляющих программ — так называемая операционная система (ОС).

Принцип децентрализации управления периферийным оборудованием реализован в той или иной степени уже в 50-х годах многими фирмами, так что в настоящее время не так просто установить первоначальное авторство этой идеи. Заметим, что в полной мере для повышения производительности ЭВМ этот принцип может быть использован лишь в комбинации с другим принципом, получившим наименование мультипрограммирование.

Смысл его заключается в том, что в ЭВМ вводятся одновременно несколько заданий. В результате при хорошем планировании работы (что является задачей ОС) удастся более полно загрузить оборудование и тем самым повысить суммарную производительность ЭВМ: пока центральный процессор занят решением одной задачи (для которой команды и данные находятся в ОЗУ), периферийные процессоры занимаются подготовкой (вводом и передачей в ОЗУ) данных и программ для других задач, а также выводом готовых результатов. Задачи ОС при этом усложняются за счет необходимости управлять переключениями и распределением ресурсов между различными процессами (задачами), выполняемыми ЭВМ.

Реализация принципа децентрализации управления периферийным оборудованием и обменом информацией внутри ЭВМ потребовала введения принципа модульности архитектуры ЭВМ, что позволило в какой-то мере отступить от абсолютной жесткости архитектуры. Принцип модульности коснулся прежде всего ОЗУ, которое стало набираться из отдельных блоков; каждый из них допускает обращения, не зависящие от других блоков. Это позволило уменьшить конфликты обращений к ОЗУ и связанные с этим потери производительности. Аналогичным образом (по модульному принципу) организуются во многих ЭВМ каналы связи с периферийным оборудованием, которое, в свою очередь, объединяется в отдельные модули.

Наличие многих независимых устройств ввода/вывода

позволяет резко увеличить производительность вычислительной системы на этапах обмена информацией. Для многих задач с относительно небольшим числом основных (вычислительных) операций по отношению к числу операций ввода/вывода (к ним относится большинство задач управления реальными объектами, задач обработки экспериментальных данных и др.) это обстоятельство может иметь решающее значение для увеличения производительности всей системы в целом. Однако на практике встречается немало важных задач другого рода, для которых решающее значение имеет производительность ЭВМ (вычислительной системы) по основным операциям.

Известны два основных пути решения этой проблемы: повышение производительности центрального процессора в однопроцессорных вычислительных системах и переход к мультипроцессорным системам.

Основной принцип для первого пути сводится к расчленению функций центрального процессора и возложению их выполнения на специализированные процессорные элементы, объединенные в те или иные технологические линии и участки. Простейшей линией такого рода является конвейер для реализации обычных неймановских команд. Таким командам свойственна одна и та же не зависящая от типа команды последовательность операций по их исполнению. Например, для трехадресных команд: выборка команды из ОЗУ, выделение из нее адресов двух входных операндов, выборка этих операндов из ОЗУ, выполнение операций над ними с одновременным выделением из кода команды адреса, по которому должен быть заслан результат операции, и, наконец, фактическая его засылка в ОЗУ по этому адресу. Для выполнения этой последовательности операций создается линия типа «конвейер».

При работе такого конвейера используется так называемый принцип синхронной накачки. Поскольку результат выполнения очередной команды, как правило (за исключением специальных команд перехода), не влияет на адрес выбираемой за ней следующей команды, то эта выборка выполняется первым процессорным элементом конвейера сразу же после передачи текущей команды второму процессорному элементу. При передвижении же ее к третьему элементу первый элемент осуществляет выборку следующей команды и т. д.

При этом достигается существенное увеличение произ-

водительности по сравнению с обычным (неймановским) процессором: при равномерном распределении нагрузки между процессорными элементами во столько раз, сколько элементов в конвейере. Правда, строго говоря, это будет лишь в том случае, когда выполняемая программа линейна, т. е. не содержит условных или безусловных переходов. При каждом таком переходе приходится производить пере-накачку конвейера, что, разумеется, приводит к потере быстродействия. Эти потери тем больше, чем больше команд перехода в исполняемой программе и чем больше длина конвейера.

Для конвейеров небольшой длины (порядка 10 элементов), употребляемых в современных ЭВМ для большинства встречающихся на практике задач, эти потери относительно невелики.

Конвейерный метод восходит к английской ЭВМ «Атлас». Он получил применение и дальнейшее развитие практически во всех сверхбыстродействующих ЭВМ (IBM-360/195, STAR-100, ASC, «Эльбрус» и др.).

Дальнейшее развитие простого конвейерного метода представляет собой магистральная обработка. В дополнение к простому конвейеру для фоннеймановских команд он позволяет организовывать конвейеры и системы взаимосвязанных конвейеров не только для операций обмена процессора с ОЗУ, но и для выполнения операций внутри самого процессора. Однако в этом случае приходится считаться с тем, что конвейеры для выполнения различных операций (например, операций сложения и умножения), хотя и содержат общие элементы, в целом различны.

Если строить отдельный конвейер для выполнения каждой операции, то получаются крайне неэкономичные конструкции с малыми коэффициентами использования оборудования. Выход состоит в том, чтобы, оперативно перестраивая связи между отдельными элементами конвейеров, быстрее приспособливать конвейерные линии к меняющейся ситуации. Один из способов такой перестройки — принцип карусели — был впервые применен во французской ЭВМ «Гамма-60» в начале 60-х годов и развит затем в работах М. G. Flynn в 1966—1972 гг.

Принцип гибкой архитектуры системы конвейеров, улучшая коэффициент использования оборудования, приводит вместе с тем к определенным потерям времени на перестройку, которые, к сожалению, далеко не всегда можно

компенсировать упреждающим планированием. Поэтому в реальных магистральных структурах идут обычно на некоторый компромисс между степенью гибкости перестройки архитектуры процессора и ухудшением использования оборудования.

Заметим, что по мере увеличения «интеллектуальности» процессоров и следовательно, усложнения выполняемых ими операций, возможности увеличения их производительности на основе магистрального принципа обработки существенно возрастают. И дело здесь не просто в увеличении длины конвейеров, а в появлении новых возможностей распараллеливания вычислительного процесса на уровне машинных операций. Нетрудно понять, например, как можно ускорить выполнение операций вычисления факториала или определенного интеграла на системах параллельных конвейеров с объединяющим их заключительным магистральным блоком. То же самое относится к большинству формульных вычислений и к другим макрооперациям современных «интеллектуальных» процессоров.

Заметим также, что принцип магистральной обработки применим не только в центральных процессорах. Во многих системах автоматизации технологических процессов, обработки экспериментальных данных и испытаний в реальном масштабе времени широкое применение для целей первичной обработки находят магистральные предпроцессоры, которые соединяют систему датчиков (измерительных приборов) с ЭВМ, осуществляющими вторичную обработку получаемых данных. Выработаны международные стандарты конструктивного оформления подобных устройств (системы «Камак», приборный интерфейс и др.). Их роль заключается в том, чтобы максимально упростить и убыстрить подготовку исходных данных для ЭВМ и тем самым увеличить производительность всей системы сбора и обработки данных в целом.

Дальнейшее развитие принципа магистральной обработки приводит к включению в магистрали специализированных (функционально-ориентированных) арифметикологических устройств (АЛУ) и специализированных процессоров. Такие АЛУ появились еще вне связи с магистральным принципом обработки. Примерами могут служить умножитель ЭВМ «Стрела» или блоки арифметики с плавающей запятой в ЭВМ систем IBM-360 и -370.

Принципиально новым моментом является магистральная организация самих функционально-ориентированных АЛУ

и процессоров. Примером могут быть специализированные векторные и матричные процессоры. Первым полупромышленным матричным процессором высокой производительности был процессор «Иллиак-IV» Иллинойского университета (1972 г.).

Процессорные элементы матричного процессора способны выполнять лишь простейшие арифметические операции над числами (скалярами). Однако, будучи соединены в матричную структуру, они оказываются способными осуществлять быстрые пересылки информации между соседними (по вертикалям и горизонталям) элементами. Организуя согласованное (синхронное) управление вычислениями и пересылками, на такой структуре можно реализовать высокораспараллеленные вычислительные процедуры определенных классов.

Например, на матричной структуре осуществляется эффективное распараллеливание сеточного метода решения плоской краевой задачи для уравнения Лапласа. Как известно, рекуррентная формула для этого метода имеет вид $x_{i,j}^{(k+1)} = 1/4(x_{i-1,j}^{(k)} + x_{i+1,j}^{(k)} + x_{i,j-1}^{(k)} + x_{i,j+1}^{(k)})$. Она предусматривает, следовательно, на каждом очередном шаге итерации пересылку очередных значений скаляров в каждый элемент матрицы из четырех соседних с ним элементов и нахождение среднего арифметического этих скаляров.

Поскольку структура связей между данными в рассмотренной задаче (выражаемая приведенной формулой) соответствует структуре связей процессорных элементов в матричном процессоре, эта задача эффективно использует все процессорные элементы. В результате ее решение ускоряется (по сравнению с однопроцессорной схемой решения) в n раз, где n — число процессоров в матрице.

Однако при другой структуре связей между данными (например, в случае трехмерной краевой задачи для уравнения Лапласа) соответствие структур нарушается. В результате, во-первых, резко усложняется программирование задач, а во-вторых, значительно ухудшается использование оборудования, поскольку большинство процессорных элементов будет работать не на вычисление, а на связь. В результате производительность матричного процессора резко уменьшается. В случае же обычных (скалярных) вычислений его производительность (в однопрограммном режиме) падает до производительности одного процессорного элемента (в случае ЭВМ «Иллиак-IV» — на 2 порядка).

Вводя дополнительные связи между элементами матриц (как это делается, например, в ЭВМ типов ПС-2000 и ПС-3000), можно расширить класс задач, допускающих эффективное распараллеливание. Однако машина при этом все равно останется специализированной в том смысле, что для большинства задач ее производительность будет падать до производительности одного процессорного элемента.

В целом за счет объединения достаточно большого числа процессорных элементов в специализированные магистральные структуры в настоящее время не составляет большого труда увеличить производительность таких структур для соответствующих (как правило, достаточно узких) классов задач во многие сотни раз (по сравнению с однопроцессорным вариантом).

Помимо векторно-матричных процессоров, достаточно большое распространение нашли, например, фурье-процессоры и ряд других специализированных процессоров высокой производительности.

Следует, однако, подчеркнуть, что само построение специализированной магистральной структуры представляет собой лишь начальную (причем самую простую) часть общей задачи повышения производительности системы для большинства задач, для которых она предназначена и в принципе хорошо приспособлена. Все оказывается просто, если структура данных в процессе решения задачи остается неизменной (меняются лишь их численные значения), все данные размещаются в распределенной памяти процессорных элементов системы, а исходные данные уже введены в нее. Если же хотя бы одно из этих условий не соблюдено, возникают трудности, которые могут быть устранены лишь специальными формами организации интерфейсов с ОЗУ и ВЗУ, представления данных в иерархической памяти, упреждающего планирования указанных форм и соответственно адекватных программных средств.

Чтобы понять природу возникающих здесь трудностей, достаточно рассмотреть задачу нахождения скалярного

произведения $ab = \sum_{i=1}^N a_i b_i$ двух векторов большой длины на векторном процессоре. Если компоненты векторов записаны на двух магнитных лентах, то скорость вычисления скалярного произведения лимитируется прежде всего скоростью считывания с них информации. Даже для лучших

отечественных перспективных лент эта скорость пока не превышает 320 кбайт/с или (что то же самое) 80 тысяч 32-разрядных чисел в 1 с. Поэтому уже скорость процессора в 160 тыс. умножений в секунду, легко достижимая в настоящее время в тривиальном однопроцессорном варианте, окажется вполне достаточной для вычисления скалярного произведения с максимально возможной в данных условиях скоростью. Применение же специального векторного процессора ничем помочь не сможет.

Разумеется, если подобная задача встретилась на входе системы, то указанное препятствие непреодолимо. Иное дело, если она представляет собой часть большой задачи, в которой компоненты векторов вычисляются, а не просто вводятся извне. В большинстве случаев только специальные методы программирования и расположения данных в памяти могут использовать при этом все возможности ускорения, предоставляемые векторным процессором.

Надо сказать, что проблема замедления скорости работы в результате взаимодействия с памятью возникает и в случае применения обычных (скалярных) сверхбыстродействующих процессоров. Для согласования скоростей работы ОЗУ со скоростью процессора выработан и успешно применяется целый ряд приемов. Это и ОЗУ с ячейками большой длины (на несколько машинных слов), и блочные ОЗУ, использующие эффект перекрытия (одновременного обмена с несколькими блоками ОЗУ), и, наконец, промежуточная сверхбыстродействующая память (СОЗУ) относительно небольшого объема.

Следует отметить, что имеются задачи, для ускорения решения которых наиболее целесообразно использовать ЗУ с другими формами доступа. Хорошо известно, например, значение ассоциативной памяти для убыстрения решения задач с выборкой информации не по адресу, а по тем или иным признакам. Особенно эффективны ЗУ, которые объединяют в себе возможности как ассоциативного, так и обычного произвольного адресного доступа. Использование такого ОЗУ в американской ЭВМ STARAN позволило получить на задачах ПВО и управления воздушным движением производительность порядка 500 млн. оп./с.

Переход от ферритовой к полупроводниковой памяти сделал подобные ЗУ с комбинированным доступом относительно недорогими. То же самое касается другого вида памяти — стековой, которая оказывается незаменимой во

многих управляющих программах и программах для обработки буквенной информации.

Работы по так называемой *R*-технологии программирования в Институте кибернетики АН УССР привели к появлению *R*-машины, в которой многие сложные программы упрощаются на 1,5—2 порядка с соответствующим возможным увеличением производительности. Для ее реализации потребуются наряду с уже упомянутыми некоторые дополнительные виды ЗУ, например, табличные и так называемые вагонные.

Построение дешевых ЗУ большого объема, в которых реализовались бы одновременно все перечисленные виды доступа, продолжает оставаться достаточно трудной технологической задачей. Для ее решения, возможно, потребуется использовать наряду с традиционно применяющимися в вычислительной технике и некоторые новые физические принципы.

Во всех рассмотренных до сих пор случаях распараллеливание касалось исполнения отдельных команд. Сам поток команд в рамках одного процесса носит строго последовательный характер (один поток команд). На самом же деле многие процессы (программы) имеют участки, которые могут исполняться параллельно. Такое распараллеливание процессов требует для своей реализации вычислительных систем со многими центральными процессорами.

Один из наиболее простых принципов организации подобных многопроцессорных вычислительных систем — системы с общей шиной. К этой шине (приспособленной для быстрой передачи информации) подсоединяются центральные процессоры и блоки ОЗУ (а также не показанные на рисунке каналы связи с периферийным оборудованием).

В языки программирования таких систем вводятся средства для описания ветвления и слияния процессов, а в операционную систему — средства для синхронизации «стыков» параллельных ветвей и разрешения конфликтов при перекрытиях (во времени), так называемых критических интервалов этих ветвей. Смысл термина «критический» в этом случае заключается в том, что на таких интервалах происходит обращение ветвей процесса к общим ресурсам (блокам ОЗУ, каналам и т. п.).

Ведение программ управления (ОС) в системах с общей шиной поручают одному из центральных процессоров. Подобная централизация управления в случае сложноветвя-

щихся процессов с большим числом параллельных ветвей сложными системами конфликтов налагает непосильные требования на «центрального управляющего». Серьезные ограничения на общую производительность системы накладывает и ограниченная пропускная способность общей шины.

В результате принцип мультипроцессорирования с общей шиной в чистом виде приводит для большинства задач к ограничению числа процессоров в системе до 8—10. После превышения этого порога рост производительности системы резко замедляется, а использование оборудования существенно ухудшается. Положение можно облегчить за счет частичного распараллеливания функций управления (аппаратной поддержки ОС), введения в состав процессов буферных СОЗУ, увеличения числа шин и других мер.

Более радикальное решение вопроса заключается в более глубоком распараллеливании управления. Одна из базовых идей в этом направлении — организация так называемого потокового управления. Смысл его состоит прежде всего в использовании специального языка, ориентированного на параллельную обработку. Операторы (команды) и данные в таких языках представляются как бы «россыпью», сопровождаясь специальными признаками (тегами), позволяющими данным находить «свои» операторы и «свои» устройства. Управление в потоковых системах организуется таким образом, чтобы в соответствии с наличным ресурсом рабочих процессоров оперативно соединять в них данные с соответствующими операторами для осуществления необходимых преобразований. Процесс управления оказывается тем самым асинхронным и в максимально возможной степени децентрализованным.

Потоковое управление в принципе можно реализовать в структурах, близких к традиционным системам с общими шинами, к которым наряду с рабочими процессорами, блоками ОЗУ и каналами интерфейса с периферией добавляются специальные управляющие процессоры, создающие особую «зону управления». Таким образом предлагают строить вычислительную систему (МАРС) Г. И. Марчук и В. Е. Котов (1978 г.).

Построен образец системы с потоковым управлением и специальным языком параллельного программирования VAL (Value-oriented algorithmic language).

Следует отметить, что языки параллельного программирования, будучи достаточно удобными для задач моделиро-

вания сложных систем, состоящих из большого числа относительно независимых объектов (например, социальных или экономических систем), весьма плохо приспособлены для описания большинства обычных вычислительных задач, имеющих рекурсивную природу. Это обстоятельство, а также необходимость использования уже накопленных библиотек алгоритмов требуют создания сложных трансляторов, переводящих традиционные описания алгоритмов на языки параллельного программирования. Операционные системы многопроцессорных структур с потоковым управлением представляются также достаточно сложными. В этом одна из причин того, что сделаны пока лишь первые шаги к промышленной реализации таких структур, несмотря на то, что в однопроцессорном варианте управление потоком данных (в так называемых системах реального времени) нашло широкое применение уже сравнительно давно.

Дальнейший шаг в развитии структур с потоковым управлением — рекурсивные структуры, адаптирующиеся к реализуемым на них процессам. Основной принцип состоит в том, что в системе процессоров (снабженных собственными ОЗУ) с гибкой системой коммутации происходит последовательный захват процессоров реализуемой программой с образованием соответствующих (отвечающих структуре программы) связей между ними. В частности, вместо рекурсивного вызова процедур происходит образование новых ветвей взаимосвязанных процессоров. Этот принцип был впервые предложен В. М. Глушковым, М. Б. Игнатьевым, В. А. Мясниковым, В. А. Торгашевым на конгрессе ИФИП (Международная федерация по обработке информации) (Стокгольм, 1974 г.).

Для организации связей в рекурсивной ЭВМ В. А. Мясников и др. предложили иерархическую схему, использующую, по существу, принцип коммутации, применяемый в телефонных сетях. Подобная идея коммутации процессоров (П) с помощью системы коммутационных блоков (К) позволяет в принципе осуществлять коммутацию любой пары процессоров.

При достаточно большом числе параллельно коммутируемых каналов имеется возможность получения достаточно сложных структур связей между процессорами. Как и следовало ожидать, реализация идеи рекурсивной ЭВМ в чистом виде (как и почти всякой чистой концепции) оказалась практически невозможной. Главная трудность состоит в эффек-

тивном наложении структуры связей решаемой на ЭВМ задачи на структуру связей процессоров. Сравнительно просто такая задача решается лишь в случае относительной неизменности этой структуры на протяжении решения всей задачи, возможности размещения всей информации (программы и данных) в распределении памяти системы (ОЗУ рабочих процессоров) и игнорировании проблемы начального заполнения системы. Необходимо также принять во внимание неизбежные потери скорости при осуществлении обменов через несколько коммутационных блоков.

Автором данной работы в 1978 г. была предложена идея усовершенствованной системы коммутации, представляющей наряду с коммутацией и функции управления. Способность такой системы выполнять функции управления позволяет динамически перестраивать связи между процессорами во время решения задачи.

Вторая базовая идея автора состоит в том, чтобы, используя специальный вариант проблемно-ориентированного структурированного языка, применять управляющие процессоры для предварительного анализа последовательных гнезд циклов структурированной программы. В результате этого анализа, с помощью нового математического аппарата (алгебры структур данных), иерархия управляющих процессоров осуществляет такое распределение данных для каждого очередного гнезда циклов между ОЗУ рабочих процессоров и дополнительными ЗУ, подсоединенными через периферийные процессоры, чтобы в максимально возможной степени минимизировать обмены, используя систему иерархической коммутации. При этом для подавляющего большинства задач удается получить прогрессивное уменьшение скоростей обмена по мере повышения уровня иерархии.

Этот результат имеет принципиальное значение, поскольку он позволяет устранить опасность снижения быстродействия системы за счет дальних связей. Кроме того, освобождая архитектурные проблемы от сложных конструктивно-радиотехнических проблем, связанных с высокочастотной связью, он значительно облегчает наладку системы и делает возможным практически неограниченное наращивание уровней иерархии (вплоть до выхода на уровень сетей территориально разнесенных вычислительных систем).

Третья базовая идея состоит в том, чтобы использовать в иерархическом управлении вычислительным процессом все уровни описания программного продукта, полученные

в процессе его проектирования и кодирования. Если применить предложенную в начале данной работы производственную аналогию, то можно сказать, что современные системы, реализующие на всех уровнях управления лишь окончательное машинное представление программного продукта, уподобляются администрации завода, которая ведет все управление на основании первичной (самой подробной) технологической документации без всяких вторичных (обобщающих) документов. Разумеется, при таком подходе технология программирования должна в максимальной степени соответствовать принципам архитектуры систем, на которых предполагается реализация готовящегося с ее помощью программного продукта.

Описанные принципы позволяют организовать своеобразный «макроконвейер», направленный на распараллеливание циклов и гнезд циклов. Распараллеливания линейных участков программы эта идея, взятая в чистом виде, вообще не предусматривает. Поскольку каждый такой участок в структурированной программе выполняется лишь один раз, то потерей времени на их «однопроцессорное» прохождение в сложных задачах можно всегда пренебречь, ибо основные затраты времени падают именно на реализацию циклов. Впрочем, как уже отмечалось выше, любой из изложенных в данной работе принципов может комбинироваться с другими, так что при желании можно обеспечить распараллеливание и линейных участков программ (это может оказаться необходимым в некоторых задачах обработки данных в реальном масштабе времени).

Заметим, что предлагаемые архитектура и принципы управления предполагают «мягкую» архитектуру рабочих процессоров. Тем самым в задачу упреждающего планирования прохождения гнезд циклов входит и планирование настройки на нужные операторы привлекаемых к вычислениям рабочих процессоров.

Еще одно замечание о методах решения задач. Дело в том, что рассматриваемый метод распараллеливания циклов оказывается эффективным не во всех случаях. Трудным случаем является, например, классический метод решения краевой задачи для обыкновенных дифференциальных уравнений путем «пристрелки». Однако стоит лишь изменить метод, как задача распараллеливается элементарно. При этом на каждой итерации приближение решения точно удовлетворяет краевым условиям, но не удовлетворяет исходным диф-

ференциальным уравнениям. Разбивая очередную траекторию (приближение решения) системой параллельных гиперплоскостей на участки, можно вычислить векторную невязку для каждого такого участка (с точки зрения отличия ее от подходящего отрезка решения системы). Смещая в соответствии с этой невязкой (на разные расстояния) точки данного участка траектории, получаем новое приближение искомой траектории. Можно так построить этот процесс, что он сходится к истинному решению задачи.

Таким образом, в полной мере возможности нового макроконвейерного инструмента можно будет использовать при соответствующем развитии методов решения задач. Проведенные исследования показывают, что для большинства трудных задач, которые встречаются в различных областях науки и техники, метод макроконвейера работает без существенных переделок метода их решения.

В Институте кибернетики АН УССР развит эффективный метод автоматизации формальных преобразований алгоритмов и программ, позволяющий, в частности, во многих случаях получать резкое их убыстрение, не вникая в содержательный смысл решаемых задач. Сегодня таким образом реально улучшаются алгоритмы, запись которых на языке Фортран содержат до 1500 операторов. С помощью системы автоматизации проектирования схем ЭВМ (системы «Проект») эти усовершенствованные алгоритмы реализуются в соответствующей аппаратуре. Тем самым открываются большие дополнительные возможности нахождения новых аппаратных решений для ускорения быстрогодействия выполнения сложных операторов в универсальных «интеллектуальных» процессорах и целых программ в функционально-ориентированных процессорах.

3. КИБЕРНЕТИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ И АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ*

Универсальные цифровые и управляющие машины можно рассматривать как преобразователи информации, принципиально способные работать в любой цепи автоматического управления. Неизбежно возникающие на практике ограничения связаны не с качественными особенностями таких машин, а с лимитированием их количественных (прежде всего скоростных) характеристик, а также с экономическими соображениями.

Основная область применения универсальных электронных цифровых управляющих машин в настоящее время — автоматизация труда диспетчеров, руководящих достаточно сложными производственными объектами. Эффект, достигаемый при этом, состоит прежде всего в резком улучшении качества управления и в повышении экономических показателей.

Разрабатывать такие машины можно, не имея законченного описания процессов, для управления которыми они предназначены. Универсальность набора операций позволит в будущем запрограммировать любые правила управления. Легко понять значение этого факта для ускорения темпов внедрения управляющих машин, а также для автоматизации процессов с часто меняющейся технологией.

Правда, универсальность, о которой идет речь, не исключает, как уже отмечалось выше, ограничений чисто количественного характера. Однако, если речь идет об автоматизации труда диспетчеров, работающих на современных пультах управления, то и здесь возможны некоторые общие оценки. Чтобы универсальная цифровая машина осуществляла управление заметно лучше даже опытного диспетчера, достаточно, если она в секунду сможет опрашивать несколько десятков датчиков и выполнять несколько тысяч элементарных операций, запоминать несколько тысяч многозначных

* Вестн. АН СССР, 1962, № 4.

чисел и осуществлять несколько десятков элементарных управляющих действий (типа нажима кнопки).

Всем этим условиям (а по ряду параметров даже со значительным превышением) удовлетворяет цифровая управляющая машина широкого назначения (УМШН-1), разработанная недавно в Вычислительном центре Академии наук СССР под руководством Б. Н. Малиновского и автора настоящей статьи. Машина отличается высокой надежностью, малым потреблением энергии, незначительными габаритами (занимаемая площадь 2 м^2 , высота около 1 м) и весьма неприхотлива в эксплуатации. Машина снабжена устройством для автоматического опроса большого числа датчиков (свыше 200). Имеется специальный релейный выход, позволяющий управлять сервомоторами.

Использование универсальных управляющих машин позволяет осуществлять параллельную и до известной степени независимую разработку собственно управляющей машины и закладываемых в нее алгоритмов управления. Однако алгоритмизация производственных процессов, проводимая обычными методами, без использования вычислительных машин, представляет собою весьма долгий и трудоемкий процесс. Его можно значительно ускорить, используя для изучения процесса ту же машину, которая в будущем будет им управлять (это оказывается возможным в силу универсальности машины). Однако при этом пришлось бы идти на риск приобретения и установки управляющей машины на производстве до окончания работы по алгоритмизации автоматизируемого процесса, а следовательно, и до определения эффективности его автоматизации. Хотя универсальная управляющая машина типа УМШН-1 способна в принципе значительно улучшить работу диспетчера, экономический эффект ее применения в разных случаях будет различным. Следуя указанному пути установки машины на объекте до окончания работ по алгоритмизации процесса, мы никогда не имели бы полной гарантии в целесообразности первоочередной автоматизации именно этого, а не какого-либо иного объекта. В то же время без использования машины работы по отысканию и наладке рациональных алгоритмов управления могут затянуться на многие месяцы и даже годы.

Избежать этого и значительно ускорить темпы внедрения управляющих машин можно путем использования стационарных универсальных электронных цифровых машин, имеющих в крупных вычислительных центрах. Это дает воз-

возможность разработать, отладить и испытать программы управления производственными объектами, используя принцип управления на расстоянии с помощью соответствующих каналов связи.

Опыты управления на расстоянии открывают также путь к созданию мощных технологических вычислительных центров для автоматического управления однотипными объектами, расположенными в разных городах и районах. Со временем информационные средства страны должны будут объединиться в единую автоматическую государственную систему, обеспечивающую сбор и переработку информации для целей управления всеми областями народного хозяйства.

В Вычислительном центре Академии наук СССР по инициативе автора был проведен ряд опытов по управлению на расстоянии. Расскажем о двух из них, а именно об управлении бессемеровским конвертором на металлургическом заводе им. Дзержинского в Днепропетровске, произведенном впервые в ноябре 1960 г., и об управлении карбоколлонной на Славянском содовом заводе в ноябре 1961 г. В обоих случаях управление осуществлялось универсальной электронной цифровой машиной «Киев» из Вычислительного центра Академии наук СССР в Киеве. Расстояние до первого объекта равнялось 470 км, до второго — 630 км.

На объектах предварительно устанавливались относительно простые регистрирующие цифровые устройства (РЦУ), которые осуществляли циклический опрос датчиков, автоматическое преобразование их показаний в цифровую форму, усреднение этих показаний и передачу их при помощи телеграфного аппарата СТ-А по линии связи. С помощью второго такого же телеграфного аппарата, установленного на другом конце линии связи — в машинном зале Вычислительного центра, осуществлялся ввод данных в универсальную электронную цифровую машину «Киев», предварительно снабженную программой (алгоритмом) управления.

Скорости машины (12 тыс. оп./с) с избытком хватало для реализации испытываемых программ. Вырабатываемые машиной данные (время повалки конвертора в первом случае и значения трех регулируемых параметров — во втором) передавались (по той же телеграфной линии) на объект управления, отпечатывались на ленте и поступали к диспетчеру для дальнейшего использования.

Скорость опроса и общее число датчиков в проведенных опытах невелики. Тем не менее результаты их были весьма

обнадеживающими и подтвердили значительный эффект применения электронных цифровых машин для управления избранными объектами.

При управлении конвертором опрашивалось 5 датчиков с частотой 5 Гц (0,2 с на датчик). Точность измерения сигналов датчиков также была относительно небольшой (0,5%). Эффект заключался прежде всего в сокращении производственного цикла. При ручном управлении производственный цикл на одном конверторе продолжается около 40 мин, причем собственно плавка, заливка чугуна и слив стали занимают лишь половину этого времени. Остальное время уходит на простой конвертора по тем или иным причинам. Сокращение средней длительности цикла всего на 4 мин даёт по одному заводу им. Дзержинского экономию свыше 150 тыс. руб. в год.

Одна из главных причин, удлиняющих производственный цикл, — отсутствие средств для точного прогнозирования времени окончания продувки конвертора и так называемой повалки его со сливом готовой стали. В результате продувки воздуха через находящийся в конверторе расплавленный чугун содержащиеся в металле примеси (прежде всего углерод) выгорают и удаляются с уходящими газами. Необходимо остановить дутьё и повалить конвертор в тот момент, когда содержание углерода в металле достигнет заданного значения (в случае выплавки рельсовой стали 0,5—0,6%). Запаздывание приводит к пережогу углерода, а следовательно, к браку.

Опытный мастер, ведущий плавку, обычно не допускает пережога, однако примерно в 95% случаев даёт сигнал на повалку слишком рано, а затем после анализа металла на углерод проводит додувку по секундомеру, пользуясь эмпирически полученной средней скоростью выгорания углерода в конце плавки. Додувки увеличивают среднюю продолжительность рабочего цикла конвертора. Использование же вычислительной машины позволяет за счёт более полного анализа поступающей от датчиков информации улучшить прогнозирование времени повалки конвертора и сократить число додувок.

В настоящее время не существует методов прямого определения химического состава стали в конверторе в момент продувки. Сотрудниками завода-втуза им. Дзержинского К. С. Гаргером, М. П. Кузнецовым и Б. В. Ляудисом была разработана система датчиков косвенных признаков, вклю-

чающая два специальных радиационных датчика и один стандартный расходомер ДМКК.

При помощи разработанной в Вычислительном центре регистрирующей установки (РЦУ) при опытных плавках был собран богатый статистический материал, обработанный затем на универсальных вычислительных машинах «Киев» и «Урал». В результате было получено уравнение, на основании которого оказалось возможным примерно на 9-й минуте от начала плавки прогнозировать время повалки с удовлетворительной точностью. Алгоритм управления содержит оценку надежности этого прогноза и при помощи специальных электронных часов выдает сигнал на повалку в момент наступления прогнозированного времени.

Основным исполнителем по разработке РЦУ и алгоритма управления был А. И. Никитин, общее руководство осуществлялось автором этой статьи, а также Л. Н. Дашевским (на первом этапе) и Б. Н. Малиновским (на втором этапе). На основании проведенных опытов управления на расстоянии алгоритм был дополнительно уточнен и реализован в виде программы для машины УМШН, которая устанавливается в настоящее время в бессемеровском цехе завода.

Опыт по управлению карбоколонной Славянского содового завода был проведен под руководством Б. Н. Малиновского. В его подготовке большую роль сыграли сотрудники Харьковского научно-исследовательского института основной химии А. Б. Тютюнников и В. И. Потрашков, давшие математическое описание процессов, происходящих в карбоколонне. Алгоритм управления, реализованный в виде программы для машины «Киев», разработал сотрудник Вычислительного центра И. А. Янович.

Карбоколонна представляет собою объект со многими входами и выходами. Регулируемыми входами являются расходы газов Q_1 и Q_2 , подводящихся к колонне по двум различным каналам, и суспензии Q_3 , подводящейся по третьему каналу. Нерегулируемыми (но измеряемыми) входными сигналами служат концентрации CO_2 в подводимых к колонне газах и хлора и аммиака в суспензии, температура суспензии и охлаждающей жидкости, потери бикарбоната на фильтрах и др.

Математическое описание связывает все эти величины с выходными сигналами, в качестве которых взяты показатели по качеству продукта, производительности и эффективности ведения процесса. За основной показатель эффектив-

ности принимается коэффициент использования сырья. Алгоритм управления заключается в поиске таких значений регулируемых параметров Q_1 , Q_2 и Q_3 , которые обеспечивают максимально возможный коэффициент использования сырья при заданных качестве продукции и производительности колонны.

Значительное быстроедействие машины «Киев» позволило выбрать простейшую реализацию алгоритма управления, основанную на переборе (с некоторыми задаваемыми заранее шагами) значений регулируемых параметров. Поиск оптимального решения занимает в каждом отдельном случае 5—10 с, что удовлетворяет все требования, обусловливаемые скоростью изменения входных данных.

Управление карбоколонной на расстоянии осуществлялось непрерывно в течение 48 ч. Проводившаяся одновременно оценка его эффективности показала, что использование сырья улучшается на 1,5—2% по сравнению с обычным управлением, осуществляемым опытным оператором. Достигаемый при этом экономический эффект за короткое время окупает все расходы, связанные с приобретением и установкой управляющей машины.

Проведенные эксперименты подтвердили высокую эффективность управления производственными объектами на расстоянии в ряде областей народного хозяйства. Дальнейшее развитие опытов в этом направлении несомненно сыграет важную роль в совершенствовании управления производственными процессами.

В Вычислительном центре по инициативе автора были предложены и испытаны также некоторые другие методы ускорения работ по изучению производственных процессов и отработке алгоритмов их управления. Так, в отделе технической кибернетики под руководством В. И. Иваненко был разработан специальный исследовательский комплекс «Альфа». Этот комплекс представляет собою соединение в единой системе при помощи специального универсального блока связи аналоговой вычислительной машины (типа МПТ-9) и универсальной электронной цифровой машины. Аналоговая машина используется при этом для моделирования объекта управления, а цифровая играет роль универсально управляющей машины. Для того чтобы в максимальной степени приблизиться к реальным схемам управления, в состав комплекса введен специальный генератор случайных процессов, позволяющий осуществить моделирование слу-

чайных возмущений и шумов с самыми различными характеристиками. Под руководством В. И. Скурихина разработана специальная переносная установка, позволяющая осуществлять автоматически циклический опрос датчиков, преобразование их показаний в цифровую форму и запись полученных цифровых кодов на магнитную ленту. Применяя универсальные электронные цифровые машины для расшифровки и изучения записанной на лентах информации, можно также значительно сократить сроки выполнения работ по алгоритмизации автоматизируемых процессов. Этой же цели служит разработанная В. А. Ковалевским и И. Т. Пархоменко установка для автоматического ввода графиков в универсальную электронную цифровую машину.

ЭКОНОМИКА И КИБЕРНЕТИКА *

Одной из наиболее важных научно-технических проблем нашего времени является проблема автоматизации не только физического, но и умственного труда человека.

Хотя сейчас в чисто принципиальном плане можно считать, что любой вид интеллектуального труда поддается автоматизации, однако в плане практическом далеко не безразлично, в каком порядке будет осуществляться эта автоматизация. Поскольку для достижения реальных практических результатов и автоматизации любого участка умственного труда нужно затратить немало усилий и преодолеть немало трудностей, необходимо тратить эти усилия рационально, направляя их на решение наиболее актуальных и важных проблем. Такой проблемой является, несомненно, управление экономикой.

Уже при современном уровне развития материального производства рациональное (а тем более оптимальное) управление экономикой представляет собой задачу колоссальной трудности. В сфере учета и управления трудятся сейчас многие миллионы людей. По мере дальнейшего роста народного хозяйства задачи управления им будут еще более усложняться и притом во все более убыстряющемся темпе.

Чтобы оценить степень сложности задач, возникающих при управлении экономикой, рассмотрим (в чрезвычайно упрощенном виде), например, задачу согласования плана

* Вестн. АН СССР, 1963, № 10.

материального производства с планом материально-технического снабжения.

Одно из существенных преимуществ планового социального хозяйства состоит в том, что система взаимных поставок между отдельными предприятиями строится на основе прямых, заранее планируемых связей и не нуждается в таком косвенном регуляторе, как рынок и рыночные цены. Благодаря этому производство может вестись при минимальном уровне омертвляемых товарных запасов, никогда не испытывая кризисов.

Возможность реализации указанного преимущества в полной мере зависит от уровня планирования. План должен быть составлен так, чтобы он предусматривал производство любого продукта точно в требуемом количестве, требуемой номенклатуре и в точно заданное время.

Предположим, что общее количество различных видов продуктов в самой детальной номенклатуре равно N , а общее количество предприятий, на которых производятся эти продукты, P . Плановое задание должно определить для любого продукта i и для любого предприятия j количество x_{ij} продукта i , которое должно быть произведено на предприятии j за тот или иной фиксированный промежуток времени (скажем, за год).

Из общего числа NP неизвестных x_{ij} многие x_{ij} заведомо должны быть обращены в нуль, исходя из специализации предприятий (нельзя производить подсолнечное масло на металлургическом заводе или тяжелые станки — на ткацкой фабрике). Число нетривиальных (априори, не равных нулю) неизвестных x_{ij} будет определяться произведением Np , где p — среднее арифметическое от N чисел p_i , выражающих количество предприятий, способных производить один и тот же продукт ($i=1, 2, \dots, N$).

Общее количество различных видов продуктов в достаточно детальной номенклатуре (учитывающей различия в размерах, типе, сортности и т. п.) исчисляется в современном хозяйстве многими сотнями тысяч наименований. Таким образом, суммарное число основных неизвестных плановых показателей x_{ij} будет порядка нескольких миллионов. Предположим, что продукт i употребляется при производстве некоторых других продуктов i_1, i_2, \dots, i_m [$m=m(i)$] в количествах $a(i_1), a(i_2), \dots, a(i_m)$ в расчете на одну условную единицу каждого из этих продуктов. Если к тому же задано суммарное непроеизводственное потребление A_i продукта i

(включая вывод его за пределы рассматриваемой системы), то должно быть обеспечено следующее соотношение (без учета накопления и ввода извне):

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ikj} a(i_k) + A_i.$$

Выписывая подобное соотношение для всех продуктов i , мы получим систему уравнений, позволяющих осуществить необходимое согласование планов производства и материально-технического снабжения.

Если теперь задать величины A_i , характеризующие непроизводственное потребление, а также коэффициенты $a(i)$, то задача сбалансирования материально-технического снабжения с производством сведется к решению выписанной системы линейных алгебраических уравнений. Эта система содержит, однако, миллионы (Np) неизвестных и при обычных методах требует для своего решения нескольких квинтиллионов (10^{18}) арифметических операций. Правда, число необходимых операций может быть уменьшено за счет того, что в матрице коэффициентов рассматриваемой системы уравнений будет много нулей, а также, возможно, за счет применения более экономных методов решения (например, итерационных).

Не следует, однако, забывать, что мы сильно упростили подлежащую решению задачу. Действительно, и неспециалисту в области экономики ясно, что задачу согласования планов производства и материально-технического снабжения нужно решать в динамике, учитывая не только суммарное годовое производство любого продукта, но и распределение этого производства по отдельным месяцам и даже неделям. Иначе производство какого-нибудь продукта, необходимого в первом квартале, может оказаться запланированным на четвертый квартал и тем самым будут спутаны все плановые наметки. Во всяком реальном плане нужно учитывать также затраты на капитальное строительство, ограниченность ресурсов, динамику расширенного воспроизводства, транспортные расходы, соответствие между уровнем потребления и фондом зарплаты и многое другое.

Таким образом, несколько квинтиллионов арифметических операций, о которых шла речь выше, представляют собой не завышенную, а скорее даже заниженную оценку числа операций, необходимых для достаточно детализированных плановых расчетов в масштабе такой большой страны, как

наша. Совершенно очевидно, что подобный объем расчетов не может быть выполнен вручную. Не могут сколько-нибудь существенно помочь здесь также настольно-клавишные вычислители, счетно-аналитические машины и любые другие механические вычислительные устройства. Такая задача по плечу лишь современным электронным цифровым машинам, причем не одной машине, а целой системе машин. Ведь при производительности одной машины 30 тыс. арифметических операций в секунду потребуется свыше миллиона машин, чтобы, работая на них в течение целого года, выполнить квинтиллион операций!

Число операций, необходимых для составления планов, можно, конечно, существенно уменьшить за счет резкого сокращения номенклатуры планируемых изделий. Однако при объединении родственных изделий в группы возникает опасность, что при сбалансировании потребностей в обобщенных показателях может обнаружиться нехватка тех или иных конкретных видов изделий. Суммарный объем производства труб, например, будет вполне достаточным, а труб какого-нибудь определенного диаметра может при этом не хватать. Таким образом, возможности упрощения задачи планирования ограничиваются определенными пределами.

Возникшая трудность разрешима путем резкого увеличения производительности труда в системе плановых органов за счет оснащения их новейшей вычислительной техникой. Для этого необходимо создать единую государственную систему вычислительных центров для переработки планово-экономической информации. Основой для подобной системы может служить имеющаяся сеть машинно-счетных станций при условии постепенного проведения ее коренного технического перевооружения.

Перед специалистами в области экономики, кибернетики и вычислительной математики стоит большая задача построения математических моделей управления экономикой, которые в наиболее полной степени использовали бы огромные преимущества, заложенные в социалистическом способе ведения хозяйства. Предстоит преодолеть немалые трудности в разработке эффективных методов решения задач большого объема способов объединения вычислительных машин в систему и т. п. Нужно привести в порядок нормативное хозяйство, создать научно обоснованную систему классификации материальных ресурсов, упорядочить систему учета и сбора первичных данных.

Было бы, однако, большой ошибкой думать, что до решения этих проблем нельзя приступать к созданию единой государственной автоматизированной системы переработки планово-экономической информации. Дело в том, что основные ячейки такой системы — планово-экономические вычислительные центры — еще до их объединения могут принести огромную пользу, решая частные планово-экономические задачи. В настоящее время имеется уже довольно много разработанных и испытанных на практике программ для решения различных задач экономического характера; повсеместное внедрение этих программ может дать большой народнохозяйственный эффект.

Прежде всего надо сослаться на опыт решения так называемых транспортных задач. В течение нескольких лет Институт кибернетики Академии наук Украинской ССР, например, проводит фактические расчеты для составления оптимальных планов перевозок по железным дорогам, а также по водным и автомобильным путям. Разработанная институтом совместно с транспортными организациями методика оптимального планирования автомобильных перевозок внедрена в некоторых крупных городах Украины и уже дала немалую экономическую выгоду. Аналогичные работы с успехом проводились Вычислительным центром Академии наук СССР и рядом других научных коллективов.

В этом году Институт кибернетики совместно с Госпланом УССР осуществляет расчеты планов материально-технического снабжения по ряду дефицитных изделий. При этом впервые организовано взаимодействие между заводскими машинно-счетными станциями и Вычислительным центром Академии наук УССР. Довольно быстрыми темпами начинают внедряться методы оптимального внутризаводского планирования.

Вопрос о внутризаводском планировании заслуживает особого внимания. Именно на предприятиях возникает исходная информация, необходимая для нормального функционирования централизованной системы планово-экономических вычислительных центров. В настоящее время назрела настоятельная необходимость в разработке и передаче в серийное производство нескольких унифицированных типов систем автоматизации внутризаводского учета и планирования. Подобные системы должны состоять из центральной электронной вычислительной машины, связанной со специальными устройствами для ввода информации в местах

первичного учета. Над созданием одной из таких систем, предназначенной для Львовского телевизионного завода, работает в настоящее время Институт кибернетики.

Разумеется, наличие специальных вводных устройств не должно исключать организации сбора информации посредством перфокарт. С этой целью следует наладить массовый выпуск дешевых настольных перфораторов и произвести унификацию системы кодирования информации на перфокартах.

Циркуляция информации в централизованной системе планово-экономических вычислительных центров должна, как правило, осуществляться с помощью современных линий связи. Однако (особенно в начальном периоде работы системы), вполне допустим и прямой обмен перфокартами.

Централизованная система сбора и обработки информации должна быть достаточно гибкой, чтобы иметь возможность быстро приспосабливаться к изменению организационных форм управления экономикой, неизбежному по мере дальнейшего увеличения масштабов производства. Для этого входящие в систему вычислительные центры должны быть не только производственными, но и научно-исследовательскими организациями, способными решать задачи непрерывного совершенствования системы управления народным хозяйством.

Самая передовая в мире советская экономика должна иметь и непременно будет иметь наиболее совершенную, высокоэффективную автоматизированную систему учета и управления.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ *

Дать характеристику всех направлений работ в области электронных вычислительных машин и систем управления в небольшой статье невозможно, поэтому я сосредоточу внимание на двух основных вопросах — развитии универсальных электронных вычислительных машин и применении их для автоматизации и обработки информации в некоторых

* Наука и жизнь, 1971, № 2.

важнейших областях промышленности и народного хозяйства.

Когда говорят о техническом прогрессе в области электронных вычислительных машин (ЭВМ), то обычно выделяют поколения ЭВМ. Трудно точно датировать смену поколений, потому что в разных странах этот процесс проходит по-разному. Однако сейчас все большее число ученых и конструкторов склоняется к мысли, что средний период обновления электронной вычислительной техники составляет 5 лет. С учетом этого замечания можно ориентировочно разбить поколения ЭВМ по годам следующим образом: до 1955 г. — предыстория электронной вычислительной техники, 1955—1960 гг. — время первого поколения ЭВМ, 1960—1965 гг. — второго поколения, 1965—1970 гг. — третьего поколения. Следовательно, сейчас совершается переход к четвертому поколению.

В чем состоят различия между этими поколениями?

В основе различия поколений ЭВМ лежит прежде всего их элементная база. Первое поколение машин в качестве элементной базы имело электронные лампы. Машины второго поколения строились на базе полупроводниковой техники: транзисторах, диодах и т. д. Машины третьего поколения созданы на базе микроэлектроники, с относительно малой степенью интеграции. Четвертое поколение отличается существенно более высокой степенью интеграции.

О четвертом поколении я скажу несколько позже, так как это — направление современного научно-технического прогресса.

Что дает переход от транзисторов к микроэлектронике? Прежде всего это — уменьшение габаритов. С уменьшением габаритов появляется возможность каждый раз увеличивать рабочую частоту и, следовательно, быстродействие ЭВМ. Увеличивается надежность, и в перспективе достигается дешевизна машин, поскольку интегральные схемы позволяют широко автоматизировать их изготовление.

Если говорить в общем об универсальных ЭВМ, то, несмотря на всю важность микроэлектроники, это отличие машин третьего поколения является не только не единственным, но, может быть, и не самым главным. Дело заключается в том, что современные машины состоят из многих блоков, а переход к микроэлектронике уменьшает габариты в основном лишь центральных процессоров.

Чем же отличаются машины третьего поколения в глобальном аспекте? Тут можно указать следующие основные отличия.

Прежде всего электронные машины третьего поколения оперируют с произвольной буквенно-цифровой информацией. Фактически в них соединились два направления предыдущих поколений машин — машин для делового, коммерческого, применения (для обработки алфавитной информации) и машин для научных применений (для обработки числовой информации). В машинах третьего поколения эти две линии слились. Возникло специальное понятие — байт. Байт — это единица информации внутри машины, которая представляет собой либо две десятичных цифры, либо один алфавитный символ — букву того или иного алфавита, включая различные знаки и символы. В соответствии с этим изменилась система команд машины. Помимо традиционной арифметической команды, появилось большое количество команд для оперирования с алфавитной информацией.

Второе чрезвычайно важное отличие — изменение структурной схемы машин. Все устройства машин первого поколения и частично второго работали последовательно.

Современные машины третьего поколения обладают возможностью параллельной работы устройств. Эта структурная схема отличается от традиционной схемы прежде всего наличием каналов, управляемых периферийно-коммуникационным процессором. Благодаря этому машина может одновременно выполнять многие операции: переписывать информацию для очередной задачи с магнитной ленты или магнитного диска, выводить информацию для соответствующего устройства, осуществлять ввод информации, работу с удаленными потребителями через линию связи на пультах и т. д. Эта параллельная работа сильно повышает производительность, что особенно важно для построения автоматизированных систем.

Параллельная работа различных устройств машин обеспечивается переходом на мультипрограммный режим. Если работает одна программа, для которой есть все данные в оперативной памяти, то в это время вторая программа может, например, осуществлять ввод информации с удаленного пульта по линии связи. Одновременно в машине находится 16—32 программы, т. е. машина работает с большим количеством задач.

Еще одна особенность заключается в так называемом раз-

делении времени. Это означает, что имеются удаленные пульты (часть из них может быть рядом с машиной, а часть — в другом городе или даже в другой стране), с помощью которых человек по линии связи может осуществлять контакт с машиной. При этом возможна одновременная работа многих людей таким образом, что любому из них кажется, что он один загружает машину, хотя в таком положении находятся все, пользующиеся ЭВМ.

Для осуществления параллельной работы устройств необходимо, чтобы, помимо обычных программ машины, была еще так называемая операционная система, которая обеспечивала бы работу всей сложной системы в комплексе, в связи с чем в машинах третьего поколения сильно повысилась роль математического обеспечения. В настоящее время в ряде машин третьего поколения стоимость математического обеспечения составляет более 50% от стоимости самой машины.

Существенную часть математического обеспечения составляют трансляторы. Внутренний язык машины довольно сложен для неподготовленных потребителей. Пока потребителями были главным образом математики, такое положение в основном устраивало. Но, когда машины стали применяться для таких процессов, как автоматизация проектирования, круг их применения значительно расширился. Внедрять электронно-вычислительную технику стало сложнее. Поэтому разрабатываются языки, удобные для общения, так называемые входные языки машины, отличающиеся от языков обработки внутренней информации машины. Необходимо было разрабатывать трансляторы, которые переводят информацию, подаваемую на внешнем языке, на внутренний язык машины.

Языки ЭВМ второго поколения обеспечивали решение научных задач малой и средней сложности, но это совершенно непригодно для того, чтобы использовать все возможности, предоставляемые машинами третьего поколения. Поэтому появились языки машин третьего поколения: «Симула-67», «ПЛ-1» и «Алгол-68». Эти языки отличаются от традиционных языков машин второго поколения тем, что обладают средствами для описания параллельных процессов и в них заложены основы для саморазвития языков, их можно усложнять дальше, не меняя ядро транслятора, добавлять новые понятия. Кроме того, в них объединяются черты различных языков ЭВМ второго поколения, ориентированных на решение научных и коммерческих задач.

Очень важной особенностью машин третьего поколения является осуществление стандартного сопряжения центрального процесса с периферийным оборудованием. Раньше машины фактически сопрягались только с теми магнитными лентами и другим периферийным оборудованием, которое разрабатывалось специально для данной машины. Это примерно выглядит так, как если бы в сельскохозяйственном машиностроении выпускался трактор, который не мог бы работать с любым плугом, а только с плугом, специально для него разработанным. Такое положение было в первом и втором поколениях машин.

В настоящее время положение существенно изменилось. Дело в том, что входной канал имеет стандартные системы связи и кодирования информации и к нему можно присоединить любое периферийное устройство машин третьего и четвертого поколения. Это достигается тем, что в машинах имеется специальное устройство, управляющее группами периферийных устройств, которые преобразуют информацию в стандартную форму. В машинах четвертого поколения стандартизация будет доведена до такой степени, что к машине могут присоединяться любые устройства.

Остановимся теперь на новых периферийных устройствах и улучшении характеристик старых устройств. При смене поколений примерно на порядок выросли характеристики традиционных устройств и появились некоторые новые: автоматы, читающие печатный текст, и экранные пульта. Я хочу о них сказать особо, потому что в машинах четвертого поколения им принадлежит будущее.

Что представляет собой экранный пульт? Это устройство имеет вид пишущей машинки с клавиатурой и экран типа телевизионного, на котором можно видеть вводимую или получаемую из машины информацию. Информацию можно впечатывать на машинке, специальным световым карандашом можно вносить правку непосредственно на экране. На экран выводится графическая информация, оператор с помощью светового карандаша может править график, рисунок, чертеж и т. д.

С помощью экранных пультов осуществляют режим диалога. Надо сказать, что режим диалога — это сфера машин четвертого поколения. Но и в машинах третьего поколения имеются зачатки режима диалога.

Режим диалога предполагает решение таких задач, программа которых в момент начала решения полностью неиз-

вестна. Для этого обеспечивается совместная работа человека, сидящего за пультом, и вычислительной машины. Человек видит, как осуществляется процесс в вычислительной машине, фиксирует те или иные промежуточные результаты и по ходу дела меняет инструкции машине, чтобы получить тот или иной желательный результат.

Развитие системы диалога с машиной особенно важно в исследовательских задачах и в задачах автоматизации проектирования. Но этот режим приходит в противоречие с принятой системой трансляции. Дело в том, что человек должен вводить информацию на входном языке, а машина работает на внутреннем. В момент диалога все время должен работать транслятор-переводчик, а трансляция и так занимает достаточно много времени в современных машинах. Поэтому все больше и больше стали развиваться другие системы, прежде всего система интерпретации, при которой форма информации, вводимой в машину, не отличается от входного языка, а машина интерпретирует выражения входного языка в своих командах. При этом, правда, снижается скорость работы, но этот недостаток исправляется за счет такого изменения структуры машины, при котором структурная интерпретация стала бы естественной. Такое направление в настоящее время еще не получило большого развития, однако это уже определенные черты перехода к машинам четвертого поколения.

Далее, изменилось понятие производительности машины. Раньше производительность машины связывалась с количеством арифметических операций, выполняемых машиной за единицу времени. Эта характеристика остается важной и сейчас. Однако в связи с изменением системы обработки данных столь же важное значение приобретают другие характеристики машин. В самом деле, если вы решаете задачу, например, расчета трасс космических кораблей, то периферийные устройства играют небольшую роль, поскольку закладывается в машину и снимается с выхода сравнительно малое количество данных, а машина производит большое количество вычислений. Задача другого качества, например, перепись населения, которая требует большого количества исходных данных и сравнительно малого числа операций. Здесь проблема ввода и вывода имеет большое значение. Поэтому важны характеристики работы всех частей системы. В настоящее время рекордная скорость работы электронных вычислительных машин — скорость выполнения мате-

матических операций в центральном процессоре — составляет несколько десятков миллионов операций в секунду, а емкость оперативной памяти — 16 миллионов байт. Ясно, что электронная часть современных машин очень мощная, но для того, чтобы использовать такую скорость ее работы, приходится преодолевать медлительность периферийных устройств.

В чем же состоит основное направление технического прогресса в машинах четвертого поколения? В настоящее время машины четвертого поколения будут строиться в основном на схемах большой интеграции, когда в еще большей степени будут уменьшены размеры машин и повышены скорость, надежность, а в перспективе — обеспечена дешевизна ЭВМ.

Для машин пятого поколения элементная база просматривается менее уверенно, но, видимо, большую роль будет играть оптоэлектроника, использование когерентных источников излучения.

По прогнозам, которые в настоящее время имеются в мире, к концу следующего поколения появятся машины с миллиардом операций в секунду. Эта скорость будет повышаться за счет мультипроцессорной и параллельной работы.

Дальше просматриваются некоторые возможности осуществления параллельного преобразования информации типа той, которая представляется в виде голограмм с помощью систем лазерных элементов, и соответствующих «вычислительных сред». Ожидается, что будут построены внешние запоминающие устройства типа магнитно-дисковых на 10^{14} байт информации. Это крупная библиотека на 100 миллионов томов, которая помещается в одной ЭВМ.

В структуре машин четвертого поколения предполагаются большие изменения. Машины общего назначения будут иметь специальные процессоры для управления, куда будет перемещена большая часть операционной системы, несколько параллельных процессоров для выполнения основных операций, коммуникационные процессоры с большим числом функций, чем в нынешних каналах, и, наконец, периферийные процессоры для решения более мелких задач.

Достигнутая машинами третьего поколения стандартизация сопрягающих устройств ввода и вывода с центральными процессорами в машинах четвертого поколения распространится и на систему математического обеспечения.

При этом будет все более возрастать роль автоматизации проектирования. Без нее невозможно будет осуществлять разработку таких сложных операционных систем, которые в настоящее время только намечаются.

Очень большие сдвиги ожидаются в области автоматизации изготовления ЭВМ в связи с переходом на технологию больших интегральных систем.

Программное управление специальными устройствами на основе электронной и ионно-лучевой технологии позволит сильно снизить стоимость больших интегральных схем. Появятся новые языки. В настоящее время в связи с задачей автоматизации проектирования все больше распространяются языки процессирования картинками и чертежами, которые требуют своего собственного подхода к структурной программе интерпретации и корреляции. Появятся новые периферийные устройства. Кроме того, ожидается, что будут созданы устройства вывода информации из машин голосом для специальных применений. В середине 70-х годов широкое распространение получат экранные пульта, о которых уже упоминалось выше.

Наконец, в машинах четвертого поколения происходит процесс (начавшийся еще в машинах третьего поколения) сращивания машин и вычислительных центров с системой связи. Меняется и представление о системе связи. Связь будущего целиком должна предоставлять потребителю не только услуги передачи информации, но и ее хранения и обработки.

Что касается использования ЭВМ, то машины первого поколения применялись в основном для научных расчетов и только частично для экономических расчетов. Машины второго поколения, помимо этого, стали широко использоваться для управления различными процессами, прежде всего технологическими (управление домнами, прокатными станами, самолетами), для выполнения экономических расчетов. Машины третьего поколения, помимо всего перечисленного, стали широко применяться для автоматизации процессов проектирования, построения автоматизированных систем управления в технологии и в административной области. Появляются интегрированные системы: машины, управляющие технологией и экономикой предприятия.

Основным направлением технического прогресса в области применения ЭВМ является так называемый системный подход к управлению ими.

Что такое системный подход? Если говорить, скажем, об использовании машин второго поколения для решения определенной задачи, то поступают так: берут исходные данные, составляют программу, передают в вычислительный центр, получают ответ и т. д. Это — эпизодическое использование ЭВМ. При системном подходе имеет место автоматизированный сбор информации, причем информация, необходимая для решения задач, накапливается прежде всего на магнитной ленте. Если мы каждый раз будем решать задачи так, чтобы использовать устройства ввода и вывода, то машина будет задыхаться от недостатка информации.

Поэтому при системном подходе накапливаются исходные данные для постоянного хранения на магнитных лентах, создается так называемая служба данных или служба информационных массивов, а ввод и обновление этих данных автоматизированы с помощью специальных устройств. Это — первое отличие.

Второе отличие заключается в том, что вывод данных производится уже в готовом виде, в окончательной форме — в виде чертежей, если это автоматизация проектирования, в виде проектов распоряжений, если это система управления заводом, каких-то проектов планов, одним словом, в виде готовых документов, оформленных так, что с них можно делать фотографии и передавать непосредственно в типографию.

Наконец, при системном подходе требуется наличие специальной операционной системы. Как правило, здесь общая операционная система машин не подходит и нужна своя, чтобы последовательно проводить подготовку данных для системы рабочих программ, осуществляющих автоматизацию того или иного процесса.

Допустим, проектировщик жилого здания одной программой решить задачу не может. Раньше он использовал машину для оптимальной планировки, выводил данные, потом вводил их и делал снова расчеты; в этом случае ввод — узкое место машины — использовался нерационально. Теперь эти данные находятся все время в машине и передаются от одной программы к другой специальной операционной системой. Кроме того, эта же операционная система ответственна за организацию взаимодействия конструктора с ЭВМ.

В каких направлениях в настоящее время осуществляется применение этого системного подхода? Системный подход уже достаточно ясно проявился в машинах третьего поколения и будет основным в машинах четвертого поколения.

Как осуществляется системный подход в проблеме автоматизации экспериментальных исследований? Имеются три основных направления автоматизации сбора информации. Первое — основано на стандартизации носителей. Аппаратура фиксирует информацию, получаемую в результате эксперимента или испытания, на очень непохожих друг на друга носителях: это и диаграмма, и кинолента, и различные бумажные ленты и т. д. Разработать данные для вводных устройств ЭВМ, которые бы достаточно эффективно читали всю эту информацию, не представляется возможным. Разумно здесь встречное движение, чтобы конструкторы приборов и конструкторы машин договорились, что имеется 5 или 10 основных видов фиксирования информации на носителях. А конструкторы периферийного оборудования для машин должны создать соответствующие высокопроизводительные устройства, которые позволяют автоматически читать эту информацию и вводить ее в машину.

Второе направление автоматизации сбора информации основано на системе разделения времени. В лабораторию выдается какой-то канал от большой ЭВМ, установленной в другом месте, и через специальные аналого-цифровые преобразователи осуществляется подключение тех или иных измерительных приборов к передаче непосредственно в ЭВМ для решения не только крупных задач, но и первичной обработки (использование метода наименьших квадратов, нахождение корреляции и т. д.), которая требует многих данных и не автоматизировалась ранее ввиду того, что не был автоматизирован ввод.

Наконец, третье направление — это органическое включение ЭВМ в сложные экспериментальные установки. Речь идет о таких установках, как ускорители, ядерные реакторы, исследовательские суда и т. д. В этом направлении уже кое-что сделано, но нужно сделать еще намного больше.

Предстоит разработать систему стандартизации и архивизации научных данных. Когда ставится тот или иной эксперимент, результаты обрабатываются в соответствии с имеющейся технологией обработки и под определенным углом зрения. Например, произвели взрывы и записали сейсмограммы. Такие сейсмограммы несут большую информацию, но обрабатываются они под определенным углом зрения, например, для поисков нефти. В будущем будет разработан новый метод обработки сейсмограмм и появятся задачи определения других полезных ископаемых. Необходимо, чтобы

первичные данные, определенным образом обработанные, хранились не на бумаге, а на магнитной ленте ЭВМ в цифровом виде с тем, чтобы можно было не повторять их ввод и вывод и сами дорогостоящие эксперименты, а использовать, когда это потребуется, ранее сделанные эксперименты и только обработать их иначе.

Очень важным вопросом является создание систем для автоматизации проектирования. Здесь системный подход отличается тем, что решаются не отдельные задачи, а весь комплекс и выдаются окончательные документы, осуществляется взаимодействие с конструктором.

Как работает конструктор, используя машину третьего поколения, при проектировании какого-то объекта? Условно рассмотрим проектирование жилого дома. В машину вводится система программ и операционная система, которая обеспечивает разговор конструктора с машиной на понятном ему языке, система директив, которая направлена на обработку чертежной информации (например, повернуть чертеж, сделать разрез). Имеется также набор программ для подсчета той или иной функции на данном объекте, например, общей полезной площади или стоимости квадратного метра.

Перед конструктором имеется пульт, на котором можно выяснить либо результат расчета стоимости квадратного метра, либо чертежную информацию (общий вид, план квартиры и т. д.). Конструктор может вмешаться и световым карандашом нарисовать стрелку, указав, что нужно подвинуть стенку на полтора метра вправо и т. д. Когда весь цикл проектирования пройден, специальная система редактирующих программ по запросу конструктора осуществляет выдачу рабочей документации.

Направление развития справочно-информационных систем для машин четвертого и особенно пятого поколения можно охарактеризовать следующим образом. В связи с резким увеличением емкости периферийных запоминающих устройств ожидается, что на протяжении ближайшего десятилетия в целом ряде стран будут созданы национальные банки данных. Это система вычислительных центров, в которых накапливается определенная информация, и система пультов на рабочих местах конструкторов-потребителей, например связанных по линиям связи с этими национальными банками данных. Конструктор может вызывать нужную ему информацию. Национальный банк в области данной технологии

включает в себя, например, описание всех материалов и обеспечивает поиск их по заданным свойствам. На запрос конструктора, работающего за пультом, о материалах с требуемыми свойствами система осуществляет поиск информации в своей памяти и отвечает, какие материалы разработаны или разрабатываются и в какой лаборатории, какие уже выпускаются промышленностью, причем с указанием адреса, по которому можно сделать заказ.

Система программированного обучения, по предположениям, будет очень широко применяться уже к концу этого десятилетия.

Несколько слов о самой важной области применения ЭВМ — в автоматизированных системах управления в промышленности и народном хозяйстве вообще (АСУ).

Надо отличать системы технологического управления и системы организационного и административного управления: новое здесь — появление интегрированных систем, о которых упоминалось выше. Проектирование таких АСУ резко отличается от привычного проектирования, которое применяли, скажем, десять лет назад. В чем это отличие? Когда автоматический регулятор на машинах делался для автоматизации тех или иных технологических операций, памятью этого регулятора служил сам объект. Регулятор должен был только преобразовывать в соответствии с поступающей информацией данные, получаемые от датчиков, и выдавать их на исполнительный орган. Когда речь идет о таких сложных объектах, как различного рода административные и организационные системы, подобный способ уже невозможен. Необходимо осуществлять создание информационной модели объекта в памяти машины.

Делается это следующим образом: в системах разграничиваются два процесса — сбор данных для управления и решение самих задач управления. Разграничение это делается через так называемые информационные массивы. Допустим, в массивах министерства хранятся данные о ресурсах, которыми располагают заводы, конструкторские бюро и другие подразделения этого министерства. Эти данные обновляются в момент, когда создается какая-то информация об обновлении: скажем, пишется новый паспорт какого-то оборудования, устанавливаемого или модернизируемого на том или ином заводе, а в этот момент информация передается в соответствующую АСУ, хотя она будет использована, может быть, только через две недели или через год.

Специальная операционная система все время обновляет поступающими данными массивы информации, определяющей состояние объекта управления. Это очень сложная работа, поскольку необходимо стандартизировать прежде всего формы представления информации, для того чтобы отдельные единицы автоматизированных систем могли без вмешательства человека обмениваться информацией с магнитных лент либо в будущем прямо по каналам связи.

Имеется еще одно важное отличие автоматизированных систем управления: необходимо, чтобы сбор информации производился таким образом, чтобы совмещалось приготовление первичного документа с подготовкой данных для ЭВМ. Для этого требуется специальная гамма периферийных устройств (скажем, специальные пишущие машины, которые одновременно с обычным текстом готовят его копию на перфоленте), чтобы не дублировать работу и вместе с тем обеспечить абсолютную точность информационных данных, вводимых в ЭВМ.

Следующий очень важный вопрос — это принцип новых задач. Иногда еще бытует такая точка зрения, что стоит установить вычислительную машину и дать математическое обеспечение, как дела пойдут очень хорошо. Фактически же дело далеко не в этом. Практика показала, что если машина устанавливается под те задачи, которые решаются сегодня, то это, как правило, большого эффекта не дает. Но если берутся совершенно новые задачи, которые не могли быть решены раньше, поскольку были ограничены возможности человеческого коллектива, то в этом случае от применения ЭВМ возможен большой эффект.

Поиск таких задач и одновременно изменение структуры управления, изменение функций человеческих коллективов, которые работают с ЭВМ, — одна из важнейших задач при внедрении АСУ.

Остановлюсь теперь на вопросе, связанном с увеличением эффективности в зависимости от размеров системы. Мировая практика показывает, что чем больше размер автоматизируемой системы, тем больше ее экономическая эффективность.

Большой эффект может быть получен от автоматизации сбора данных на предприятиях и использования координирующего центра, например, в министерстве.

Несколько слов об организации внедрения АСУ.

Нужно создать индустрию не только ЭВМ, но и систем математического обеспечения для машин. Индустриальные

методы внедрения систем управления, систем автоматизации обработки данных, о которых говорилось выше,— это залог успеха.

Вторым условием успеха является единая техническая политика как в отношении математического обеспечения, так и в отношении сопрягаемости систем управления в различных звеньях.

Я не затронул здесь такие интересные моменты, как автоматизация математических доказательств, построение дедуктивных теорий с помощью ЭВМ, моделирование сложных систем, постановка математических экспериментов в таких областях, которые раньше считались далекими от математики (биология, лингвистика и т. п.). Однако о главных направлениях технического прогресса и применении ЭВМ в народном хозяйстве я постарался рассказать полнее. И самым основным среди них является использование ЭВМ для дальнейшего совершенствования управления.

АСУ.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ *

В соответствии с Директивами XXIV съезда КПСС созданы и создаются сотни АСУ различных классов. Важное место среди них занимают автоматизированные системы управления предприятиями и объединениями, а также автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП). Многие из этих систем оказались весьма эффективными, однако далеко не весь полученный от их внедрения эффект находит сегодня прямое денежное выражение.

Как показал опыт, внедрение АСУ на предприятиях позволяет увеличить объем выпускаемой продукции на 3—7%, сократить уровень запасов на 20—25%, уменьшить нормы оборотных средств на 16—18%. На многих машиностроительных заводах внедрение АСУ позволило сократить в несколько раз сроки запуска в производство новых сложных изделий и резко (в 5—6 раз) уменьшить списываемые остатки материалов и комплектующих изделий после окончания выполнения сложных заказов в мелкосерийном и единичном производстве.

* Механизация и автоматизация упр., 1975, № 1.

На многих машиностроительных и приборостроительных предприятиях, внедривших АСУ, отмечается значительное ускорение темпов роста ряда технико-экономических показателей и прежде всего темпов роста производительности труда. Такое ускорение обуславливается рядом причин. Одна из них — увеличение действенности социалистического соревнования, основанного на несравненно большей оперативности и точности учета, обеспечиваемых автоматизированными системами управления (например, оперативное доведение до рабочих результатов расчетов зарплаты при переходе на ежедневное начисление).

Другая не менее важная причина увеличения темпов роста технико-экономических показателей производства состоит в том, что АСУ позволяет оперативно производить детальный технико-экономический анализ всех факторов, влияющих на производительность труда, себестоимость продукции, ее качество и другие показатели и тем самым ставить конкретные цели перед администрацией и инженерно-техническим персоналом по совершенствованию организации и технологии производства. Кроме того, АСУ дает возможность руководству и инженерно-техническому персоналу избежать затрат времени на составление справок и отчетов, продвижение заказов в цехах, организацию авралов и сосредоточиться на решении наиболее актуальных задач совершенствования технологии и управления производством.

Сегодня уже нередки случаи, когда внедрение АСУ позволило предприятиям увеличить годовые темпы роста производительности труда с 3—4% до 12—14%. Хотя эти темпы роста наряду с другими составляющими эффекта, о которых шла речь выше, пока не учитываются принятой методикой расчета экономической эффективности АСУ, тем не менее она оказывается достаточно высокой. Общий экономический эффект от внедрения АСУ в 1971—1973 гг. составил 723 млн. руб.

Если принимать во внимание лишь те АСУ, функционирование которых не сводится к автоматизации решения простейших бухгалтерских учетных задач, а к решению коренных задач планирования и управления, то сроки окупаемости затрат для таких систем не превышают двух лет. Иными словами, уже на современном этапе без учета многих составляющих эффекта эффективность вложения средств в АСУ в среднем в 3 раза выше, чем в основное производство. Например, внедрение отраслевой АСУ Минприбора только в 1972 г. позволило получить дополнительную прибыль в сум-

ме около 13 млн. руб., в результате чего расходы на ее создание и эксплуатацию окупились менее чем за один год. За полтора года окупились расходы на создание АСУП в Ленинградском оптико-механическом объединении и ПТО «Электрон» (г. Львов) и т. д.

Однако наряду с указанными высокоэффективными системами за последние годы появилось немало АСУ с незначительной, нулевой, а иногда и отрицательной эффективностью. Деятельный анализ показывает, что подобное положение имеет место там, где на самом деле никаких АСУ в том смысле, который вкладывается в это понятие современной наукой, создано не было. Подобные псевдоАСУ при пренебрежении к давно сформулированным принципам построения АСУ ориентируются не на коренное улучшение решения основных задач планирования и управления производством, а лишь на отдельные рутинные задачи, решаемые на ЭВМ в том же виде, в каком они решались ранее.

Имеются три основные причины появления подобных псевдоАСУ. Первая причина заключается в слабости технической базы. Дело в том, что до последнего времени можно было строить АСУ лишь на ЭВМ второго поколения (в основном «Минск-32»), выпускавшихся без магнитных дисков и с крайне слабым математическим обеспечением. Положение усугублялось почти полным отсутствием выпуска необходимой периферийной техники (регистраторов производства, дисплеев и др.), а также плохим качеством магнитной ленты и других машинных носителей информации.

В этих условиях создание АСУ, отвечающих современным стандартам, предъявляло особо высокие требования к квалификации разработчиков АСУ. Следует сказать, что разработчики АСУ в США, Западной Европе и Японии считают вообще невозможным создание сколько-нибудь эффективных АСУ без мощной технической базы. Поэтому создание высокоэффективных отечественных АСУ можно рассматривать как своеобразный научный подвиг, свидетельствующий о весьма высокой квалификации и огромном труде аналитиков, системотехников и программистов.

Вторая причина появления псевдоАСУ заключается в том, что в условиях общего недостатка кадров разработчиков АСУ (имеющего место во всем мире) необходимо обеспечить должную организацию их работы. Если в восьмой пятилетке АСУ создавались в основном по индивидуальным проектам, то в девятой основой технической политики в области созда-

ния АСУ должна была стать концентрация наиболее квалифицированных кадров при относительно небольшом количестве типовых проектов и организация массовых индустриальных форм их привязки и внедрения на конкретных объектах. Как показал опыт группы машиностроительных отраслей промышленности, такая политика в 4—5 раз увеличивает производительность труда в разработке и внедрении АСУ.

Задания в области разработки и внедрения АСУ в девятой пятилетке возросли по сравнению с восьмой не менее чем в 8 раз, а число квалифицированных кадров в течение пяти лет было лишь удвоено. Выполнение заданий пятилетнего плана по АСУ без снижения среднего качества разработок в таких условиях могла обеспечить только политика концентрации квалифицированных кадров на типовых проектах и переход к индустриальным методам внедрения. К сожалению, она была проведена далеко не всюду. В результате число квалифицированных кадров, приходящихся на один проект, уменьшилось, что не могло не привести к снижению качества проектирования и к появлению некачественных проектов, т. е. подмене настоящих систем автоматизации псевдосистемами.

Третья причина появления псевдоАСУ состоит в формально-бюрократическом отношении руководителей ряда предприятий и министерств к вопросам создания и внедрения АСУ.

Появление псевдоАСУ особенно опасно тем, что бросает тень на идею автоматизации управления и приводит к возникновению волны вторичного скептицизма. Если первичный скептицизм (распространенный в 60-е годы) основывался на полном познании возможностей ЭВМ, то вторичный (по крайней мере внешне), — на определенном знании и опыте, возникшем в результате появления псевдоАСУ.

Положение усугубляется тем, что до настоящего времени трудности, стоящие на пути создания действительно эффективных АСУ, в полной мере еще не оцениваются большинством наших хозяйственных руководителей. От их внимания, как правило, ускользает тот факт, что создание высокоэффективной АСУ для современного крупного предприятия представляет собой весьма сложную задачу. Поэтому трудно назвать нормальным положение, когда разработку АСУ находят возможным поручать на полубюджетных началах какой-либо лаборатории, институту, отягощенных к тому же многочисленной дополнительной тематикой.

Из сказанного следует вывод о полной бесперспективности технической политики, основанной на индивидуальном проектировании АСУ. Производимый в настоящее время переход на ЭВМ третьего поколения (ЕС ЭВМ) еще более облегчит задачу типизации АСУ. Если для ЭВМ второго поколения использовался в основном лишь один уровень типизации по группам родственных (например, машиностроительных) предприятий, то для АСУ всех классов (от цеха и склада до отрасли) представляется возможным типизировать большую часть технического и программного обеспечения и значительную часть информационного обеспечения.

Уже сейчас возможности ЕС ЭВМ обеспечивают условия для создания достаточно широкого класса конфигураций технических средств, особенно устройств внешней памяти и стандартных устройств ввода-вывода для ВЦ общего назначения. Распространение этих возможностей на комплексирование центральных процессоров, включая миникомпьютеры и «нестандартные» (с точки зрения классической вычислительной техники) периферийные устройства (цеховые и складские регистраторы, кассовые аппараты и т. п.), позволит с минимальной затратой сил и средств создавать технические комплексы для АСУ в любых отраслях народного хозяйства (включая непромышленную сферу).

Разработанные и освоенные системы и пакеты программ для ЕС ЭВМ (над которыми трудились десятки тысяч специалистов в разных странах) также позволяют охватить большое число задач планирования и управления и облегчить труд программистов, занятых разработками АСУ. Продолжение работы над пакетами программ приведет к возможности централизованного снабжения программами (и процедурами) управления всех разработчиков независимо от вида разрабатываемой АСУ. Такое снабжение предполагает соответствующую централизацию обучения всех разработчиков новым (ускоренным) методам создания АСУ. В связи с этим важнейшей первоочередной задачей является создание мощного учебно-методического центра. В таком центре прежде всего должна быть создана и развита техническая база, позволяющая быстро создавать прототипы технических комплексов для любых видов АСУ. Этот центр должен также концентрировать работу по созданию и освоению пакетов прикладных программ для широкого применения (включая не только обычные АСУ, но и автоматизацию испытаний, проектно-конструкторских работ и др.).

При наличии подобного центра и головных НИИАСУ во всех отраслях (или группах родственных отраслей) работа по созданию АСУ в республике может быть организована следующим образом. В головных НИИАСУ разрабатываются технические задания на АСУ различных типов. В соответствии с планом работ разработчиков АСУ из головных институтов направляют в учебно-методический центр (УМЦ), где для них создается необходимая конфигурация технических средств и комплектуется необходимый состав математического обеспечения. При этом в пакетах ЕС ЭВМ, ориентированных на АСУ, имеются уже необходимые формы представления информации как внутри ЭВМ, так и на ее входах и выходах. Освоив определенную учебную программу по работе на рекомендуемой конфигурации технико-программных средств (сначала на некоторой условной информации), разработчики в дальнейшем концентрируют свое внимание на заполнении массивов реальной информацией, в том числе на создании (или применении) необходимых классификаторов.

Освоив работу с первым экземпляром разрабатываемой системы на той или иной реальной информации, разработчики вместе с УМЦ организуют обучение кадров пользователей тех объектов (предприятий, магазинов, строительных трестов и т. д.), где будет внедряться система этого типа. Применительно к каждому объекту головной НИИ совместно с УМЦ уточняет конфигурацию технического комплекса и программного обеспечения, после чего оно централизовано (специальным монтажно-наладческим трестом) поставляется, монтируется и отлаживается. Одновременно заранее подготовленный персонал пользователей организует наполнение системы реальной информацией в соответствии с разработанными головными НИИ стандартами (классификаторами, формами документов и т. п.).

Поскольку создание эффективных АСУ, как правило, требует коренного изменения организационных форм управления, а в ряде случаев и введенных ранее экономических механизмов, в задачу головного НИИАСУ должны входить не только автоматизация обработки информации, но и проектирование (под руководством УМЦ) всей организации управления. Здесь речь идет о структуре и функциях различных звеньев органов управления, процедурах принятия решений и контроля исполнения, формах материального и морального поощрения и т. п.

Наряду с созданием отдельных функциональных звеньев

автоматизированного управления в виде низовых и отраслевых АСУ, а также общереспубликанских АСУ (АСПР, АСУ МТС и др.) важнейшее значение имеет единый замысел всех создаваемых АСУ, а также техническая и информационно-программная их стыковка. Эта задача должна быть решена на основе разработки и постоянного уточнения республиканской автоматизированной системы, а также с помощью рабочих форм координации в виде совета главных конструкторов и его представителями во всех разрабатываемых АСУ.

Важное значение в ускорении темпов и увеличении эффективности автоматизации управления в народном хозяйстве будет иметь создание Республиканской сети вычислительных центров коллективного пользования (ВЦКП) и системы связанных с ними терминалов абонентских пунктов, установленных у пользователей. Решение этой задачи тесно связано с развитием общереспубликанской сети передачи данных. Помимо связи пользователей с ВЦКП, эта сеть должна обеспечить прямой обмен информацией между АСУ различных ведомств и уровней управления (горизонтальные и вертикальные связи), что позволит улучшить качество управления во всех звеньях народного хозяйства.

Учитывая межведомственный характер подобных обменов и перспективу создания единого общереспубликанского распределенного банка данных, в следующей пятилетке наряду с развитием сети передачи данных предполагается создать межведомственную сеть территориальных информационно-диспетчерских пунктов (ИДП) с целью управления передачей данных и совместной работой ВЦ, принадлежащих различным ведомствам. Одной из первоочередных задач, которую могла бы решать сеть ИДП, является увеличение загрузки ВЦ и улучшение использования ЭВМ в республике. Проектирование сети ИДП и ВЦКП является важной задачей, которая может быть решена лишь мощной специализированной проектно-конструкторской организацией. Создание таких сетей потребует специальных централизованных ассигнований в рамках нового пятилетнего плана.

Важнейшей задачей в новой пятилетке будет оставаться задача автоматизации (с помощью ЭВМ) сложных технологических процессов. Научный задел, созданный в девятой пятилетке, позволит приступить к комплексной автоматизации проектно-конструкторских работ. Опыт показывает, что на этом пути можно добиться десятикратного сокращения сро-

ков проектирования при одновременном значительном улучшении его качества. Много работы предстоит выполнить в связи с задачей комплексной автоматизации испытаний сложных объектов и экспериментальных научных исследований.

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ПЛАНОВЫХ РАСЧЕТОВ *

Мой доклад посвящен двум основным вопросам. Сначала я хочу осветить некоторые принципиальные на мой взгляд положения, которые связаны с созданием автоматизированной системы плановых расчетов. Во второй части я собираюсь рассказать о новых результатах, полученных мною недавно в теории линейных макроэкономических моделей и некоторых нелинейных методов оптимизации.

В первой части доклада я хотел бы остановиться на трех вопросах. Первый и, по-видимому, самый главный вопрос — это нормативная база. Ясно, что никакая работа по оптимизации не может дать хороших результатов, если в ее основе лежат дутые нормативы.

В настоящее время можно с уверенностью сказать, что хорошей нормативной базы для решения оптимизационных задач у нас не имеется. В первую очередь это касается перспективного планирования. Главным недостатком является то, что для подсчета перспективных нормативов мы в лучшем случае продолжаем использовать методы экстраполяции временных рядов. А в практическом планировании зачастую не делают даже этого, заменяя экстраполяцию нормативов прямой экстраполяцией основных плановых показателей по выпуску продукции.

При экстраполяции нормативов мы фактически становимся на позицию планирования будущего, исходя даже не из нынешних тенденций в научно-техническом прогрессе, а из тенденций, имевших место 10 и даже более лет назад. В самом деле, пусть у конструкторов и технологов возникла мысль о возможности коренных изменений в той или иной отрасли народного хозяйства. Для того, чтобы воплотить эти идеи

* 1973 г.

в реально работающее оборудование и конструкции выпускаемых изделий, заведомо уйдет не менее пяти лет. Еще столько же времени (если не больше) уйдет на то, чтобы эти достижения настолько серьезно изменили лицо отрасли, что это проявится в соответствующем изменении среднетрасловых нормативов. А это и означает как раз, что тенденции развития научно-технического прогресса, родившиеся в НИИ и КБ, находят отражение в статистике производства с задержкой на две пятилетки.

Указанный недостаток усугубляется тем, что в эпоху научно-технической революции, с одной стороны, резко возрастают темпы научно-технического прогресса, а с другой — сильно возрастает вероятность принципиальных качественных сдвигов, не сводящихся к простой сумме мелких количественных изменений. В то время, когда наша страна отставала в научно-техническом плане от развитых капиталистических стран, мы могли учитывать подобные неожиданные качественные повороты на основании опыта этих стран. При выходе же на передовые рубежи научно-технического прогресса эта возможность исключается.

Разумеется, в сильно укрупненных моделях даже значительные качественные сдвиги подвергаются заметному усреднению и сглаживанию. Однако, как показывает мировой опыт, развитие практики планирования идет не по линии укрупнения, а по линии все большей детализации используемых моделей. Это вызывается как реальными потребностями планирования, так и непрерывно растущими возможностями вычислительной техники. Ведь только достаточно детализированные модели могут привести к составлению реального плана, в то время как укрупненные модели в лучшем случае могут служить лишь для достаточно грубых качественных оценок основных тенденций развития экономики.

Анализ сложившегося положения показывает, что эффективная нормативная база особенно для целей перспективного и долгосрочного планирования может быть создана лишь на основе постоянного прогнозирования первичных нормативов для новой техники и технологии, создаваемой в НИИ и КБ, и хорошо организованной системы агрегации таких нормативов. В какой-то мере эту задачу призваны помочь решить подготавливающиеся сейчас прогнозы развития науки и техники до 1990 г. Однако в нынешней практике прогнозирования имеется ряд существенных недостатков, которые мешают использовать прогнозы в качестве базы для

математических моделей перспективного и долгосрочного планирования.

Первым недостатком является неполнота прогноза. Оценки технических параметров будущих изделий (например, электронных вычислительных машин) не сопровождаются, как правило, оценкой нормативов для их производства и эксплуатации. Это и понятно, поскольку прогнозы делаются в большинстве случаев учеными, а не технологами. Отсутствие же оценок технологических нормативов лишает возможности использовать результаты прогноза научно-технического прогресса для количественных экономических прогнозов.

Второй недостаток — это разовость прогноза. Разовость прогноза, в свою очередь, приводит к двум отрицательным последствиям. Первое из них заключается в том, что при разовом прогнозе мы лишаемся возможности учесть все те мысли, которые появились у наших ученых, конструкторов технологов после завершения работы над прогнозом. Более того, ответственность, которую берут на себя авторы прогноза, создает известные предпосылки для их будущего консерватизма (и даже прямого противодействия) в отношении последующих новых идей, не учтенных ими в прогнозе. Налицо серьезное противоречие между разовостью прогноза и непрерывностью процесса развития научно-технической мысли.

Другая отрицательная черта разовости прогноза — это фактическое отсутствие возможности для повышения квалификации прогнозистов. Дело в том, что прогнозирование науки и техники — это работа, существенно отличная от работы по развитию науки и техники. Она требует специальной квалификации и опыта. Отнюдь не обязательно, чтобы хороший ученый являлся в то же время и хорошим прогнозистом даже в своей узкой области науки. Достаточно вспомнить, что, например, Резерфорд — один из самых блестящих физиков-атомщиков, много сделавший для подготовки успехов современной ядерной энергетики, упорно отрицал саму возможность практического использования энергии атома. А многие наши видные специалисты в области вычислительной техники в начале 50-х годов отрицали возможность автоматизации даже простейших творческих процессов.

В результате, ситуация при разовом прогнозе напоминает субботник на строительстве, когда участники субботника привлекаются не к подсобным работам (как это обычно и делается), а например, к кладке стен или к отделке помещений.

Повышать квалификацию прогнозистов, превращать их из неумелых новичков в опытных строителей прогнозного изделия можно только при превращении прогнозной работы в непрерывную. Разумеется, при этом методика прогнозирования должна обеспечить, чтобы время, затраченное учеными на прогнозную работу, не выходило из разумных пределов и составляло бы органическую часть их основной деятельности, полезную для этой деятельности.

Третий недостаток современной практики прогнозирования — это отсутствие комплексности прогноза, ведомственная разобщенность прогнозистов и подготавливаемых ими прогнозов.

Прогноз в каждой отрасли составляется при весьма неполном знании о возможностях других отраслей, в том числе и таких, развитие которых предопределяет развитие данной отрасли. В результате в прогнозе упускаются многие возможности, особенно такие, которые связаны с принципиальными взаимообусловленными изменениями в целом ряде отраслей. Легко понять, например, что при том уровне ведомственной разобщенности прогнозистов, который имеет место сегодня, прогноз развития энергетики на 1955 г., выполненный в 1935—1940 гг. (и даже в более поздний срок), не содержал бы и намека на возможность практического использования атомной энергетики.

Ведомственная разобщенность прогнозистов приводит к тому, что прогнозы (особенно дальние) оказываются более пессимистическими по сравнению с реальными возможностями научно-технического прогресса. Пессимистичность прогнозов, в свою очередь, дезориентирует плановиков, направляя их по пути эволюционного развития каждой отрасли в отрыве от возможностей, открывающихся в других отраслях. В результате рождается отставание, преодолеть которое особенно трудно в силу его комплексного характера.

Из сказанного ясно, что полнота, непрерывность и комплексность прогноза должны являться неотъемлемыми частями всякой системы прогнозирования, перед которой ставится цель быть основой для перспективного и долгосрочного планирования. Несколько лет тому назад нами была разработана и успешно применена на практике система прогнозирования, удовлетворяющая всем этим условиям. Основой системы являются экспертные оценки, на которые могут накладываться любые зависимости строго функционального или вероятностного характера, включая и методы экстраполяции.

Полнота прогноза в этой (как, впрочем, и в любой другой) системе, основанной на экспертных оценках, может быть обеспечена за счет полноты системы вопросов, ставящихся перед экспертами. Особенностью нашей системы (обеспечивающей ее комплексность) является возможность объединения мнений большого числа экспертов. Причем речь идет не о простом суммировании оценок, а о их действительном комплексировании: мнения технологов на стадии опроса могут быть отделены от мнений ученых и конструкторов и объединяются лишь на стадии комплексного анализа полученного исходного материала. Анализ производится таким образом, что весь исходный материал постоянно находится в памяти ЭВМ. Наличие специальной операционной системы и языка диалога позволяет быстро заменять те или иные составные части исходной информации, что создает возможность сделать прогноз непрерывным.

Наиболее трудным является требование комплексного прогноза. В нашей методике его удовлетворение обеспечивает тем, что от экспертов не требуется безусловных оценок типа: «К 1990 г. следует ожидать появления промышленных термоядерных реакторов с такими-то параметрами». Как правило, их оценки являются условными. «Промышленные термоядерные реакторы с заданными параметрами могут быть созданы через 5 лет после того, как будут получены такие и такие-то достижения в других областях». Специальная система программ обеспечивает получение из множества подобных условных оценок (весьма различных, а иногда и прямо противоречивых друг другу) не только безусловные (вероятностные) оценки для времени решения тех или иных научно-технических вопросов, но и возможные пути их решения. В системе предусматривается также возможность целенаправленного управления процессом непрерывной экспертизы и непрерывного контроля роста квалификации экспертов. Методика предусматривает также возможность непрерывного перевода хорошо разработанных частей прогноза в перспективные и долгосрочные планы.

Проблема нормативов встает и при текущем планировании. Наши плановики хорошо знают, что те усредненные нормативы, которыми пользуются при составлении годовых планов, содержат в себе в скрытом виде все те резервы, которые имеются в народном хозяйстве. Разница в десятки процентов между теми нормативами, которые можно достичь в условиях уже внедренной технологии, и теми, по которым

фактически производится планирование, в наших условиях к сожалению, далеко не редкость.

Существенное различие между технически обоснованными и среднестатистическими нормами плохо само по себе. Но еще хуже, что точная величина этого различия, как правило, неизвестна плановым органам. В результате плановые задания на изменение того или иного норматива, скажем, уменьшение трудозатрат, распределяются по отраслям без учета действительных резервов, которые эти отрасли имеют.

Ликвидировать все перечисленные недостатки в рамках системы усредненных нормативов невозможно. Система ведения нормативного хозяйства должна исходить из непрерывного слежения за первичными нормативами, как текущими — непосредственно на предприятиях, так и нормативами ближайшей перспективы, отражающими возможности готовящихся или уже готовых, но еще не внедренных разработок. Для того, чтобы первичные нормативы были объективными, необходима разработка специальной системы экономических и административных мер, включая специальный межведомственный контроль нормативов.

В отраслевых автоматизированных системах управления должна быть создана подсистема агрегации первичных нормативов до уровня нормативов, необходимых для детального планирования межзаводских связей (объединение при этом рассматривается как один завод). Вторая система агрегации должна быть основана на взаимодействии ГВЦ Министров и ведомств. Эта система должна быть гибкой: ГВЦ Министров на основе подробных межзаводских нормативов должны быстро вычислять агрегированные нормативы для любых группировок.

Проведенный нами анализ показывает, что наличие лишь жестких, заранее определенных группировок резко снижает возможности повышения эффективности планирования в АСПР. При этом, сохраняя заданную размерность моделей в АСПР, можно быстро менять обсчитываемые плановые показатели за счет укрупнения единых группировок и разукрупнения других, доходя, в случае необходимости, до самых мелких позиций (например, до автомобилей данной марки того или иного сорторазмера проката). Методы подобной агрегации и дезагрегации нормативов были разработаны и начата подготовка для их внедрения.

Разумеется, говоря о системе организации нормативной базы, я имею в виду не только текущие (действующие сегод-

ния) нормативы, но и нормативы как ближайшей, так и дальней перспективы.

Второй принципиальный вопрос, который мне хочется затронуть, — это вопрос о доведении плановых решений до их логического конца, а именно до оперативно-календарного планирования работы отдельных предприятий и производственных участков и их **взаимных связей**. С высот макроэкономики эти вопросы зачастую представляются мелкими. Между тем именно эти задачи являются наиболее трудоемкими и нуждающимися в автоматизации. По нашим оценкам, примерная трудоемкость задач планирования и управления на уровне предприятий и их связей между собой составляет 99,98—99,99% от общей трудоемкости задач планирования и управления экономикой.

Если задачи автоматизации оперативно-календарного планирования и доведения заданий непосредственно до рабочих мест еще как-то решаются в передовых АСУП, то задача управления связями между предприятиями находится в гораздо более худшем положении.

Задача управления связями между предприятиями — это прежде всего задача строгой **синхронизации** работы всех взаимосвязанных предприятий. Решение этой задачи с точностью до квартала приводит к большим потерям. Механизм возникновения этих потерь очень прост: предположим, что две стройки получили наряд на один и тот же сорторазмер проката на первый квартал. Предположим далее, что этот металл нужен первой стройке в январе, а второй — в марте. Однако в силу большей расторопности своих снабженцев вторая стройка «выбила» для себя поставку проката в январе, а первая — лишь в марте. На первой стройке в январь-феврале возникает дефицит металла, который является в действительности мнимым из-за неправильной разнарядки. Если первая стройка была стройкой, скажем, нового прокатного стана, то в результате задержки ее окончания, вызванной мнимым дефицитом, возникает уже истинный дефицит металла.

В настоящее время уже нередки случаи, когда в АСУП «вылизываются» доли процента резервов увеличения эффективности работы предприятий, а в то же самое время десятки процентов эффективности теряются из-за отсутствия синхронизации поставок от смежников. Задача синхронизации работы предприятий в масштабе всей страны является весьма трудоемкой. По нашим оценкам (очень грубым и явно зани-

женным), в 1968—1969 гг. для решения этой задачи требовалось выполнять не менее 10^{15} арифметических операций в год, для чего требуется круглосуточная работа 2—3 тыс. ЭВМ типа «Минск-32». А ведь помимо задач синхронизации требуется решать задачи их оптимизации, коррекции и т. д. К тому же рост уровня специализации и увеличение средней сложности изделий в условиях научно-технической революции вызывает непрерывное и быстрое увеличение сложности этих задач. Нетрудно понять, что полное решение всех таких задач не под силу никакому отдельному ведомству. Они могут эффективно решаться только в результате совместной работы вычислительных центров (АСУП) поставщиков и потребителей в непосредственном контакте с планово-производственным аппаратом соответствующих предприятий и объединений.

Организация подобного взаимодействия вычислительных центров предприятий и объединений независимо от их ведомственной принадлежности требует специальных технических средств и диспетчерской службы по отношению к ведомственным ВЦ. Соответствующие средства и служба могут и должны быть сосредоточены в руках единого союзного или союзно-республиканского ведомства. Технические средства этого ведомства вместе с вычислительными центрами всех остальных ведомств должны составить общегосударственную систему сбора и обработки экономической информации для нужд учета, планирования и управления, создание которой предусмотрено директивами XXIV съезда КПСС. По имеющимся оценкам, такая система только за счет синхронизации и оптимизации связей между предприятиями позволит не менее чем вдвое увеличить темпы развития нашей экономики.

Третий принципиальный вопрос, который мне хотелось бы поднять, касается собственно работы Госплана и АСПР. На основании имеющегося у нас сегодня опыта можно с полной уверенностью заявить, что никакая система экономикоматематических моделей без тесного взаимодействия в реальном масштабе времени с практическими работниками Госплана не способна эффективно решать задачи планирования. Подчеркну, что речь идет не просто о необходимости создания человеко-машинной системы планирования (с этим сегодня, пожалуй, согласны все), а именно о системе, работающей в реальном масштабе времени.

Понятие реального масштаба времени обычно применяется по отношению к управлению технологическими про-

цессами, и там смысл этого термина совершенно понятен. Что же представляет собой реальный масштаб времени применительно к задачам планирования в макроэкономике? В нашем понимании — это такая организация человеко-машинной системы, при которой ответы машины не задерживают естественный ход человеческой мысли, не требуют переключения человека на другую работу, пока производятся машинные расчеты в связи с его очередным заданием.

Особо нуждаются в режиме реального времени различного рода оптимизационные расчеты. Авторы оптимизационных моделей обычно предполагают, что область, в которой ищется оптимальное решение, задана перед началом решения задачи. В ряде случаев, когда ограничения, определяющие область решения, сравнительно немногочисленны и, самое главное, не подвержены быстрым изменениям, такое предположение является вполне оправданным. Примером могут служить транспортные задачи или задача распределения производственной программы между различными единицами оборудования.

Совсем другое дело, когда ограничения в решении оптимизационной задачи являются результатом творческого процесса, как это имеет место в большинстве макроэкономических задач. Пусть, например, решается задача о нахождении оптимального набора технологий в статической линейной макроэкономической модели. Процесс нахождения новых технологий является процессом творческим и потому непрерывным: он не обязан кончаться и действительно не кончается к моменту начала решения оптимизационной задачи. К тому же надо иметь в виду необходимость экономии человеческого труда по подготовке и вводу в машину нормативов (технологических коэффициентов), задающих новые технологии, а также огромные трудности решения самой оптимизационной задачи, если в машину с самого начала будут введены все мыслимые технологии.

Как известно, в линейных моделях область, в которой ищется решение, представляет собой многомерный многогранник, а точка оптимума (или одна из таких точек) расположена в одной из его вершин. Известно также, что эта точка не изменится при достаточно широких вариациях ограничений в далеких от нее участках области (не включающих в себя граней, проходящих через данную точку). Иными словами, после нахождения решения выясняется, что значительная

часть работы по точному описанию области оптимизации была фактически ненужной.

Учитывая все сказанное, нетрудно прийти к выводу, что экономные методы оптимизации в задачах подобного рода должны исходить первоначально из достаточно грубого описания области и уточнять это описание в тех частях, где это необходимо, после получения решения очередной упрощенной задачи. Методы, в которых указанный процесс приводит в конечном счете в точку истинного оптимума при полностью уточненном описании области, приближаясь к ней на каждом шаге, условимся называть методами **последовательной оптимизации**.

Методы последовательной оптимизации обладают целым рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами в задачах с большим числом подверженных человеческому управлению ограничений. Прежде всего такими методами можно решать задачи со столь большим числом ограничений, что классические методы оказываются для них непригодными. Правда, при этом нет гарантии, что мы успеем полностью закончить процесс. Однако даже простое приближение к оптимуму может оказаться достаточно полезным на практике.

Второе преимущество методов последовательной оптимизации состоит в экономии человеческого труда и, самое главное, — в направлении человеческой мысли на решение именно тех проблем, которые помогут совершить очередное продвижение к оптимуму. Наконец, эти методы в наилучшей степени отвечают непрерывному характеру человеческого творчества, позволяя перейти к **непрерывному планированию**. Непрерывное же планирование стирает грань между планированием и оперативным управлением, ибо последнее есть ничто иное, как быстрая коррекция ранее составленных планов в соответствии с меняющимися условиями.

Разумеется, все описанные преимущества в полной мере будут иметь место лишь только в том случае, когда каждый шаг по проверке (с точки зрения критерия оптимизации) каждого очередного предложения по улучшению плана будет выполняться достаточно быстро, чтобы автор предложения не потерял интереса к диалогу с машиной к моменту оценки предложенного им варианта. Было бы, конечно, хорошо, чтобы такой ответ давался мгновенно, однако для сколько-нибудь сложных задач нереально говорить даже о секундных задержках.

Чтобы определить практическую границу разумной скорости ответа системы, посмотрим, каким образом рождаются предложения о путях улучшения плана при обычных (немашинных) методах планирования. Прежде всего в результате расчетов выявляются узкие места, мешающие дальнейшему улучшению плана. Допустим, что таким узким местом является производство черных металлов. В результате собственных раздумий или контактов со специалистами эксперты формируют те или иные предложения, направленные на увеличение производства металла, уменьшение его расхода и т. п. Если предложение рождается в беседе со специалистом, ответ системы должен поступить до конца этой беседы. В других случаях время задержки ответа должно быть того же порядка (или меньше) по сравнению со временем ввода данных (при ручном наборе с удаленного пульта) о предлагаемом изменении.

Во всех случаях время задержки ответа системы в 12—15 мин следует считать достаточно удовлетворительным с практической точки зрения. Если же время задержки ответа исчисляется часами и тем более сутками, то происходит переключение человека на другую работу, в результате теряется интерес к ответу системы и к продолжению диалога с ней по затронутому вопросу. Таким образом, организация работы системы, в которой оценка поступающих предложений происходит за 12—15 мин, удовлетворяет нашему определению работы в истинном масштабе времени.

Поскольку на поиск и обдумывание предложений у плановых работников могут уходить многие часы и даже дни, то при указанной скорости ответа система может обслуживать достаточно большое число пользователей. При этом время, затраченное на обдумывание и предварительную отбраковку поступающих предложений, никоим образом нельзя считать затраченным напрасно: есть серьезные основания считать, что процесс последовательной оптимизации, направляемый человеческой интуицией и опытом, способен быстрее найти точное решение оптимизационной задачи по сравнению с классическими методами оптимизации.

В заключение я хочу рассказать о недавно разработанном мною методе последовательной оптимизации в системе годового и пятилетнего планирования, а также о некоторых связанных с ним теоретических результатах. Хотя метод имеет дело с линейной моделью типа затраты-выпуск, он фактически решает нелинейную задачу оптимизации. Метод

предназначен для работы в реальном масштабе времени, поскольку при 1200 плановых позиций время задержки ответа системы на поступающие предложения даже при использовании такой малоомощной машины, как «Минск-32» (с записью информации на ленты), составляет 15—18 мин.

Итак, мы имеем дело с линейной моделью вида $C = AX$, где A — матрица нормативов прямых затрат, C — вектор конечного выпуска (конечного продукта), а X — вектор полного выпуска. Обозначая через A^* матрицу $(E - A)^{-1}$ полных затрат, получим, как обычно, решение системы в виде $X = A^*C$. Обозначим через $b = \|b_i\|$ ($i = 1, 2, \dots, m$) вектор наличных запасов ресурсов на рассматриваемый плановый период.

Под ресурсами мы будем понимать производственные мощности (основные фонды) и трудовые ресурсы, разбитые на те или иные группы. Имея в виду задачу наилучшего использования основных фондов, целесообразно выделять специализированное оборудование (например, доменную печь), годное для производства лишь одного вида продукции (в пределах плановых показателей), и универсальное оборудование (например, металлорежущие станки или грузовые автомобили), которые могут использоваться при производстве различной продукции. Аналогичный смысл имеет также и выделение отдельных групп трудовых ресурсов. Это обстоятельство следует особо подчеркнуть, поскольку в нынешней практике планирования зачастую рассчитывают производственные мощности как единое целое, не выделяя специализированной и универсальной части. Впрочем, при желании (хотя это и уменьшает возможности оптимизации) можно оценивать мощности по производству каждого продукта плановой номенклатуры как единое целое (в этом случае $m = n$).

Измерение ресурсов будем производить не просто их количеством, выраженным в тех или иных единицах, а количеством, умноженным на ожидаемое время их использования в течение рассматриваемого планового периода. Так что правильнее было бы говорить не о ресурсах, а о ресурсочасах, ресурсоднях и т. п. Подобный способ измерения позволяет легко включать в рассмотрение ресурсы, действующие лишь в течение некоторой части планового периода, например, ресурсы, возникающие в результате окончания строительства в течение планового периода.

Через $B = \|b_{ij}\|$ обозначим $(m \times n)$ -матрицу нормативов прямых затрат ресурсов. Элемент b_{ij} этой матрицы означает

количество i -го ресурса (точнее, ресурсо-часов, ресурсо-дней и т. п.) для производства j -го продукта, затрачиваемое в j -й отрасли. Заметим, что каждый ресурс, равным образом как и каждый продукт, может иметь свою собственную единицу измерения (рубли, тонны, метры, станко-часы, человеко-дни и т. п.).

Пусть C^* — план выпуска, обеспечивающий выпуск конечного продукта C . Как уже отмечалось выше, $C^* = A^*C$. Вектор $b^* = BC^*$ будет представлять собой вектор полных затрат ресурсов в течение заданного планового периода для обеспечения плана выпуска C^* . По аналогии с матрицей A^* нормативом полных затрат продуктов можно ввести матрицу $B^* = BA^*$ нормативов полных затрат ресурсов. В таком случае $b^* = B^*C$.

План C^* будет сбалансированным, если вектор полных затрат ресурсов b^* (покомпонентно) меньше или равен вектору b наличных запасов ресурсов: $b^* \leq b$.

Последнее неравенство (представляющее собою n скалярных неравенств) можно рассматривать как ограничения в задаче оптимизации. Если речь идет о задаче оптимизации состава конечного продукта C , то подобная постановка задачи оптимизации наиболее естественна. В действительности же приходится решать более сложные задачи оптимизации. Дело в том, что имеется много возможностей менять не только компоненты вектора C (потребительские изменения), но и элементы матриц A и B (технологические изменения).

Технологические изменения обычно возникают в виде принятия (с целью улучшения плана) группы элементарных технологических предложений. Каждое из таких предложений заключается или во введении новой технологии производства (включая возможное изменение конструкции) какого-либо продукта, входящего, скажем, в j -ю плановую группировку (обобщенный продукт), или в изменении относительных долей продуктов в j -й группе, или, наконец, в изменении состава предприятий, производящих продукты j -й группы.

Во всех случаях результатом принятия соответствующих элементарных предложений будут изменения j -х столбцов матриц A и B . Задача оценки соответствующего предложения заключается в перерасчете плана с новыми матрицами A и B , вычислении значения критерия, по которому производится оптимизация, и сравнении нового значения критерия со старым. Критерии обычно задаются в виде относительно

простых (большой частью линейных) функций от компонент вектора C^* полного выпуска, вектора C конечного выпуска или вектора b^* полных затрат ресурсов. Поэтому их вычисление не представляет особого труда и может не учитываться в общей сумме затрат машинного времени.

Точно так же не представляет особого труда при известной матрице A^* находить изменения ΔC^* вектора полного выпуска при любых изменениях ΔC вектора конечного выпуска. Вычисления приращения ΔC^* по формуле $\Delta C^* = -A^* \Delta C$ требует около $2n^2$ арифметических операций, что при числе плановых позиций $n=1200$ составляет не более 3 млн. арифметических операций. Для выполнения такого числа операций центральному процессору ЭВМ «Минск-32» потребуется порядка 3 мин, а с учетом необходимости обращения к магнитной ленте (где хранится матрица A^*) — порядка 8—10 мин.

Еще более просто обстоит дело в случае элементарного приращения ΔB матрицы B нормативов прямых затрат ресурсов. Поскольку такое приращение затрагивает лишь один столбец матрицы B , то вычисление приращения Δb^* вектора b^* по формуле $\Delta b^* = \Delta B C^*$ потребует всего лишь m умножений и может поэтому не приниматься в расчет при вычислении общих затрат машинного времени.

Наиболее сложен случай элементарного приращения матрицы A , поскольку это приращение вызывает необходимость заново решить уравнение $x = Ax + C$ для нахождения нового плана полного выпуска. Если использовать для решения этого уравнения обычные методы, то потребуются сутки работы центрального процессора ЭВМ «Минск-32», а с учетом необходимости обращения к магнитным лентам затраты времени будут значительно большими. Правда, в практических задачах матрица A достаточно разрежена, т. е. имеет большое число нулей. Применение методов, использующих это обстоятельство, позволяет уменьшить затраты машинного времени, однако они все еще остаются достаточно большими. Не следует забывать также, что разреженность матрицы A имеет тенденцию уменьшаться со временем в силу усложнения системы связей между отдельными отраслями экономики в результате научно-технического прогресса.

Суть предлагаемого метода решения поставленной задачи состоит в использовании весьма простой, но, по-видимому, неизвестной ранее формулы, связывающей приращение $\Delta_i A^*$ матрицы A^* с элементарным, т. е. одностолбцовым прираще-

нием $\Delta_i A$ матрицы A . Индекс i в приращении $\Delta_i A$ означает, что нулевые приращения имеют лишь элементы i -го столбца матрицы A .

Формула, о которой идет речь, может быть записана в виде

$$\Delta_i A^* = \frac{1}{1 - \alpha_i} A^* \Delta_i A A^*,$$

где через α_i обозначен элемент матрицы $D_i = A^* \Delta_i A$, стоящий на пересечении i -го столбца и i -й строки. При записи этой формулы в виде $\Delta_i A^* = \left(A^* \left(\frac{1}{1 - \alpha_i} \Delta_i A \right) \right) A^*$ легко проверить, что вычисления с ее помощью требуют порядка $3n^2$ арифметических операций. При числе плановых позиций $n=1200$ это составляет около 4,5 операций.

Важно отметить также, что предлагаемая формула хорошо приспособлена для работы с информацией, расположенной на магнитных лентах. Вычисления могут быть осуществлены за два прогона ленты, на которой записана матрица A^* (одностробцовые матрицы $\Delta_i A$ и $A^* \frac{1}{1 - \alpha_i} \Delta_i A$ при этом могут храниться в оперативной памяти). В результате полное решение задачи об оценке элементарного технологического предложения, изменяющего матрицу A , при числе плановых позиций $n=1200$ может быть выполнено на машине «Минск-32» за 15—20 мин. В результате оценка элементарных предложений любого вида может с использованием предлагаемого метода производиться практически в реальном масштабе времени даже при условии использования столь маломощной машины, которой является «Минск-32».

Хотя предлагаемый метод может работать с любым критерием оптимизации, на наш взгляд (особенно на первых порах), его целесообразно использовать в виде, максимально приближенном к традиционной практике планирования, когда задачей оптимизации плана является экономия критического ресурса. В этом случае для первоначально заданного вектора C конечного выпуска условие сбалансированности плана, т. е. неравенство $b^* \leq b$, не выполняется. Иными словами, план выходит за пределы допустимой области.

Имеется тривиальный способ удовлетворять условие сбалансированности плана, умножая план C конечного выпуска на скалярный положительный множитель $\lambda < 1$. Этот множитель всегда можно выбрать таким образом, чтобы хотя бы для одной пары компонент b_i^* , b_i векторов b^* и b неравенство об-

рашалось в равенство $b_i^* = b_i$. Соответствующий ресурс C и будет критическим. Критических ресурсов может быть и несколько, однако на практике этот случай маловероятен, и мы его поэтому исключим из рассмотрения.

Процедура планирования в соответствии с предлагаемым методом состоит в следующем. Прежде всего формируется **напряженное задание** по конечному продукту C . Оно составляется, как обычно, из различных компонент (народное потребление, оборона, капитальное строительство и т. д.). Важно подчеркнуть, что все крупные стройки можно включать в вектор C как отдельные составляющие. Это позволяет впоследствии, на этапе оптимизации, рассматривать предложения, направленные на изменение сроков окончания тех или иных строек, а тем самым на значения векторов C и b . Далее, в пределах заданных размерностей n и m плана формируются плановые показатели и в результате взаимодействия с ГВЦ Министерства подсчитываются нормативы прямых затрат продуктов и ресурсов, т. е. матрицы A и B . Попутно происходит новый подсчет вектора b . Затем находятся первоначальные значения матрицы A^* , вектора C^* полного выпуска, вектора b^* полных затрат ресурсов и критический ресурс (в результате сравнения векторов b^* и b).

Далее наступает этап оптимизации. Если план конечного выпуска C был достаточно напряженным, то критический ресурс, а возможно, и некоторые другие ресурсы окажутся в дефиците. Считая дефицит критического ресурса главным узким местом плана, осуществляется сбор и оформление предложений, направленных на решение этого вопроса, после чего организуется последовательная проверка поступающих предложений на описанной выше модели, принимая те из них, которые приводят к уменьшению дефицита критического ресурса, и отвергая остальные.

Процесс продолжается до тех пор, пока критическим станет другой ресурс, после чего усилия направляются на уменьшение дефицита этого ресурса. Процесс оптимизации заканчивается либо тогда, когда нет новых неопробованных предложений по улучшению плана, либо когда для процесса дальнейшей оптимизации не хватает времени. Если при этом какие-то ресурсы все еще оказываются в дефиците, производится окончательная балансировка плана за счет сокращения заданий по конечному продукту. Разумеется, здесь также возможен перебор многих вариантов такого сокращения.

По мере поступления новых, заслуживающих внимание

предложений (уже после утверждения плана) может производиться их оценка и, если будет признано необходимым, соответствующие коррекции плана. Поскольку такие коррекции (вызывающие полную перебалансировку плана) выполняются в течение 15—20 мин, то создается реальная возможность оперативного управления экономикой на основе непрерывной и (что самое важное) полностью сбалансированной корректировки планов.

Остается ответить еще на один важный вопрос. В предлагаемой методике поступающие элементарные предложения оцениваются последовательно, поодиночке. Не может ли случиться, что среди имеющихся элементарных предложений ни одно, взятое в одиночку, не улучшает значения критерия, а какая-то их комбинация приводит к его резкому улучшению. Если рассматривать вопрос абстрактно, независимо от его экономического содержания, то нетрудно построить примеры, когда такое положение будет действительно иметь место. В случае же выполнения дополнительных условий, которые справедливы для задач, возникающих из реальных экономических постановок, автором доказана следующая теорема о последовательной оптимизации.

Пусть A — вполне продуктивная матрица, а вектор полного выпуска C^* — неотрицателен, и пусть эти условия сохраняются при любых изменениях, составленных из имеющихся элементарных изменений. Тогда если какая-либо комбинация элементарных изменений приводит к экономии критического ресурса, то среди входящих в эту комбинацию элементарных изменений хотя бы одно, взятое само по себе, также приводит к экономии критического ресурса.

Эта теорема показывает, что предлагаемый метод действительно является методом последовательной оптимизации в том смысле, какой был придан этому термину выше. В самом деле, из теоремы следует, во-первых, что, принимая очередное полезное элементарное предложение, мы улучшаем значение оптимизационного критерия (в данном случае — расход критического ресурса). Во-вторых, теорема показывает, что в случае наличия конечного числа элементарных предложений по улучшению плана процесс последовательной оптимизации через конечное число шагов приведет к абсолютному оптимуму, т. е., иными словами, к выбору наилучшей комбинации элементарных предложений.

Заметим, что, вообще говоря, теорема не гарантирует того, что элементарное предложение, отвергнутое на каком-

либо шаге, не станет полезным на последующих шагах. Так что в принципе для достижения абсолютного оптимума необходимо после каждого очередного шага, улучшившего план, опробовать все имеющиеся элементарные предложения, в том числе, возможно, и такие, которые аннулируют некоторые элементарные предложения, принятые на предыдущих шагах оптимизации. Однако в то же время ясно, что процесс подобного перебора должен продолжаться до нахождения первого полезного элементарного предложения, которое, в силу доказанной теоремы, следует принимать, как очередной шаг в достижении абсолютного оптимума. Поскольку же отбор предложений для проверки осуществляется не машиной, а людьми, то есть серьезные основания надеяться, что доля отвергаемых предложений (особенно на начальных этапах оптимизации) будет невелика. Иными словами, можно надеяться, что человеческая интуиция и опыт помогут существенно сократить перебор, обеспечивая выбор очередного полезного элементарного предложения уже при первых попытках.

Полученные результаты, помимо их непосредственной практической направленности, представляют определенный интерес и для общей теории макроэкономических моделей. Так, из развитых нами здесь методов вытекают простые и весьма естественные (с точки зрения их экономического смысла) доказательства некоторых известных теорем из теории линейных макроэкономических моделей, например, известной теоремы Самуэльсона о замещении.

Заметим, также, что постановка задачи об упрощении решения системы линейных алгебраических уравнений при условии наличия информации о решении некоторой близкой к ней системы представляет самостоятельный, чисто математический интерес. В математике хорошо известна постановка этой задачи, когда близость двух систем уравнений заключается в том, что их соответствующие коэффициенты отличаются друг от друга на малую величину. При этом могут изменяться (хотя и мало) все коэффициенты. Новая постановка задачи состоит в том, что большим изменениям подвергается относительно небольшое число коэффициентов.

УПРАВЛЕНИЕ НАУКОЙ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ *

Говоря об управлении наукой, мы подразумеваем обширный круг проблем, начиная с «технологии» научных исследований — автоматизированного управления экспериментом и кончая организацией науки в масштабе всей страны и вопросами международной научной политики. Этот широкий спектр задач привлекает все большее внимание кибернетиков, экономистов и социологов. Системную теоретическую основу для эффективного управления научной деятельностью призвана сформировать новая научная дисциплина, получившая в Советском Союзе название науковедения. Один из самых крупных коллективов исследователей науки работает в Институте кибернетики Академии наук УССР.

Большинство разрабатываемых ныне теоретических проблем управления наукой связано с развитием прикладных исследований. Но многое из того, что сделано в этой области, может быть использовано и в академической, фундаментальной, науке.

Взятый партией курс на повышение эффективности общественного производства, на опережающий рост качественных его показателей требует повышения эффективности работ по всему фронту научных исследований. Эта задача приобретает особенную актуальность в предстоящей пятилетке, которая будет пятилеткой качества, пятилеткой эффективности. В данной статье я хочу высказать некоторые соображения относительно путей повышения эффективности исследований в рамках академической науки.

Прежде всего — о вкладе в решение этой проблемы технической кибернетики, об автоматизации экспериментальных исследований.

Известно, что примерно 70% рабочего времени ученых занимают различного рода эксперименты. Сокращение сроков их проведения за счет использования новейших технических средств — один из важнейших резервов повышения эффективности исследовательского процесса. За последние годы в этом отношении у нас сделано немало. Но нам и далее пред-

* Вестн. АН СССР, 1975, № 10, с. 13—19.

стоит ускоренно развивать эту, если можно так выразиться, технологическую линию в организации и управлении наукой. Для конечного успеха дела она должна сочетаться с совершенствованием организационно-экономических форм использования технических средств науки. Любые экспериментальные установки — циклотроны или синхрофазотроны, например, предназначены — и это совершенно очевидно — не для того только, чтобы получать, скажем, пучок элементарных частиц с такими-то характеристиками, но для того, чтобы делать научные открытия. Поэтому вопросы управления экспериментом и автоматизированной обработки его результатов столь же значимы, как и вопрос о физических параметрах установки.

Все наши новые крупные установки, такие, как синхрофазотроны и радиотелескопы, снабжаются собственными системами для автоматизации обработки экспериментальных данных на основе ЭВМ; больше того, в какой-то мере производится автоматизация управления самим экспериментом. В каком же положении находится эксперимент, который осуществляется с помощью более дешевого оборудования, приборов, которые стоят дешевле, чем система обработки данных? Отметим, что если синхрофазотрон стоит сотни миллионов рублей, то стоимость электронно-вычислительной машины, которая позволяет увеличить его эффективность во много раз, составляет около одного процента стоимости синхрофазотрона, и здесь никаких вопросов не возникает. Когда же оборудование и приборы, необходимые для проведения эксперимента, стоят всего несколько тысяч рублей, а электронно-вычислительная машина, на которой обрабатываются его данные, — сотни тысяч, целесообразно построение иерархической системы обработки данных с мини-или микрокомпьютерами, устанавливаемыми непосредственно в лабораториях. В такой системе компьютеры для первичной и особенно для вторичной обработки экспериментальных материалов являются групповыми, т. е. обслуживают ряд лабораторий или целый научно-исследовательский институт, что связано с определенными экономическими, организационными и управленческими проблемами.

То же можно сказать и об управлении экспериментом, особенно в геологии, геофизике, океанологии. Оптимальное планирование существенно, если речь заходит о дорогостоящих экспериментах, в частности, когда на основе ранее полученных данных необходимо определить ход дальнейших ра-

бот, например, где закладывать скважины, производить экспериментальные взрывы для геофизической разведки или устанавливать станции для изучения морских течений, химических, физических свойств водных масс и т. д. Здесь нужна определенным образом градуированная, упорядоченная информация. Ее структура и соответствующие весовые коэффициенты должны отражать степень важности и последовательность изучения свойств тех или других объектов в зависимости от целей исследования. Наша задача состоит в том, чтобы соответствующие методы планирования нашли достаточно широкое применение в исследовательской практике.

Заслуживают пристального внимания исследователей также вопросы, связанные с информационным обеспечением науки. Можно констатировать, что сейчас это относительно хорошо понятая проблема, важность решения которой признается всеми учеными. Вместе с тем стала ясна и необходимость совершенствования управления процессом информационного обеспечения. Получение научной информации, ее обработка и передача потребителю — все это в настоящее время составляет предмет серьезной заботы специалистов.

Уже создана соответствующая технология, в частности с использованием электронных вычислительных машин, позволяющая надеяться на успех в деле научно-информационного сервиса. Теперь, видимо, следует приступить к организации централизованного накопления первичной информации в целях последующего многократного ее использования. Приведу пример, подтверждающий этот тезис. Предположим, где-то произведен взрыв с целью геофизической разведки. Получены и обработаны первичные сейсмограммы, давшие определенную информацию о наличии нефти или газа. Спустя 10 лет могут появиться новые методы обработки и интерпретации сейсмограмм, которые позволят извлекать из «старых» сейсмограмм дополнительную информацию, например о запасах урана. Однако сделать это не удастся, так как сейчас, к сожалению, первичные сейсмограммы обычно не сохраняются, остаются только вторичные данные, к тому же обработанные под определенным углом зрения и содержащие лишь часть полученной при сейсморазведке информации. Отсюда следует необходимость организовать специальную службу хранения первичных данных, выраженных в цифровой форме, чтобы в случае надобности их можно было бы быстро обрабатывать на ЭВМ. Это впослед-

ствии даст значительную экономию в затратах на эксперимент. Имеются в виду как уникальные и дорогостоящие эксперименты, так и массовые, регулярно проводимые (в том числе и социально-экономические), повторение которых требует или значительного времени или вообще невозможно ввиду изменившегося характера объекта.

Теперь о собственно организационных проблемах управления наукой.

Науковедение вносит свой вклад в реализацию идей и современных методов научно-технического прогнозирования. Пока эти методы применяются в первую очередь в прикладных науках. Но прогнозирование охватывает уже и фундаментальные проблемы физики, химии и других естественных наук.

Следует заметить, что, поскольку результаты фундаментальных исследований, как правило, в той или иной мере используются в прикладных науках для организации систем непрерывного прогнозирования, неизбежно необходимыми представляются поиск и обобщение информации о генерируемых фундаментальной наукой идеях. Это привязывает фундаментальные исследования к прикладным и, тем самым, к решению определенных народнохозяйственных задач. Опыт, накопленный нашим институтом в области научно-технического прогнозирования, позволяет определенно утверждать, что нет никаких препятствий к тому, чтобы решать и обратную задачу — выдвигать вопросы и проблемы для научного поиска в области фундаментальных исследований и таким образом осуществлять прогноз дальнейшего их развития.

Если верно, что результаты фундаментальных исследований в настоящее время являются основой для решения прикладных вопросов, то верно и обратное — многие достижения фундаментальных исследований невозможны без решения специальных прикладных проблем. Поэтому фундаментальная наука всегда имеет двойную диалектическую связь с прикладными работами. С одной стороны, она дает им новые идеи и решения, с другой — ее собственное продвижение вперед уже зависит сегодня от возможностей промышленности. Эта взаимосвязь ясно осознается современным науковедением и находит отражение в разрабатываемых методиках прогнозирования.

Известно, что соответствующие нормативные методы, используемые в прикладных областях (скажем, метод прямого

управления исследованиями и конструкторскими работами, используемый в сетевых графиках), применительно к фундаментальным исследованиям в значительной мере теряют свою эффективность. Это относится, в частности, и к введению нормативов. Но вот механизм прогнозирования, который выходит за пределы сетевых графиков и вносит элементы вероятностей, не требует жесткого нормирования. Таким образом, важное для управления введение определенных нормативов в фундаментальных науках становится весьма проблематичным, а может быть, такие нормы вообще не нужны для организации фундаментальных исследований.

Вместе с тем следует учесть, что в рамках академической науки на данном этапе происходит своеобразное переплетение прикладных исследований с фундаментальными, поскольку в ряде академических институтов имеются конструкторские бюро и даже экспериментальные заводы. Их деятельность должна планироваться и управляться уже проверенными на практике методами.

Далее. Для того, чтобы эффективно руководить институтом, а тем более группой или комплексом институтов, необходимо располагать информацией — желательно в машинной реализации — об имеющихся ресурсах — материальных и интеллектуальных. Научные ресурсы — это прежде всего люди. Значит, необходимы постоянное улучшение условий труда, четкая система слежения за изменением научных интересов и квалификации сотрудников. Это требует фиксации данных по гораздо более развернутой номенклатуре, чем та, которая предусматривается, например, традиционной сеткой научных специальностей. Исследования научно-технического потенциала страны, проведенные нашим институтом, московскими, ленинградскими и сибирскими учеными, показал, что здесь имеется еще много и неиспользуемых возможностей. Некоторые из такого рода проблем уже успешно решаются с помощью АСУ.

Возьмем проблему коллективного использования уникального дорогостоящего оборудования. Здесь в значительной мере можно применять процедуры, опробованные в практике управления прикладными институтами и даже разработанные для планирования и управления в промышленности.

Что же касается управления работами по комплексной тематике, то теоретические разработки ученых и накопленный опыт программно-целевого управления свидетельствуют

о важности создания специального аппарата, который поможет определять цели научного исследования и формулировать пути их достижения и потребности в ресурсах. Хорошие результаты в этом случае дает соединение методов непрерывного прогнозирования, о которых шла речь выше, и системотехнических методов управления обеспечением ресурсами. Имея информацию, которая необходима для достижения той или иной научной цели, можно в человеко-машинном диалоговом режиме осуществлять отдельные операции оптимизации научных исследований.

Строго говоря, мы не готовы еще ставить вопрос об оптимальном управлении, предположим, комплексными разработками фундаментальных проблем, однако уже возможно использовать человеко-машинные системы, обеспечивающие управление такого рода комплексами работ.

Науковеды нашего института накопили значительный опыт в области проектирования и внедрения организационных процедур управления. Система «Цикл», например, определяет порядок ведения всего комплекса работ научно-исследовательского отдела — от выбора целей до контроля за внедрением полученных результатов в практику. Оригинальными и особо ценными, с моей точки зрения, ее свойствами являются организованный «съем» промежуточных результатов, получаемых в ходе многостадийного процесса НИОКР, а также контроль за качеством работ. Каждая такая процедура представляет собой комплекс нормативно-методических и директивных документов, а также систему носителей информации и четко определенную последовательную их обработку.

Процесс проектирования процедур управления включает в себя обоснование и экспериментальную проверку ряда новых методических приемов, а их внедрение требует, как правило, глубоких изменений в организационной структуре, экономических стимулах, стиле и «механизме» управления научной деятельностью. Стратегия проводимых нашим институтом науковедческих исследований состоит в том, чтобы охватывать все уровни управления, начиная с конкретного технологического процесса и кончая управлением научно-исследовательскими работами в масштабе страны. При этом особо важно последовательно проводить идею связи фундаментальных исследований с прикладными. Например, в создаваемых нами системах научно-технического прогнозирования каждый научный результат определяется либо как цель развития науки, либо как подцель в решении приклад-

ных проблем, которые тем не менее требуют для своего решения теоретического основания.

Если говорить о советской науке в целом, мы подошли к необходимости создания системы непрерывного выставления заявок на фундаментальные и прикладные исследования, исходя из запросов практики. В связи с этим большое значение приобретает деятельность научных проблемных советов. Так, заявки от научного учреждения или организаций, занимающихся той или иной проблемой, скажем, на методы решения дифференциальных уравнений в математике, методы точного измерения физических параметров, выявления физических или химических свойств вещества по их структурной формуле должны поступать в специальные учреждения, скажем, институты научной информации, где они будут рассматриваться на предмет новизны. Ведь может оказаться, что искомый ответ уже содержится в каких-то научных отчетах или даже опубликованных статьях и патентах. Действительно новые предложения рассматривает проблемный совет, который окончательно формулирует задачу и направляет ее для обсуждения и принятия решения в соответствующий научный институт. Таким образом будут формулироваться и основные проблемы, стоящие перед фундаментальными науками. Это будет своеобразное децентрализованное управление, существующее помимо программно-целевого управления, которое в фундаментальных науках должно основываться прежде всего, как я сказал, на человеко-машинных процедурах, а не полностью на вычислительных методах. Кроме того, следует создать децентрализованную систему постановки локальных целей и организации временных локальных связей между народнохозяйственными предприятиями и отраслевыми институтами, с одной стороны, и академическими — с другой.

В этой связи уместно поднять вопрос о новых формах организации и управления наукой в рамках Академии.

Академия наук СССР имеет большую и славную историю. Организационные формы управления ею сложились в значительной мере исторически. Такая форма организации Академии, скажем, как Отделение, возникла еще в то время, когда Академия, по существу, никакими значительными материальными ресурсами не располагала, была объединением ученых, а не объединением научных институтов; не имела она и такого определяющего значения в развитии народного хозяйства, в жизни общества, которое имеет сейчас.

Главные задачи Отделения тогда заключались в следующем. Во-первых, организовывать взаимодействие ученых, работающих в сравнительно близких областях знаний, скажем, физиков, и математиков, химиков и биологов и т. д. (Отделение наук Академии представляло собой объединение типа дискуссионного клуба.) Во-вторых, важной его миссией было поддерживать и поощрять молодых ученых, выявлять из них наиболее достойных, с помощью академических званий повышать авторитет ученых, приобщать их к фундаментальным исследованиям. Эти две функции более или менее успешно выполняют и существующие сейчас в системе Академии отделения. Однако в наши дни, в связи с тем, что наука стала в значительной степени непосредственной производительной силой, роль Академии сильно возросла, а организационная структура коренным образом изменилась. В ней появилось большое число новых институтов, работающих над ответственной тематикой и располагающих мощными конструкторскими бюро, а также опытным производством. В этих условиях существующая форма управления через бюро отделений уже в значительной мере перестала соответствовать тем задачам, которые выдвигаются жизнью. Назрела необходимость изыскать новые формы, которые были бы более гибкими и давали возможность решать эффективно проблемы управления научными исследованиями.

Сейчас это особенно важно в связи с появлением новой крупной проблематики на стыках наук. Примером тому является та же самая кибернетика. И не только кибернетика. На стыке физики, физической химии и биологии возникают очень интересные проблемы, скажем, генной инженерии и т. д. Примеров можно привести множество.

Как правило, в каждой науке своя специфика. Но в то же время при проведении различных исследований огромное значение имеет общая методологическая установка. Быть специалистом в нескольких науках теперь нереально, однако знать определенные конкретные вещи из химии или физики — возможно. Так, сейчас не редкость специалисты, которые понимают смысл уравнения Шредингера (физика), структурных формул (химия) и наряду с тем владеют соответствующими методами эксперимента по выяснению роли гена. Реальна и постановка задачи о целенаправленной подготовке специалистов широкого профиля и руководителей науки.

То, что эффективно управлять институтами Отделения его бюро, по существу, не может и способно только координи-

ровать их деятельность, чувствовалось еще 10—15 лет назад. В 1963 г. было проведено разукрупнение отделений в академиях наук СССР и союзных республик. Однако это мероприятие не решило полностью проблему.

В настоящее время для правильного руководства академической наукой особенно необходимо гибко осуществлять непосредственное управление разработкой комплексной научной тематики, маневрировать ресурсами, материальными и людскими, переводя в случае необходимости лаборатории из одного института в другой. Это чрезвычайно актуальная задача, решение которой может сильно повысить эффективность исследований и прежде всего в пограничных областях науки. Поэтому представляется своевременным создать подчиненный непосредственно Президиуму Академии наук Кибернетический центр, где вопросами управления наукой станут заниматься представители разных отраслей знаний — математики, техники, электронщики, экономисты, биологи, социологи и т. д. на общей методологической основе и в рамках единой системы целей.

Исследования ученых и практический опыт, накопленный в Институте кибернетики, свидетельствуют, что при формировании комплексной научной проблематики чрезвычайно важно придерживаться некоторых «стратегических» правил, таких, например, как единство ближних и дальних целей. Это очень существенно, поскольку наука становится все более дорогостоящей и потенциально плодотворной. Конечно, мы не исключаем, что может быть и такая цель, в которой не удастся выделить ни одной ближней подцели, но, как правило, это не так.

В каждом направлении фундаментальных исследований нужно сформировать такую иерархию целей, при которой бы каждый участник работы ощущал, что, делая тот или иной шаг, он приближается к большой цели.

Чрезвычайно важным является и такой методологический и организационный принцип, как единство теории и практики, или единство общего и специфического.

Оговоримся, что есть направления в науке, например, в современной теории чисел, где вовсе не очевидна непосредственная связь с практикой, но, как правило, сама работа над подобной математической проблемой обязательно приводит к такому усовершенствованию математического аппарата, которое просто не может не найти впоследствии применения.

Так или иначе, во всех случаях нужно с самого начала продумывать ход каждого крупного фундаментального исследования с точки зрения использования его результатов в практике, понимая под этим не обязательно промышленность, но и смежные области науки. Это исключительно важная сторона организации и управления академической наукой.

В то же время никогда не следует начинать в рамках Академии конкретную хозяйственную работу, не подумав о возможности теоретического обобщения данных, полученных на ее основе.

Сказанное выше в отношении математики и естествознания полностью относится к экономике и науковедению.

Активная связь с практикой и последовательное совершенствование методического арсенала — закон жизни этих научных дисциплин. Мы пытаемся реализовать данные принципы у нас в институте, хотя и с неодинаковой степенью успеха. В одних случаях это удается сделать лучше, в других — хуже. Тем не менее опыт показывает, что именно эти принципы вместе с соответствующим методическим, организационным и информационным обеспечением, о котором мы говорили выше, безусловно имеют определяющее значение для эффективности научной деятельности в любой области фундаментальных исследований.

ЧЕЛОВЕК И АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ *

Современные системы организационного управления используют три основные группы средств. Первую группу составляют различного рода социально-экономические механизмы: политико-воспитательная работа, социалистическое соревнование, системы материального и морального стимулирования и т. д. Вторая группа включает в себя чисто организационные средства: структуру органов управления, функциональные обязанности различных звеньев аппарата управления, систему документооборота, организации учета, контроля исполнения и т. п.; третья — технические средства управления: оргтехнику, средства связи и электронно-вычислительную технику.

* 1975 г.

Значение последней группы средств особенно выросло в эпоху научно-технической революции, ввиду вызванного ею резкого усложнения технологии и системы технологических связей в производстве. Задачи управления технологией и технологическими связями если не по форме, то по своей сути определяются прежде всего объективными (технологическими), а не субъективными (организационными) факторами. В частности, их суммарная сложность зависит в первую очередь от сложности развития производства, а не от принятой формы управления производством. Сложность современного производства такова, что для эффективного управления им оказывается недостаточно суммарной мощности мозгов всего взрослого населения. Этот феномен в какой-то мере подобен феномену, испытанному человечеством при выходе производства за рамки мелкого натурального хозяйства, когда сложность объективно необходимых задач управления превысила возможности одного человека. Именно этим была вызвана необходимость создания организационных и экономических механизмов, способных распараллеливать задачи управления как прямым способом (иерархические структуры управления), так и косвенным (рынок и товарно-денежные отношения). В современных же условиях, когда средства распараллеливания процессов управления в значительной мере себя исчерпали, центр тяжести проблемы перемещается в увеличение производительности труда в системах управления, что невозможно без использования современных технических средств и прежде всего электронной вычислительной техники.

Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что автоматизация управления на основе широкого использования ЭВМ невозможна без учета и использования человеческого фактора. Речь идет о создании новой технологии управления, учитывающей новые огромные возможности, открываемые автоматизацией обработки информации, с одной стороны, и творческие возможности человека (которого автоматизация освобождает от рутинного труда) — с другой. При этом эффективность автоматизации управления в значительной мере определяется тем, насколько открываемые ею новые возможности используются в политико-воспитательной работе, в организации социальнoго соревнования, в системах материального стимулирования и т. п.

Практика наших лучших АСУ со всей очевидностью подтверждает этот вывод. Взять, например, такой на первый

взгляд мелкий факт, как ежедневное начисление зарплаты и различного рода премий каждому работающему и оперативное доведение результатов этих расчетов до соревнующихся перед началом каждой очередной смены. Там, где партийные и профсоюзные организации умело используют эту новую, даваемую АСУ возможность, резко возрастает эффективность соцсоревнования, увеличиваются темпы роста производительности труда. Сегодня этот эффект осязает уже не один десяток предприятий. На очереди новые задачи. Так, например, оперативный дифференцированный подсчет ущерба (уменьшение премий, фонда социального развития и т. п.), вызываемого каждым конкретным случаем брака, поломки инструмента, нарушения технологической дисциплины и т. п., открывает новые возможности для увеличения эффективности воспитательной работы, организации прямого воздействия не только коллектива, но и всех его членов на лодырей, бракоделов и других нарушителей трудовой дисциплины. В сферу этого воздействия попадают и работники административно-управленческого аппарата, из-за ошибок, халатности или бездеятельности которых производство понесло, тот или иной конкретный ущерб.

Важное значение приобретают АСУ и в такой важной задаче, как оперативное согласование и сбалансирование встречных планов на различных рабочих местах и участках с тем, чтобы от отдельных рекордов переходить к планомерному и пропорциональному подъему производства. Особо важное значение должны приобрести АСУ в соревновании за качество и эффективность производства. Открывающиеся здесь возможности далеко не всегда можно использовать в рамках имеющихся сегодня форм стимулирования. Многие предприятия и даже целые отрасли промышленности (например авиационная) включают в разрабатываемые ими АСУ слежение за качеством своей продукции у потребителей. В то же время детальный учет и соответствующая организация информационных архивов на машинных носителях непосредственно на производстве позволяют установить конкретных виновников брака не только в результате оперативного контроля качества, но иногда и через многие недели и даже месяцы. Однако к последнего рода возможностям действующая ныне система стимулирования не приспособлена, ее необходимо существенным образом усовершенствовать.

Важнейшее значение в увеличении эффективности производства и воспитании коммунистического отношения к труду

имеет задача синхронизации работы отдельных производственных участков и рабочих мест. Суть этой задачи состоит в том, что ЭВМ рассчитывает поминутный взаимно согласованный график работы на различных рабочих местах и контролирует его выполнение. Тем самым организуется конвейерный ритм работы на местах, не объединенных в реальный физический конвейер. Значение подобной синхронизации для увеличения эффективности производства очевидно. Об этом убедительно свидетельствуют результаты, полученные на ряде предприятий машиностроительного и приборостроительного профилей. В качестве примера можно привести тракторное производство объединения «Кировский завод» в Ленинграде, где за счет синхронизации работы заготовительных цехов почти вдвое была повышена производительность труда.

Весьма велика воспитательная роль синхронизации. В самом деле, когда производственные процессы не синхронизированы, на рабочих местах постоянно возникают помехи, мешающие нормальной работе: то не подготовлен рабочий инструмент, то не хватает материала, запаздывают заготовки с соседних участков и т. п. Подобные помехи, возникающие не по вине рабочего, не только сбивают его с ритма и уменьшают выработку. Гораздо хуже то, что они объективно способствуют воспитанию расхлябанности и безответственного отношения к своим обязанностям и могут свести на нет результаты воспитательной работы целых коллективов.

Вместе с тем организация конвейерного ритма требует детального учета многих психологических факторов. Она настоятельно требует такой организации труда, которая делала бы труд каждого рабочего менее однообразным, более творческим. Необходимо использовать возможности ЭВМ для организации систематического слежения за замечаниями и предложениями рабочих, направленными на улучшение организации труда.

Следует отметить еще одну особенность автоматизации организационного управления, заключающуюся в разумном распределении обязанностей между ЭВМ и управленческим персоналом. Дело в том, что, помогая человеку в быстрой подготовке различных вариантов решений, ЭВМ никоим образом не освобождает его от принятия решений и связанной с этим ответственности. То же самое относится и к выработке неформальных, творческих предложений, направленных на улучшение процесса управления. Поэтому при разработке АСУ должны быть точно определены и спро-

ектированы не только машинные процедуры, но и действия всех звеньев управленческого аппарата. Здесь, как и на производстве, в результате внедрения АСУ организуется своеобразный конвейерный ритм управленческой работы с точным и четким контролем исполнения. В результате создается возможность своевременного выявления, предупреждения и пресечения не только прямых ошибок управленцев, но и фактов бездеятельности, несвоевременного принятия решений и т. п. Воспитательное значение подобной возможности трудно переоценить. Ведь не секрет, что без точного учета (возможного лишь в условиях автоматизации управления) деятельность контрольных органов направляется главным образом на выявление и искоренение лишь более или менее очевидных ошибок и злоупотреблений (в основном мелких). Факты же бездеятельности, от которых общество несет зачастую гораздо больший ущерб, но которые гораздо труднее доказать, остаются, как правило, безнаказанными.

Необходимо остановиться еще на одном важном аспекте проблемы человека в условиях автоматизации управления — создании систем прогнозирования и управления социальными процессами (в том числе и процесса воспитания нового человека), основанных на использовании метода «коллективного мозга». Суть этого метода состоит в том, что изучаемое социальное явление или фактор рассматривается вместе с множеством других явлений или факторов, могущих оказать на него прямое или косвенное влияние. Например, если нас интересует такой фактор, как отношение к труду, то на него могут оказать влияние многочисленные факторы, характеризующие нашу пропагандистскую и воспитательную работу, трудовое законодательство, системы материального и морального стимулирования и т. д.

При этом следует иметь в виду, что социальные факторы и явления не могут быть, как правило, описаны числами и функциями, как это имеет, например, место в случае физических явлений. Однако ничто не препятствует ввести для их характеристик определенные качественные оценки. Отношение к труду, например, можно характеризовать, как очень хорошее, удовлетворительное и т. п. В случае необходимости эта характеристика может быть заменена рядом характеристик в зависимости от отрасли, территории и т. д. Любая статья закона или конкретное мероприятие, направленное скажем, на улучшение пропагандистской работы, могут быть охарактеризованы номерами различных их формулиро-

вок (вариант 1, вариант 2 и т. д.). Сложность социальных явлений сегодня такова, что для изучения одного фактора требуется принять во внимание возможности изменения многих сотен и даже многих тысяч влияющих на него факторов, которые могут быть описаны в виде подобных качественных параметров.

За каждым из таких параметров закрепляется группа специалистов в соответствующей области социальных наук или практиков, работающих в сфере социального управления. Задачей каждого члена такой группы (эксперта) является перечисление по возможности всех условий (в терминах выбранных качественных параметров), при которых закрепленный за ними параметр может измениться.* При этом не исключается возможность прямо противоположных взглядов. Более того, в случае наличия таких взглядов их носители, во избежание предвзятой оценки, должны обязательно быть включены в число экспертов. Задачей ЭВМ является объединение мнений всех экспертов и выдача прогнозируемых значений различных параметров в различные моменты времени. В настоящее время разработаны программы, способные объединять подобным образом мнения многих тысяч экспертов. ЭВМ как бы «председательствует» на конференциях всех этих экспертов, давая высказаться каждому (и притом не один раз), и вырабатывает в заключение согласованное решение этой конференции. Само собой разумеется, что проведение подобной конференции обычным образом (без использования ЭВМ с их огромным быстродействием) для многих тысяч (даже для одной сотни) участников практически невозможно.

Следует отметить, что наличие различных мнений приводит к известной неопределенности прогноза. Его результатом будут высказывания типа «параметр x через время t с вероятностью p_1 приобретет значение x_1 , с вероятностью p_2 — значение x_2 и т. д.» Разработана методика, позволяющая управлять прогнозом. С ее помощью определяются те звенья, которые в наибольшей степени способствуют неопределенности прогноза. Тем самым ставятся (и ранжируются по их относительной значимости) конкретные проблемы

* Для каждого такого условия указывается характер применения закрепленного параметра, ориентировочное время, когда может произойти это изменение, и оценка уверенности эксперта в высказанном утверждении.

перед теми или иными разделами социальных наук, решение которых (т. е. полное или хотя бы частичное устранение противоположных мнений в результате объективного анализа, наблюдений, экспериментов и др.) в наибольшей степени уменьшает неопределенность прогноза.

Еще более важным является то, что разработанная методика позволяет не только прогнозировать процесс развития изучаемой группы социальных явлений, но и управлять этим процессом. С этой целью изучаемые параметры делятся на две группы. В первую группу входят все прямо управляемые параметры, т. е. такие параметры, значение которых можно изменять прямыми управленческими актами (принятием определенного варианта закона или решения и т. п.). Подбор значений этих параметров в различные моменты времени и составляет сущность управления рассматриваемым процессом.

Специальная (относительно немногочисленная) группа экспертов и руководителей соответствующего уровня намечает различные варианты управления, а ЭВМ, проведя описанную выше «конференцию» с тысячами экспертов, прогнозирует значения тех параметров второй группы (косвенно управляемых), которые в наибольшей степени интересуют руководство. В результате последовательных проб (сопровождаемых анализом причин получаемых результатов) выбирается наиболее удовлетворительное управление (лучшее среди испробованных, но не обязательно лучшее из всех возможных).

Подобная методика применительно к одному классу процессов (процессам управления научно-техническим прогрессом) в настоящее время успешно опробована и принята в качестве рабочего инструмента. Сейчас подготовлен второй вариант методики, охватывающий любые социальные процессы. Следует подчеркнуть, что при внедрении методики приходится преодолевать немалые трудности организационного характера. Ведь никакая методика не даст результата, если эксперты недобросовестно отнесутся к своим обязанностям. Важно отметить также, что, будучи раз приведена в действие, система должна работать непрерывно, улучшая прогноз (а следовательно, и управление) по мере совершенствования исходных экспертных оценок. Поддержание такого режима работы требует весьма высокого уровня организации. По мере развития описанной системы она может и должна охватить весь круг стоящих перед обществом про-

блем социального управления. Круг же экспертов, все более и более расширяясь, должен в конце концов охватить всех тех, кто может и хочет вносить свой творческий вклад в вопросы социального управления на том или ином (пусть небольшом) участке огромного круга взаимосвязанных явлений и факторов, характеризующих жизнь современного общества. Тем самым создаются объективные предпосылки для нового крупного шага в дальнейшей демократизации процессов социального управления.

В настоящее время особенно актуальной является задача создания подобной системы для управления процессом повышения эффективности общественного производства, прежде всего процессом внедрения прогрессивных технологических нормативов, информация о которых рождается в основном «внизу» — в НИИ, КБ, в цехах, на производственных участках и непосредственно на рабочих местах.

ПРОБЛЕМЫ ОГАС НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ*

В создании Общегосударственной автоматизированной системы сбора и обработки информации для учета, планирования и управления народным хозяйством (ОГАС) имеется два основных аспекта: первый — технико-информационно-программный, второй — функциональный, связанный с разделением на отдельные подсистемы, модели этой большой охватывающей все проблемы автоматизации управления экономикой системы.

Создание отдельных функциональных подсистем, входящих в состав ОГАС, а именно: автоматизированных систем плановых расчетов (АСПР), государственной статистики (АСГС), управления материально-техническим снабжением (АСУМТС), управления научно-техническим прогрессом (АСУНТ), отраслевых систем, по нашему мнению, не может полностью решить задачу автоматизации управления экономикой в стране. ОГАС — не механическая сумма составляющих ее подсистем, а их органическое объединение с большим количеством стыковых, межведомственных задач.

* В кн.: Алгоритмы и организация решения экономических задач. М.: Статистика, 1975, вып. 6, с. 5—14.

В связи с этим следует обратить внимание, на одно важное обстоятельство. Автоматизация управления в начальный период развивалась в нашей стране в соответствии с существующим отраслевым принципом управления и соответственно базировалась на традиционных вертикальных связях. Так же строились связи и между автоматизированными системами: АСУ предприятий связывались с АСУ отрасли, министерствами или с их главными вычислительными центрами, которые, в свою очередь, устанавливали связи с вычислительными центрами Госплана СССР и других общегосударственных органов управления.

Такие связи безусловно необходимы, но недостаточны для решения многих задач управления. Наряду с вертикальными связями необходимо использование горизонтальных связей между предприятиями различных ведомств, различными министерствами, т. е. между экономическими ячейками, находящимися на одном иерархическом уровне, но принадлежащими разным ведомствам.

Задачи, базирующиеся на горизонтальных связях, в настоящее время по ряду причин практически не решаются. В результате народное хозяйство несет большие потери, снижающие, по подсчетам специалистов, в полтора-два раза темпы роста экономики.

Однако административные органы, призванные решать эти задачи, например, задачи материально-технического снабжения, не могут полностью решать проблему горизонтальных связей. По нашим расчетам, объем таких задач составляет десятки процентов общего объема всех задач управления и решение их каким-либо одним ведомством невозможно. Кроме того, это, как правило, человеко-машинные задачи. Они требуют неформального знания положения на местах и поэтому должны решаться в первую очередь самими предприятиями, т. е. в данном случае необходима разумная степень децентрализации.

Среди этих задач на первое место выдвигается синхронизация работы отдельных предприятий в области материально-технического снабжения, иначе говоря, синхронизация работы поставщиков и потребителей. Сейчас органы материально-технического снабжения решают эту задачу с точностью до одного квартала. С помощью автоматизации этот срок при существующих связях можно сократить до месяца. А использование хорошо налаженных горизонтальных связей позволит решать такие задачи с точностью до дней, часов и

даже минут, если это потребуется. Уже в настоящее время имеются примеры решения подобных задач с точностью до минут. Так, с точностью до 5 мин согласована работа некоторых московских домостроительных комбинатов со сборочными площадками и автотранспортом.

В мировой практике в области машиностроения и приборостроения является общепринятым согласование взаимных поставок с точностью до 10 мин. И в этом нет ничего удивительного.

При согласовании же с точностью до одного месяца возникают так называемые мнимые дефициты. В течение этого срока продукты, материалы, комплектующие изделия часто направляются не туда, где они в первую очередь нужны. В результате в одном месте возникает дефицит, в другом — преждевременное получение соответствующей комплектации. А это чревато серьезными последствиями: мнимые дефициты имеют тенденцию переходить в истинные. Так, например, если строительство не получило вовремя (не в начале, а в конце месяца) необходимые материалы, то срываются сроки, ввод производственных мощностей и возникает уже истинный дефицит в тех продуктах и изделиях, которые эти мощности должны выпускать. Именно это и вызывает сейчас наибольшие потери в народном хозяйстве.

Такие задачи должны найти свое решение в ОГАС.

Рассмотрим технико-информационно-программную базу ОГАС. Технической базой ОГАС должны стать Государственная сеть вычислительных центров (ГСВЦ) и автоматизированная система связи страны. Как строится и будет строиться ГСВЦ? Существуют три основных типа вычислительных центров, на которых создаются ГСВЦ.

Первый тип — ведомственные ВЦ индивидуального пользования, принадлежащие предприятиям, министерствам или другим органам управления, например территориальным органам управления — облисполкомам или горисполкомам, министерствам (республиканским или союзным), общегосударственным органам — Госплану СССР или Государственному комитету по материально-техническому снабжению и т. д. Вычислительные центры этого типа, в свою очередь, делятся на два подтипа: на ВЦ предприятий и ВЦ органов управления.

Второй тип — ведомственные и кустовые ВЦ коллективного пользования, основанные на территориально-ведомственном принципе. Они обслуживают группу мелких пред-

приятий какого-либо ведомства, расположенных в определенном районе, для которых строительство самостоятельных вычислительных центров нецелесообразно.

К третьему типу относятся государственные вычислительные центры коллективного пользования — ВЦКП. Они должны принадлежать государственному органу, ориентированному на выполнение информационно-вычислительных задач, и обслуживать как мелких, так и крупных пользователей независимо от их ведомственной принадлежности. Сеть ВЦКП станет основой автоматизированной информационно-вычислительной службы страны. Как показали расчеты, необходимо около 200 таких ВЦ, т. е. приблизительно столько, сколько существует административных единиц (областей, автономных республик и др.). Практически в каждом областном центре должен быть создан один ВЦКП. В зависимости от условий и необходимости некоторые области могут иметь больше одного ВЦКП. С помощью системы связи Общегосударственной системы передачи данных (ОГСНД) эти ВЦКП будут связаны с абонентами, которыми могут быть различные предприятия и органы управления, не имеющие своих ВЦ.

Каждый пользователь должен иметь специальный абонентский пункт, оснащенный оборудованием в зависимости от состава и количества решаемых задач, информационных потоков. Простейший абонентский пункт будет иметь обыкновенный телетайп и обслуживаться дежурным оператором. Наиболее сложный абонентский пункт будет состоять из мини-компьютера и различного рода периферийных устройств. По существу, он будет своеобразным мини-вычислительным центром, выполняющим простейшие вычислительные и информационные задачи абонентов. Решение более сложных задач будет осуществляться в ВЦКП.

Если рассматривать ГСВЦ как простое техническое средство для обслуживания потребителей с удаленных пунктов, прежде всего с удаленных терминалов, то режимами его работы будут разделение времени, пакетная обработка и пр. в зависимости от характера запросов. В настоящее время такого рода системы уже имеются за рубежом. Это чисто коммерческие предприятия, обслуживающие вычислительными мощностями различных потребителей. В нашей стране ГСВЦ предназначены прежде всего для построения ОГАС.

ОГАС отличается от ГСВЦ большой группой вопросов, требующих своего решения. Прежде всего созданием информационной базы системы. Вычислительные центры или

соответствующая сеть ВЦ коллективного пользования за рубежом носит коммерческий характер. Они осуществляют простую продажу машинного времени. Создание информационной базы для них — дело самих потребителей.

В нашей стране сеть ВЦ служит задаче оптимального управления экономикой в народном хозяйстве. Уже имеется вполне определенный поток задач, для которых необходим соответствующий объем информации. Поэтому следует проектировать не только саму технику, не только программы, обеспечивающие работы в режиме продажи машинного времени для этой системы, но и процедуры управления, соответствующие программную и информационную базы. Этим прежде всего и отличается ОГАС от простой сети ВЦ.

Однако при создании информационной базы ОГАС возникают две основные трудности, которые мешают использовать классический метод проектирования этой системы. Первая трудность состоит в следующем. Структура управления и функции управления экономикой в этой большой системе должны быть гибкими. В соответствии с классическими методами проектирования больших систем сначала устанавливаются цели, ради которых создается система, а также процедуры управления. Затем определяются виды и объем информации. И только после этого организуются информационные потоки и соответствующий набор технических средств. Создание же информационной базы для такой системы, как ОГАС, очень длительный процесс. Зарубежная практика показывает, что создание информационной базы для системы, по сложности составляющей примерно 2—3% ОГАС, занимало 7—8 лет. А для ОГАС информационная база будет создаваться лет 12—15. Разумеется, за это время как структура управления, так и функции органов управления могут изменяться, так как постоянно происходит процесс совершенствования управления, и вся работа может не иметь той эффективности, если в процессе проектирования не предусмотреть такой эволюции.

Вторая трудность заключается в том, что ОГАС, помимо регулярных потоков информации, будет получать и различные случайные запросы на информацию со стороны абонентов. Поэтому система должна строиться с учетом постоянного расширения и иметь резервы для внутреннего расширения.

Рассмотрим вопрос о создании информационного массива. Если провести подробный анализ информационных массивов, то окажется, что основные трудности возникают при

создании первичных информационных массивов, отображающих первичную экономическую информацию, находящуюся на предприятиях, в КБ и т. д.

Эта информация не зависит от структуры управления экономикой. Она объективно отображает реальные технологические процессы, которые развиваются и определяют изменение структуры органов управления. Поэтому, по нашему мнению, основу информационной базы ОГАС, т. е. первичные информационные массивы, надо создавать параллельно и независимо от функциональных задач, которые будут решать органы управления, и, следовательно, от вторичных информационных массивов, которые эти задачи потребуют.

Первичные информационные массивы следует привязывать к объективной экономической информации на местах. Система обращения к первичным массивам должна быть гибкой, т. е. необходимо создание специального математического обеспечения, которое позволит быстро извлекать любую информацию из этих первичных массивов и формировать при необходимости любые вторичные массивы. Эти первичные массивы могут быть расположены как в вычислительных центрах предприятий, так и в кустовых ВЦ или ВЦ коллективного пользования, обслуживающих предприятия.

Что представляют собой первичные информационные массивы? Это массивы, которые описывают основные фонды на предприятиях, включая здания, помещения, различное технологическое оборудование, а также трудовые ресурсы (нормативные, плановые, различные технологические массивы — технологические карты и т. д.).

Первичные информационные массивы необходимы для решения задач управления на предприятиях, поэтому их создание адекватно долгосрочным капиталовложениям. Если будут созданы такие массивы, а также системы постоянного их обновления, в любое время отображающие реальное состояние дел на предприятии, то на этой основе можно будет строить более эффективные системы управления предприятиями и уже сегодня получать определенный выигрыш. Но для этого надо унифицировать документацию, соответствующие информационные массивы, определить показатели, включаемые в них, и т. п.

Проведение работ по унификации массивов означает, что при создании АСУП должны быть предусмотрены работы по унификации и переводу уникальных массивов по требова-

нию государственной системы в унифицированную стандартную форму.

Важнейшая составная часть АСУП — ее математическое обеспечение, включающее специальный информационный язык и систему программ и позволяющее из первичных информационных массивов на вычислительных установках предприятий, ведомств или на ВЦКП произвести подготовку и выдачу массивов требуемых структур: из массивов с большим количеством показателей выбрать и сформировать новый массив с двумя-тремя показателями или, например, выяснить, сколько в нашей стране станков с заданными характеристиками и т. д. Такая система аналогична системе «ИНФОР», созданной в Институте кибернетики АН УССР и внедряемой в настоящее время на предприятиях девяти машиностроительных министерств. Такого рода системы должны быть обязательными для всех АСУП.

Однако для того, чтобы полностью решать все задачи управления, недостаточно иметь только информацию в низовых звеньях и соответствующие программы. Так как эта информация принадлежит разным ведомствам, а ведомственные ВЦ заняты решением своих собственных задач, то для организации потоков информации в государственном масштабе необходимо централизованное межведомственное управление всеми информационными массивами и ВЦ, а не управление экономикой. В рамках ОГАС нужно прежде всего создать систему управления своим собственным информационно-программным хозяйством.

Для того, чтобы из первичных массивов, находящихся на ВЦ предприятий, сформировать вторичный массив, необходимо:

знать, есть ли эта информация в нужной форме на данном предприятии. Если рассматривать систему как развивающуюся, то на некоторых предприятиях уже могут быть созданы массивы, а на других еще нет;

установить, есть ли на данных ВЦ соответствующие программы, с помощью которых они могут выполнить требуемую работу;

знать, есть ли необходимые технические средства для этого выполнения;

определить, есть ли время, свободное от решения задач управления предприятием.

Все эти сведения необходимо иметь в специальной системе управления ВЦ, без которой немыслима ОГАС.

Предполагается, что соответствующие функции такой системы управления будут сосредоточены в специальной сети информационно-диспетчерских пунктов (ИДП), которые целесообразно совместить с ВЦКП (поскольку в них будет сосредоточена значительная часть экономической информации по стране).

ИДП — это своеобразный информационно-управляющий ВЦ, который располагает вычислительными мощностями и при необходимости дополнительно использует вычислительные мощности ВЦКП. Прежде всего задача ИДП состоит в ведении автоматизированного каталога всей информации, имеющейся на территории, обслуживаемой им. Этот ИДП должен иметь автоматизированную связь со всеми ВЦ, расположенными на отведенной ему территории, независимо от их ведомственной принадлежности.

Кроме каталога информационных массивов, содержащего сведения об информационных массивах на определенном предприятии, на ИДП должен быть каталог программ, содержащий сведения о программах на определенном предприятии, их характеристиках, технических средствах, необходимых для реализации программ, и пр.

Необходимо также, чтобы на ИДП постоянно была информация о ВЦ, его оборудовании, планах загрузки ВЦ и выполнении работ с низким приоритетом, которые можно приостановить в случае срочных межведомственных заказов.

ИДП должны быть связаны между собой каналами связи и обслуживаться специальной службой управления информацией в стране.

Вся эта система должна быть построена по союзно-республиканскому принципу, т. е. и в Москве, и в столицах союзных республик будут находиться головные ИДП. В этом плане республиканская автоматизированная система является просто составной частью ОГАС. По своему построению она ничем от ОГАС не будет отличаться.

Создание такой службы управления информацией позволяет совершенно по-новому решать задачи как государственные, так и справочно-информационные по различным заказам, которыми могут быть заявки предприятий на выполнение определенного небольшого заказа без обращения по инстанциям и к плановым органам и т. д., а также заказ и самого верхнего уровня управления на информацию о загрузке того или иного вида оборудования или об имеющихся

в настоящее время запасах того или иного вида материалов по всей стране или на определенной территории и т. д.

Если такая система будет создана, то все первичные экономические ячейки, все органы управления, предприятия, КБ и т. д. будут входить в нее через собственные ВЦ или ВЦКП. Они будут абонентами этой системы. Там же, где своих собственных ВЦ не окажется, например в поселковых Советах, будут организованы специальные абонентские пункты, с помощью обычного телетайпа, связанные с ближайшим ВЦКП и соответствующим ИДП.

Любой запрос на информацию поступает прежде всего на ИДП: от государственных органов управления — в соответствующий головной ИДП, от низовых организаций — в ближайший территориально ИДП, где в первую очередь должны быть предусмотрены процедуры автоматической юридической проверки права доступа данного абонента к соответствующей информации.

Необходимо отметить, что это — совершенно новая задача, которая не решалась до сих пор в рамках соответствующих информационно-справочных систем.

После того как в системе будут накоплены заявки, автоматически определяется их приоритет, уточняется загрузка вычислительных центров, на которых они будут выполняться, и составляется расписание выполнения этих заявок. Затем ИДП дает указания ВЦ, когда и какие заявки на получение той или иной информации следует выполнять. При этом для упрощения работы с каналами связи в ИДП должны создаваться выборочные дубликаты информационных массивов, к которым наиболее часто приходится обращаться. Причем эти «вторичные» информационные массивы будут уже переменными.

Следующий не менее важный вопрос — сжатие информации. По-видимому, самое эффективное сжатие информации — это варианты проектов решений по данному вопросу. По существу, традиционные системы управления, которые сейчас имеются в экономике, работают именно по этому принципу.

Для эффективного управления информацией по конкретной проблеме должна быть создана временная конфигурация вычислительных центров и организована их совместная работа над проблемой. Организовать работы ВЦ, принадлежащих различным ведомствам и работающих по разным планам, должна сеть ИДП в ОГАС. В этом и заключается ее главная межведомственная роль. Аналогично можно орга-

низовать конфигурации ВЦ для решения низовых задач, например, для согласования расписаний поставок, синхронизации работы поставщиков и потребителей. С этой целью связь ВЦ предприятий между собой и выполнение этой работы осуществляются под диспетчерским управлением сети ИДП.

Здесь возможны два случая.

Первый случай — решаемые задачи требуют сравнительно небольшого объема передаваемой друг другу информации, не требуют больших вычислительных мощностей и могут быть выполнены низовыми ВЦ. В этом случае конфигурация ВЦ основывается на принципах телеграфной связи: один низовой ВЦ пересылает результаты решения задачи в виде телеграммы в другой ВЦ.

Для второго случая характерны задачи (кстати сказать, наиболее важные для получения ощутимого экономического эффекта) с огромными информационными потоками, которые при любых разумных требованиях к развитию систем связи не могут быть удовлетворены местными каналами связи, так как предприятия в основном будут подсоединяться к своим ИДП по среднескоростным каналам связи.

В этом случае возможен следующий режим решения задачи. Для решения межведомственных задач на ВЦКП и ИДП выделяется необходимое время. Затем на соответствующий ИДП из ВЦ, расположенных на территории, подведомственной этому ИДП, доставляются магнитные ленты, диски, программы, после чего начинается решение задачи с использованием огромных вычислительных мощностей, сосредоточенных в ВЦКП и ИДП (и с огромными пропускными способностями каналов связи между ними).

Проведенный анализ показывает, что для решения целого ряда важнейших задач управления необходимо, чтобы все 200 главных ВЦ страны вместе с ВЦКП и ИДП работали бы как один вычислительный комплекс. Это означает, что соответствующая машина, находящаяся, например, в Киеве, должна читать информацию на магнитных дисках в Хабаровске и записывать на магнитную ленту информацию из Москвы. При таком обмене информацией можно будет решать самые сложные задачи управления межведомственного характера, необходимые для того, чтобы в полтора-два раза ускорить темпы развития нашей экономики.

Указанный режим использования ВЦКП предъявляет еще одно требование к технической базе ОГАС — ГСВЦ:

программную совместимость вычислительными мощностями абонентов.

Если эта проблема будет решена, то информационно-диспетчерская служба сможет выполнять и другие функции, например, аварийное резервирование. Так, если какие-либо вычислительные мощности на предприятии по некоторым причинам выйдут из строя, то наиболее ответственные для этого предприятия задачи временно может решать ВЦКП или ИДП.

Если на предприятии возникает перегрузка ВЦ, то оно может временно воспользоваться ВЦКП, передавая ему часть информации и решая с его помощью свои задачи. Следует отметить, что эта сеть должна обладать юридическим правом перераспределения нагрузок, т. е. в том случае, если ВЦКП перегружен, а где-то на территории страны имеется ведомственный ВЦ, в данный момент недогруженный, то соответствующая служба должна иметь право перераспределять нагрузку, естественно, с последующими взаимными финансовыми расчетами за использование машинного времени, что осуществляется в настоящее время для системы электростанций.

Остановимся на этапах создания ИДП. Первый этап — это создание ИДП, осуществляющих диспетчерское обслуживание ВЦ с использованием обычной телефонной связи, а также передачей нагрузки из одного ВЦ в другой, но не по каналам связи, как будет в будущем, а пересылкой из очереди потребителей на другие ВЦ, где будут в это время свободные мощности. На первом этапе должно быть начато создание каталогов программ и каталогов информации в пределах области.

Вторым этапом явится автоматизация диспетчирования. В соответствующих ИДП появятся специальные управляющие машины, на которых будут решаться задачи оптимизации распределения нагрузок. Необходимо будет решить задачу автоматизации информационного поиска, т. е. автоматизации каталогов, с этой целью на ИДП будут созданы информационно-вычислительные мощности.

Следующий этап — объединение ИДП в одну систему с единым управлением и соответствующими каналами связи. И, наконец, завершающий этап — создание операционной системы всей сети, которая позволит решить задачу создания временных конфигураций вычислительных центров.

Как уже отмечалось, в функциональном аспекте ОГАС представляет собой не простую сумму, а органическое объединение всех ее подсистем. Но при создании такой системы возникает тот же вопрос, что и при создании информационной базы. Если вначале решать централизованно весь комплекс вопросов, связанных с планированием управления, а после этого выдавать задание на проектирование отдельных подсистем, то пройдет очень много времени и задачи вновь изменятся. Во избежание этого структура управления разработками функциональных звеньев ОГАС должна быть гибкой, адаптирующейся к реальным условиям. Для этого прежде всего необходимо провести организационные работы: создать Совет главных конструкторов всех функциональных звеньев ОГАС или РАСУ (республиканской автоматизированной системы).

Главные конструкторы разработок АСПР, АСГС, АСУМТС, а также автоматизированных отраслевых и территориальных (областных и городских) систем управления народным хозяйством должны быть объединены в специальный Совет главных конструкторов.

Кроме того, должна быть также создана система головных институтов, находящихся в распоряжении председателя Совета, главного конструктора и научного руководителя разработок ОГАС. Эти головные институты должны прежде всего решать различные межведомственные задачи.

Совет главных конструкторов все решения по межведомственной стыковке принимает после специальной подготовки и научной проработки. Для этого должна быть специальная система представителей головной организации во всех институтах, занимающихся разработкой функциональных звеньев ОГАС (РАСУ).

Осуществление всех изложенных принципов и методов разработки ОГАС (РАСУ) позволит выполнить в течение 10—15 лет грандиозную задачу создания научной и материально-технической базы автоматизации управления народным хозяйством на современной основе.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НАУКОЙ*

Как и в задаче автоматизации управления народным хозяйством, в автоматизации управления наукой можно выделить два уровня: технологический и организационный. Применительно к науке технологический уровень включает в себя системы автоматизации экспериментальных исследований, испытаний сложных объектов, проектно-конструкторских работ и т. п. Организационный уровень, в свою очередь, разбивается на системы управления в рамках отдельных организаций (НИИ, КБ и т. п.), в рамках отдельных отраслей народного хозяйства и, наконец, в общегосударственном масштабе.

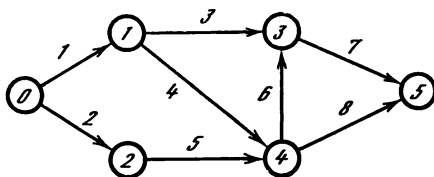
Оставляя в стороне вопросы организационного управления фундаментальными научными исследованиями, остановимся подробнее на системах управления прикладными научными исследованиями и разработками (НИР и ОКР).

Важнейшим методом управления прикладными исследованиями и разработками является программно-целевое управление. В нашей стране (особенно в последние годы) проводится курс на всемерное развитие программно-целевого управления. Разработаны и утверждены целевые программы развития многих важных научно-технических направлений, определяющих главные задачи научно-технического прогресса в большинстве отраслей народного хозяйства. Однако сделанное — еще только начало. Дело в том, что программно-целевой метод не ограничивается только формулировкой целой программы и перечислением организаций, принимающих участие в разработке отдельных ее разделов. Речь идет о создании стройной системы планирования, контроля и управления каждой целевой программы.

Прежде всего в самом процессе формулировки целей программ нужно сразу предусматривать не только НИР и ОКР, заканчивающиеся разработкой опытных образцов или полупромышленной технологией. Важно с самого начала планировать также и этап широкого внедрения результатов НИР и ОКР в народное хозяйство. Тем самым обеспечивается органическое единство научно-технических программ с перспек-

тивными и долгосрочными планами развития народного хозяйства.

Для правильного управления программой, контроля за ее исполнением необходимо иметь соответствующий инструмент. Таким инструментом для комплексных целевых программ являются сетевые графики. Напомню в нескольких словах о том, что представляет собой сетевой график. Для его построения в программе должны прежде всего быть опре-



делены все составляющие ее конкретные работы и так называемые события, отождествляемые с фактами окончания тех или иных этапов работы. Например, «расчеты первого варианта технологии А выполнены», «опытный образец изделия В изготовлен» и т. п. Работы и события представляются соответственно в виде ребер и узлов направленного графа, как это показано на рисунке. В изображенном здесь графе (сетевом графике) имеется 6 событий (включая нулевое) и 8 работ. Расположение ребер и узлов на сетевом графике характеризует взаимоотношение работы и событий. Например, событие 3 наступает лишь после полного окончания работ 3 и 6, работа 6 может быть начата лишь после наступления события 4 (т. е. окончания работ 4 и 5) и т. п.

Начальное событие 0 соответствует моменту утверждения соответствующей целевой программы. Конечное событие 5 означает окончание выполнения программы. Для всех работ, изображенных на сетевом графике, производится оценка времени и ресурсов, необходимых для выполнения. Для i -й работы они могут быть обозначены через t_i и r_i . После установления длительности каждой работы находится критический путь, т. е. совокупность тех работ, которые определяют конечный срок выполнения всей программы в целом. Таким путем на приведенном рисунке может оказаться, например, путь, состоящий из работ 1, 4, 6, 7. Все остальные работы при этом располагают теми или иными резервами времени. Задержка их выполнения в пределах этих резервов не влияет на срок выполнения программы. Понятие критического пути позволяет совсем по-иному построить процесс управления

выполнением программы. При обычных — линейных — графиках фиксируются календарные сроки окончания каждой работы. С точки зрения системы контроля все работы оказываются при этом равнозначными, поскольку из линейного графика не видно, как влияет задержка в выполнении отдельных работ на выполнение всей программы. Поэтому контроль и управления организуются по горизонтальным временным срезам: контролируются все работы, которые ведутся в настоящее время, и особенно те из них, которые близятся к завершению. В случае обнаружения срывов времени для их исправления, как правило, не хватает, что в конечном счете приводит к срыву выполнения программы.

Иное дело при управлении по сетевому графику. Здесь управление идет по вертикальному срезу: в поле зрения попадают прежде всего те работы, которые находятся на критическом пути. Важно, что среди них находятся и те работы, выполнение которых еще не начиналось. Благодаря этому выигрывается время для проведения мероприятий, позволяющих сократить время их выполнения.

В этой работе, осуществляющей все время заглядывание вперед и заблаговременную разработку необходимых инженерно-технических и организационных мероприятий, главный смысл управления по сетевому графику. Она (эта работа) должна проводиться непрерывно в течение всего времени разработки и выполнения программы. Решающим условием здесь является организация эффективного взаимодействия центра управления программой со всеми ответственными исполнителями, определяющими сроки и ресурсы, необходимые для выполнения каждой работы, входящей в сетевой график. В противном случае руководитель не только не почувствует эффективности сетевого графика, а наоборот, может принять его за средство, с помощью которого исполнители научно обосновывают необходимость более длительных сроков выполнения программы.

В самом деле, подсчитанный на основании сетевого графика срок окончания всей программы определяется сроками выполнения отдельных работ, представленными ответственными исполнителями. Естественно, что исполнители будут стремиться к завышению сроков (и ресурсов), необходимых для выполнения порученных им работ. Положение усугубляется трудностью выработки нормативов даже для ОКР, не говоря уже о НИР. Поэтому на практике обычно оказывается, что первый вариант сетевого графика разочаровывает

руководителя, поскольку как сроки выполнения программы, так и необходимые для нее ресурсы оказываются сильно завышенными. Вот здесь и должен сказать свое слово тот механизм взаимодействия центра управления программой с ответственными исполнителями, о котором говорилось выше. Определив критический путь, необходимо провести кропотливую работу по уточнению и «поджиманию» сроков выполнения отдельных работ с исполнителями. Для этой цели создается система стимулирования, позволяющая еще на уровне предварительного планирования максимально объективно оценивать сроки и ресурсы, необходимые для выполнения всех работ, входящих в сетевой график. Без такой системы сетевой график как инструмент управления в значительной мере (если не полностью) теряет свою силу. Его роль при этом состоит в том, чтобы обращать внимание на те работы, от которых в данный момент в первую очередь зависят сроки выполнения программы в целом.

Слова «в данный момент» подчеркивают динамичный характер понятия критического пути. После проведения мер по сокращению оценок сроков выполнения работ, лежащих на критическом пути, данный путь может перестать быть критическим. Тем самым на первый план выдвигаются другие работы, с которыми снова проводится очередной цикл мероприятий по сокращению сроков их выполнения, и т. д.

Описанная работа должна проводиться непрерывно как на стадии предварительного планирования, так и на всех стадиях выполнения программы, вплоть до окончательного ее завершения. Успех этой работы в значительной мере определяется возможностью быстрых перерасчетов всего сетевого графика при непрерывно поступающих изменениях оценок сроков (и затрат ресурсов), необходимых для выполнения тех или иных работ. Для сколько-нибудь серьезных программ приходится составлять сетевые графики, содержащие тысячи (а иногда и десятки тысяч) отдельных работ и событий. Требование быстрых перерасчетов столь сложных сетевых графиков предопределяет необходимость использования для этой цели ЭВМ. Сетевой график при этом должен все время находиться в памяти ЭВМ, а специальная система сервисных программ должна в считанные минуты выдавать любые необходимые сведения, как о всей программе, так и о любых ее составных частях вплоть до отдельных работ. Весьма важной функцией ЭВМ в этой системе является непрерывное отслеживание того вклада, который вносится каждым ответ-

ственным исполнителем в ускорение сроков выполнения программы и сокращение расхода ресурсов. Эти данные, поставляемые ЭВМ, являются исходным пунктом для определения форм и размеров стимулирования для всех исполнителей программы.

До сих пор мы в основном говорили о сокращении сроков выполнения программы. Не менее важной функцией автоматизированной системы управления программой является сокращение расхода ресурсов и наиболее целесообразное распределение этого расхода во времени. С помощью специальных (вложенных в ЭВМ) методов оптимизации сетевых графиков удастся получить более равномерное расходование ресурсов во времени, сократить потери ресурсов, вызванные вынужденными простоями (когда готовые к действию ресурсы вынуждены ждать окончания выполнения тех или иных работ). Однако наиболее важная часть работы по оптимизации расходования ресурсов не может быть сделана с помощью одной лишь ЭВМ. Здесь, как и в случае сокращения сроков, решающая роль принадлежит взаимодействию центрального звена управления программой с ответственными исполнителями и соответствующей системой стимулирования. При организации управления программами (или их отдельными частями) на основании сетевых графиков часто приходится сталкиваться с необходимостью ведения нескольких сетевых графиков (для выполнения разных программ или разных разделов одной и той же программы) одновременно. При этом отдельные работы и события у сетевых графиков могут быть общими, а конечные события (цели) различными. Техника управления с помощью подобных многоцелевых графиков отличается от случая одноцелевого графика прежде всего тем, что центром управления различным целям присваиваются те или иные весовые коэффициенты в соответствии с интуитивно понимаемой важностью этих целей. При последующем управлении эти коэффициенты как бы выстраивают цели на общей временной шкале. А именно задержка в достижении цели с весом 10 на одни сутки будет в этой шкале соответствовать задержке на 10 суток, а с весом 0,1 — на 0,1 суток.

При работе с сетевым графиком стремятся уменьшить суммарное (взвешенное) время достижения всех целей.

Сложность современных научно-технических программ приводит к необходимости строить системы управления ими по иерархическому признаку: на уровне отдельных организа-

ций (НИИ и КБ) составляются самые подробные сетевые графики, на уровне министерств — агрегированные графики, отражающие взаимодействие принадлежащих им организаций, и, наконец, на общегосударственном уровне — обобщенные графики, контролирующие в основном взаимодействия различных министерств. В случае крупных НИИ и КБ их отдельные подразделения могут иметь еще более подробные (дезагрегированные) сетевые графики. В хорошо организованной системе управления программой графики всех уровней должны постоянно находиться в памяти ЭВМ и притом в согласованном друг с другом виде. Согласованность означает, что коррекция графиков на одном уровне должна немедленно вызывать необходимые коррекции всех остальных уровней. Кроме того, в иерархической системе возникает необходимость непрерывного управления декомпозицией агрегированных систем графиков. Чтобы понять, в чем здесь суть дела, рассмотрим следующий пример.

Предположим, что в начальном варианте сетевого графика, составленного на основании агрегации графиков отдельных НИИ и КБ, не выписывались явно этапы работы, замыкающиеся внутри организаций, а лишь те этапы, которые связаны со взаимодействием отдельных организаций. Если центр управления программой не устраивают окончательные сроки, на которых настаивает руководитель какой-нибудь организации, он может произвести декомпозицию сетевого графика в части, касающейся данной организации. Дойдя тем самым до исполнителей более низких уровней, центр может провести работу по «ужиманию» сроков непосредственно с ними. Возможность быстрой декомпозиции сетевых графиков требует соответствующего математического обеспечения ЭВМ на всех уровнях управления, а также организации обмена информацией между ЭВМ различных уровней по каналам связи или по крайней мере на машинных носителях (например, на магнитных лентах). Как ясно из сказанного, организация эффективного управления сложными программами требует решения многих вопросов. Это и установка необходимой техники (системы взаимодействующих друг с другом ЭВМ), и разработка соответствующего математического обеспечения, и организация информации, и наконец, разработка новой организационной структуры управления (включающее изменение функций многих существующих звеньев управления и создание некоторых новых звеньев) с соответствующей системой стимулирования.

К сожалению, организационные вопросы и прежде всего вопрос о правах руководителя программы у нас пока еще не нашли своего решения. Поэтому описанная выше методика управления на основе сетевых графиков в наших условиях дает пока существенный эффект лишь на уровне отдельных НИИ и КБ, и то при условии, что руководство программой осуществляется руководителем организации. Ведь только руководитель организации имеет право перераспределения ресурсов и осуществления (хотя в ограниченных рамках) необходимого стимулирования. Распространение механизма сетевых графиков на более высокие уровни управления даже в тех случаях, когда с информационно-технической стороны организовано все более или менее удовлетворительно, несет у нас пока в основном контрольную, а не действительно управленческую функцию.

До сих пор мы обходили молчанием вопрос о механизме постановки целей в комплексных научно-технических программах. Ясно, однако, что этот вопрос имеет первостепенное значение. Ведь если цель поставлена неправильно, то не поможет никакое, даже самое совершенное управление программой. Нельзя допустить, чтобы цель, которую мы планируем достичь, оказалась в момент своего достижения намного ниже мирового уровня. Для правильной формулировки целей и непрерывного генерирования соответствующих целевых программ необходимо иметь еще один инструмент управления а именно непрерывно действующую систему целевого прогнозирования.

Такая система требует прежде всего хорошо организованную автоматизированную систему научно-технической информации. Такая система должна состоять из взаимосвязанных информационно-вычислительных центров, каждый из которых отвечает за накопление и обработку информации о научно-техническом прогрессе во всех областях науки и техники. Очень важно, чтобы эти центры накапливали информацию не только о готовых результатах, но и о ведущихся в мире новых разработках с оценками времени их окончания и характеристикой возможных результатов. Тем самым появляется возможность экстраполяции, а не просто констатации факта. Например, центр, специализирующийся на новых материалах, должен выдавать по запросам информацию не только об уже выпускаемых в мире материалах, но и о материалах, которые предполагается выпускать в будущем.

Анализируя кривые изменения технических характери-

стик продукции и технологии в своей области, информационно-вычислительные центры должны вести постоянную экстраполяцию (причем, не чисто механически, а с учетом мнений специалистов) этих характеристик на 10—20 лет вперед. Системное обобщение результатов подобной экстраполяции должны делать специально выделенные для этой цели головные институты под руководством потенциальных руководителей будущих целевых программ в соответствующей области науки и техники. Результатом этого обобщения должны быть технические задания на будущие конструкции или технологии с желательным сроком реализации этого задания. Институт и персонально руководитель системного обобщения несет ответственность за соответствие (предполагая обычно разумное опережение) этих заданий предполагаемому мировому научно-техническому уровню.

Оформив техническое задание в качестве цели, головной институт организует (с помощью органов государственного управления наукой и техникой) ведение непрерывного прогноза возможных путей и сроков фактического достижения этой цели. Методика такого прогнозирования разработана под руководством автора и в 9-й пятилетке успешно испытана на примере совместного с ГДР прогноза развития электронной вычислительной техники до 1990 г., после чего она была утверждена в качестве рекомендуемой методики для всех стран СЭВа. Суть методики состоит в следующем.

Эксперты, способные возглавить работы по фактическому достижению поставленной цели, оценивают условные сроки ее достижения и необходимые ресурсы. Условность сроков означает то, что они ставятся в зависимость от достижения каких-то других научно-технических целей, например, создания новых материалов с недостижимыми в настоящее время характеристиками и т. п. Для этих целей экспертами формулируются точные технические задания, после чего они передаются в качестве целей другим группам экспертов.

В результате такой работы возникает граф целевого прогноза, напоминающий сетевой график. Главное его отличие от сетевого графика состоит в том, что для каждого технического решения эксперты указывают не один путь, а несколько альтернативных путей (из которых при последующем развитии науки и техники может быть фактически пройден только один). Это обстоятельство требует при работе с целевым прогнозом более сложных математических методов (включающих вероятностные оценки, функции распределения ве-

роятностей и т. п.), чем в случае обычных сетевых графиков.

Методика работы с прогнозным графом приводит постепенно к уменьшению числа альтернатив и в конце концов — к его превращению в обобщенный сетевой график целевой программы, направленной на достижение цели, сформулированной в прогнозе. Методика предусматривает также тесное взаимодействие непрерывно ведущихся целевых прогнозов с системой перспективного планирования на макроэкономическом уровне.

Несколько слов об организации непрограммного управления. Дело в том, что существует много текущих, сравнительно мелких вопросов, которые нецелесообразно помещать в большие целевые программы. Например, у химика в заводской лаборатории может возникнуть вопрос к математику. Поиск нужного математика сейчас происходит стихийно, на основе информации, известной данному химику, его личных связей и т. п. Среди лиц, найденных таким методом, как это часто случается, может не найтись ни одного, желающего и способного решить поставленную задачу. В то же время за пределами информационных связей поставившего задачу химика может найтись не один математик, способный быстро ее решить или даже уже имеющий готовое решение.

Подобных ситуаций в жизни встречается очень много. Чтобы помочь быстро и эффективно устанавливать необходимые связи между учеными и инженерами, нужно расширить понятие научной информации, включив в него не только информацию о готовых результатах, но и информацию о возникающих научно-технических проблемах.

Для сбора и обработки такой информации следует иметь специальный информационно-вычислительный центр (ИВЦ), тесно связанный с ВИНТИ и другими центрами, фиксирующими готовые научно-технические результаты. Любой специалист, у которого в процессе работы возник вопрос, который он не может решить, обращается с ним в этот центр. Там прежде всего осуществляется проверка вопроса на новизну: если ответ на него известен, то об этом (вместе с указанием источника, где находится ответ) информируется автор вопроса. Если же вопрос нов, он посылается в соответствующий координационный научно-технический совет, где он рассматривается по существу и после возможного объединения с другими родственными ему вопросами публикуется в специальном проблемном бюллетене с присвоенным ему идентифицирующим шифром или просто номером.

Бюллетени рассылаются во все институты, где имеются специалисты соответствующего профиля, так что вопрос находит практически всех возможных адресатов. Для включения работы по поставленной проблеме в план института теперь достаточно сообщить в координирующий орган шифр проблемы. Планирование и управление процессом решения стоящих таким образом проблем чрезвычайно упрощено: по шифрам сразу видно, какие проблемы берутся решать несколько институтов сразу, а какие не берет никто. После окончания работы также сразу известен адрес, по которому надо послать отчет, т. е. адрес инициатора постановки вопроса.

В заключение о технологических аспектах автоматизации в науке и технике. Большое значение приобретает сегодня автоматизация экспериментальных исследований. Созданные к настоящему времени системы автоматизации этого вида повышают (в зависимости от сложности эксперимента) производительность труда экспериментаторов от трех-четырех раз до нескольких десятков и даже сотен раз.

Очень большой эффект получается при автоматизации испытаний сложных объектов. В качестве примера можно указать разработанную нашим институтом систему ТЕМП ЭК, с помощью которой уже испытано несколько новых самолетов (в частности ТУ-144). Вопрос этот чрезвычайно важен, поскольку до создания этой системы время испытаний новых самолетов было больше суммарного времени на проектирование и создание опытного образца. Время обработки результатов летных испытаний с помощью ТЕМП ЭК практически равно нулю, что, в свою очередь, позволяет резко снизить общее время испытаний.

Очень эффективна комплексная автоматизация проектно-конструкторских работ, ставшая возможной в связи с появлением новых мощных ЭВМ и особенно устройств внешней памяти на дисках. Сегодня уже созданы первые системы, которые коренным образом изменили труд конструктора и облик КБ. Конструктор делает только эскиз (исправляя и улучшая его в процессе диалога с системой), а вся расчетная, чертежная и оформительская часть работы делается автоматически. Фактически речь идет о создании поточной линии по подготовке проектно-конструкторской документации в соответствии с требованиями ЕСКД. В КБ при этом нет ничего привычного глазу — ни кульманов, ни готовален, а есть только рабочие места конструкторов с графическими ди-

сплеями, ВЦ и технологическая линейка специальных выводных устройств по подготовке выходной документации.

Созданные в нашем институте две подобные системы (в судостроении и строительстве) в двадцать раз сократили сроки проектирования и существенно улучшили качество проектов.

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЭПОХУ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ *

Не являясь экономистом по образованию, автор неоднократно сталкивался с экономическими проблемами в процессе работы (начиная с 1962 г.) над автоматизированными системами организационного управления. Опыт этой работы свидетельствует о том, что рассмотрение многих экономических проблем с позиции теории управления позволяет находить новые, нетрадиционные подходы к их решению. Многие из этих подходов излагались ранее автором в различных формах, рассчитанных на относительно узкий круг читателей (отчеты, докладные записки и т. п.). При этом экономическая сущность предлагаемых решений подчас терялась за большим количеством технических деталей. В настоящей работе автор предпринимает попытку в доступной форме изложить свой подход к ряду злободневных экономических проблем, рассматривая их в едином комплексе. Необходимо особо подчеркнуть, что затрагиваемые проблемы (как правило, многоаспектные) в настоящей публикации рассматриваются главным образом лишь в одном аспекте — управленческом. Ясно, что принятая автором краткая форма изложения не позволяет дать исчерпывающий всесторонний анализ затрагиваемых проблем. Автор надеется, что принятый им способ изложения даст основу для комплексного системного рассмотрения затрагиваемых проблем и предоставит неограниченные возможности для учета других аспектов предлагаемых подходов.

Поскольку в корне всех жгучих экономических проблем современности лежит научно-техническая революция, то первый раздел мы посвящаем вопросу «что такое научно-техни-

* Препр. ИК АН УССР № 79-2. Киев, 1979. 52 с.

ческая революция?» Разумеется, этот, как и все другие вопросы, будем рассматривать прежде всего в управленческом аспекте. Итак:

Что такое научно-техническая революция?

Когда говорят о научно-технической революции, обычно концентрируют внимание на таких ее чертах, как ускорение темпов научно-технического прогресса, превращение науки в непосредственную производительную силу и т. п. Будучи, несомненно, важными, эти черты, на наш взгляд, не определяют того главного качественного скачка, с которым и связывается прежде всего само понятие революции. Ведь ускоренный темп научно-технического прогресса, достигнутый ныне, будет сохраняться (и еще более ускоряться) и дальше. Превратившись в непосредственную производительную силу, наука вряд ли утратит эту особенность (по крайней мере в обозримом будущем). Но из факта сохранения двух указанных особенностей отнюдь не следует, что мы отныне будем все время жить в условиях научно-технической революции. Ведь по самому определению всякая революция предполагает какие-то изменения качественного порядка, приуроченные к относительно короткому промежутку времени, и не может продолжаться перманентно.

Следовательно, главную черту, характеризующую научно-техническую революцию, следует искать в чем-то другом. По нашему мнению, этим «чем-то» является управление научно-техническим прогрессом. С нашей точки зрения, сущность научно-технической революции состоит в том, что количественные изменения в материальном производстве, в науке и технике, постепенно накапливаясь, превосходят некоторый порог, после достижения которого необходимо коренным образом менять методы управления научно-техническим прогрессом.

После того как методы управления будут приспособлены к новым условиям, наступает очередной период эволюционного роста, период постепенного накопления количественных изменений, пока не возникает необходимость новой революции в методах управления научно-техническим прогрессом.

Какие же количественные изменения в материальном производстве и в развитии науки и техники вызвали нынешнюю научно-техническую революцию? Это прежде всего непрерывный рост сложности изделий, выпускаемых промышленностью, а также рост сложности технологии производства во всех отраслях народного хозяйства.

В то же время требования к темпам технического перевооружения производства не только не снизились, но, напротив, продолжали возрастать. Тем самым перед обществом была поставлена задача осуществлять все более и более сложные изменения в производстве за все более и более короткое время. До определенного момента эта задача могла более или менее удовлетворительно решаться за счет мобилизации резервов количественного характера, имевшихся в традиционном последовательном методе управления научно-техническим прогрессом.

В чем суть этого метода? Прежде всего — в чисто отраслевой организации управления научно-техническим прогрессом: каждая отрасль планирует совершенствование своей продукции и технологии, ориентируясь не на планируемый, а на уже достигнутый научно-технический уровень других отраслей. Причем (как это до сих пор имеет место во многих отраслях нашего народного хозяйства) конструкторам вменяется в обязанность применять в новых разработках лишь те материалы и комплектующие изделия, которые уже освоены нашей промышленностью.

При таком методе управления взаимосвязанные разработки даже в смежных областях выстраиваются во времени последовательно одна за другой: пока не окончен полный цикл разработки и внедрения в производство нового материала, не будет начата разработка новых конструкций, где применяется этот материал. При сложных цепочках отраслевых взаимосвязей, которые имеют место сегодня, это приводит к огромному затягиванию сроков разработки и освоения новых видов продукции и технологии.

При чисто последовательном методе управления осуществление даже одного нововведения в одной отрасли выстраивает отдельные этапы работы над ним в строго последовательные цепочки: исследования, опытно-конструкторская разработка, опытное производство, подготовка к полномасштабному внедрению (строительство и реконструкция заводов) и, наконец, использование нововведения в широких масштабах. К тому же зачастую планирование каждого очередного этапа начинается лишь после полного окончания предыдущего этапа, так что ко времени, необходимому для реализации каждого этапа, добавляется время, нужное для его планирования.

Разумеется, последовательный метод управления научно-техническим прогрессом наиболее прост в организации и требует минимальных усилий от аппарата управления. Именно

этим обстоятельством в первую очередь объясняется его живучесть. К тому же для относительно мелких, несложных усовершенствований последовательный метод дает достаточно удовлетворительные практические результаты. В то же время для крупных нововведений типа становления атомной и ракетно-космической промышленности последовательный метод управления оказывается совершенно непригодным. Если бы над конструкторами первого атомного котла довлела необходимость использовать только те материалы, которые в то время выпускала наша промышленность, и не управлять активно процессом создания необходимых материалов (и многого другого), если бы к конструированию приступали лишь после полного окончания фундаментальных исследований, то мы, наверное, до сих пор не имели бы атомной энергетики.

Необходимость управления подобными сложными процессами родила новые программно-целевые методы управления научно-техническим прогрессом, позволяющие в максимально возможной степени запаараллелить выполнение всех этапов, из которых складывается реализация крупных нововведений. Хотя действительной необходимостью применение подобного параллельного метода управления становится лишь в случае достаточно крупных нововведений, оно приносит несомненную пользу и для нововведений более мелкого масштаба. Поэтому естественно считать происходящий ныне в мире процесс повсеместного перехода от последовательного к параллельному методу управления научно-техническим прогрессом одной из наиболее важных черт, характеризующих нынешнюю научно-техническую революцию.

Следует подчеркнуть, что задача повсеместного перехода от последовательного к параллельному методу управления принципиально отличается от задачи использования параллельного метода для нескольких наиболее важных нововведений, что уже реализовалось на практике ранее. Дело в том, что при переходе на параллельный метод управления с максимально возможным запаараллеливанием всех процессов количество управленческой работы возрастает в сотни, а то и тысячи раз. Пока такой переход совершается для небольшого числа объектов, нужное качество управления может быть обеспечено путем привлечения к решению возникающих здесь новых задач необходимого числа людей в уже существующем или вновь создаваемом аппарате управления. При повсеместном же переходе на новые методы управления и

использовании лишь традиционно сложившейся технологии управления (люди, бумаги, почта, телефон и др.) для решения всех необходимых задач не хватит всего населения страны. Требуется поэтому кардинальное изменение нынешней технологии организационного управления, причем не только собственно научными исследованиями и разработками, но и всем народным хозяйством, где в конечном счете реализуются достижения науки и техники.

Суть такого изменения (охватившего сегодня все технические развитые страны и начинающего проникать в развивающиеся страны) состоит в создании всеохватывающих информационно-управляющих компьютерно-человеческих систем в национальных и даже в межнациональных масштабах. Необходимо особо подчеркнуть, что речь идет не о простом использовании компьютеров для автоматизации сложных вычислений, а о создании принципиально новой технологии организационного управления.

Что же представляет собою эта технология?

Ее основу составляет сеть соединенных между собой каналами автоматической связи вычислительных центров (ВЦ) различных уровней и так называемых терминалов, фактически представляющих собой автоматизированные рабочие места административно-управленческих работников всех уровней. В памяти ЭВМ, составляющих систему, при этом находятся постоянно обновляемая информационная база, исчерпывающим образом описывающая все уровни экономики, а также система программ, обеспечивающая решение практически всех (или, во всяком случае, большинства) задач экономического и социального управления.

Как правило (особенно в случае социального управления), эти задачи решаются в так называемом диалоговом режиме, т. е. в процессе взаимодействия людей (административно-управленческого аппарата и руководителей всех уровней) с технической частью системы. При этом ликвидируются (за исключением неформальных писем, содержащих различного рода предложения, жалобы и т. п.) потоки бумажных документов. Все виды формализованного взаимодействия различных звеньев административно-управленческого персонала замыкаются через систему, хотя, разумеется, при желании любой работник административно-управленческого персонала может получить от системы в пределах круга своих полномочий любой документ (справку, план, приказ и т. п.) в обычной (бумажной) форме.

В последние годы в технически развитых странах начинают вводиться в практику так называемые компьютерные конференции и совещания. Для проведения такой конференции (совещания) ее участникам не надо съезжаться в одно место. Они остаются на своих рабочих местах, общаясь друг с другом через систему как голосом, так и документально. Причем, что особенно важно, не только подготовленные заранее доклады, но и возникающие в ходе дискуссии нерегламентированные выступления (например, ответы на вопросы) могут тут же по ходу конференции сопровождаться соответствующими расчетами, документальными справками и т. п.

Первые идеи новой технологии организационного управления родились у нас в самом начале 60-х годов. В июле 1964 г. под руководством автора настоящей работы был разработан первый проект Государственной сети вычислительных центров, в котором были предложены решения многих вопросов новой технологии организационного управления, получившей впоследствии наименование Общегосударственной автоматизированной системы сбора и обработки информации для нужд учета, планирования и управления или, сокращенно, ОГАС. Как важнейшая Общегосударственная программа задача создания ОГАС была впервые сформулирована в директивах XXIV съезда КПСС. В девятой и десятой пятилетках эта программа начала претворяться в жизнь. Необходимо особо подчеркнуть, что в решениях XXIV и XXV съездов КПСС ОГАС понимается как система взаимодействующих друг с другом вычислительных центров. В то же время до сих пор не изжито представление об ОГАС, как о простой сумме таких центров. Часто оно усугубляется тем, что, строя ВЦ, пытаются решать на них планово-управленческие задачи по старой технологии. Необходимо ясно понимать, что без создания принципиально новой технологии организационного управления простое использование ЭВМ в этой сфере хотя и может принести известную пользу, однако не может дать и десятой доли того огромного эффекта, который заключен в происходящей ныне управленческой революции.

Создание новой технологии организационного управления — очень сложный процесс, требующий больших организационных и материальных усилий. Стремление обойти возникающие на этом пути трудности часто рождает вопрос:

А нельзя ли обойтись без создания новой автоматизированной технологии организационного управления за счет простого упорядочения организационных структур и введения эффективных социально-экономических механизмов?

Отвечая на этот вопрос, необходимо подчеркнуть, что совершенствование организационных структур и экономических механизмов продолжает оставаться чрезвычайно важной задачей. Более того, решение этой задачи (под принципиально новым углом зрения) является органической составной частью создания новой технологии организационного управления. Однако взятая сама по себе (в отрыве от новой, автоматизированной технологии управления) эта задача не может решить проблемы создания системы управления, отвечающей требованиям научно-технической революции.

Чтобы лучше уяснить ситуацию, необходимо прежде всего обратить внимание на существование объективно необходимых задач организационного управления. К их числу мы относим задачи управления материальными потоками от сырья до конечного потребления и научно-техническим прогрессом от совокупности идей до полной их реализации в народном хозяйстве и социальной сфере. Причем речь идет не только об агрегированных задачах, решаемых на верхних уровнях управления, но (и прежде всего) о задачах, доводящихся (во всех подробностях) до отдельных рабочих мест и конкретных исполнителей.

Нетрудно понять, что суммарная сложность таких задач определяется в первую очередь не способом организации управления, а сложностью технологии (и прежде всего технологических связей) совокупного общественного производства.

Разумеется, суммарный объем фактически решаемых задач управления может быть уменьшен за счет ухудшения точности решения задач управления, за счет уменьшения оперативности, т. е. увеличения времени реакции на возникающие отклонения, за счет отказа от оптимизации и даже от полной сбалансированности планов и т. п. Однако в результате любого уменьшения объема решаемых задач управления ниже определенного объективно обусловленного минимума возникают заметные (и все более возрастающие с дальнейшим уменьшением этого объема) материальные потери в народном хозяйстве.

Полностью избежать таких потерь практически невозможно: не говоря уже о влиянии различного рода плохо предска-

зуемых факторов, полное устранение потерь потребовало бы катастрофического увеличения нагрузки на управление, с которым не справится даже современная автоматизированная технология. Поэтому любая реалистическая постановка задачи должна исходить из какого-то минимально допустимого уровня потерь, скажем, 1%. Более того, существует объективно обусловленный оптимальный размер потерь. Он определяется тем, что экономия, получаемая от дальнейшего снижения потерь, уже не будет компенсировать расходы, необходимые для соответствующего улучшения качества управления.

Смысл научно-технической революции под подобным углом зрения состоит в следующем. Нынешняя технология организационного управления была выработана применительно к невысоким темпам научно-технического прогресса и к относительно простой технологии совокупного общественного производства. Будучи адекватной объективным условиям, она обеспечивала организационное управление как текущим производством, так и его совершенствованием с разумным уровнем потерь. По мере увеличения темпов развития науки и ее внедрения в народное хозяйство происходило непрерывное увеличение сложности задач управления не только научно-техническим прогрессом, но и текущим производством. Ведь научно-технический прогресс вызвал, в первых, быстрый рост номенклатуры продукции, а во-вторых, усложнение технологии ее производства. Кроме того, наблюдаемая быстрая смена продукции и технологии оставляла меньше времени для решения задач управления. Таким образом, нагрузка на систему управления все время возрастала. До определенного момента это увеличение могло компенсироваться совершенствованием организационных структур и социально-экономических механизмов в рамках традиционной технологии управления.

Однако возможности даже идеально организованной системы управления в рамках старой технологии имеют объективное количественное ограничение. Ведь способность человеческого мозга к переработке информации не беспредельна. В отношении арифметических операций она ограничена (даже в случае использования арифмометра) несколькими сотнями тысяч операций в год. Подобные пределы существуют и для операций преобразования буквенной информации, решений качественного характера и др. Следовательно, при данной численности управленческого аппарата его макси-

мальная мощность (даже при идеальной организации) строго ограничена. В условиях научно-технической революции эта мощность быстро исчерпывается. Как показывают производственные оценки, уже в 60-е годы даже идеально организованный управленческий аппарат численностью в 200 млн. человек не смог бы обеспечить необходимое качество управления (без увеличения относительного объема потерь). Итак, взятое само по себе совершенствование организационных структур даже при увеличении численности административно-управленческого аппарата не способно справиться с нарастающим объемом объективно необходимых задач управления.

Теперь о возможностях достижения требуемого результата за счет совершенствования социально-экономических механизмов.

Парадоксально, но факт, что даже среди отдельных специалистов-управленцев бытует наивная вера в якобы неограниченные возможности, заложенные в таких механизмах: всего, чего нельзя добиться прямыми методами (планирования, учета, контроля и т. п.), по их мнению, можно достичь, введя некий чудодейственный экономический механизм. Возможности, заложенные в экономических и особенно в социально-экономических механизмах, и в самом деле огромны. Огромны, но не безграничны. Те, кто думает иначе, забывают, что социально-экономические механизмы действуют не сами по себе, а воспринимаются и приводятся в действие в конечном счете людьми. Например, при свободной игре цен на рынке каждый покупатель каждым актом выбора покупаемого товара выполняет некий элементарный управленческий акт. Однако даже идеальная система социально-экономических механизмов, действующая в рамках старой (неавтоматизированной) технологии управления, ограничена суммарной способностью к переработке информации всего взрослого населения.

Поэтому по мере ускорения темпов научно-технического прогресса и усложнения технологии общественного производства резервы совершенствования обоих рассмотренных механизмов рано или поздно исчерпываются. После наступления этого момента, который автор предложил в свое время назвать вторым информационным барьером, дальнейшее развитие, при условии сохранения традиционной технологии управления, неизбежно приводит к прогрессирующему ухудшению качества управления, а значит, и к соответствующему росту потерь, снижению темпов развития экономики, ухуд-

нению технического уровня продукции и к другим неприятным явлениям.

Преодоление второго информационного барьера делает новую (автоматизированную) технологию организационного управления — исторической необходимостью. Осуществив этот революционный скачок, дальнейшее совершенствование управления можно осуществлять в рамках новой технологии за счет непрерывного увеличения суммарной мощности ЭВМ и постепенного перекладывания на них все большей и большей доли управленческих задач.

Возникает естественный вопрос: почему рассматриваемый нами информационный барьер назван вторым?

Дело в том, что в истории развития экономики был период, когда для эффективного управления ею были не нужны не только ЭВМ, но и все атрибуты, составляющие современную технологию управления: документооборот, организационные структуры, экономические механизмы и т. п. Читатель, разумеется, догадался, что речь идет о первобытно-общинном строе, когда для управления отдельными, не связанными друг с другом социально-производственными ячейками достаточно было иметь по одному человеку на ячейку.

Примитивный уровень развития производительных сил, а как следствие, и производственных отношений, позволял одному человеку (вождю рода, племени, общины) справляться со всеми нехитрыми управленческими задачами того времени. Первый информационный барьер означал такой уровень развития производительных сил, при котором мощности одного человеческого мозга стало недостаточно и возникла необходимость распараллеливания управленческих задач сначала на нескольких, а затем и на многих людей. Иными словами, был осуществлен переход на принципиально новую технологию управления, основанную на использовании иерархических организационных структур и экономических механизмов, прежде всего рыночного механизма.

Разумеется, в истории становления современной технологии организационного управления были и другие скачкообразные изменения, связанные с изобретением письменности, книгопечатания, итальянской бухгалтерии, телефона и др.

С другой стороны, такие нововведения, как, например, арифмометр, заменивший счета, практически не повлияли на технологию организационного управления. Об этом еще раз следует напомнить тем, кто полагает, что сущность автоматизации организационного управления на современном этапе

состоит в простой замене арифмометров компьютерами. Ведь современную революцию не только в технологии организационного управления, но и во всей информационной деятельности человека справедливо сравнивают с революциями, вызванными изобретением письменности и книгопечатания.

Огромные новые возможности, которые открываются при широком переходе на методы хранения, доступа и обработки информации в сетях ЭВМ, вызвали к жизни новую область научной и практической деятельности человечества, которая получила наименование информатики. По оценкам специалистов, к началу 90-х годов информатика по масштабам вовлеченных в нее людских и материальных ресурсов превзойдет все производственные отрасли (химию, металлургию, автомобилестроение и т. д.). Для централизованного управления этой областью деятельности во многих странах (не только развитых, но и развивающихся) созданы специальные министерства информатики.

Хотя для нас основной интерес представляет управленческий аспект современной информатики, как продукта научно-технической революции, ответим для полноты еще на один вопрос:

Исчерпывается ли научно-техническая революция революцией в управлении научно-техническим прогрессом?

Ответ на этот вопрос, разумеется, отрицательный. Становление современной информатики в целом есть тоже огромный качественный скачок, характеризующий нынешнюю научно-техническую революцию. К этому можно добавить революцию в образовании. На примере образования особенно хорошо прослеживается необходимость качественного скачка при накоплении относительно медленных количественных изменений.

Пока скорость накопления знаний была невелика, за период активной деятельности человека с момента получения им образования (например, окончания вуза) и до ухода на пенсию можно было обходиться полученным в процессе учебы багажом, дополняя его опытом практической работы и эпизодическим ознакомлением с новинками. Сейчас, когда объем знаний за 15 лет удваивается, подобный метод уже совершенно не годится.

Необходимо коренное изменение системы образования, заключающееся в трех основных моментах. Во-первых, в учебных заведениях нужно учить прежде всего умению непрерывно учиться и лишь на базе этого умения — тем или

иным конкретным знаниям. При этом само понятие конкретных знаний смещается от изучения отдельных конструкций или технологий к общим принципам и методам их построения.

Второй момент — организация системы непрерывного обучения в виде курсов повышения квалификации, институтов переподготовки и т. п. Этот момент, как и первый, уже стал объектом практической деятельности по совершенствованию системы образования.

Третий момент, которому предстоит сыграть огромную роль в будущем — использование достижений информатики. Речь идет не только об использовании ЭВМ в системе обучения. Очень важным является то, что принципиально новые возможности доступа к информации и средствам ее преобразования, предоставляемые современной информатикой, ставят по-новому вопрос — чему учить? Требования к навыкам математических выкладок, знаниям отдельных фактов и к ряду других сторон, стоящих в современном образовании очень высоко, в дальнейшем могут быть, несомненно, понижены. Взамен должны быть повышены требования к другим сторонам образования. Каким? Сегодня мы еще не готовы сколько-нибудь полно ответить на этот вопрос. Ответ придет из практики создания и широкого использования диалоговых (человеко-машинных) систем автоматизации различных областей человеческой деятельности.

Можно было бы продолжить разговор о некоторых других аспектах научно-технической революции, однако это увело бы нас слишком далеко от нашей основной цели — проблем экономики и социально-экономического управления. Для новой технологии организационного управления (как, впрочем, и для старой) далеко не безразличен вопрос о критериях и показателях, по которым оценивается деятельность тех или иных социально-экономических звеньев. Поэтому, заключая разговор о научно-технической революции, мы переходим к следующему разделу, открывая его вопросом:

Какой показатель лучше?

Как известно, стоимость продукции, производимой на том или ином предприятии, складывается из четырех основных частей. Во-первых, это стоимость необходимых для производства данной продукции материалов и комплектующих изделий, поступающих на предприятие от поставщиков. Во-вторых, затраты живого труда, измеряемые суммарной зарплатой персонала предприятий, обеспечившего изготовление этой продукции. В-третьих, затраты прошлого труда,

выражаемые величиной амортизации стоимости основных фондов предприятия, отнесенной к данной продукции. Вчетвертых, прибыль, получаемая предприятием за счет этой продукции. Совокупная стоимость всей продукции, выпущенной предприятием за какой-то промежуток времени, называется валовой продукцией, или сокращенно просто валом.

Если для добывающих и некоторых других отраслей народного хозяйства (химия, металлургия, транспорт и др.) наряду с валом существуют также натуральные показатели объема произведенной продукции (тонны, тонно-километры и т. п.), то для таких отраслей, как машиностроение, приборостроение, строительство и др., использование натуральных показателей затрудняется ввиду огромного количества видов производимой продукции и темпов ее обновления. Конечно, и здесь можно измерять автомобили штуками, жилые дома — квадратными метрами и т. д. Однако автомобили и жилые дома 70-х годов (в отличие от нефти, угля или чугуна) существенно отличаются от жилых домов и автомобилей, скажем, 50-х (а тем более 30-х) годов. Это обстоятельство затрудняет сравнение и делает необходимым использование наряду с натуральными также денежных показателей.

В нашей печати периодически критикуется вал, как один из основных показателей работы предприятий. Перечисляются недостатки этого показателя, среди которых мы отметим три основных. Во-первых, стремясь выполнить план по валу, предприятие становится заинтересованным в применении более дорогих материалов и комплектующих изделий, что, разумеется, противоречит государственным интересам. Во-вторых, вал делает трудносравнимыми вклады различных предприятий в общественное производство, поскольку в валовую продукцию предприятия, выпускающего конечный продукт, входит стоимость продукции всех его поставщиков. Таким образом, это предприятие дает большой вал в значительной мере «чужими руками».

Это же обстоятельство обуславливает также и третий недостаток вала, а именно многократный счет одной и той же продукции в суммарном выпуске нескольких работающих друг на друга предприятий. Например, пусть имеется цепь из 3 предприятий, где продукция первого целиком потребляется вторым, а продукция второго — третьим предприятием. Если прибавки к стоимости (за счет затрат и прибыли собственно на предприятиях) обозначить соответственно А,

В и С, то валовые выпуски этих предприятий будут равняться А, $A+B$ и $A+B+C$, а суммарный валовый выпуск — $3A-2B+C$. В то же время в результате чисто формального акта, а именно административного объединения всех трех предприятий в одно, суммарный валовый продукт сразу сократится до $A+B+C$.

Легко видеть, однако, что в приведенной критике вала смешаны совершенно различные функции этого показателя: если первый недостаток относится к функции показателя как стимула для экономии, то остальные два относятся к совершенно другой его функции, а именно функции учетного характера. Назначение этих функций совершенно различно, поэтому абсолютно неправильно смешивать их друг с другом.

Совершенно ясно, что как учетный показатель вал совершенно не годится. В этом случае его целесообразно заменить показателем чистой продукции, исключающим из стоимости выпущенной продукции стоимость материалов и комплектующих изделий, которые поставляются другими предприятиями. Показатель чистой продукции лишен второго и третьего недостатков из перечисленных трех. Вместе с тем он не только не устраняет, но даже в известном смысле усугубляет первый недостаток. Ведь в показателе валовой продукции учитываются все компоненты стоимости, а в показателе чистой продукции одна из компонент совсем отбрасывается. Тем самым при любых способах его использования полностью исключается возможность стимулировать с его помощью снижение затрат на покупные материалы и комплектующие изделия. Кроме того, использование показателя объема выпуска чистой продукции будет толкать предприятия на завышение других компонент расходов и прежде всего расхода живого труда.

Сторонники чистой продукции, как единого универсального показателя, говорят, что стоит лишь усовершенствовать этот показатель, добавив к нему термин «нормативный», как он сразу избавится от всех недостатков.

Смысл этого усовершенствования состоит в том, что в стоимости чистой продукции учитываются не фактические расходы живого труда, а расходы, определяемые некоторым нормативом. Тогда, снижая затраты труда ниже нормативных, предприятие увеличивает свою прибыль, и, наоборот, превышение затрат по сравнению с нормативным ведет к снижению прибыли. Не вдаваясь пока в трудности, связанные с правильным определением нормативов (об этом пойдет речь

ниже), заметим, что сам по себе переход от фактического к нормативному показателю является принципиальным (и единственно правильным) шагом к превращению его в инструмент стимулирования экономии затрат.

Однако здесь как раз и проявляется в полной мере та потеря в показателе чистой продукции одной из существенных частей затрат (а именно затрат на покупные материалы и комплектующие изделия), о которой говорилось выше. Экономия этого вида затрат показателем нормативной чистой продукции не стимулируется и не может стимулировать-ся.

Легко видеть, что в этом плане показатель нормативной валовой продукции является гораздо более совершенным. Задание нормативов всех трех частей затрат (покупные материалы и изделия, основные фонды, живой труд) вместе с применением только что описанного механизма увеличения или снижения прибыли в зависимости от величины и знака отклонения фактических затрат от нормативных будет стимулировать предприятия, снижать все виды затрат на производство продукции. Чтобы такое снижение не сказывалось на качестве выпускаемой продукции, необходимо перечисленные выше нормативы дополнить еще одним нормативом, задающим необходимый технический уровень выпускаемой продукции. Что же касается фактического технического уровня продукции, то его должны определять потребители совместно с системой государственной инспекции по качеству. Отклонение от норматива качества в ту или иную сторону должно соответственно влиять на величину прибыли.

Итак, мы приходим к выводу о необходимости не одного универсального, а нескольких специализированных показателей: показателя нормативной чистой продукции для целей учета и определения вклада предприятий в совокупный национальный продукт и показателя нормативной валовой продукции, дополненного показателем нормативного технического уровня — для стимулирования эффективности (экономичности) производства и качества выпускаемой продукции. К этим нормативам целесообразно добавить еще нормативы, позволяющие определять истинные производственные мощности предприятий.

Следует заметить, что стремление к единому универсальному показателю есть одно из проявлений распространенной болезни, выражающейся в стремлении управлять сложными процессами простыми средствами. Разумеется, само по себе

стремление к максимальному упрощению управленческих процедур не только не предосудительно, но, наоборот, весьма похвально. Однако дело обстоит так лишь в том случае, когда для достижения простоты не жертвуют главным, а именно — качеством управления.

К сожалению, жизнь устроена таким образом, что при усложнении управляемой системы сложность управляющей системы, как правило, растет не только абсолютно, но и относительно (по сравнению со сложностью управляемой системы). Поэтому рассчитывать на некоторую простую универсальную процедуру, которая разом решит все экономические проблемы, не приходится. В частности, выбор системы показателей и основанных на них механизмов стимулирования предприятий, представляемый иногда как окончательное и полное решение всех проблем, составляет на самом деле лишь весьма малую долю усилий, которые надо затратить, чтобы создать действительно эффективный механизм экономического управления. В частности, создание эффективной системы определения и непрерывного обновления системы нормативов для всех видов продукции и всех типов предприятий требует огромных усилий.

Планово-директивный метод решения этой задачи в принципе может использовать процедуры двух различных классов. В одной из них нормативы для предприятий устанавливаются сверху. Этот путь требует создания огромного дополнительного нормативно-планового аппарата и ведет к необходимости постоянных споров с неизбежной тратой времени и ресурсов для их разрешения.

Во-втором классе процедур, описываемом ниже, предусматривается введение таких методов стимулирования персонала предприятий, при котором они сами раскрывают свои истинные возможности (в частности, нормативные) перед вышестоящими звеньями управления, которые и превращают их в планы и директивы. Процедуры такого рода описываются ниже, а сейчас нам предстоит разобрать еще один, в принципе гораздо более простой, метод установления нормативов стоимости (а точнее, цены), прямо противоположный планово-директивному. Речь идет о рыночном методе регулирования со свободной игрой цен. Не останавливаясь на несовместимости рыночной экономики с основными принципами социалистических производственных отношений, заметим, что и с чисто управленческих позиций рынок в эпоху научно-технической революции оказывается весьма несовершенным

инструментом, фактически непригодным для регулирования цен на большинство видов современной продукции.

В чем заключается слабость классического, рыночного механизма в условиях научно-технической революции?

Привлекательной стороной рыночного механизма регулирования цены с позиций теории управления является его внешняя простота. Все сложности, связанные с определением истинной потребительской стоимости товаров и ее соответствия с ценой, перекладываются при этом на никем не конструируемый и никем не регламентируемый механизм взаимодействия между покупателем и продавцом. В условиях распространенности упомянутой выше «болезни», которую можно назвать «манией простоты», неудивительно, что рыночный механизм способен заморозить подверженных этой болезни специалистов. Дело им представляется простым: не нужно никаких сложных управленческих процедур. Стоит только ввести рыночный механизм и все образуется.

В действительности все обстоит далеко не так просто. Дело в том, что классический рыночный механизм может выполнять функцию определения правильной цены некоторого товара, находящегося в соответствии с его стоимостью, лишь при обязательном соблюдении следующих трех условий. Во-первых, наличие большого количества независимых покупателей, способных совершить столь большое число покупок данного товара (многие тысячи и даже более), чтобы сработал закон больших чисел в процессе случайных колебаний цены. Во-вторых, необходимо наличие достаточного числа независимых продавцов, чтобы исключить возможность сговора и установления монопольной цены. И, наконец, в-третьих, необходимо, чтобы товар существовал на рынке в неизменном виде (без всяких улучшений или тем более замен заведомо лучшим товаром того же самого потребительского назначения) достаточно долго для возможности стабилизации случайного процесса колебания цены.

Нетрудно понять, что в условиях научно-технической революции на современном этапе развития общества для большинства наименований товаров хотя бы одно из перечисленных условий (а для многих товаров и все три условия) заведомо не выполняется. Недавний пример скачкообразного изменения мировых цен на нефть (в результате несоблюдения второго условия) может служить хорошей иллюстрацией создавшегося положения. Третье, второе, а зачастую и первое условия не выполняются в условиях НТР для большинства

видов машин, приборов и другого оборудования. Разумеется, имеются и такие виды продукции (например, большая часть продукции пищевой и частично легкой промышленности), где соблюдаются все три условия, так что классический рыночный механизм для них может работать (в условиях капитализма) с управленческой точки зрения достаточно эффективно.

В дополнение к сказанному отметим, что классический рыночный механизм в принципе не годится для параллельных методов управления научно-техническим прогрессом, о которых говорилось выше и которые составляют сущность научно-технической революции. Неудивительно поэтому, что требования, предъявляемые научно-технической революцией, с одной стороны, и возможности, предоставляемые современной информатикой, — с другой, приводят к существенной перестройке классического рыночного механизма, превращению его в такой механизм, который естественно назвать информационным рынком.

Что же такое информационный рынок?

Если ответить на этот вопрос кратко, то отличие информационного рынка от классического состоит в том что на нем продаются не сами товары, а планы их создания и последующей поставки. Именно на этой основе строят свои отношения американские фирмы с Пентагоном и Национальным аэрокосмическим агентством. Другой пример — сверхзвуковой пассажирский самолет «Конкорд», разработанный совместно английскими и французскими фирмами. Разработка таких изделий, как «Конкорд», требует столь больших затрат, а потребность в них столь мала (она исчисляется в лучшем случае десятками штук), что о классическом методе, когда товар выпускался на рынок в готовом виде, не может быть и речи. Для обеспечения уверенности в возможности последующей продажи и оправдания огромных расходов, которые требуются для разработок, необходимы предварительные контракты с фирмами — будущими потребителями разрабатываемых изделий.

Наличие таких контрактов позволяет фирме-изготовителю, в свою очередь, заключать контракты с другими фирмами на разработку и поставку необходимых материалов, приборов, технологического оборудования и т. п. Цены при заключении контрактов устанавливаются не в результате действия закона больших чисел в случайном процессе, как это имеет место для случая классического рыночного меха-

низма, а на основании детальных нормативных расчетов. При этом используются современные математические методы прогнозирования, программно-целевого планирования и др. Тем самым открывается возможность использования параллельных методов управления научно-техническим прогрессом, отсутствующая в классическом рыночном механизме.

Ввиду того, что устанавливаемые контрактами цены на будущие поставки являются предметом взаимного соглашения, в процессе переговоров может понадобиться многократный пересчет на основе взаимных обменов информацией, уточняющей исходные данные для расчетов. Наиболее удобным (а зачастую и единственно возможным) средством для быстрого выполнения подобных расчетов являются сети ЭВМ, о которых уже шла речь выше. Первые сети ЭВМ в национальных масштабах были созданы в США в 1969—1970 гг. А к 1978 г. развитие сетей далеко перешагнуло национальные рамки и охватило практически все развитые и многие развивающиеся страны.

Наличие подобной технической базы управления позволяет согласовывать планы производства и материально-технического снабжения по длинным цепочкам взаимосвязанных между собой поставщиков и потребителей на весь период контракта с полной детализацией по номенклатуре и по срокам поставок (нередко в случае, когда это необходимо, — до часов и минут).

Переходя к более подробной характеристике механизмов экономического стимулирования, ответим прежде всего на вопрос: каким условиям должны удовлетворять механизмы экономического стимулирования? Отвечая на этот вопрос, автор далек от мысли перечислить все условия. Мы ограничимся лишь несколькими важнейшими условиями, которые необходимы для дальнейшего изложения.

Первым условием является условие полноты или двусторонности системы стимулирования. Это означает, что система должна реагировать на отклонения от выполнения нормальных требований, предъявляемых к стимулируемому лицу или предприятию, не в одну, а в обе стороны. Таким образом, в системе работает не только стремление что-то приобрести (например, в случае проявления дополнительной инициативы), но и страх потерять достигнутое (например, в случае бездеятельности.)

В системе, не использующей эту сторону процесса стимулирования, неизбежно развиваются многие негативные явления: привычка смотреть на основную зарплату как на

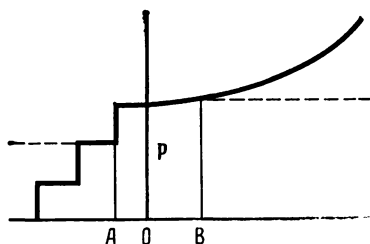
своеобразную пожизненную ренту, бездеятельность, пренебрежение своими обязанностями и т. д. Кроме того, необходимость постоянной коррекции относительных уровней зарплат работников различных профессий и квалификаций (с целью сохранения равных уровней обеспеченности рабочей силой различных участков народного хозяйства) при соблюдении условий изменений зарплаты лишь в сторону ее повышения может привести к инфляции.

Вместе с тем нельзя ограничиться одними лишь санкциями. В таких условиях не будет развиваться инициатива, стремление полностью раскрыть свои силы и возможности.

Второе условие вытекает из характера человеческой психологии: для приведения в действие все больших и больших усилий в любом виде деятельности величина стимула должна возрастать темпами, опережающими рост усилий. Иными словами, кривая стимулирования в своей правой (положительной) части должна быть вогнута вверх, как это показано на рисунке. По горизонтальной оси на этом рисунке вправо откладывается величина усилия, а по вертикальной — величина соответствующего вознаграждения. Точке О соответствует величина усилия, необходимого для выполнения регламентированного (нормального) круга обязанностей.

Отрезок *p* представляет собой величину нормального вознаграждения за обычную добросовестную работу (основная зарплата).

Кривая в левой (отрицательной) части графика может выбираться различным образом, например, в виде ступенчатой ломаной линии, как показано на рисунке. Важно лишь, чтобы эта кривая не допускала сколько-нибудь значительных отклонений от точки О нормальной работы.



Социалистическая система накладывает два дополнительных условия на систему стимулирования: отсутствие безработицы и отсутствие сверхвысоких доходов. Эти условия в социальном плане представляют собой величайшее историческое достижение и стали в глазах миллионов людей символом справедливости нашего общественного строя. Однако с позиций теории управления они, как и любые другие априорные дополнительные условия, снижают эффективность стиму-

лирования, ибо фактически ограничивают его действие показанным на рисунке отрезком АВ (вне этого отрезка кривая стимулирования параллельна оси абсцисс, что на рисунке показано пунктирными линиями).

Из сказанного ясно, что слепое копирование механизмов стимулирования, использующихся в капиталистической системе, в наших условиях не может дать адекватные результаты. Это относится в полной мере к таким механизмам, как механизм конкуренции между отдельными предприятиями и связанный с ним рыночный механизм. В лучшем случае подобные механизмы могут позволить взять лишь достигаемые относительно малыми усилиями поверхностные пласты резервов.

Отсюда следует, что для социалистической системы следует строить другие, принципиально новые механизмы стимулирования, использующие в максимально возможной степени присущие социализму преимущества и в первую очередь преимущества планового ведения хозяйства не только в локальных, но и в национальных масштабах. Об одном из возможных способов построения подобного механизма стимулирования, отвечающего социалистическим принципам, будет рассказано ниже. А пока продолжим перечень условий, которых должны удовлетворять системы стимулирования.

Еще одним таким условием является условие непротиворечивости системы материального стимулирования принципам общественной морали. Если система стимулирования позволяет иметь достаточно высокие заработки, а общественная мораль осуждает владение вещами, которые можно купить на такой заработок, то эффективность системы стимулирования может быть сведена к нулю. Если у той или иной части населения сложились свои определенные представления о достаточном уровне материального комфорта, то в условиях, когда основная зарплата подходит вплотную к этому уровню, система материального стимулирования может перестать работать. В таких условиях возможно предпочтение излишнему материальному комфорту комфорта морального, не всегда к тому же разумно понимаемого (беззаботность, иррациональное, а порою даже вредное для здоровья использование свободного времени и т. п.).

В ряде случаев дестимулируемый материально бракодел или прогульщик может получать моральную компенсацию в виде сочувствия менее сознательной части своих товарищей по работе. Системы стимулирования должны учитывать это

обстоятельство, помогая воспитанию не только более трудно воспитуемого чувства ответственности перед обществом в целом, но и более легко воспитуемого чувства ответственности перед конкретной небольшой ячейкой этого общества, состоящей из ближайших товарищей по работе (бригады, участка, цеха). Иными словами, система стимулирования должна недвусмысленно и ясно показывать каждому члену коллектива ту долю стимулирования, которую он теряет по вине отдельных нерадивых работников.

Очень важным условием является правильное сочетание систем материального и морального стимулирования. Кстати говоря, действенность последнего в наших условиях во многих случаях не только не уступает действенности материального стимулирования, но и превосходит его.

Наконец, система стимулирования (включая уровень основной зарплаты) должна быть достаточно гибкой, чтобы быстро реагировать на непрерывно меняющиеся условия. Постараемся ответить на вопрос:

Каким должен быть механизм непрерывного регулирования систем стимулирования и уровня зарплат?

Задачей такого механизма должна быть постоянная сбалансированная обеспеченность кадрами всех отраслей народного хозяйства и регионов страны по всем необходимым профессиям. Задача эта выходит за пределы регулирования только систем стимулирования и уровня зарплат. Речь идет о сбалансированном регулировании также и других факторов, влияющих на перетоки рабочей силы: условия труда и быта, престижность профессии, возможности повышения квалификации, перспективы роста и др.

В основе подобного механизма должна лежать специальная информационная система (являющаяся подсистемой ОГАС), основной задачей которой является регистрация желаний трудящихся по изменению профессии и места работы, анализ причин, вызывающих перетоки рабочей силы, выработка мероприятий, позволяющих выравнять и уменьшать эти перетоки, и, конечно же, оказание трудящимся действенной помощи в осуществлении их желаний путем снабжения их целенаправленной (отвечающей их желаниям) информацией о возможных новых местах работы (с имеющимися или ожидаемыми в будущем вакансиями).

Информация о желательном месте и условиях новой работы вместе с причинами, заставляющими заявителя менять место работы, в виде специальной анкеты подается им в один

из территориальных терминальных пунктов системы ЭВМ. Информация о личности заявителя является конфиденциальной и ни при каких условиях не должна становиться доступной руководству организации или предприятия, на котором работает заявитель. Организациям и предприятиям сообщается лишь общее число их работников, желающих перейти на другую работу с соответствующей обобщенной характеристикой причин, вызывающих эти желания.

Поскольку заявление, поступившее в систему, не обязательно удовлетворяется немедленно (вакансий с нужными заявителю условиями может в данный момент не оказаться), образуется некоторое упреждение получения информации об ожидаемых перетоках рабочей силы и самими перетоками. Это упреждение позволяет осуществлять различного рода мероприятия по устранению причин, вызывающих перетоки, и уменьшению (хотя бы частичному) величины самих перетоков. В числе таких мероприятий важное место должны занять мероприятия по регулированию относительных уровней зарплат и возможностей систем материального стимулирования.

Следует подчеркнуть, что величину упреждения времени поступления информации об ожидаемых перетоках по отношению к самим перетокам можно увеличить за счет усиления воспитательной работы, направленной на закрепление рабочей силы. При отсутствии описываемого механизма регистрации желаний такое увеличение чревато большой опасностью. Ведь при нынешнем положении, когда информация о перетоках рабочей силы возникает только после фактического их осуществления, всякая искусственная задержка перетока (без проведения мероприятий, направленных на устранение их причины) подобна обвалу, временно преградившему путь бурному горному потоку: через некоторое время этот поток возобновится и притом с многократно усиленной мощью.

С точки зрения задач управления желательным максимальным образом увеличивать упреждение поступления информации об изменениях управляемого объекта по сравнению с самими изменениями. В рассматриваемом случае это означает необходимость проводить воспитательную работу, направленную не только на задержку самих перетоков, но и на возможно более раннюю выдачу в систему информации об ожидаемых перетоках и их причинах.

Теперь нам предстоит ответить на один из самых сложных и в то же время самых интересных вопросов.

Как стимулировать процесс полного раскрытия предприятиями своих возможностей?

Как уже отмечалось выше, достичь этой цели, используя механизмы конкуренции между предприятиями и рыночных отношений, в наших условиях невозможно. В 1972 г. автору пришла в голову мысль использовать вместо внешней конкуренции, когда каждое предприятие выступает как единое целое, внутреннюю конкуренцию в рамках каждого предприятия, вводя различные системы стимулирования для различных категорий работающих и прежде всего для различных звеньев аппарата управления.

С этой целью аппарат управления и работающие под его началом производственные и научно-технические звенья разбиваются на 3 основных блока, которые мы назовем соответственно разрабатывающим, исполнительским и контрольным блоками. В разрабатывающий блок включаются службы, разрабатывающие конструкции, технологию, планы и нормативы, а также экспериментальное производство. В исполнительский блок входят прежде всего основное производство и обеспечивающие его звенья управленческого аппарата. Контрольный блок, как следует из его названия, представляет собой часть аппарата управления, на которую возложены функции контроля двух других блоков.

Члены дирекции предприятия, осуществляющие руководство не одним, а несколькими блоками (прежде всего директор) с необходимой референтурой, выделяются в отдельный руководящий блок. Кроме того, имеется еще обслуживающий блок, включающий в себя АХЧ и подчиненные ей службы, отдел кадров, канцелярию и другие части административно-управленческого аппарата, обслуживающие все другие блоки. Этот последний блок мы опускаем из дальнейшего изложения.

Задача раскрытия возможностей предприятия ставится перед разрабатывающим блоком, который через Общегосударственную автоматизированную систему снабжается исчерпывающей информацией о всех применимых к условиям данного предприятия технических и организационных новинках, изобретениях, рационализаторских предложениях и т. п. С целью усиления ответственности, а также максимальной объективизации подготавливаемой блоком планово-нормативной информации и противодействия возможному давлению процесс подготовки и оформления информации строго персонифицируется.

Это означает, что отдельные технологические участки предприятия не просто закрепляются за конкретными технологиями, плановиками и нормировщиками, а выступают в качестве отдельных разделов (скрепленных подписями соответствующих лиц) в специальном планово-нормативном документе. В этом документе для каждого участка приводится несколько возможных вариантов планов производства для данного участка с реально достижимыми предельными нормативами, минимизирующими затраты материалов, комплектующих изделий, а также затраты труда и износа основных фондов и обеспечивающими максимально возможный выпуск продукции требуемого качества.

В число вариантов плана включаются условные варианты, реальная выполнимость которых ставится в зависимость от выполнения некоторых четко сформулированных условий, находящихся за пределами возможности данного предприятия (выделение дополнительных фондов или численности, проведение крупной реконструкции и т. п.).

На основании этого исходного документа составляются варианты планов с агрегированными нормативами и, если надо, — с мероприятиями. Поскольку в процессе составления вариантов общего плана задания участкам могут меняться, составление обоих документов представляет собою единый процесс, по окончании которого варианты планов отдельных участков должны строго соответствовать вариантам общего плана предприятия. Процедуры подобной многократной увязки планов (в частности, процедуры агрегации нормативов) должны быть строго регламентированы, с тем чтобы допускать последующие формализованные проверки. Поскольку описанный механизм составления планов существенно сложнее, чем принятый ныне, он должен быть обязательно основан на использовании АСУ.

Составляемые варианты планов должны исходить из ясно сформулированных предельных возможностей, но сам план не может полностью строиться на этих возможностях: он должен включать в себя необходимые резервы, величина которых (отступление реального плана от предельно возможного) должна быть также четко оговорена и обоснована.

Сотрудники разрабатывающего блока, ответственные за весь указанный механизм, стимулируются прежде всего за добросовестность, выражающуюся в правильном определении предельных возможностей закрепленных за ними производственных участков (в соответствии с новейшими возмож-

ностями, предоставляемыми научно-техническим прогрессом) и в правильном агрегировании этих возможностей в возможности всего предприятия в целом.

Система стимулирования работников разрабатывающего блока поэтому должна строиться в виде своеобразной «выслуги лет» за добросовестную работу. С этой целью по мере нарастания стажа добросовестной работы регулярно из месяца в месяц увеличивается зарплата (вначале минимальная), пока она не достигнет некоторого максимального уровня. Она будет и далее оставаться на этом уровне, если только система контроля не выявит каких-либо фактов недобросовестности работника, причем (что весьма существенно) не только в настоящем, но и в прошлом. В этом случае его зарплата понижается соразмерно с серьезностью вины, вплоть до минимального уровня, после чего нужно снова постепенно наработать стаж добросовестной работы, чтобы восстановить потерянный уровень зарплаты. При изменении места работы по собственному желанию, без согласия на то предприятия, стаж добросовестной работы теряется, и на новом месте все надо начинать сначала. В случае же согласия предприятия оформляется перевод стажа на новое место работы. Однако при этом факты недобросовестности, выявленные на старом месте уже после перевода, законодательным порядком определяют потерю стажа и на новом месте. Для технического обеспечения возможности решения подобных задач в АСУ предприятий должны вестись соответствующие архивы, а сами АСУ — взаимодействовать через ОГАС.

Психологически подобная мера (потери на достаточно длительный срок уже достигнутого уровня) оказывается несравненно более действенной, чем любые разовые меры (выговоры, лишение премии и т. п.). В случае необходимости ее можно усилить, вводя механизм влияния фактов потери стажа добросовестной работы на размер пенсии.

Задача периодических проверок добросовестности работников разрабатывающего блока ложится на контрольный блок данного предприятия и (в меньшей мере) на контрольные блоки вышестоящих организаций. При этом у работников контрольного блока также устанавливается аналогичная система стимулирования добросовестной работы с постепенным повышением зарплаты. Контроль их добросовестности производится путем выборочных повторных проверок контрольными блоками вышестоящих организаций результатов проверок, проводимых контрольными блоками предприятий.

Для того, чтобы заинтересовать руководящий блок предприятия в добросовестной работе его контрольного и разрабатывающего блоков, для него устанавливается аналогичный порядок дестимулирования за факты недобросовестности контрольного и других блоков, выявленные в результате проверок, проводимых контрольными блоками вышестоящих организаций. Такое дестимулирование не имеет места, если факты недобросовестности вскрываются своим контрольным блоком.

Введение описанной системы двустороннего стимулирования (имеются как возможность добиться высокой зарплаты, так и опасность ее потерять), четкая формализация процедур планирования (включая планирование прогрессивных норм) и персонификация ответственности позволяют извлечь ту самую информацию, которая нужна для вычисления не фактической, а нормативной продукции (валовой или чистой). Тем самым открывается дорога для правильного (соответствующего государственным интересам) функционирования другого механизма стимулирования, определяющего размер вознаграждений в зависимости от размеров прибыли, получаемой как всем предприятием, так и отдельными его участками. Поскольку, как описано выше, планы и нормативы работы этих участков подробно рассчитываются, то при организации соответствующего учета оказывается возможным введение хозрасчета для каждого участка. Объем управленческой работы при этом, естественно, увеличивается, что еще раз говорит о необходимости возлагать решение подобных задач на АСУ.

Только что описанная вторая система стимулирования применяется прежде всего к исполнительскому блоку, а также (дополнительно к ранее описанной первой системе) и к руководящему блоку (поскольку он отвечает за работу предприятия в целом). Частично (во всяком случае, через фонд социального развития предприятия) вторая система стимулирования распространяется и на работников остальных блоков, хотя основной у них должна быть все-таки первая система. В свою очередь, первая система в качестве дополнительной (применительно к четкоопределенному кругу обязанностей) может применяться и для исполнительского блока.

Наряду с двумя описанными системами на предприятиях могут и должны действовать и другие дополнительные системы: премии за рационализаторские предложения и другие

формы полезной дополнительной инициативы, за вскрытие крупных упущений и ошибок и т. п.

Разрабатывающему блоку вменяется в обязанность (также строго персонифицированную) вводить в ОГАС всю информацию о новых технических решениях, технологических и организационных новинках и другую информацию, которая может быть полезной для других предприятий.

Заметим, что описанный механизм установления истинного значения величины нормативной валовой продукции, а значит, и правильной, соответствующей действительной (нормативной) стоимости (цены) продукции, в отличие от рыночного механизма, не использует ни случайной игры цен, ни закона больших чисел. Поэтому он свободен от описанных выше слабостей, свойственных рыночному механизму. В частности, он будет успешно работать и в том случае, когда для некоторой продукции имеются всего один поставщик и один потребитель.

Следует заметить также, что определяемая описанным образом нормативная стоимость (с учетом предельных возможностей предприятия) будет своей для каждого предприятия, в зависимости от конкретных условий, в которых оно работает (территориальное расположение, качество оборудования и т. п.). Поэтому при установлении единой оптовой цены на продукцию, выпускаемую различными предприятиями, возникает ситуация, аналогичная с дифференциальной земельной рентой. Описание соответствующих процедур установления общей цены увело бы нас слишком далеко, тем более, что такие процедуры хорошо известны экономистам. Важно подчеркнуть лишь то, что предлагаемая нами система обеспечивает Госкомитет по ценам достоверной первичной информацией о величинах и структурах нормативной стоимости продукции, производимой на различных предприятиях.

Остается ответить еще на один вопрос:

Как обеспечить такие условия, чтобы предприятиям было выгодно осваивать новую более прогрессивную продукцию и технологию?

Описанный выше механизм стимулирования дает ответ и на этот вопрос. В вариантах планов, разрабатываемых предприятиями, обязательно должны быть варианты (если они объективно существуют) переходов на более прогрессивную продукцию и технологию. Отсутствие таких вариантов означало бы факт недобросовестности разрабатывающего блока этого предприятия.

Далее, если предприятие совершает этот переход своими силами, затрачивая на него часть своих ресурсов, то это должно найти обоснованное отражение в соответствующем изменении нормативов. При этом прибыль в соответствии с заданным общим уровнем рентабельности должна исчисляться и на те нормативно обусловленные дополнительные затраты собственных ресурсов, которые связаны с таким переходом. Поскольку эти затраты не могут быть включены в стоимость выпускаемой старой продукции, то они должны возмещаться из фонда развития предприятия.

После окончания перехода осуществляется возмещение использованных средств из фонда (с определенным процентом роста) либо за счет соответствующей прибавки к оптовой цене выпускаемой новой продукции, либо в случае, когда меняется не продукция, а технология, — за счет уменьшения затрат на производство этой продукции и получаемой за этот счет дополнительной прибыли. Такое уменьшение обязательно должно быть, иначе не стоило бы затевать переход на новую технологию.

При описанной процедуре предприятие, осуществляющее переход на новую продукцию или новую технологию, в процессе такого перехода не теряет достигнутого уровня прибыли. Быть первым при осуществлении такого перехода выгодно потому, что предприятие, первым осуществившее переход, будет иметь больший период времени, чем другие, для восполнения (и увеличения) своего фонда развития, а следовательно, и больший прирост этого фонда. Это преимущество может быть усилено за счет разрешения переводить дополнительный прирост фонда развития на другие нужды (премии, увеличение фонда социального развития и т. п.), а также за счет установления более высокого уровня рентабельности предприятия, первым осуществившего переход на выпуск новой продукции (на время, пока на ее выпуск перейдут другие предприятия).

Важно подчеркнуть, что в эпоху научно-технической революции наибольший эффект получается от крупных мероприятий, которые не под силу отдельным предприятиям.

Заканчивая раздел, посвященный механизмам экономического стимулирования, перейдем к вопросу о некоторых основных принципах построения Общegosударственной автоматизированной системы (ОГАС). Постараемся здесь кратко ответить всего на три вопроса, которые дадут читателю воз-

возможность представить себе задачи, с которыми имеет дело ОГАС.

Итак, вопрос первый:

Что такое вертикальные связи в ОГАС?

Вертикальными связями в ОГАС принято называть связи по линии административной подчиненности: предприятие — объединение — министерство — Госплан. Разумеется, с учетом наличия территориальных органов управления, а также ряда ведомств общегосударственного характера (Центральное статистическое управление, Госкомитет по материально-техническому снабжению и др.) действительная картина вертикальных связей выглядит несколько сложнее. Однако для наших целей достаточно рассмотреть лишь предельно упрощенный вариант. Основой нашего рассмотрения будет предложенная автором модель планирования, хотя, разумеется, возможны и другие подходы к организации вертикальных связей.

Отправляясь от системы планирования на уровне предприятий, бегло описанной в разделе о стимулировании, естественно продолжить ее (и соответствующие системы стимулирования) на следующие уровни иерархической лестницы. По мере движения вверх показатели плана и нормативы все более и более агрегируются и выходят в конце концов на систему программно-балансовых моделей Госплана, которые должны работать в диалоговом режиме с аппаратом Госплана. Вариант такой системы моделей — так называемая система «Дисплан» был недавно разработан под руководством автора. Эти модели, отправляясь от конечной цели экономики — способствовать максимальным темпам роста уровня удовлетворения материальных и духовных потребностей общества, — определяют узкие места, тормозящие этот рост. На этих местах концентрируется внимание министерств, а через них — объединений и предприятий.

Получив, таким образом, установки о направлениях совершенствования планов, предприятия вносят в планы уточнения и изменения. Эти новые плановые наметки опять агрегируются по вертикальным связям, вновь попадают в Госплан, снова оцениваются, после чего описанный цикл повторяется. Для того чтобы наилучшим образом согласовать локальные возможности с общегосударственными интересами, необходимо осуществить не один и не два, а десятки таких циклов. При переходе от цикла к циклу может меняться характер агрегации: узкие участки плана при подъеме на

верхние уровни агрегируются в меньшей степени, чем остальные, а в отдельных, исключительных случаях даже вовсе не агрегируются. Госплан выступает в этом процессе как своеобразный дирижер, управляющий движением плановой и нормативной информации снизу вверх и сверху вниз.

Разумеется, для осуществления описанной процедуры планы на всех уровнях должны находиться в «безбумажном» виде в памяти ЭВМ. Обмен планами между различными иерархическими уровнями должен производиться также без всяких бумаг — на основе прямого взаимодействия ЭВМ через каналы связи. На всех уровнях должен быть обеспечен эффективный диалог ЭВМ и людей. Последовательные улучшения планов должны, как правило, выполняться в виде коррекции отдельных его звеньев (с последующей автоматической взаимоувязкой), а не путем пересоставления их заново.

В настоящее время уже созданы прообразы таких автоматических цепочек связей ЭВМ различных уровней — зародыши будущей системы вертикальных связей в ОГАС.

Ограничившись этим эскизным наброском, переходим к следующему вопросу:

Что такое горизонтальные связи в ОГАС?

Горизонтальными связями в ОГАС принято называть связи между экономическими объектами, находящимися на одинаковых уровнях административной иерархии: предприятие — предприятие, объединение — объединение, министерство — министерство. Эти связи отражают структуру материальных потоков между поставщиками и потребителями. Главная задача в любой модели горизонтальных связей — это так называемая задача синхронизации работы поставщиков и потребителей.

Дело в том, что модели, действующие по вертикальным связям, способны в ближайшем будущем осуществить межатрасловую балансировку лишь в укрупненных позициях взаимных поставок (в лучшем случае для нескольких десятков тысяч наименований) и для относительно больших промежутков времени (квартал или, в лучшем случае, месяц).

Это обстоятельство связано с тем, что вертикальные связи, построенные по отраслевому и даже по территориально-отраслевому принципу, обеспечивают окончательную межатрасловую балансировку лишь на самом верхнем уровне — в Госплане СССР. Степень же подробности решения задач на этом уровне ограничивается мощностью ЭВМ. Кроме того,

задачи подробной балансировки, как правило, не могут быть решены без непосредственного участия плановиков из министерств и предприятий, которые обладают необходимой совокупностью неформализованных знаний о конкретных местных условиях.

В то же время обеспечение бесперебойной ритмичной работы предприятий требует четкого регламентирования взаимных поставок по самой подробной (специфицированной) номенклатуре, которая сегодня исчисляется многими миллионами, и с большой точностью по времени (минимум до суток, а в случаях режима работы «с колес» — даже до часов и минут). Решение этой задачи и определяет как раз ту самую синхронизацию, о которой шла речь выше.

Трудность этой задачи состоит в том, что ее, как правило, нельзя решать на чисто двусторонней основе между двумя предприятиями, составляющими пару потребитель — поставщик. Во-первых, у предприятия-потребителя бывает обычно не один поставщик, а зачастую многие десятки и даже сотни. Если ему не удастся договориться о поставке в нужный срок хотя бы с одним поставщиком, то договоренности с остальными нужно менять. Ведь поставленная ими продукция может при этом лежать у потребителя, ожидая поставки недостающей комплектации от «несговорчивого» поставщика. А в то же время у других потребителей может не хватить именно этой продукции, тогда как от «несговорчивого» поставщика продукцию они давно получили.

Подобное явление естественно назвать мнимым дефицитом. Ибо дефицита в целом по стране нет, однако в силу несогласованности сроков поставок ни у одного из потребителей может не оказаться полной комплектации, необходимой для выпуска продукции, и они будут фактически простаивать, создавая в последующих звеньях материально-технических связей уже не мнимый, а фактический, истинный дефицит. При усложнении связей явление мнимого дефицита может вызывать огромные потери и сильно тормозить развитие экономики.

Одним из способов борьбы с мнимым дефицитом является создание запасов, но не у потребителей, где они фактически омертвляются, а таких запасов, которыми можно в случае нужды маневрировать, закрывая ими узкие места. Сегодня такие запасы создаются в территориальных базах Госснаба, хотя с точки зрения теории управления их целесообразнее всего создавать на соответствующих заводах — поставщиках данной продукции. При этом облегчается свобода маневра

в масштабах всей страны) и вдвое уменьшается объем погрузочно-разгрузочных работ.

Следует подчеркнуть, однако, что в эпоху научно-технической революции возможности синхронизации взаимных поставок путем создания запасов резко уменьшаются. Ведь запастись впрок целесообразно лишь ту продукцию, ценность которой при хранении не падает слишком быстро. В то же время сегодня для большей части номенклатуры (особенно в таких областях, как электроника, приборостроение, машиностроение) моральное старение (в результате появления новой более прогрессивной продукции) происходит столь быстрыми темпами, что создание сколько-нибудь значительных запасов во многих случаях оказывается нецелесообразным.

Поэтому возникает задача фактической согласованной синхронизации работы зачастую многих сотен предприятий (расположенных к тому же в различных районах страны), связанных по сложным цепочкам взаимных поставок (от сырья до готовой продукции). Для ее решения необходимо обеспечить совместную работу ЭВМ, обслуживающих все эти предприятия, с многократными обменами информацией между ними, подобно тому, как это имеет место и в случае вертикальных связей. Кроме того, наличие многих неформализованных ограничений требует, чтобы наряду с ЭВМ в эту работу были вовлечены люди на предприятиях, знающие конкретные условия и способные контролировать и направлять ход решения задачи с учетом этих условий и ограничений.

В отличие от вертикальных связей, проходящих по линиям прямой административной подчиненности, горизонтальные связи объединяют, как правило, предприятия разных министерств и ведомств. Поэтому для организации эффективного информационного взаимодействия их ЭВМ и АСУ нужен специальный межведомственный орган, располагающий сетью территориальных информационно-диспетчерских пунктов и межведомственными вычислительными мощностями. В их задачу как раз и входит организация временных сетевых конфигураций вычислительных центров предприятий, принадлежащих различным ведомствам, и управление ходом решения задач на таких сетях (с передачей информации по каналам связи).

Огромная сложность информационных связей в современной экономике и огромная четкость и точность (измеряемая тысячными долями секунды) управления, которые требуются для организации эффективной совместной работы

многих десятков и сотен АСУ различных ведомств по решению межведомственных задач (в частности, задачи синхронизации), обязательно требуют такого общесоюзного дирижера. К чисто техническим трудностям здесь присоединяются трудности организационные: поскольку АСУ принадлежат различным ведомствам, никто, кроме специального межведомственного органа, облеченного диспетчерскими полномочиями, не может командовать им выйти на согласованную работу в определенный день, час и даже секунду. А выпадение даже одного звена сразу ломает всю систему согласованных расчетов.

Нужно учитывать к тому же, что объективно интересы потребителей и поставщиков часто противоречат друг другу: поставщикам выгодно выпускать продукцию длинными однородными партиями, а потребителю, как правило, нужны небольшие партии различной номенклатуры. Поэтому при взаимном согласовании планов нужно исходить из конечной народнохозяйственной выгоды. При таком подходе интересы отдельных предприятий (чаще всего поставщиков) могут ущемляться, например, может уменьшаться величина прибыли. Но если план действительно оптимален с точки зрения конечного результата, то это локальное уменьшение прибыли должно с лихвой перекрываться суммарным увеличением прибыли других предприятий (обычно потребителей). Для того чтобы предприятия добровольно (на основании взаимного соглашения) принимали этот наиболее выгодный для государства план, необходимо, чтобы в права директоров предприятий и объединений входила бы возможность частичного перераспределения прибыли.

Введение подобного механизма позволяет децентрализовать решения по окончательной детализации планов (по номенклатуре и срокам поставок) без потери (а даже при усилении) организующего начала централизованного планирования, замыкающегося в основном по системе вертикальных связей. Это обстоятельство принципиально важно, поскольку суммарный объем работы по детальной взаимоувязке планов намного превышает объем работы по балансировке планов в укрупненных показателях и поэтому физически не может быть выполнен с нужной точностью и в нужные сроки в Госплане, Госснабе и любых других центральных органах. Отметим еще, что достигаемый таким образом результат является примером своеобразной управленческой диалектики: эффективная децентрализация процесса принятия детализированных плановых решений становится возможной

лишь при условии централизации управления процессами обработки информации при решении межведомственных задач.

Мы затронули здесь (и притом бегло) лишь часть вопросов о системе экономико-математических моделей, которые должны быть реализованы в ОГАС. Однако даже то, что уже сказано, дает определенное представление о том огромном объеме информации, которая должна храниться (постоянно обновляясь) и перерабатываться в ОГАС. Система организации информации зависит, разумеется, от системы используемых в ОГАС экономико-математических моделей. А по этому вопросу имеются различные мнения, служащие предметом непрекращающихся споров. К тому же, если бы даже сегодня удалось прийти к единому мнению, непрерывные изменения, происходящие в экономике и в организационной структуре управления народным хозяйством, будут неизбежно вызывать изменения в системе используемых экономико-математических моделей и информационной базе ОГАС. В то же время создание информационной базы системы подобных масштабов — это чрезвычайно трудоемкий и длительный процесс.

Возникает своеобразный порочный круг: для того чтобы строить информационную базу ОГАС, нужно зафиксировать систему используемых в ней экономико-математических моделей, а к тому времени, когда информационная база будет создана, система моделей почти неизбежно серьезно изменится. Возникает естественный вопрос, как же разорвать этот порочный круг?

Как строить информационную базу ОГАС?

К ответу на этот вопрос (решающему проблему выхода из порочного круга) автор пришел еще в процессе работы над проектом Государственной сети вычислительных центров в 1963—1964 гг. Дело в том, что информационная база ОГАС представляет собой многоступенчатую пирамиду, нижнюю ступень которой составляет информационная база первичных экономических ячеек (предприятий и организаций), а верхнюю ступень — информационная база общегосударственных органов управления. При этом основная масса информации (не менее 90 %) сосредоточена в нижней ступени. В то же время усложнение управления производством в эпоху научно-технической революции неизбежно приводит к необходимости создания автоматизированных систем управления предприятиями, а также опытно-конструкторскими и проектными организациями. Причем в автоматизации нуж-

дается прежде всего наиболее детализированная часть планирования и управления, доходящая непосредственно до рабочих мест. Для этих нижних этажей АСУ информационная база может (и должна) строиться в самых детализированных показателях, привязываясь прежде всего не к существующим организационным структурам управления, а к материально-технической базе производства, в состав которой наряду с материалами, оборудованием, людскими ресурсами и др. включается также проектно-конструкторская и технологическо-нормативная информация. Создание такой базы (вместе с системой ее непрерывного изменения) так или иначе необходимо для нужд управления производством, независимо от задачи создания ОГАС, а следовательно, и от принятой для нее системы экономико-математических моделей.

Если теперь ввести в состав математического обеспечения всех АСУ нижнего уровня специальную программную систему, позволяющую быстро формировать из имеющихся в первичной (наиболее подробной) информационной базе любые вторичные информационные базы (содержащие агрегированную информацию), то мы придем к гибкой системе, быстро настраивающейся на любые изменения, происходящие в системе управления.

Такая программная система помимо специальных программ сортировки, выборки, урезания записей и других преобразований форм представления информации, составляющих универсальный набор, должна содержать язык описания вторичных массивов, форм входных и выходных документов и других форм внешнего взаимодействия с этими массивами (например, формы диалога через дисплей). Программная система, о которой идет речь, наряду с вторичной базой должна автоматически порождать также и систему непрерывного обновления (актуализации) этой базы; отслеживающую (в соответствии с задаваемыми правилами) все изменения, которые происходят в первичной базе. Пробразы подобных программных систем уже созданы в наших лучших АСУ.

По мере создания и дальнейшего развития автоматизированных систем более высоких уровней управления на них должна распространяться описанная процедура формирования и поддержания вторичных информационных баз, принимаемая за первичную информационную базу АСУ непосредственно предшествующих ему уровней управления. Не исключается, впрочем, и возможность полного или частичного

формирования информационных баз верхних уровней управления непосредственно из первичных информационных баз предприятий. Задача создания, поддержания и изменения всей иерархической системы информационных баз возлагается при этом на ОГАС и управляющий ею межведомственный информационный орган. При такой организации ОГАС приспособление информационной базы к меняющейся структуре и моделям управления становится нетрудной и быстрорешаемой задачей.

Заметим в заключение еще одно преимущество предложенного подхода к созданию ОГАС. Начав ее создание не классическим путем, которым обычно создаются системы меньшего масштаба (т. е. с системы моделей), а, если так можно выразиться, «с железа», т. е. с установки ЭВМ и создания на их базе АСУ в низовом звене, мы решаем еще одну (может быть, самую важную) задачу. А именно, создаем достаточно мощный всесоюзный коллектив специалистов, без которого невозможно создать ОГАС. Впрочем (как следует из факта существования описанного выше порочного круга), классический путь для создания такой огромной системы, какой является ОГАС, вообще неприменим.

Необходимо особенно подчеркнуть то обстоятельство, что разработка ОГАС отнюдь не сводится лишь к созданию информационной базы, сети ВЦ и соответствующего математического обеспечения. Не менее важной задачей является подробная инженерная разработка системы организационных структур, функциональных обязанностей и социально-экономических механизмов во всех звеньях управления экономикой. Уже сегодня для четкого функционирования системы управления экономикой совершенно недостаточны такие, бытующие до сих пор, общие определения функциональных обязанностей должностных лиц, как, например, «должностное лицо N отвечает за материально-техническое снабжение, а должностное лицо M — за капитальное строительство» и т. п. Необходимо подробно проектировать рабочий день и рабочую неделю каждого должностного лица, создавать подробные классификаторы обязанностей, документов, четко (во времени и в лицах) определять порядок их рассмотрения и т. д.

Без такого инженерного подхода к проектированию организаций невозможна их эффективная работа (и особенно четкий контроль этой работы). Необходимо ясно понимать, что задача проектирования организаций (особенно в условиях

действия ОГАС) не менее сложна, чем, скажем, задача проектирования систем управления ракетами и космическими кораблями. Очень важно поэтому преодолеть бытующее сегодня легкое отношение к проектированию организаций, когда решение этой задачи (скажем, задачи перехода на новую структуру организации управления) поручается временным комиссиям, а не крупным инженерно-техническим коллективам, как это имеет место для задач проектирования систем технологического управления.

Созданный ныне многотысячный коллектив разработчиков ОГАС может и должен быть использован для решения задач такого рода.

ОРГАНИЗАЦИОННОМУ УПРАВЛЕНИЮ — СОВЕРШЕННУЮ ТЕХНОЛОГИЮ

Вопрос повышения эффективности и качества организационного управления — это сегодня вопрос вопросов, основное звено в цепи проблем дальнейшего развития и совершенствования народного хозяйства в целом.

Действующая ныне у нас традиционная (бумажно-документальная) технология организационного управления в принципе не может осуществить подобных расчетов в сколько-нибудь сложных случаях. Необходимо возможно более быстрыми темпами заменять ее на новую технологию, которую можно условно назвать безбумажной. В такой технологии основная масса технико-экономической информации обрабатывается с помощью ЭВМ и не существует в обычной бумажной форме.

Основные задачи по созданию такой технологии в нашей стране (так называемой общегосударственной автоматизированной системы, сокращенно ОГАС) были сформулированы XXIV съездом КПСС в директивах по 9-му пятилетнему плану и развиты далее XXV съездом КПСС. Однако далеко не во всех звеньях нашего народного хозяйства эти задачи решаются с той степенью энергии и настойчивости, которые необходимы в этом важнейшем, но и в то же время труднейшем деле. С чисто технической точки зрения переход на безбумажную технологию организационного управления сводится к построению АСУ различных типов и уровней и к объединению их в ОГАС с помощью сети связи и специальной

всесоюзной информационно-диспетчерской службы. Однако, внедрение АСУ, как это неоднократно подчеркивалось многими нашими специалистами (в том числе и автором настоящей статьи), даже с чисто технической точки зрения отнюдь не сводится к установке ЭВМ (пусть даже начиненными всеми необходимыми программами). Гораздо более трудная задача — это организация циркуляции на новой безбумажной основе. Для ее решения необходимо автоматизировать все рабочие места, на которых рождается или потребляется технико-экономическая информация, и связать их с центральным вычислительным комплексом АСУ.

Так возникают автоматизированные рабочие места (АРМы) различных типов и назначений: для рабочего, конструктора, клеровщика, начальника участка или цеха и т. д. При этом приходится решать две трудные технико-экономические проблемы. Во-первых, поскольку рабочих мест много, устанавливаемая на них аппаратура должна быть максимально простой, надежной и, самое главное, — достаточно дешевой. Вторая проблема — это проблема надежной дешевой связи АРМов с центральным вычислительным комплексом. Если решать эту проблему «в лоб», т. е. провести отдельные жилы кабелей от всех АРМов к ВЦ, то затраты на одну лишь связь для АСУ крупного завода могут достигать многих миллионов рублей. Разработанная в нашем институте система ступенчатой передачи информации (получившая наименование «БАРС») позволяет снижать эти затраты во многие десятки раз. Система в прошлом году была награждена большой золотой медалью на Лейпцигской ярмарке. Большой интерес к ней проявили западные фирмы, а НРБ уже купила у нас лицензию на производство системы. Система «БАРС» позволяет на хорошей современной основе организовать безбумажную подпитку АСУ всей необходимой информацией о состоянии производства, запасах на складах в масштабах крупного предприятия, обеспечивая тем самым основу любой эффективной системы управления — идеальный учет. Пытаться вводить всю эту массу информации с бумажных документов вручную — все равно что подносить наперстком топливо к двигателям современного реактивного лайнера. А ведь именно это делается еще во многих наших АСУ, поскольку периферийной техники, необходимой для реализации безбумажной технологии, у нас еще крайне недостаточно. О какой же эффективности управления и сокращения бумажных потоков может идти при этом речь! Поскольку основная мысль первичной технико-эконо-

мической информации рождается в нижних звеньях народно-хозяйственного механизма, любая безбумажная система управления должна строиться. Но в то же время наиболее важные решения, дающие наибольший народнохозяйственный эффект, принимаются на верхних этажах управления. Для подготовки таких решений требуется обычно огромное количество информации и соответствующие мощности по ее переработке. Собрать такое количество информации (особенно за короткое время) средствами традиционной бумажной технологии практически невозможно. Поэтому сосредоточенные огромные (и дорогие) вычислительные мощности будут попросту простаивать. Поэтому одной из важнейших задач безбумажной технологии является автоматизация движения информационных потоков в вертикальном направлении (прежде всего снизу вверх), вплоть до самых верхних этажей управления. Разумеется, при этом руководитель любого уровня может получить от системы требуемую ему (обычно обобщенную) информацию в любых аспектах и разрезах (соответствующих уровню его полномочий) в обычной бумажной форме. В обычной бумажной форме могут циркулировать в системе также различного рода неформализованные документы (личные письма, жалобы, предложения и т. п.).

Что же касается отчетной, плановой, нормативной и любой другой формализованной информации, то она должна помещаться на машинных носителях (магнитных дисках и магнитных лентах) или непосредственно в памяти ЭВМ различных уровней со строго формализованными процедурами ее обновления, агрегации и использования. Нашим институтом недавно создана своеобразная «шапка» для подобной безбумажной технологии, предназначенная для работы на уровне Госплана, так называемая система «ДИСПЛАН» (диалоговая система планирования). При наличии ее бумажной подготовки с нижних уровней планирования (министерства, объединения, крупные предприятия и стройки) система может по указанию опытных плановиков проводить полные перебалансировки планов по нескольким тысячам показателей за несколько минут (!). Разумеется, организация такой подчистки требует полного перепроектирования действующей ныне технологии информационного обмена и самих плановых расчетов на всех уровнях и немалого времени для своей реализации. Организация прямых (безбумажных) информационных обменов в горизонтальном направлении (по линиям связи потребителей с поставщиками) позволит организовать эф-

фективные решения межведомственных задач по рациональной специализации и кооперации, планированию и контролю за взаимными поставками в точном расписании, номенклатуре и необходимых качественных показателях. На несвоевременном и неточном решении именно этих задач государство сегодня несет наибольшие потери (особенно в строительстве). Разумеется, эффективная автоматизация горизонтальных связей будет невозможна лишь при организации всесоюзной межведомственной информационно-диспетчерской службы.

Однако следует особо подчеркнуть, что создание не только ОГАС, но и любой эффективной организационной АСУ немислимо без одновременного решения целого круга крупных организационных и социально-экономических вопросов.

В самом деле, предположим, что с помощью аппаратуры БАРС мы наладили идеальный учет на предприятии. При этом о всяком отклонении от заданного ритма (поломке оборудования, отключении электроэнергии и др.) система будет немедленно сигнализировать на рабочее место должностного лица, ответственного за устранение причины отклонения. Система будет аккуратно считать (что она делает уже сейчас) часы, минуты и секунды, которые уйдут на ликвидацию неисправности. Однако, если нет точных (недопускающих никаких кривотолков и возможностей спрятаться за чью-то спину) должностных инструкций, никакой учет не поможет. То же самое произойдет, если система стимулирования не приведена в соответствие даваемыми техникой возможностями точного контроля за добросовестным исполнением своих обязанностей всеми должностными лицами без всякого исключения.

Иными словами, переход на новую безбумажную технологию требует не только новых технических решений, а и перепроектирования всей системы организационного управления в ее человеческом звене.

Как показывает практика, организационное управление сегодня должно стать предметом тщательного инженерного проектирования, как и любая производственная технология. Так же, как нельзя допускать оператора к управлению сложным технологическим агрегатом без разработанных и изученных им должностных инструкций, недопустимо без аналогичной подготовки назначать, скажем заместителя директора завода по материально-техническому снабжению. Нам необходимо возможно скорее избавиться от

своеобразного организационного механизма, заставляющего нас считать нормальным, когда для разработки системы управления сложным техническим объектом (например, ракетой) создаются и работают годами крупные КБ, а разработка гораздо более сложной системы управления крупнейшим социально-экономическим объектом, скажем, министерством, поручается временной комиссии или бригаде социологов.

За годы 9-й и 10-й пятилеток созданы специализированные институты и КБ для проектирования АСУ. Хотя их мощность в целом пока еще далеко не отвечает сложности стоящих перед ними задач, их отдачу можно было бы значительно увеличить, переведя их на рельсы комплексного проектирования организационного управления (обеспечив предварительно их необходимыми кадрами, которых сейчас остро не хватает).

Большие резервы увеличения отдачи разработчиков АСУ находят на пути дальнейшей типизации проектных решений, соответствующей специализации и кооперации имеющихся сил. Приведя в действия эти ресурсы, переработчики АСУ смогут значительно увеличить свой вклад в повышение эффективности общественного производства.

ДИАЛОГОВЫЕ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

В настоящее время в распоряжении математиков и экономистов, занимающихся автоматизацией планирования на макроэкономическом уровне, имеется большое число различного рода макроэкономических моделей. Здесь и простейшие линейные статические модели и сложные нелинейные динамические модели с оптимизацией. Эти модели оказали и продолжают оказывать немалые услуги плановикам при анализе тенденций развития экономики. Они послужили источником многих важных теоретических исследований макроэкономических процессов. Вместе с тем нельзя не видеть, что роль макроэкономических моделей в реальных процессах планирования и принятия решений продолжает оставаться достаточно ограниченной.

На наш взгляд, имеется несколько веских причин, объясняющих подобное положение. Прежде всего обычные макроэкономические модели практически полностью исключают

из рассмотрения вопрос об активном влиянии процессов планирования на научно-технический прогресс. В лучшем случае они представляют в руки плановиков возможность выбора в классе уже созданных технологий или экстраполируют на будущее уже сложившиеся закономерности изменения технологических коэффициентов. В эпоху научно-технической революции такой возможности явно недостаточно. Необходимы модели, которые тесно увязывали бы классические методы межотраслевого баланса с принципами программно-целевого планирования. Причем речь должна идти о программно-целевом планировании не только собственно в экономике, но и в процессах разработки новых прогрессивных технологий и конструкций.

Второй недостаток обычных макроэкономических моделей состоит в том, что для целей оптимизации они нуждаются в огромной предварительной работе по точному оформлению (в виде последовательностей технологических коэффициентов) всех имеющихся технологических возможностей. Это неправильно, во-первых, с чисто психологической точки зрения, поскольку люди, готовящие такую информацию, играют в общем процессе оптимизации подсобную роль. Активное же творческое начало выбора из предлагаемого набора технологических возможностей наилучшего варианта остается при этом за машиной.

Такое положение никак не стимулирует людей к активному сотрудничеству и приводит к ухудшению качества исходной информации. Ситуация усугубляется тем, что подготовка действительно сколько-нибудь полной исходной информации представляет собой весьма трудоемкий процесс, плохо поддающийся автоматизации. Кроме того, как известно, машина в конце концов из предлагаемых по каждой отрасли многих десятков и сотен технологических возможностей выберет лишь одну. Тем самым еще более усугубляется психологический дискомфорт людей, готовящих исходные данные. Ведь им заранее известно, что лишь незначительная доля подготовленной ими информации войдет в окончательное плановое решение. Особенно неуютно работать в такой системе людям, обладающим экономической интуицией, позволяющей им до точного решения задачи угадать значительную долю полезных технологических вариантов. В процессе подготовки исходных данных их все время не покидает чувство бесполезности большей части их труда, что, разумеется, не может не сказаться на его качестве. Происходит также неоправданное

увеличение размерности задач оптимизации, которого можно избежать при более эффективных методах использования человеческого опыта и интуиции.

Третий недостаток большинства современных макроэкономических моделей заключается в том, что они оперируют с непрерывными величинами, тогда как в реальном планировании часто приходится решать задачу выбора из конечного множества возможных решений. Во многих случаях ограничения множества возможных плановых решений определяют-ся большим числом неформальных условий, которые нецелесообразно (а зачастую и просто невозможно) вводить в модель заранее. Например, плановик может иметь в своем распоряжении лишь конечное число вариантов проектов новых заводов, контрактов на внешнем рынке и т. п.

Учитывая все сказанное, обычные макроэкономические модели оказывается целесообразным применять в основном для предплановых ориентировок на ранних стадиях планирования. При этом для облегчения подготовки исходных данных целесообразно не увеличивать чрезмерно размерность задач как с точки зрения количества условных отраслей, так и количества предлагаемых технологических возможностей. Такие ориентировки помогают плановикам выявить общие тенденции и оттренировать свою интуицию для перехода на основную (заключительную) стадию планирования, целью которой является выработка окончательных плановых решений. На этой стадии следует широко применять диалоговые методы, позволяющие наилучшим образом использовать возможности как машин, так и людей.

Такие методы, кроме собственно оптимизационных программ, должны включать в себя средства управления диалогом с несколькими десятками плановиков, средства ускорения подготовки исходной информации и др. Впрочем, и сами оптимизационные программы должны строиться по-новому, так, чтобы окончательное решение было бы естественным результатом непрерывного многостороннего диалога. Таким образом, речь идет не просто о новой макроэкономической модели, а о новой системе организации всего процесса планирования (с оптимизацией) на макроэкономическом уровне. Такая система была разработана под руководством и при непосредственном участии автора в Институте кибернетики АН УССР. Хотя отправной моделью системы является некоторая статическая линейная макроэкономическая модель, решаемые в ней оптимизационные задачи существенно не-

линейны и используются для многокритериальной оптимизации динамических процессов.

В простейшем случае исходным объектом в системе является статическая модель Леонтьева, хотя ее сравнительно нетрудно заменить линейной статической моделью с совместным выпуском.

Через $A = \|a_{ij}\|$ обозначим квадратную матрицу прямых затрат продуктов в n -продуктовой балансовой модели. Через $B = \|b_{kj}\|$ — прямоугольную $(m \times n)$ -матрицу прямых затрат ресурсо-часов на выпуск одной единицы продукции. Под ресурсами здесь понимаются прежде всего рабочие и специалисты различных профессий, а также производственные здания, машины, земля и другие основные фонды. При этом в большинстве случаев оказывается целесообразным объединять основные (и оборотные) фонды в единый комплексный ресурс, например, ресурс энергетических мощностей, мощностей по выплавке чугуна, производству проката и др. С другой стороны, оборудование, имеющее более универсальное применение (станки, прессы и др.), целесообразно не связывать в комплексный ресурс, имея в виду как возможность их перемещения, так и загрузки выпуском различной продукции. То же самое относится и к трудовым ресурсам.

В соответствии с принятой политикой использования ресурсов (коэффициент сменности, продолжительность рабочей недели и отпусков, величина пенсионного возраста) исчисляется вектор b общего запаса ресурсо-часов по всем видам ресурсов на заданный плановый период T . При этом исходят из тех или иных планов ввода новых мощностей и подготовки специалистов, принятых предварительно для данного периода. Так что часть ресурсов заранее предполагается использовать лишь на некоторой части планового периода. Данные об этих планах представляются в виде законченных блоков, соединенных некоторой системой логико-временных связей. В каждом блоке заключена нормативная и плановая информация о том или ином целостном объекте, способном к выпуску той или иной продукции. В состав этой информации входят суммарные затраты продуктов и ресурсо-часов (по всем видам продуктов и ресурсов), необходимые для сооружения рассматриваемого объекта, сроки начала и конца его строительства и прирост ресурсов, который обеспечивается вводом объекта в строй. Логико-временные связи показывают, какие обеспечивающие объекты (например, дороги) и с каким временным опережением должны быть построены,

чтобы обеспечить нормальное функционирование рассматриваемого объекта.

Через s обозначается вектор конечного выпуска за рассматриваемый плановый период T . Он представляет собою сумму вектора потребления c' (включающего в себя прямую комплектацию жилищного и культурно-бытового строительства), векторов прямой комплектации c_1, c_2, \dots крупных производственных объектов, строящихся в течение рассматриваемого периода, и векторов суммарной прямой комплектации мелких производственных объектов, разбитых по группам.

Задание матриц A, B и векторов v, c определяет некоторый, вообще говоря, еще не сбалансированный план на рассматриваемый период T . Основная идея разработанного метода как раз и состоит в том, чтобы за счет напряженного задания по конечному продукту сделать план заведомо несбалансированным по ресурсам и свести задачу оптимизации к задаче минимизации максимальной плановой невязки. Окончательная ликвидация невязок и, следовательно, получение окончательного сбалансированного плана производится после этого путем пропорционального (по номенклатуре и срокам) уменьшения задания по конечному продукту.

Если, как это принято обычно, обозначить через $A^* = (E - A)^{-1}$ матрицу полных затрат продуктов, то вектор d невязки плана по ресурсам определится формулой

$$d = v - v^* = v - BA^*c.$$

Отрицательные компоненты этого вектора означают дефицит соответствующих ресурсов, а положительные — их избыток.

Специальный язык диалога, реализованный для рабочих мест с дисплеями, позволяет плановикам быстро обозреть ранее рассматривавшиеся варианты планов, узнать общее количество дефицитных ресурсов по каждому варианту, найти максимальные дефициты в абсолютном и в процентном выражении и т. п. Процесс оптимизации заключается в том, что участвующие в диалоге специалисты в соответствии со своими знаниями и областями деятельности готовят и вводят в систему те или иные конкретные предложения, направленные на уменьшение дефицита (прежде всего — дефицита наиболее дефицитного — критического ресурса). Предложения оформляются в виде системы приращений $\Delta A, \Delta B, \Delta c, \Delta v$ матриц A, B и векторов v, c (в абсолютном или

относительном исчислении) и в таком виде вводятся в систему одно за другим для оценки.

Приращение Δd вектора невязки ресурсов может быть вычислено по формуле

$$\Delta d = \Delta v - (\Delta B + BA^* \Delta A)(A^* + \Delta A^*)(c + \Delta c) - BA^* \Delta c. \quad (1)$$

Здесь через ΔA^* обозначено приращение матрицы A^* : $\Delta A^* = (E - A - \Delta A)^{-1} - (E - A)^{-1}$. Заметим, что в реальной практике планирования предложения по улучшению плана, поступающие от специалистов, как правило, затрагивают лишь одну отрасль и, следовательно, могут менять лишь один столбец в матрицах A и B . Подобные «одностолбцовые» приращения мы будем обозначать символами $\Delta_i A$ и $\Delta_i B$, где i — номер изменяемого столбца. В самом сложном случае, когда приращения $\Delta_i A$ и $\Delta_i B$ вызваны вводом новых мощностей, предложение вызывает одновременное изменение векторов v и c .

Если обозначить через $B^* = BA^*$ матрицу полных затрат ресурсов, то формула (1) переписется в виде

$$\Delta d = \Delta v - (\Delta_i B + B^* \Delta_i A)(A^* + \Delta_i A^*)(c + \Delta c) - B^* \Delta c. \quad (2)$$

Поскольку умножение $(m \times n)$ -матрицы на вектор размерности n требует в общем случае порядка $2n^2$ арифметических операций, то в формуле (2) наибольшую сложность представляет вычисление приращения $\Delta_i A^*$ (так как в матрице $\Delta_i B + B^* \Delta_i A$ лишь один столбец отличен от нуля, ее умножение на произвольную матрицу требует лишь n^2 умножений).

В общем случае вычисление ΔA^* требует порядка n^3 операций. Однако в данном случае можно воспользоваться тем обстоятельством, что в матрице A меняются элементы лишь одного (i -го) столбца. В этих условиях имеет место предложенная автором формула

$$\Delta_i A^* = \frac{1}{1 - \alpha_i} A^* \Delta_i A A^*, \quad (3)$$

где скаляр α_i представляет собой элемент матрицы $D_i = A^* \Delta_i A$, стоящий на пересечении единственного ненулевого (i -го) столбца этой матрицы с главной диагональю. Можно показать, что в случае вполне продуктивных матриц A и $A + \Delta_i A$ (для реальных макроэкономических моделей) имеет место неравенство $\alpha_i < 1$.

Легко заметить, что вычисления по формуле (3) требуют лишь $3n^2$ арифметических операций, так что в целом вычис-

ление приращения Δx по формуле (2) требует порядка не более чем $11n^2$ арифметических операций. При больших n это дает существенную экономию времени вычислений, а значит, и времени оценки вводимых в систему предложений. При размерностях порядка нескольких тысяч, характерных для задач реального планирования, экономия во времени выполнения операций достигает трех десятичных порядков и даже более.

Для современных ЭВМ это означает изменение времени реакции системы от нескольких минут до нескольких суток. Принципиальная важность этого факта заключается в том, что только при временах задержки ответа порядка нескольких минут оказывается возможным вести эффективный диалог. При увеличении времени реакции системы до нескольких часов и тем более суток интерес специалистов к продолжению диалога резко снижается и эффективность системы становится весьма малой. Поэтому формулу (3) можно считать одним из ключевых моментов, определяющих успех использования системы.

С точки зрения вычислительной математики предлагаемый метод представляет собою своеобразный аналог метода разложения решения системы линейных уравнений в ряд по степеням малого параметра ε , от которого зависят коэффициенты системы. Такое разложение позволяет ускорить процесс нахождения решения новой системы уравнений, полученной при небольших изменениях всех ее коэффициентов при условии, что известно решение старой системы. В рассматриваемом случае имеем дело с противоположным случаем, когда произвольным изменениям подвергается наибольшая часть коэффициентов исходной системы.

Как уже отмечалось выше, наиболее сложные для обработки предложения связаны с изменениями планов ввода мощностей в той или иной заданной отрасли. Назовем эти предложения предложениями первого рода. Более простыми являются предложения второго рода, затрагивающие лишь матрицы A и B (в одном из столбцов). Эти предложения являются результатом изменения пропорций объемов выпуска неагрегированных продуктов в пределах отрасли, оптимизации использования ресурсов и проведения текущих мероприятий (не связанных с большими расходами) по улучшению нормативов. Наиболее простыми в рассмотрении оказываются предложения третьего рода, затрагивающие лишь вектор c . К ним относятся предложения по изменению

структуры потребления, структуры внешней торговли и политики в отношении страховых запасов тех или иных продуктов.

Нетрудно показать, что оптимизационная задача в классе предложений второго и третьего рода эквивалентна некоторой задаче линейного программирования (правда, в пространстве большей размерности, чем n). Предложения первого рода приводят к существенно нелинейным постановкам оптимизационных задач.

В случае, если возможности оптимизации ограничиваются конечным множеством предложений второго и третьего рода $M = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$, удастся доказать следующую теорему:

если некоторое множество $M_0 = \{P_{i_1}, \dots, P_{i_k}\}$ заданных предложений минимизирует дефицит заданного ресурса, то это множество может быть построено в результате последовательного отбора из множества предложений, уменьшающих этот дефицит.

Тем самым метод перебора предложений по одному в случае одноресурсной задачи приводит к точному решению оптимизационной задачи. Поскольку подобный перебор делается не вслепую, а по указаниям специалистов, обладающих опытом и интуицией, процесс нахождения окончательного решения заканчивается обычно задолго до исчерпания всего списка предложений. При этом все операции производятся в пространстве минимально возможной размерности, которая для n -продуктовой задачи равна n . Тем самым значительно ускоряется процесс решения собственно оптимизационной задачи. Самое же главное состоит в резком уменьшении утомительной работы по подготовке исходных данных. Сами же эти данные готовятся целенаправленно, в условиях поддержания непрерывного интереса к диалогу и поэтому оказываются гораздо более качественными. Диалог фактически инициирует и непрерывно поддерживает процесс выработки предложений по интенсификации развития экономики, в том числе и многих таких предложений, которые вне рамок этого процесса просто не родились бы.

В случае оптимизации по многим ресурсам описанный процесс применяется к ресурсу, относительный дефицит которого является наибольшим. Как только его место займет новый ресурс, процесс оптимизации переключается на него и так далее, пока не будет достигнуто примерное равенство относительных дефицитов у возможно большей группы

наиболее дефицитных ресурсов. После этого сбалансированность плана достигается за счет пропорционального уменьшения заданий по конечному продукту.

Для предложений первого рода теорема о возможности достижения абсолютного оптимума путем последовательного перебора предложений по одному в общем случае оказывается несправедливой. На практике описанный процесс действует достаточно хорошо и в этом случае прежде всего за счет лучшей проработки поступающих в систему предложений.

Очень важно отметить, что сбалансированность плана в целом по периоду планирования T еще не гарантирует его сбалансированности по всем его частям. Поэтому, осуществив балансировку плана по периоду T , разбивают этот период на достаточно мелкие части и производят дополнительную балансировку в пределах каждой из них. При этом возможно некоторое дополнительное уменьшение плановых заданий по конечному продукту. Впрочем, возможность беспроцентных «натурных» займов извне по отношению к рассматриваемой экономической системе позволяет в принципе при сбалансированности плана в целом по периоду T сделать его сбалансированным и по всем его составным частям. Необходимость возврата займов с процентами и колебания цен на мировом рынке внесут, разумеется, свои коррективы. Однако в случае, когда проценты и колебания цен относительно невелики, их учет не скажется существенно на общем объеме конечного продукта за весь плановый период T .

Как уже отмечалось выше, относительно нетрудно обобщить приведенные рассмотрения на процессы с совместным выпуском. В этом случае обычно оказывается нетрудным выделить $n_0 < n$ интуитивно выгодных процессов и n_0 основных продуктов, потребности в которых определяют интенсивности указанных процессов. Остальные $n - n_0$ продуктов будут при этом производиться выбранными процессами в некотором избытке по сравнению с потребностями в них. Оставляя эти продукты временно вне рассмотрения, мы приходим к уже рассмотренной модели (без совместного выпуска) в пространстве размерности n_0 . Дополнительное требование к процессу оптимизации состоит в непрерывном слежении за тем, чтобы выбранные n_0 основных продуктов оставались основными (т. е. чтобы $n - n_0$ неосновных продуктов производились без дефицита). При нарушении этого условия в процессе оптимизации приходится перестраивать выбранный базис основных продуктов и производящих их процессов.

4. АВТОМАТИЗАЦИЯ УМСТВЕННОГО ТРУДА

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЫСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ*

Моделирование сложных мыслительных процессов — одна из самых увлекательных и вместе с тем самых сложных проблем кибернетики. Интерес к этой проблеме вызван двумя обстоятельствами. Во-первых, переход от простого наблюдения работы мыслительного аппарата человека к его активному моделированию позволит гораздо быстрее раскрыть многие тайны, окутывающие и по сей день процесс мышления. Во-вторых, моделирование мыслительных процессов с привлечением современной кибернетической техники служит основой для автоматизации многих видов умственной деятельности человека.

МОДЕЛЬ МОЗГА

В зависимости от целей, которые преследует моделирование мыслительных процессов, оно может осуществляться разными путями. Различают два основных вида такого моделирования — прямое и косвенное, или феноменологическое.

При прямом моделировании основное внимание уделяется естественному мыслительному аппарату — мозгу человека. Моделирование собственно мыслительных процессов получается при этом как результат моделирования этого аппарата. При косвенном моделировании воспроизводится лишь общий ход течения мыслительного процесса — закономерности перехода от одной мысли к другой. Что же касается способов реализации (внутреннего механизма) таких переходов, то они, как правило, имеют при этом мало общего с действительными процессами, протекающими в мозгу человека.

Биологов, изучающих мыслительный аппарат человека, разумеется, должен интересовать в первую очередь прямой

* Природа, 1963, № 2.

метод моделирования. К сожалению, возможности этого метода в настоящее время весьма ограничены. Дело в том, что информационная модель нейрона, учитывающая многие известные в настоящее время тонкости его поведения, требует для своей реализации достаточно сложных радиоэлектронных схем. Огрубляя модель, удастся снизить сложность соответствующих схем, однако при современном состоянии радиоэлектроники подобное снижение возможно лишь до известного предела. Для приблизительной ориентировки можно считать, что самая грубая модель нейрона имеет такой же порядок сложности, как одноламповый радиоприемник. Но при уточнении модели сложность этих схем более уместно сравнивать со сложностью современных многоламповых приемников и телевизоров. Разумеется, заменяя лампы полупроводниковыми или магнитными элементами, можно существенно уменьшить габариты схем, моделирующих нейроны, однако их сложность (измеряемая количеством используемых в схеме деталей) при этом сохраняет прежний порядок. Относительно высокой остается и стоимость подобного рода моделей. А ведь человеческий мозг состоит не менее чем из десяти миллиардов нейронов! Если стоимость модели одного нейрона принять равной всего 10 коп., то лишь на моделирование всех составляющих его нейронов пришлось бы затратить миллиард рублей! А ведь в эту сумму не входят еще расходы на сборку и отладку схем, которые, по-видимому, были бы еще более грандиозными! К тому же в настоящее время далеко не ясно, каким образом должны быть соединены между собой модели нейронов, чтобы образовать систему, действительно моделирующую мозг.

Таким образом, правильно будет, если скажем, что при современном состоянии науки и техники задача прямого моделирования человеческого мозга практически неосуществима. Еще очень много нужно достигнуть в изучении строения мозга и в создании принципиально новых методов изготовления и монтажа радиоэлектронных элементов, чтобы осуществить моделирование этого сложнейшего и совершеннейшего живого органа. Пока же приходится ограничиваться гораздо более скромными целями, моделируя системы нейронов, состоящие из нескольких десятков или, в лучшем случае, из нескольких сот нейронов.

Следует, однако, отметить, что уже такое, весьма скромное по своим масштабам моделирование может принести большую пользу биологам, изучающим мозг и происходящие в нем

процессы на клеточном уровне. Используя модель системы нейронов, биолог может проверять гипотезы, касающиеся закономерностей передачи информации от нейрона к нейрону в различных участках мозга, более детально изучать механизмы возникновения и угасания условных рефлексов и т. д.

Серьезное препятствие на пути широкого использования биологами методов электронного моделирования нейронов и систем нейронов — относительно высокая стоимость соответствующего электронного оборудования и необходимость специального персонала для его эксплуатации, ремонта и наладки. Однако в настоящее время эти препятствия можно легко преодолеть, используя универсальные электронные цифровые машины, установленные в вычислительных центрах или в научно-исследовательских институтах. Дело в том, что функционирование любой модели (не только мозга, но и какого угодно другого объекта) можно имитировать при помощи универсальной цифровой машины, составив и введя в нее соответствующую программу. В эту программу входит цифровое описание модели и условий, в которых она находится, а машина описывает поведение этой модели. От экспериментатора требуется лишь умение составить программу. Искусство программирования вопреки мнению, бытующему среди далеких от математики людей, вовсе не является чем-то непостижимо сложным. Любой человек, имеющий среднее образование, может при желании за несколько месяцев научиться хорошо программировать.

Научившись же этому, экспериментатор получает возможность легко подготавливать и проводить на универсальных цифровых машинах эксперименты со столь сложными моделями, каких ему никогда не удалось бы создать своими руками. Расходы при таком подходе к моделированию сводятся, по существу, лишь к оплате машинного времени и не идут ни в какое сравнение с затратами на изготовление аппаратуры, сходной по функциям с моделируемым органом.

К сожалению, биологи все еще крайне недостаточно используют новую мощную технику эксперимента, которая создана благодаря успехам современной кибернетики и вычислительной техники. В частности, немногочисленны пока и попытки моделирования на универсальных цифровых машинах отдельных нейронов и систем нейронов, хотя уже первые, пока еще робкие эксперименты, показывают большие возможности, открывающиеся на этом пути. В качестве примеров успешного использования современных электронных вычис-

лительных машин для моделирования элементов мыслительного аппарата человека можно указать следующие факты: в США изучалось поведение системы из нескольких сот связанных между собой относительно грубых моделей нейронов. Недавно на одной из вычислительных машин Института кибернетики в Киеве было осуществлено моделирование хотя и одного нейрона, но зато с учетом многих тонкостей его поведения.

Несмотря на огромную принципиальную важность прямого моделирования мыслительного аппарата человека, необходимо отметить, что основой для реальной автоматизации мыслительных процессов в настоящее время могут служить не прямые, а косвенные методы. Причину этого обстоятельства нетрудно понять, если вспомнить, что прямое моделирование, даже при условии использования электронных цифровых машин, может охватить пока элементы, состоящие из нескольких сот или в крайнем случае из нескольких тысяч нейронов. Всякий же сколько-нибудь сложный вид умственной деятельности человека использует одновременно гораздо большее число нейронов головного мозга. Да и обязательно ли нужно при автоматизации сложных мыслительных процессов слепо следовать естественному мыслительному аппарату — мозгу человека? История техники знает немало примеров, когда слепое копирование природы не только не двигало вперед технику, но зачастую и тормозило ее развитие. Достаточно вспомнить, что первые паровозы пытались снабдить «ногами», а на заре авиации много сил и энергии отняли попытки подражать маховым движениям крыльев птиц. Не следует забывать, что материальная основа сегодняшнего моделирования мыслительных процессов — электронные элементы — качественно отлична от материальной основы живых нейронов — живого белка. Механизм же моделирования должен отражать в первую очередь специфику его материальной основы. Те формы организации взаимных связей и передачи информации, которые хороши для живых нейронов, вовсе не обязаны быть хорошими для моделирующих их электронных элементов, и наоборот.

АЛГОРИТМ И КОДИРОВАНИЕ

На современном этапе развития кибернетики особое значение приобрели формы автоматизации различных участков умственной деятельности человека, основанные на их

так называемом алгоритмическом описании. Понятие алгоритма, возникшее первоначально в математике, приобрело в настоящее время гораздо более универсальное значение. Алгоритмом называют любую конечную систему правил, позволяющих производить однозначное преобразование информации, заданной в обобщенной буквенной форме. Добавление термина «обобщенная» применительно к буквенной информации означает, что речь идет не обязательно о буквах, латинского или какого-нибудь другого применяемого для записи лексической информации алфавита. В общей теории алгоритмов рассматриваются обобщенные алфавиты, состоящие из любых индивидуально различимых знаков или символов. Существенно лишь, чтобы общее число различных знаков, составляющих алфавит, было конечным.

Благодаря столь широкому толкованию понятия алфавита, любой вид информации, с которым человек встречается на практике, может быть представлен в (обобщенной) буквенной форме. Процесс такого представления называется обычно кодированием. Термин «кодирование» (или «перекодирование») относят также и к процессу перезаписи при помощи какого-либо алфавита информации, заданной первоначально в одном определенном алфавите.

При кодировании, как правило, стремятся пользоваться алфавитами с относительно небольшим числом букв. Например, поскольку общее число различных позиций на шахматной доске конечно, можно было бы кодировать каждую позицию специально отведенным для нее символом — обобщенной буквой. Однако алфавит при этом был бы чудовищно велик. Поэтому на практике, как известно, предпочитают кодировать шахматные позиции при помощи алфавита, состоящего из части букв латинского и русского алфавитов и восьми цифр (от 1 до 8).

Другой пример. Составляя рисунки заданного формата из черных и белых квадратиков фиксированного размера, можно получить конечное (хотя обычно и очень большое) число различных рисунков. Однако кодирование рисунков, использующее отдельную букву для каждого рисунка, практически неосуществимо (если только буквами не считать сами рисунки!). Более целесообразно поэтому ввести лишь две различные буквы для обозначения черного и белого квадратиков и кодировать рисунки последовательностями, составленными из этих букв (необходимо, разумеется, пред-

варительно фиксировать порядок обегания рисунка, например, обегание по строкам или по столбцам).

При кодировании информации в обобщенных алфавитах возникают обобщенные слова, т. е. конечные последовательности обобщенных букв. Поскольку знак раздела между словами может быть включен в обобщенный алфавит, то любую конечную последовательность обобщенных слов можно считать одним словом. Так обычно и поступают в общей теории алгоритмов. Для целей же более естественного моделирования мыслительных процессов целесообразнее представлять себе информацию записанной в виде совокупности отдельных слов.

Имея в виду общность понятия алфавита, фактически любой вид умственной деятельности человека можно представить в виде преобразования буквенной информации. Если при этом к одной и той же входной информации человек всегда относит одну и ту же выходную информацию, а процесс преобразования входной информации в выходную описывается конечным (хотя, быть может, и очень большим) числом правил, то мы имеем дело с алгоритмом.

Пусть, например, мы имеем дело с шахматной игрой, входная информация представляет собой позицию перед очередным ходом, а выходная информация — позицию после выполнения этого хода. Легко понять, что одни лишь правила шахматной игры сами по себе не составляют алгоритма, поскольку они не определяют вообще говоря, однозначным образом очередной ход. Однако если дополнить эти правила специальными правилами, позволяющими оценивать различные позиции и выбирать каждый раз наилучший (с точки зрения данной системы правил) ход, то мы получим некоторый алгоритм игры в шахматы. Ясно, что существует не один, а много различных шахматных алгоритмов. Относительно нетрудно строить алгоритмы, моделирующие игру шахматистов низкой и даже средней квалификации. Гораздо труднее описать правила для моделирования игры сильных шахматистов. Эта проблема привлекает в настоящее время внимание целого ряда математиков (особенно в США) и, по видимому, будет решена в ближайшие годы.

Что же дает алгоритмизация того или иного вида умственной деятельности? Оказывается, что на современном уровне развития кибернетики алгоритмическое описание мысленного процесса дает, как правило, возможность его моделировать и автоматизировать на базе уже существующих универсальных электронных цифровых машин.

Дело в том, что любую буквенную информацию нетрудно закодировать цифрами (для этого достаточно, например, заменить каждую букву ее порядковым номером в алфавите). После же этого любой алгоритм можно запрограммировать, т. е. записать в виде некоторой последовательности команд, выполняемых электронной цифровой машиной. Введя указанную последовательность (так называемую программу) в машину, мы заставляем ее реализовать исходный алгоритм.

Если первый этап автоматизации — алгоритмическое описание процесса — выполнен достаточно тщательно, то второй этап (программирование) представляет собою уже чисто техническую работу, хотя, быть может, и весьма громоздкую. Критерием, позволяющим судить о тщательности выполнения алгоритмического описания, может служить следующий контрольный опыт: если человек, совершенно незнакомый с алгоритмируемым процессом (например, не умеющий играть в шахматы), может без всякой подготовки, руководствуясь лишь описанной системой правил (пусть очень медленно), выполнять этот процесс, то этап алгоритмирования может считаться выполненным удовлетворительно, а соответствующая система правил — подготовленной к программированию. Природа же указанных правил может быть любой: наравне с математическими формулами годятся правила, сформулированные подобно правилам грамматики или правилам уличного движения. Важно лишь, чтобы при пользовании этими правилами не возникало никаких двусмысленностей или неясностей (чего, например, о современных правилах уличного движения полностью сказать нельзя).

ВОЗМОЖНА ЛИ АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ТВОРЧЕСТВА?

Эффект автоматизации мыслительных процессов определяется прежде всего огромной скоростью и точностью работы современных электронных цифровых машин. Именно благодаря преимуществу в скорости машина оказывается способной выполнять соответствующую работу лучше, чем человек, составивший для нее программу. Например, при игре в шахматы, благодаря тому, что машина способна просматривать в единицу времени гораздо большее число вариантов, чем человек, она может регулярно обыгрывать составителя введенной в нее шахматной программы.

Возникающий подобным образом эффект кажущегося интеллектуального превосходства машины над человеком дает возможность не просто автоматизировать ту или иную сферу умственной деятельности человека, но и резко поднять производительность труда в этой сфере. Необходимость же в подобном росте производительности труда ощущается сегодня в целом ряде областей умственной деятельности.

Общеизвестными примерами являются научные и инженерные расчеты, техническое проектирование, планирование народного хозяйства, оптимальное управление производственными процессами, диспетчерская и информационная служба. В настоящей статье мы остановимся на другом примере, а именно на проблеме автоматизации научного творчества.

Речь идет не об автоматизации вспомогательных работ, отсутствующих почти каждому научному исследованию, как, например, выполнение трудоемких расчетов (это успешно делается уже сегодня), поиск и реферирование необходимой литературы (методы автоматизации участка работы успешно разрабатываются и найдут применение в ближайшем будущем). Нас же интересует сам процесс научного творчества и в первую очередь — в области точных наук (математики, физики и т. д.).

В качестве примера рассмотрим математику. Процесс научного творчества здесь многогранен. Он включает введение новых понятий, постановку новых проблем, доказательство теорем, построение примеров и контрпримеров и т. д. Выделим из перечисленных задач лишь одну, а именно доказательство (или опровержение) уже сформулированных теорем. Существует широко распространенное мнение, что именно эта задача составляет основу научного творчества в области математики. Трудоемкость и сложность этой задачи в общем случае несомненна; если не считать времени, затрачиваемого на ознакомление с литературой, то поиски доказательства или опровержения теорем занимают львиную долю в бюджете времени каждого математика. Существуют примеры, когда на поиски доказательства одной теоремы затрачивались многие десятки лет упорного труда талантливых ученых. Ясно, что резкое увеличение производительности труда при доказательстве новых теорем (основанное на автоматизации) не только заметно ускорило бы темпы научного прогресса, но и дало бы возможность решать такие проблемы, которые «невооруженному» человеческому уму просто недоступны.

В настоящее время, когда автоматизация доказательств делает лишь первые робкие шаги, разумеется, преждевременно говорить о моделировании универсальных способностей доказывать теоремы во всех областях современной математики. Наиболее целесообразно на первых порах выделять относительно узкие области математики, составлять отдельные программы доказательств для каждой из них. Первые шаги в этом направлении уже сделаны. Так, известный математик Хао-Ванг, работающий в настоящее время в США, разработал программу, при помощи которой универсальная электронная цифровая машина за несколько минут доказала около четырехсот теорем из известного труда по математической логике «Principia Mathematica». Эта программа открыла путь к доказательствам и новых, никем ранее не доказанных теорем математической логики. В Институте кибернетики АН СССР разработана программа для доказательства или опровержения произвольных теорем относительно корней вещественных полиномов (на основе так называемого алгоритма Тарского).

Положение, однако, осложняется тем обстоятельством, что далеко не для всех областей современной математики оказывается возможным построить универсальные алгоритмы доказательства или опровержения всех теорем, какие только можно сформулировать в рамках данных областей. Отсутствие подобного, так называемого универсального разрешающего алгоритма доказано, например, для арифметики натурального ряда чисел. В силу знаменитой теоремы Геделя в арифметике натуральных чисел можно сформулировать такие теоремы, которые нельзя ни доказать, ни опровергнуть!

Этот результат кажется на первый взгляд весьма мало обнадеживающим с точки зрения перспектив автоматизации доказательства теорем. Однако в действительности дело обстоит вовсе не так плохо. Дело в том, что и человек не может «запрограммировать» у себя в мозгу (в результате процесса обучения) бесконечное число методов, необходимых для установления истинности или ложности всех теорем в неразрешимых теориях (т. е. в таких теориях, в которых отсутствует универсальный разрешающий алгоритм). В результате даже самый изощренный математик при поисках доказательства теорем в неразрешимых теориях пользуется фактически не универсальными, а частными разрешающими алгоритмами. Хотя эти алгоритмы и не способны дать ответы на все

вопросы в рамках рассматриваемой теории, они тем не менее на практике дают обычно хорошие результаты. Программируя эти алгоритмы, мы решаем задачи автоматизации доказательств в неразрешимых теориях, если не в принципиальном, то, во всяком случае, в практическом аспекте.

Необходимо подчеркнуть, что механизм получения логических следствий из известных результатов, являющийся основой автоматизации доказательств, хорошо известен и может быть относительно просто запрограммирован. Однако само по себе это не может обеспечить действенную автоматизацию, так как приводит, как правило, к столь большому перебору различных возможных вариантов поиска доказательства, что такой перебор оказывается недоступным даже для современных электронных цифровых машин, выполняющих сотни тысяч операций в секунду. Главная задача в построении доказывающих алгоритмов состоит поэтому в уменьшении перебора на основе более глубокого проникновения в методы математического мышления и особенно той его части, которую принято называть математической интуицией.

Здесь напрашивается аналогия с шахматной игрой. Набор фактов, с которыми математик имеет дело на каждом этапе доказательства теоремы, аналогичен шахматной позиции, а правила логики, при помощи которых выводятся следствия из известных фактов, аналогичны правилам, по которым ходят шахматные фигуры. Придерживаясь одних лишь последних правил, практически невозможно прийти к выигрышу в партии, насчитывающей несколько десятков ходов, точно так же при помощи одних лишь правил логики практически невозможно доказать сколько-нибудь сложную теорему. И в том и в другом случаях препятствием на пути к успеху будет необходимость рассмотрения слишком большого числа вариантов. Поэтому приходится ставить промежуточные цели, достижение которых возможно за меньшее число ходов (шахматных или логических соответственно).

В шахматах постановка подобных целей определяется стратегическими правилами, основанными на оценке позиций. Что же касается теории доказательств, то в отличие от шахмат соответствующие правила здесь не сформулированы даже в первом приближении.

Потенциальные возможности автоматизации имеются и в других областях научного творчества, в частности, в постановке новых проблем и в построении новых теорий, обобщающих совокупность фактов. Однако в этом направлении

сделано пока еще столь мало, что соответствующие проблемы можно считать лишь поставленными.

Несмотря на всю важность чисто алгоритмического подхода к проблеме автоматизации научного творчества, нельзя не отметить известной его узости. Дело в том, что при таком подходе исключается возможность проявления какой-либо случайности при формировании ответа. Вне рассмотрения оказывается и такое важное свойство мозга, как способность совершенствовать свои ответы в процессе работы, по мере накопления опыта. Можно, однако, так расширить понятие алгоритма, что оно будет включать в себя как алгоритм со случайными переходами, так и самосовершенствующиеся системы алгоритмов. Такие алгоритмы в широком смысле слова могут столь же успешно программироваться и выполняться универсальными электронными цифровыми машинами, как и рассматривавшиеся ранее алгоритмы в узком смысле слова.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Следует отметить одно принципиальное отличие самосовершенствующихся систем автоматизации доказательств от систем, использующих жесткие, неизменные алгоритмы. Если такие системы рассматривать как изолированные, не взаимодействующие с внешней средой, то возможность самосовершенствования не вносит ничего принципиально нового. То же самое будет и тогда, когда воздействия внешней среды на систему могут рассматриваться как результат работы некоторого алгоритма. В случае же «неалгоритмической» внешней среды положение существенно меняется. Для самосовершенствующейся системы алгоритмов, взаимодействующих с подобной средой, может оказаться возможным, например, доказательство (за бесконечное время) всех истинных теорем какой-либо неразрешимой теории, что заведомо невозможно для любой жесткой системы алгоритмов.

Практически необходимость перехода к самосовершенствующимся системам возникает обычно в том случае, когда трудно найти жесткий алгоритм, решающий заданную проблему, а алгоритм нахождения требуемого алгоритма является хотя и весьма трудоемким, но простым с точки зрения его описания. В таком случае программируется не сам рабочий алгоритм, а алгоритм поиска или уточнения рабочего алго-

ритма. Задача же фактического нахождения рабочего алгоритма (и последующей работы по нему) поручается при этом машине.

Классический пример подобной ситуации — это задача распознавания зрительных образов. Если попытаться найти алгоритм (систему правил), позволяющий отличать женские лица от мужских, то нетрудно убедиться, что эта простая на первый взгляд задача оказывается в действительности очень сложной. Между тем человеческий мозг относительно легко справляется с этой задачей, но, разумеется, подобная легкость появляется лишь в результате более или менее длительного процесса приспособления зрительного центра, происходящего в раннем возрасте.

Естественно попытаться моделировать указанный процесс приспособления, основываясь на тех или иных гипотезах относительно механизма подобного приспособления. К настоящему времени предложено много моделей такого механизма. Все эти механизмы в более или менее явной форме используют идею запоминания одного или нескольких изображений каждого класса изображений в качестве эталонов для всех классов. Новые изображения сравниваются с эталонами и в зависимости от их близости к тем или иным эталонам относятся к соответствующему классу.

В Институте кибернетики АН УССР разработана и построена специальная приставка к универсальной электронной цифровой машине — так называемый универсальный читающий автомат. Эта приставка позволяет вводить в машину произвольные рисунки с учетом не только черных и белых полей, но и различных полутонов. Благодаря наличию универсальной цифровой машины становится возможным быстрое моделирование и опробование различных способов распознавания образов, включая системы с самосовершенствованием и самообучением. В настоящее время разработан и испытан целый ряд таких систем. Некоторые из них, например, система, обучающаяся распознаванию геометрических фигур, довольно хорошо имитируют приспособительные функции мозга человека в части такого вида деятельности.

В связи с проблемой обучения распознаванию зрительных образов заслуживает внимания специальная алгоритмическая схема для решения указанной проблемы, которая была предложена американским ученым Ф. Розенблаттом. Эта система, названная перцептроном, включает в себя, помимо

чувствительных элементов (сетчатки), которые воспринимают изображение, некоторое множество довольно грубых моделей нейронов, связанных с сетчаткой случайным образом. Часть входных каналов нейронов является возбуждающими, а часть — тормозящими. Когда суммарное возбуждение нейрона превосходит его суммарное торможение на некоторую пороговую величину, нейрон возбуждается и передает некоторую величину, называемую весом нейрона, на специальное устройство, суммирующее веса всех подключенных к нему возбужденных нейронов. Таких сумматоров имеется несколько, и нейроны делятся на несколько групп, в соответствии с тем, к какому сумматору они подключены.

Показание каждого сумматора интерпретируется как «степень похожести» показываемого перцептрону изображения на образ (класс изображений), заранее поставленный в соответствие данному сумматору. Специально введенный в схему перцептрона механизм поощрения увеличивает вес тех нейронов, которые возбуждаются изображением, относящимся к тому же образу, что и соответствующий этим нейронам сумматор. В противном же случае вес нейронов уменьшается. В результате моделируется некоторый приспособительный процесс: веса полезно работающих нейронов увеличиваются, а веса нейронов, которые не помогают или даже мешают правильной работе перцептрона, уменьшаются. Продолжая подобный процесс обучения, можно добиться, чтобы перцептрон научился правильно классифицировать изображения по заранее определенным группам (образам).

Возможен и несколько видоизмененный режим работы перцептрона (называемый режимом самообучения), при котором группировка изображений, к которой нужно стремиться, не задается заранее, а определяется перцептроном в процессе работы.

Проведенное автором теоретическое изучение работы перцептрона показало, что примененная в нем организация процесса обучения и особенно процесса самообучения далеко не всегда приводит к хорошим результатам. Многие важные черты, свойственные обучению и самообучению человека (применительно к задаче распознавания образов), отражены в схеме перцептрона плохо либо совсем не отражены. В настоящее время есть возможность гораздо более рационального моделирования тех процессов, на которые был рассчитан перцептрон. Некоторые из этих возможностей уже нашли свое воплощение в реальных программах, разработанных

и опробованных в Институте кибернетики АН УССР и в ряде других институтов.

В целом работы по моделированию процессов распознавания образов развиваются в настоящее время достаточно быстрыми темпами. В первую очередь это касается зрительных образов и в меньшей степени — речевых сигналов. А ведь работа по распознаванию такого рода образов составляет значительную долю (хотя и выполняемую обычно бессознательно) работы человеческого мозга, что видно хотя бы из сравнения объемов зрительного и слухового центров с другими участками мозга.

ОПЫТЫ ОБУЧЕНИЯ МАШИН

В последнее время идеи самоорганизации и самосовершенствования начинают вторгаться и в процессы моделирования таких видов умственной деятельности, как логическое мышление, обучение языку и т. п. Особый интерес представляют семантические построения, обеспечивающие автоматизацию распознавания смысла и обучения такому распознаванию. Опыты такого рода были успешно проделаны в Институте кибернетики АН УССР в Киеве.

Первоначальная идея автора, положенная в основу автоматизации процесса обучения распознаванию смысла фраз, состояла в следующем. Предположим, что рассматриваются лишь такие фразы, которые имеют простейшую грамматическую конструкцию, а именно подлежащее — сказуемое. Пусть далее дан какой-либо набор существительных и глаголов, из которых будут составляться подобные фразы. Первоначально некоторый набор фраз указанного типа составляется человеком (учителем), причем при их составлении ограничиваются лишь такими фразами, которые, по мнению учителя, имеют смысл. Эти фразы одна за другой вводятся в машину и запоминаются ею.

Процесс запоминания организован таким образом, что вначале машина осуществляет «голую зубрежку» осмысленных фраз, т. е. запоминает их без всякого изменения. Однако при известных условиях характер запоминания изменяется. Это происходит тогда, когда число фраз с одним и тем же сказуемым превосходит некоторую фиксируемую заранее величину — так называемый коэффициент терпения.

Пусть, например, коэффициент терпения равен двум, а машине после двух осмысленных фраз «профессор думает» и

«студент думает» была сообщена новая осмысленная фраза «мальчик думает». В таком случае машина, вместо того чтобы зазубрить эту новую фразу, вводит новое понятие для обозначения класса всех думающих и запоминает, что профессор, студент и мальчик относятся к этому классу.

Подобная перестройка характера запоминания не приводит пока еще к появлению у машины каких-либо новых сведений о множестве всех осмысленных фраз по сравнению с тем, что сообщил ей учитель. Принципиально иной эффект достигается введением нового процесса, называемого процессом экстраполяции осмысленности. Этот процесс также управляется неким коэффициентом, называемым коэффициентом осторожности. Для того чтобы понять сущность указанного процесса, предположим, что коэффициент осторожности равен двум, а машиной уже образован класс думающих. Если теперь машине сообщить, что два каких-либо представителя класса думающих, скажем, профессор и мальчик, могут также говорить, то машина экстраполирует заключение, что все думающие являются вместе с тем и говорящими. В результате машина делает правильный вывод, что фраза «студент говорит» является осмысленной фразой, хотя бы она и не содержалась в числе осмысленных фраз, на которых было проведено обучение машины.

Разумеется, в результате описанного процесса экстраполяции осмысленности машина может прийти и к неверным выводам. Если бы, скажем, в уже рассмотренном примере первоначальный класс был бы образован не по признаку сочетаемости с глаголом «думать», а по признаку сочетаемости с глаголом «стоять», то в результате процесса экстраполяции машина пришла бы к неправильному заключению, что все стоящие являются вместе с тем и говорящими.

Чтобы уменьшить число подобных ошибок, перед экстраполяцией машина составляет предварительно несколько фраз с глаголом «говорить», выбирая существенные (подлежащие) из класса стоящих случайным образом. Сообщив эти фразы учителю, машина спрашивает, осмысленны ли они? И лишь получив на этот вопрос утвердительный ответ, машина производит экстраполяцию.

На основе описанной идеи в Институте кибернетики АН УССР была построена программа для вычислительной машины «Киев», при помощи которой были проведены опыты по обучению машины смыслу фраз не только простейшей, но и более сложной грамматической конструкции. Во время

этих опытов машина сама создавала понятия «человек», «мебель» и др.

Интересно отметить, что, меняя значения некоторых параметров (аналогичных описанным выше коэффициентам терпения и осторожности), введенных в программу, удается моделировать самые различные темпераменты и типы обучения — от голый зубрежки до склонности к крайне поспешным выводам и заключениям. Впрочем, оба этих крайних случая приводят к замедлению процесса обучения (в первом случае из-за отсутствия экстраполяции, а во втором — из-за частых ошибок и вызываемой ими необходимости перестройки классов). Существуют (находимые пока опытным путем) наилучшие значения указанных коэффициентов, при которых процесс обучения происходит в среднем наиболее быстро. Эти значения, впрочем, сильно зависят от первоначального набора слов, из которых строятся фразы.

Из-за небольшого объема памяти машины «Киев» опыты по обучению проводились с весьма бедным словарем, насчитывающим всего около ста слов. При наличии существенно большей памяти дальнейшее развитие описанных принципов может привести к построению программ для обучения машины тому или иному человеческому языку с учетом не только его синтаксиса, но и семантики.

Для изучения возможностей самоорганизующихся систем большой интерес имеют опыты по моделированию биологической эволюции. Опыты такого рода были проделаны в Институте кибернетики АН УССР на универсальной электронной цифровой машине «Киев». Моделировался некоторый весьма просто устроенный «мир», в котором действовал «закон природы», управлявший перемещением «пищи» из одних участков этого «мира» в другие. Обитающие в описанном мире «живые существа» моделировались в виде программно реализованных автоматов.

Каждый автомат снабжается двумя счетчиками — счетчиком «жизни» и счетчиком «голода». Первый счетчик отсчитывает число моментов времени, прошедших со времени «рождения» автомата, а второй — число моментов времени, отделяющих автомат от последнего момента, когда автомат находился на участке пространства, снабженном «пищей». При достижении счетчиком «жизни» или счетчиком «голода» некоторых определенных заранее значений автомат «умирал», т. е., попросту говоря, исключался из дальнейших рассмотрений.

Перемещения автомата в «мире» определялись его состояниями, а переход автомата из одного состояния в другое осуществлялся в зависимости от состояния ближайших к нему участков «мира» (т. е. от наличия или отсутствия в них «пищи» и других автоматов). Специальная матрица, управляющая подобными переходами, первоначально задается случайно, а впоследствии испытывает еще небольшие случайные изменения («мутации») в процессе «размножения» автоматов. Был выбран простейший вид размножения путем деления, причем одна из образовавшихся половинок полностью наследовала структуру исходного автомата, а со второй происходило то же самое, за исключением случайной мутации в матрице переходов. Момент деления определялся подходящим «возрастом» автомата (показанием его счетчика «жизни»), относительно малым показанием счетчика «голода» и наличием свободных соседних ячеек для вновь образующихся в результате деления автоматов.

В результате проведенных опытов имитировался процесс естественного отбора и приспособления автоматов к выбранному «закону природы». Этот процесс может быть при желании интерпретирован так же, как процесс «познания» коллективом автоматов соответствующего «закона природы», ибо в результате естественного отбора возникают автоматы, в структуре матрицы переходов которых все более и более отражается выбранный «закон природы».

Принципиально не видно никаких ограничений для того, чтобы с помощью подобных моделей, использующих крайне простую исходную структуру автоматов, но весьма сложный процесс развития «природы», можно было бы получить весьма высокие формы приспособления к указанному процессу (вплоть до возникновения и совершенствования моделей человеческого сознания и сознательной человеческой деятельности).

И все же в настоящее время сделаны лишь первые шаги в построении общей теории самоорганизующихся систем, как основы моделирования мыслительных процессов. Несомненно, что успехи этого направления в будущем помогут объяснить многие загадки мышления и создадут прочную базу для автоматизации сложных мыслительных процессов.

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ В БИОНИКЕ *

Задача распознавания образов принадлежит к числу важнейших и вместе с тем наиболее трудных задач бионики.

Важность этой задачи обусловливается чрезвычайно большим многообразием приложений. Это не только распознавание зрительных образов или звуков речи. Сегодня проблема распознавания образов включает в себя такие вопросы, как, например, распознавание производственных ситуаций, синтаксически правильных построений в естественных и искусственных языках, распознавание смысла фраз и т. п.

Однако проблема распознавания зрительных образов до настоящего времени продолжает занимать ведущую роль в общей проблеме распознавания образов как по своему практическому значению, так и по глубине разработки вопроса. Практический аспект проблемы касается прежде всего задачи автоматизации ввода в электронные цифровые машины цифровой и буквенной информации, чертежей, рисунков, фотографий с помощью так называемых читающих автоматов. Разумеется, далеко не все работы по читающим автоматам могут быть отнесены к бионике. В частности, интересные работы В. А. Ковалевского (1962) не являются в полной мере бионическими, хотя и приводят к хорошим практическим результатам (надежность распознавания по сравнению с обычным человеческим восприятием повышается на целый порядок).

Чисто бионический аспект проблемы лежит прежде всего в области распознавания нестандартных изображений на основе тех или иных обучающих процедур. Первой существенной трудностью, которая встает при таком подходе к делу, является огромное количество возможных образов. Хорошо известно, что для сетчатки, состоящей из N двухпозиционных элементов, общее количество различных образов равно 2^{2^N} . Поскольку при постановке вопроса в приемлемой для практики форме величина N должна измеряться по крайней мере сотнями, то количество всех возможных образов будет чудовищно велико.

Неудивительно поэтому, что были предприняты попытки ввести те или иные ограничения, которые позволили бы резко уменьшить число подлежащих рассмотрению образов. Так,

* В кн.: Бионика. М.: Наука, 1965, с. 13—17.

Браверман (1962) предложил ограничиться рассмотрением лишь так называемых компактных образов. К сожалению, в случае сетчатки, составленной из двухпозиционных элементов, компактных образов практически (исключая лишь случай образов, состоящих из всех или почти всех изображений) не существует. Более удачной в этом смысле является гипотеза *N*-экстраполируемости образов, предложенная автором (1962).

Ясно, однако, что сужение понятия образа в направлении максимального приближения его к образам, легко распознаваемым человеком, требует более тонкого анализа свойств нейронных сетей в соответствующих распознающих центрах головного мозга. Подобное свойство «человечности» образа зависит, разумеется, от вида восприятия: так, легко распознаваемые человеком звуковые образы могут оказаться трудно распознаваемыми при переводе их (тем или иным фиксированным способом) в зрительную форму, и наоборот. Не исключено, что систематическое изучение и использование подобной избирательности органов чувств позволит в некоторых случаях упростить решение задачи обычного (неавтоматического) распознавания. Возможно, например, что представление электрокардиограмм или энцефалограмм в звуковой, а не в визуальной форме позволит быстрее и точнее распознавать скрытые пороки работы сердца или соответственно мозга.

Что же касается проблемы автоматического распознавания образов, то в бионическом плане решение этой проблемы тесно связано с задачей моделирования сетей нейронов.

Не следует думать, разумеется, что при таком моделировании нужно слепо копировать природу абсолютно во всех ее проявлениях. Разумный уровень точности моделирования определяется прежде всего технологическими факторами. В частности, точность моделирования нейронных сетей может и должна повышаться соразмерно с прогрессом технологии изготовления радиоэлектронных устройств. Поэтому, оставляя пока более тонкие свойства обычных «живых» нейронов, можно ограничиться рассмотрением сетей нейронов в том смысле, как они понимаются современной теорией автоматов. При этом каждый нейрон представляется в виде порогового элемента либо с непрерывными, либо с двоичными входными и выходными сигналами.

Возникающие подобным образом идеализированные нервные сети можно разделить на полностью дискретные, так

называемые логические сети и на сети, часть параметров которых может пробегать то или иное непрерывное множество значений (чаще всего такое множество составляют все вещественные числа, заключенные между 0 и 1). Следует отметить, что в задаче распознавания образов полностью дискретным цепям до сих пор уделялось недостаточное внимание. Между тем этот вопрос заслуживает более тщательного изучения.

Дело в том, что булевы функции «нейтронного» типа, реализуемые пороговыми элементами, обладают рядом свойств, интересных с точки зрения задачи распознавания образов. Действительно, любая система булевых функций, состоящая из n функций f_1, f_2, \dots, f_n от n переменных (x_1, x_2, \dots, x_n) , задает некоторое преобразование двоичной n -элементной сетчатки в себя. При каких условиях такое преобразование будет взаимно-однозначным? Легко понять, что одним из необходимых условий является равенство числа единиц и числа нулей в таблице значений любой из функций f_1, f_2, \dots, f_n . Этому условию удовлетворяет всякая пороговая булева функция с $2m-1$ входными каналами, если число q запрещающих входов и порог p удовлетворяют соотношению $q+p=m$ ($m=1, 2, 3, \dots$).

Далее, из пороговых элементов можно строить правильные (многослойные) цепи, осуществляющие перевод ряда характерных для «человеческих» зрительных образов признаков из сложно кодируемой (на исходной сетчатке) формы в просто кодируемую форму. Возникает естественное предположение о том, что «человечность» образов связана с простотой кодирования характерных для них признаков в верхних слоях соответствующих распознающих нейронных сетей. Условие же взаимной однозначности преобразования в каждом слое (а, следовательно, и во всей сети) сохраняет возможность распознавания (хотя и более трудным путем) сложно кодируемых признаков непривычных для человека образов.

В связи с естественным требованием простоты исходных гипотез о закономерностях строения распознающих сетей представляет особый интерес задача изучения случайно организованных многослойных цепей нейронов. При этом изучение регулярных (правильно организованных) сетей делает естественным предположение, что достаточно хорошие результаты должны получиться в сетях, где вероятности подсоединения входов каждого нейрона $(i+1)$ -го слоя к выхо-

дам нейронов i -го слоя распределены не по равномерному, а по нормальному закону (слои предполагаются лежащими один над другим в виде прямоугольных площадок достаточно больших размеров, чтобы было возможно пренебречь краевым эффектом).

Еще одна особенность нейронных сетей, заслуживающая внимания с точки зрения распознавания образов,— это возможность простого осуществления однородного глобального механизма регулирования среднего уровня активности нейронов, но так, чтобы в каждом случае активной была бы примерно половина всех нейронов сети. В нейронных сетях этого можно достигнуть за счет одновременного изменения в ту или иную сторону порогов возбуждения всех нейронов. Точное выполнение условия половинной активности потребует, разумеется, перехода от дискретных к непрерывным сетям.

Интересные результаты могут быть получены также при использовании для целей распознавания образов моделей, основанных на идеях машины условной вероятности (Аттли, 1956) и машины условных рефлексов (Глушков, 1962). В задачах распознавания синтаксических и семантических (языковых) образов особую роль приобретает понятие регулярно события и его связи с понятием конечного автомата.

Что же касается зрительных образов, то бионический аспект задачи их распознавания наиболее ярко проявляется в развитии работ по теории перцептрона, вступившей сейчас в новый этап своего развития. Как известно после первых работ Ф. Розенблатта, породивших большие надежды, наступила пора разочарований. Схема трехслойного перцептрона, предложенная Розенблаттом, оказалась весьма ограниченной в своих возможностях, а анонсированные Розенблаттом результаты в большей своей части оказались ошибочными.

В работах Джозефа (1960), Глушкова (1962) и Розенблатта (1962) были получены следующие результаты, выяснившие с достаточной ясностью возможности трехслойных перцептронов.

1. В значительной мере развенчана гипотеза о существовании у перцептронов спонтанной независимой организуемости, так называемый режим самообучения.

2. Показана недостаточность первоначально предложенных Розенблаттом механизмов поощрения в режиме обучения и необходимость перехода к системам с коррекцией ошибки.

3. Установлено, что для возможности осуществления произвольной классификации в трехслойных персептронах требуется огромное число A -элементов (не менее 2^n A -элементов при n двоичных рецепторах).

4. Оказалось, что хотя при переходе на режим обучения с коррекцией ошибок всякая допустимая бинарная классификация может быть достигнута при обучении случайными последовательностями достаточно общего вида. Но при этом требуется, как правило, неоправданно большое число экспериментов.

5. Установлено полное отсутствие предпочтительности осуществляемых персептронами классификаций к естественным критериям подобия (возникающим на основе применения к изображениям преобразований геометрического подобия, переносов и поворотов).

6. Выявилось полное отсутствие характерной для человека возможности обучения по частям, т. е. первоначального обучения простым свойствам, а затем на их базе — сложным. Более того, в случае нескольких R -элементов (что совершенно необходимо для обучения по частям) при использовании систем с коррекцией ошибки отсутствует, вообще говоря, свойство достижимости всякой априори возможной классификации.

Работы, о которых говорилось выше, не только определили действительные границы возможностей трехслойных персептронов, но и наметили пути дальнейших исследований и усовершенствований. В результате исследования по теории персептронов вступили в совершенно новую фазу, когда изучаемые модели начинают воспроизводить многие глубокие и тонкие особенности работы распознающих нервных центров человеческого мозга. Весьма интересные результаты в этом направлении получены Ф. Розенблаттом и некоторыми другими авторами. Эти результаты, обобщенные в монографии Розенблатта (1962), не привели еще к созданию связной теории и ограничиваются пока лишь экспериментальным материалом и отдельными теоретическими фрагментами.

Главные направления исследований по персептронам, ведущиеся в настоящее время, следующие.

1. Переход к изучению многослойных систем, а также систем с пересекающимися и возвратными связями (Глушков, Ковалевский, Рыбак, 1962). Многочисленные исследования в указанном направлении выполнены Ф. Розенблаттом.

2. Введение механизмов управления порогом А-элементов (Розенблатт, 1962).

3. Переход от построения обучающих последовательностей по методу независимых испытаний к построению их как марковской цепи. При этом возникает возможность самообучения как процесса, переводящего временную близость изображений в их пространственную близость (Глушков, 1962; Розенблатт, 1962).

4. Переход от распознавания отдельных изображений к распознаванию последовательностей изображений, что позволило включить в круг «перцептронной» тематики не только зрительные, но и звуковые анализаторы. Делаются попытки объединить зрительный и звуковой перцептроны в единую распознающую систему (Розенблатт, 1962). Принципиально новым элементом здесь является переход к распознаванию пар образов, чем, по существу, стирается разница между режимами обучения и самообучения.

Весьма любопытно, что в перцептронах с перекрестными связями или с двумя слоями А-элементов возникает возможность обучения группе преобразований (на практике чаще всего локальной группе), сохраняющих принадлежность образу. Закономерность проторения связей для одного изображения как бы проторяет пути для быстрого усвоения таких преобразований для других изображений. Намечается достаточно простое объяснение многих характерных для человека особенностей преобразований, не меняющих принадлежности изображения тому или иному образу.

Перцептроны с перекрестными связями оказываются гораздо более экономными (по сравнению с обычными трехслойными перцептронами) с точки зрения расходования А-элементов. Камероном анонсирован результат о том, что в подобном перцептроне все возможные классификации могут быть реализованы при общем числе А-элементов, не превосходящем числа рецепторов (двоичных) сетчатки. В перцептронах с перекрестными связями достаточно естественным образом реализуются процессы распознавания последовательностей.

При переходе к перцептронам с возвратными связями происходит дальнейшее сближение с распознавательными возможностями, присущими человеку. Проявляется, в частности, свойство концентрации внимания и возможность обучения по частям (Розенблатт, 1962).

Как известно, обучение распознаванию понятий и смысла фраз в естественных языках (Глушков, 1962; Глушков, Гри-

щенко, Стогний, 1962) строилось до настоящего времени методами, которые по своему оформлению были довольно далеки от «перцептронной» тематики. Сейчас в результате расширения понятия перцептрона (прежде всего за счет введения возвратных связей) создавалась возможность объединения этих работ с работами по распознаванию зрительных образов. Весьма заманчивой является идея объединения в единой модели на основе использования возвратных связей от *R*-элементов трех перцептронов, распознающих зрительные, звуковые и логические (смысловые) образы. На этом пути можно будет, по-видимому, построить первую (хотя пока еще весьма примитивную) глобальную модель мозга.

Возможно, что на этой основе удастся подойти к вопросу о конструировании наиболее естественного «внутреннего» языка для моделирования процессов мышления. В таком языке система кодирования понятий была бы, несомненно, гораздо более близкой к системе кодирования непосредственных зрительных и звуковых восприятий. А это, в свою очередь, упростило бы задачу дешифровки в зрительных и слуховых распознающих центрах.

ЭЛЕКТРОННЫЕ МАШИНЫ И АВТОМАТИЗАЦИЯ УМСТВЕННОГО ТРУДА *

Электронные вычислительные машины (ЭВМ) — одно из наиболее удивительных созданий науки и техники XX столетия. Их вполне можно поставить в один ряд с практическим использованием атомной энергии или началом освоения космоса. Правда, рождение ЭВМ было не таким эффектным, но с течением времени они стали завоевывать все новые и новые позиции. Теперь все большее число ученых склоняются к мысли, что в конечном счете появление ЭВМ сыграет для человечества не меньшую, а, по-видимому, даже большую роль, чем атомная энергия или космические полеты.

Это объясняется тем, что ЭВМ — универсальные преобразователи информации, а с преобразованием информации человек сталкивается всегда в любой сфере своей деятельности. По существу, именно преобразованием информации за-

* В кн.: Кибернетика. Итоги развития, 1979, с. 122—138.

нимается и переводчик, и экономист-плановик, и математик, и даже поэт. Преобразование информации — это и есть содержание того, что мы называем умственным трудом человека. А так как и в то время, когда человек выполняет чисто физическую работу, мозг человека работает, координируя движения человеческих рук и ног, то, по существу, нет ни одного участка деятельности человека, где мы не имели бы дела с преобразованием информации.

Именно благодаря такой неограниченной области применения ЭВМ их научное и техническое значение будет из дня в день увеличиваться.

Почему мы называем ЭВМ универсальными преобразователями информации? На первый взгляд, здесь как будто есть противоречие: электронные машины имеют дело с информацией только одной природы — числовой, тогда как в перечисленных выше процессах преобразования информации участвует информация самая разнообразная. Действительно, информация, которую человек воспринимает, — это и звуковая информация, причем не только осмысленная, но и различного рода шумы, в конце концов музыка; это и зрительная информация, все богатство форм и красок внешнего мира. А ЭВМ имеют дело только с числами.

Но противоречие это только кажущееся. Нетрудно показать, что числовой способ задания информации является в некотором смысле универсальным, т. е. что любую информацию можно путем сравнительно несложных преобразований привести к числовому виду. Более того, уже разрабатываются информационные устройства, позволяющие любой вид информации преобразовать в числовую форму, и наоборот. Правда, эти аппараты сейчас еще не всегда надежны, обладают недостаточной скоростью и т. д. Но они существуют.

Сомнение в универсальности вычислительных машин как преобразователей информации может вызывать еще и то обстоятельство, что правила преобразования информации различной природы качественно различны. Одни правила математика применяет при решении вычислительных задач, совсем другие — при доказательстве теорем.

Но и здесь мы подходим к одному из фундаментальных фактов, который был установлен математической логикой еще в домашний период, но значение которого для человечества стало ясно только после того, как появились ЭВМ.

Нас не удивляет, что множество разнообразных предметов, нас окружающих, в конце концов состоит из одних и тех же элементарных частиц в разных комбинациях. Электроны и протоны одинаковы везде, но тем не менее сочетания их в атомах и молекулах дают совершенно различные тела.

А почему бы информации быть в этом смысле исключением? Почему не может быть «информационных атомов», атомов преобразования информации, на которые можно разложить любые правила преобразования информации? Оказывается, это сделать можно. Можно выделить небольшое число типовых правил — «атомов», с помощью которых можно представить или, как выражаются в электронно-вычислительной технике, запрограммировать любые правила, если только эти правила познаны и точно описаны. Природа этих правил роли уже не играет. Это могут быть правила грамматики, математики, стихосложения, музыкального творчества, экономического анализа и т. д. Если эти правила познаны и точно описаны, их можно разложить на некоторые элементарные правила.

А ЭВМ впервые в истории человечества вместила в себя весь набор элементарных правил преобразования информации и имеет принципиальную возможность выполнять по этим правилам любые действия в заданной последовательности.

Это обстоятельство и делает ЭВМ универсальными преобразователями информации, универсальным средством автоматизации не только физического труда человека, но и умственного труда, причем умственного труда достаточно высокой квалификации.

По существу, на наших глазах происходит вторая техническая революция. Первая такая революция, затронувшая область физических усилий, была связана с созданием двигателя, умножившего физическую мощь человечества. Теперь же мы являемся свидетелями рождения универсальных автоматов, которые помогут неограниченно увеличить интеллектуальную мощь человечества.

Разумеется, одно дело — принципиальная возможность и другое дело — ее практическая реализация. Для того, чтобы действительно использовать все огромные возможности, уже заложенные в современных ЭВМ, не говоря о машинах будущего, необходимо изучить те правила, по которым человек преобразует информацию в той или иной сфере при-

ложения своего интеллекта, в той или иной сфере умственной деятельности. А это задача колоссальной сложности.

Если позволено мне будет употребить такое сравнение, то вычислительная машина подобна мозгу только родившегося ребенка, который нужно «начинить» соответствующей информацией. Потенциально ребенок может обладать такими возможностями, что из него может вырасти Ньютон или Лобачевский. Но необходима огромная работа, чтобы сообщить ему всю совокупность знаний, всю необходимую информацию, можно сказать, необходимые программы работы — программы очень высокого уровня, взаимодействие которых мы в полной мере еще ясно себе не представляем.

Нужно иметь в виду, что принципы, с помощью которых преобразование информации раскладывается на отдельные элементарные акты в мозгу человека, имеют только внешнее сходство с теми принципами, которые реализуются в ЭВМ. Тем не менее внешний конечный результат один и тот же: как мозг человека, так и ЭВМ — универсальные преобразователи информации, хотя построенные совершенно по-разному.

И теперь встает следующий, не менее важный и интересный вопрос. Если перед человечеством открываются столь широкие горизонты машинной переработки информации, облегчения умственного труда, а для реализации этих перспектив нужно будет проделать очень большую работу, то куда же следует направить основные усилия в настоящее время? Какие задачи в первую очередь должны интересовать человечество, науку? Что в первую очередь надо передать машинам, в какой области призвать их на помощь?

Можно, скажем, пытаться решить задачу машинной переработки информации в применении к автоматизации игры в шахматы: изучить правила, по которым гроссмейстер оценивает позиции, разложить их на элементарные правила и в конце концов получить программу. Но человечество еще не испытывает особого ущерба от того, что люди играют в шахматы по-старому, без использования электронно-вычислительной техники. В то же время существуют такие области человеческой деятельности, где уже сегодня дальнейшее развитие без использования электронно-вычислительной техники невозможно. Это те области, где количество информации, которое наваливается на работающего в них человека, начинает превосходить его возможности. Возникает информационный затор: информация скапливается, и человек не успевает ее

перерабатывать. Тогда он прибегает к какому-нибудь качественному методу, методу качественных оценок и выполняет соответствующую работу хуже, с большим количеством ошибок.

Мы как-то не привыкли задумываться над тем, что не только физические, но и умственные возможности человека ограничены. Человека нельзя заставить мыслить все с большей и большей скоростью, не изменив существенно биологической природы человеческого мозга. Вряд ли на протяжении ближайшего столетия появится человек, который способен будет запомнить наизусть все книги, хранящиеся в Ленинской библиотеке, или выучить наизусть в течение часа Большую советскую энциклопедию. В области умственной деятельности человек имеет определенный предел производительности труда, и когда к нему предъявляются требования, превосходящие этот предел, он не может их выполнить, так же как землекоп не может выкопать лопатой котлован для крупной гидроэлектростанции.

Но то, чего не может сделать человек как объект биологический, он может делать и делает успешно как объект социальный. Человеческое общество уже нашло способы штурмовать эти вершины информации. Изобретение книгопечатания, например, тоже было ответом человечества на увеличение количества информации. Благодаря ему человек как социальный объект восполняет свои недостатки как объекта биологического. В настоящее время эти возможности неограниченно умножились в связи с применением ЭВМ.

Таким образом, усилия ученых, работающих в области применения ЭВМ, нужно направить в первую очередь в те области человеческой деятельности, где уже сегодня ощущается информационный затор и где он будет испытываться в ближайшем будущем.

Надо сказать, что само появление ЭВМ было вызвано именно образованием такого информационного затора. В связи с развитием новых областей техники в вычислительной математике появились такие задачи, которые при старых методах счета потребовали бы десятков, сотен, может быть, тысяч лет человеческого труда. Техника не могла ждать столько времени. И тогда противоречие, создавшееся в результате возникновения такого информационного затора, было разрешено при помощи ЭВМ.

Первая задача, которая встает перед нами, — это задача автоматизации планирования, управления экономикой и

учета. Проблемы, возникающие в системе планирования, грандиозны. Наша промышленность, народное хозяйство непрерывно растут и управлять этим хозяйством становится все сложнее.

Например, перед Госпланом СССР стоит задача согласовать планы материально-технического снабжения с планом производства материалов. Для этого Госплан должен получить исходную информацию в размере 100 млн. чисел и произвести с этими числами примерно триллион операций. Что такое триллион операций? Если вы будете выполнять одну операцию в секунду, что человек заведомо не может делать на протяжении сколько-нибудь длительного времени, то для выполнения такого количества операций потребуется 30 тыс. лет. И это только для составления годового плана!

Ясно, что без автоматизации в сфере планирования невозможно решить те огромные задачи, которые встают перед страной. Если же вы примените ЭВМ, которая делает 100 тыс. оп. с. (а эта скорость является в настоящее время довольно обычной), то подобная задача может быть решена за три-четыре месяца, а если вы примените несколько таких машин, то еще быстрее.

Таким образом, электронно-вычислительная техника дает возможность осуществлять гораздо более детальное планирование и наилучшим образом использовать те огромные преимущества, которые заложены в социалистической системе хозяйства. Практика применения у нас ЭВМ показывает, что эти преимущества во много раз умножаются, когда мы начинаем применять электронно-вычислительную технику.

Я могу привести такой пример. С помощью ЭВМ теперь решаются многие транспортные задачи. Планы железнодорожных перевозок, составленные машинами, на 10—15%, а план автомобильных перевозок чуть ли не в 2 раза экономичнее, чем составленные «вручную».

В настоящее время ЭВМ используют в основном так называемые линейные модели, и математики приобрели большой опыт в применении их для планово-экономических расчетов. Сейчас возникает проблема построения динамических моделей, которые позволили бы найти наилучшие пути развития нашей экономики с целью обеспечить заданный уровень потребления на какой-то определенный период. Математики пытаются создавать методы, которые позволяют решить такие задачи. И здесь в большом долгу оказываются экономисты, которые должны разработать соответствующие экономиче-

ческие модели и дать возможность математикам применить эти методы решения.

Очень важная проблема в автоматизации планирования — проблема автоматизации первичного учета. Те формы хранения информации, к которым мы привыкли, совершенно не удовлетворяют электронно-вычислительную технику и являются в наше время архаичными. Необходимо переходить к новым формам хранения первичной информации, удобным для последующей передачи на ЭВМ: на магнитной ленте, на перфокартах, на специальных документных бланках. Сегодня всякий, кто занимается учетом и составлением документов, должен думать о том, как будет этот документ читать не только вышестоящая инстанция или контрагент, но и ЭВМ. Уже появляются такие системы, в которых подготовка первичных документов совмещается с передачей информации по каналам связи в ЭВМ. При такой организации все данные, содержащиеся, например, в какой-нибудь лежащей перед вами накладной, одновременно передаются в ЭВМ, которая их запомнит и использует в дальнейшем.

Предстоит еще огромная работа по увеличению парка ЭВМ, занятых переработкой планово-экономической информации. Нужно создать из этих машин мощные вычислительные центры с современными каналами связи, для того чтобы можно было быстрее обмениваться информацией. Речь идет не только о составлении новых языков программирования, но и о перестройке всей системы ведения первичной документации, самой психологии людей, занятых в сфере учета и планирования.

Второе, очень важное применение ЭВМ находят в комплексной автоматизации инженерно-технических расчетов. Здесь, вообще говоря, машины используются довольно давно: значительная часть расчетов, необходимых при проектировании новой машины или изделия, уже производится не вручную, а ЭВМ. Но я хочу сказать о новой возможности комплексной автоматизации процессов проектирования и последующего изготовления машины или изделия, когда процесс проектирования становится органической составной частью самого производственного процесса.

Примером этого может служить одна из работ, выполненных нашим Институтом кибернетики вместе с Институтом автоматики на одном из судостроительных заводов. Там вычислительной машине дается исходная информация о корпусе судна, и она без всякого вмешательства человека уже по

определенной заданной программе производит разверстку листов, из которых сваривается корпус судна, на плоскости и оптимальную раскладку без чертежей нужных деталей заданных размеров, а потом выдает магнитные ленты с программами. Если эту магнитную ленту заложить в соответствующий станок, то он будет вырезать газовым резаком нужные детали из большой полосы стали; если же газовый резак заменить чертежным оборудованием, по той же программе будут выполнены чертежи раскладки деталей в соответственно уменьшенном масштабе.

Все это дает экономию на инженерно-техническом труде, исчисляемую в 200 тыс. рублей в год. Еще большая экономия будет получена при сборке судна, потому что изготовленные таким методом детали корпуса намного точнее выполненных старым способом, и подгонка листов в процессе сборки корабля будет практически исключена.

Проектирование с помощью ЭВМ позволяет перейти от обычных методов к так называемым оптимальным, когда проверяется несколько вариантов решения той или иной технической проблемы и из них выбирается наилучший. Такая возможность была, как правило, принципиально недоступна в домашний век, потому что построение оптимальных конструкций требовало огромных затрат умственного труда.

Мне хотелось бы остановиться еще на одной, особенно интересной задаче в области автоматизации проектирования — на автоматизации проектирования самих вычислительных машин.

Часто в популярной литературе говорится о создании таких ЭВМ, которые будут сами производить себе подобных — будут способны, так сказать, к размножению. Сейчас это уже не праздная проблема, которая может интересовать человечество в будущем, а одна из актуальнейших задач сегодняшнего дня.

Существующие ЭВМ настолько сложны, что на их проектирование уходит очень много времени и конструктор никогда не бывает уверен, что он в данных условиях выбрал лучший вариант. В будущем же предстоит разрабатывать еще более совершенные ЭВМ. И вот возникает конкретная задача — поручить машине создавать, конструировать себе подобные или еще более совершенные машины.

Такие работы проводятся у нас в институте. Нельзя сказать, что они уже завершены, но развитие автоматизации в настоящее время значительно расширило возможности при-

менения формальных методов синтеза для проектирования ЭВМ. Одна из основных проблем здесь заключается в создании знаковой системы — своего рода искусственного языка — для описания тех или иных уровней проектирования соответствующего объекта, например совершенно точного «языка» для описания блок-схемы машины. Такой язык сейчас рождается стихийно: один изображает блок-схему так, другой — иначе. Необходимо разработать точный способ представления структуры машины на данном уровне ее абстрактности, реализации блок-схемы, как мы говорим, когда элементы машины еще не выбраны.

Ряд подобных языков в настоящее время создан и создается. После того как структура машины записана на таком языке, к ней можно применить формулу минимизации и оптимизации схемы и получить такие машины, которые другим способом за короткое время построить не удастся.

Правда, еще нельзя сказать, что проектирование ЭВМ полностью автоматизировано, но тем не менее определенный ряд очень трудоемких этапов уже пройден.

Следующая важная проблема, которая встает перед человечеством, — это автоматизация научных исследований. Уже сейчас математики, физики, механики, техники применяют ЭВМ в своей научной деятельности. Но пока эти вычислительные машины играют подсобную роль, т. е. используются для вычислений, а не для того, чтобы выполнять на машинах сам творческий процесс, а тем более — постановку задачи, что составляет в настоящее время сущность науки. Об этом до самого последнего времени боялись даже мечтать, и такая возможность казалась очень далекой.

Прежде всего, подобно комплексной автоматизации инженерного проектирования, можно уже говорить и о комплексной автоматизации научных исследований в области экспериментальных наук. Машина может не просто производить те или иные расчеты, а брать объект исследования, скажем, тот или иной физический прибор, присоединяться к этому прибору и самостоятельно проводить физический эксперимент, рассчитывать показания, обрабатывать их и выдавать готовый результат. Комплексная автоматизация исследований уже начинает осуществляться при решении таких задач, как анализ снимков звездного неба в астрономии или анализ следов частиц на снимках, полученных при фотографировании ядерных реакций. Машины изучают эти снимки, выби-

рают необходимый тип реакций, делают нужные замеры и в конце концов выдают обработанные данные.

Что касается теоретических наук, основанных на дедуктивных методах, то здесь возникает не менее интересная задача автоматизации самого процесса научного творчества. В области математики это прежде всего процесс доказательства трудных теорем.

Спрашивается, а нужно ли решать эту задачу сейчас? Так ли она актуальна в настоящее время?

Люди давно задумывались над тем, как ученый приходит к тому или иному результату. Особенно явно это видно в математике: здесь можно найти наиболее характерные примеры. Часто бывают случаи, когда сформулированная теорема в течение многих лет не решается и большое число людей пытаются найти подход к решению этой теоремы.

Анализируя процесс научного творчества, можно видеть, что человек пытается добиться решения на основе так называемой интуиции, аналогий с теми знаниями, которые он уже имеет, накопил в течение длительного времени, изучая специальную литературу, пробуя всевозможные варианты, исходя из уже решенных проблем и из начальных данных. В конце концов перед исследователем может блеснуть догадка, которая соединит звенья цепи, и очень напряженная работа, которая длится годами, завершается успехом.

Но так бывает не всегда. В той же математике существуют очень много проблем, над которыми ломали голову выдающиеся математики, но тем не менее они остаются нерешенными и сегодня. И получается, что человек двадцать лет программирует себя на решение той или иной задачи, потом еще несколько лет пытается ее решить, а в конце концов вступает в действие неумолимый закон биологии — старость, и человек, который мог бы еще очень и очень многое сделать для науки, уже оказывается выбывшим из строя. Все то, что он мог бы еще написать, погибло.

Кроме того, если существуют проблемы, над которыми человеку надо думать непрерывно в течение тридцати лет (а такие примеры сейчас не так уж редки), то могут существовать и такие проблемы, над которыми надо думать 200 лет, и человек не решит таких проблем только потому, что положенный ему срок не позволяет этого сделать.

Правда, человечество выходит из этого положения за счет специализации, разложения проблемы на более мелкие подпроблемы, но где гарантия того, что слепые поиски ведут к

разрешению проблемы, а не мимо? И сколько еще можно ждать счастливых случайных сочетаний, счастливых догадок исследователей? Темпы развития науки в настоящее время таковы, что, по-видимому, в ближайшем будущем человечество не сможет себе позволить такую роскошь, как ждать случая, дарованного провидением. Поэтому так важна задача автоматизации научного творчества.

На первый взгляд здесь определенное противоречие. В математической логике доказано, что наряду с теориями, поддающимися разрешению путем создания универсальных программ, существуют и так называемые неразрешимые теории, о которых известно, что в рамках подобной теории нельзя сформулировать алгоритмы программ, которые бы доказывали или опровергали данную теорему. Казалось бы, это обстоятельство ставит предел применению ЭВМ.

Но оказывается, что, по существу, проблема теоретической алгоритмической разрешимости той или иной теории и проблема практической ее разрешимости лежат в совершенно разных областях. Если изучить весь ход мыслей научного работника, все переходы, которые он употребляет, то можно прийти к заключению, что здесь действует сравнительно небольшое число правил, которые и помогают ему разрешить определенный круг задач рассматриваемой теории. Таким образом, задача ставится по-другому: найти не универсальный алгоритм, который решал бы все проблемы в данной области, а практически функционирующие алгоритмы, которые работали бы так же или лучше, чем математик, работающий в этой области. Поэтому есть надежда, что, даже если не все практические правила, которыми пользуется человек в процессе доказательства той или иной теоремы, будут вложены в ЭВМ, она все равно сможет работать быстрее, чем человек.

Может оказаться, что в разрешимой теории, где есть уже построенный алгоритм, решающий все проблемы, в действительности практически пользоваться этим алгоритмом нельзя, потому что даже для вычислительной машины этот алгоритм оказывается громоздким; и наоборот, в неразрешимой теории, где доказана невозможность существования такого алгоритма, может быть достаточно простой алгоритм, который охватывает именно ту часть теории, которая в настоящее время интересна для человечества.

Если мы поставим сейчас задачу построить не такой алгоритм, который может доказать или опровергнуть все мысли-

мые теоремы в данной области, а такой, чтобы доказать теоремы, которые встанут перед человечеством на протяжении ХХI в., то такой алгоритм существует. Почему его не найти?

Правда, если даже сегодня удались доказательства тех маленьких теорем, на которые пытается делить доказательства больших теорем математическая логика, то такие доказательства трудно читать, и человечеству придется преодолеть немало трудностей, чтобы перевести их на обычный русский, английский, немецкий или другие языки, на язык предикатов. Возникает вопрос: а не нужно ли построить такой язык, который был бы в какой-то мере подобен, скажем, русскому языку, но содержал бы меньше возможностей разных способов выражения одной и той же мысли, был бы более определенным и точным, использовал как можно меньше терминов? Для этого нужно построить алгоритм, который будет давать доказательства теорем и выдавать их в таком виде, чтобы можно было их читать и публиковать в журналах.

В настоящее время попытки построения подобных программ делаются в целом ряде научных коллективов. Есть некоторые успехи, есть неудачи, показавшие, что здесь предстоит преодолеть очень большие трудности. Во всяком случае, ясно, что мы уже приступили к практическому решению этой проблемы.

Оказывается, что наиболее трудная ее часть — автоматизация не формальных выкладок, а того, что называют интуицией. Человек обычно не штурмует проблему в лоб, он не перебирает всех путей для ее решения, а выбирает только те, которые в силу каких-то аналогий, в силу непознанных вполне ясно законов деятельности мозга кажутся ему ведущими к цели. Поэтому человеческий мозг добивается лучших результатов, чем машина, обладающая большой скоростью работы, но в которой не запрограммирована эта интуиция, потому что мы пока не знаем, что это такое.

Поэтому возникает новый, не менее важный вопрос: а зачем все закладывать в машину? Если человек обладает интуицией, а как вложить ее в машину, мы не знаем, то давайте предоставим эту интуицию человеку: человеку человеческое, а машине — машинное. Машине оставим перебор вариантов и оформление окончательного варианта в виде, удобном для печати. Такая задача уже поставлена.

Но здесь мы подходим к одной из актуальнейших проблем развития всей электронно-вычислительной техники — проблеме общения человека с машиной. Дело заключается в том,

что в ЭВМ сегодняшнего дня «кирпичики» ее элементарных действий очень сложны и нужен очень искусный каменщик для того, чтобы сложить из этих кирпичиков стройное здание математической программы. И если исследователю, который пользуется ЭВМ для проверки доказательств, надо будет каждый раз «вкладывать» в нее интуицию, то он может сказать: «Бог с ней, с этой машиной, я сам скорее этот вариант решу вручную».

Проблема общения человека с машиной давно волнует коллектив нашего Института кибернетики, и мы пытались решить такого рода проблему для формульного вычисления, пытались сделать так, чтобы с машиной мог работать не только математик-программист, но и инженер. Для таких вычислений была создана ЭВМ «Проминь» малой производительности с упрощенным вводом и упрощенным программированием. Она очень маленькая, размером с туалетный столик, но благодаря тому, что тщательно продуман набор операций, команд, сделаны различные упрощения, становится возможным легко программировать простые задачи, с которыми часто сталкиваются конструкторы машин. И инженер через полчаса после того, как ознакомился с инструкцией, уже работает на этой машине, чувствует себя ее хозяином и она его «понимает». Поэтому инженеры с большой охотой идут на применение таких машин. Сейчас коллективом института создана новая, гораздо более совершенная машина аналогичного класса под названием МИР (машина для инженерных расчетов).

Но это касается пока лишь формульных вычислений. Разработка такого языка, который был бы «понятен» машине и достаточно близок к естественному человеческому языку, потребует еще больших исследований. Пока создаются только первые наброски такого языка, и те программы, которые мы строим для автоматизации научного творчества, будут уже закодированы в «переводе» на этот язык. Это еще далеко не то, чего нам хотелось бы. Такое направление будет одним из основных в будущем развитии электронно-вычислительной техники.

Вы, наверное, заметили, что нам приходится не раз возвращаться к проблеме языка: «язык для экономических расчетов», «язык для описания схем электронных вычислительных машин», «точный язык» для общения с машиной — язык, язык и еще раз язык. Нередко и мы сами, специалисты по ЭВМ, недооцениваем те сдвиги, которые происходят в науке,

и в математике прежде всего, в связи с рождением подобных языков. По-видимому, нынешний этап развития математики можно сравнить с состоянием науки в XVII в., когда складывался формульный язык алгебры и математического анализа.

Что происходило тогда? Существовали описательные приемы решения тех или иных задач. Математики достигли большого искусства в применении этих приемов. Когда были сделаны первые попытки формализации языка математики, создания языка дифференциального и интегрального исчисления, многие математики говорили: «А зачем эти ухищрения, когда и старыми методами могу эту задачу решить? Вы утверждаете, что они позволяют провести касательную к этой кривой? А я это и так могу сделать».

Значение формульного языка не сразу осознается. И сам язык в науке создается постепенно, и значение его рождения становится ясным гораздо позже.

Оглянувшись на XVII в., мы можем сказать, что если бы подобный язык не был создан (в этом отношении характерна судьба японской математики), то алгебра и анализ не получили бы такого развития в XVIII—XIX вв. В принципе можно было все задачи решить старыми методами, но эти решения были бы лишены изящества, логичности, которые пришли в математику вместе с новыми методами, новым языком.

Но уже в XIX в. оказалось, что если говорить о средствах, выражающих конечный итог решения математиками какой-то задачи, то язык формул для этого недостаточен. Было время, когда математики верили, что каждое дифференциальное уравнение можно решить в квадратурах, интегралах, с помощью языка символов. Но было доказано, что существуют уравнения, которые принципиально нельзя решить. Таким образом, была доказана неполнота этого языка.

Сейчас в науке рождается новый язык — алгоритмический, которому не свойственна эта ограниченность старого языка. Тем не менее многие математики относятся к этому примерно так же, как относились математики XVII в. к формульной символике.

Например, можно решить задачу и дать формулу, написать интеграл — это хорошее, изящное решение. Можно вместо этого написать стандартную программу для ЭВМ, которая тоже решает проблему, и с меньшей степенью общности, чем формула. Однако говорить, что это последнее

решение численное, а то, первое,— решение в общем виде. Но, в сущности, почему интеграл — решение в общем виде? Просто формульный язык символов нам понятен, программу же мы часто не понимаем, она написана на незнакомом нам языке.

Есть основание думать, что когда станет возможной краткая запись стандартной алгоритмической программы, скажем, будет разработана алгебра формальных преобразований внутри машинного языка, то такой язык станет для математической логики столь же ясным и доступным, как для нас язык формул. А формулы будут использоваться лишь в несложных случаях. Тогда математики привыкнут и к этим непривычным для нас алгоритмам в записях и будут пользоваться ими для решения проблем, которые принципиально нельзя решить в одной формульной записи.

Таким образом, проблемы вычислительной техники привели нас к некоторым мыслям по поводу будущего всей науки. ЭВМ имеют огромное значение для ее развития, и мы еще не представляем себе всех тех последствий, которые повлечет за собой использование средств автоматизации умственной деятельности человека.

В связи с перспективой автоматизации умственной деятельности за рубежом очень часто высказывают опасение, что, когда все будут делать машины, человеку делать будет нечего, машина вытеснит его. Особенно часто это приходится слышать, когда речь заходит об автоматизации научных исследований. Говорят, что ученым останется только почитать на лаврах и снимать урожай доказательств. Я вполне серьезно думаю, что через 20—30 лет можно будет и в самом деле наблюдать такие случаи. Скажем, двое ученых, один из которых более способный и более трудолюбивый, чем другой, сидят рядом, причем первый не пользуется машиной для доказательств, а второй пользуется. И вот первый, более способный и более трудолюбивый, с удивлением видит, что он делает менее интересные вещи, чем его сосед.

Но это вовсе не значит, что машина вытеснит человека. Просто задачи, стоящие перед человеком, неизмеримо возрастут вместе с возможностями их решения. В этом — диалектика развития. Наверное, когда изобрели мотоцикл, тоже раздавались голоса, что, мол, теперь бегуны на длинную дистанцию исчезнут и, значит, человечество «оскудеет» в физическом отношении. Но этого не произошло: рекорды, которые ставят сегодня наши спортсмены, и не снились спортсменам

ХІХ в. Почему же мы должны бояться того, что, когда человек умножит свою интеллектуальную мощь с помощью этих машин, он будет ими вытеснен?

Когда была создана первая ЭВМ, некоторые тоже опасались, что если машины работают с такой скоростью, то, когда мы создадим сотни таких машин, они за несколько минут перерешают все задачи. Однако появление машин вызвало к жизни еще большее количество задач, с которыми не только те машины, которые у нас есть, но и те, которые будут, не в состоянии справиться. И так как только человек может знать, что ему нужно, именно он будет ставить перед машинами задачи и направлять их на путь решения тех или иных проблем. Так что работы у человека хватит.

Конечно, вопрос о перспективах использования машин — это вопрос не только технический, но прежде всего — социальный. Если в капиталистическом мире применение электронно-вычислительной техники в той или иной отрасли часто становится источником бедствий для трудящихся, например, приводит к массовому увольнению клерков из банков, то в условиях социализма внедрение ЭВМ будет способствовать общему увеличению народного благосостояния. Мы должны смело смотреть в завтра и верить в то, что какие бы удивительные применения ни нашла электронно-вычислительная техника в будущем, в условиях нашего общества она всегда будет служить на благо человека.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ*

Вопрос о том, как человек мыслит, привлекал внимание ученых во все времена, начиная с глубокой древности. Уже в древней Греции были открыты многие закономерности логического мышления, составившие основу так называемой формальной логики. Определенную завершенность формальная логика древности получила в трудах Аристотеля. Два тысячелетия спустя новый толчок развитию формальной логики дало развитие математики и математической символики. Эта символика позволила записывать логические высказывания в виде формул и построить так называемую алгебру логики. Переход от простой формальной логики Аристотеля к современной математической логике привел

к огромному расширению возможностей формализации строгих рассуждений, характерных для так называемых дедуктивных наук (математика, теоретическая физика и др.).

Были разработаны различные алгоритмы логического вывода, т. е. системы правил, позволяющие строго регламентировать процесс вывода логических следствий из тех или иных начальных систем знаний. Тем самым были подведены научные основы по искусственной реализации определенных черт естественного человеческого интеллекта.

На практическую ногу задача создания искусственного интеллекта была поставлена однако лишь после изобретения электронных вычислительных машин — так называемых компьютеров. Компьютер представляет собою универсальный преобразователь информации. Более точно, он способен выполнить любой алгоритм (строго определенное предписание) преобразования произвольной буквенно-цифровой информации. Это означает, в частности, что с помощью компьютеров можно автоматизировать любой процесс логического вывода, коль скоро известен алгоритм такого вывода.

Становление и широкое распространение компьютеров открыло дорогу практической работе по созданию искусственного интеллекта. Следует сразу подчеркнуть, что создание искусственного интеллекта представляет собой задачу огромной сложности. Ее невозможно решить «одним махом» в результате гениального озарения какого-либо изобретателя-одиночки. Подобное представление, бытующее в научно-фантастической литературе, крайне наивно и весьма далеко от реальности.

Человеческий интеллект представляет собою самый сложный феномен из всех, с которыми встречалась до сих пор наука. Поэтому искусственное воссоздание даже основных его черт потребует многолетней работы многих тысяч ученых и инженеров. Суть этой работы состоит, во-первых, в точном описании систем правил (алгоритмов), по которым выполняются различные мыслительные процессы, и переводе этих алгоритмов в машинное представление — так называемом программировании.

Однако простое накопление в компьютере программ преобразования информации для различных аспектов деятельности человеческого мозга еще не решает задачу создания искусственного интеллекта. Вторая, не менее трудная часть задачи состоит в накоплении в компьютере огромного объема начальных знаний, или, как сейчас принято говорить, моде-

ли мира. Задача этой модели — связать значения слов и фраз и последовательностей фраз в том или ином естественном человеческом языке (русском, английском и др.) с образами и процессами реальной деятельности.

Компьютер, снабженный такой моделью, приобретает способность понимать человеческий язык аналогично тому, как это делает человек, воспринимающий языковую (письменную или устную) информацию.

Необходимо особо подчеркнуть, что речь идет о создании в компьютере лишь начального представления о мире. В состав же программ, моделирующих мыслительные процессы, вводятся программы обучения, задача которых состоит в изменениях модели мира в зависимости от поступающей в компьютер информации.

Третья часть задачи создания искусственного интеллекта состоит в моделировании органов чувств (прежде всего зрения и слуха), с помощью которых компьютер может непосредственно воспринимать информацию из внешнего мира. Речь идет о так называемом распознавании образов, позволяющем сопоставлять поступающую извне информацию с находящейся в памяти компьютера модели мира, вырабатывать их языковые представления и изменять в случае необходимости саму модель.

Наконец, четвертая часть задачи состоит в моделировании исполнительных механизмов (эффектов), позволяющих выводить информацию, возникающую в процессе мышления, во внешний мир и осуществлять те или иные действия. В первую очередь здесь решаются задачи моделирования человеческого голоса и человеческой руки.

Третья и четвертая части задачи имеют важное значение при создании так называемых интеллектуальных роботов. Для них используется понятие искусственного интеллекта в широком смысле слова, включающее в себя взаимодействие интеллекта с органами чувств и с исполнительными механизмами, аналогичными тем, которыми располагает человек. Искусственный интеллект в узком смысле слова предусматривает лишь весьма ограниченные каналы общения с внешним миром. Обычно это электрифицированная пишущая машинка или алфавитно-цифровой дисплей (экран с клавиатурой), объединяемые под общим наименованием (алфавитно-цифрового) терминала. Информация (в буквенно-цифровом виде) искусственному интеллекту извне передается работающим на терминале человеком. На этот же терминал

автоматически (под управлением компьютера) выводятся ответы искусственного интеллекта.

Подобный диалог человека с искусственным интеллектом позволяет производить различные тесты его возможностей. Можно вести с ним разговор на ту или иную тему, сыграть в ту или иную игру, предложить ту или иную логическую или математическую задачу, испытать возможность обучения чему-либо новому и т. д. Через тот же терминал можно организовать не только диалог человека с компьютером, но и человека с человеком.

Это обстоятельство позволило английскому математику Тьюрингу сформулировать следующий критерий, по которому можно установить, заслуживает ли представленный на испытание информационно-программный комплекс быть названным искусственным интеллектом? Согласно Тьюрингу ответ будет положительным, если в течение достаточно длительного времени человек, ведущий диалог, не сможет уверенно различить, кто его партнер по диалогу: человек или компьютер?

Возникает естественный вопрос: а можно ли этого достичь в принципе? Ответ на этот вопрос определяется ответом на другой вопрос: познаваемы ли до конца законы мышления, закономерности работы человеческого мозга? Если да (а весь опыт развития науки и практики говорит в пользу только такого ответа), то искусственный интеллект может быть создан. Более того, поскольку современные компьютеры являются универсальными преобразователями информации, для создания искусственного интеллекта в узком смысле слова не нужно даже изобретать каких-либо новых машин. Такой интеллект может быть создан в виде соответствующей системы программ и информационной базы уже на существующих ныне компьютерах.

Работа по программированию различных задач искусственного интеллекта на универсальных компьютерах началась еще в 50-е годы и к настоящему времени достигла большого размаха. Одной из первых областей, привлечших к себе внимание исследователей, была работа компьютеров в естественных человеческих языках, в частности, автоматический перевод с одних языков на другие. Первоначальные успехи в автоматическом переводе простых текстов с ограниченным словарем пробудили большие надежды. Однако последующее развитие событий показало, что дело обстоит далеко не так просто.

Во-первых, оказалось, что грамматики естественных языков были развиты далеко недостаточно. Потребовалось развитие нового направления — формальной теории грамматик (Хомский и др.), чтобы дать надежную основу для построения достаточно полных грамматик естественных человеческих языков. Однако и этого оказалось мало. Задача квалифицированного перевода сложных литературных текстов требовала глубокого проникновения не только в синтаксис, но и в семантику (смысловой аспект) естественных человеческих языков. В конечном счете дело сводится к тому, что квалифицированная машина-переводчик должна иметь внутри себя модель мира, о которой уже говорилось выше.

Работы по созданию таких моделей широко развернулись в 70-е годы, но пока, разумеется, они достаточно далеки от завершения. Созданные к настоящему времени модели перекрывают, во-первых, простейшие геометрические представления. Это позволяет компьютеру понимать смысл таких понятий, как «выше», «ниже», «спереди», «сзади», «справа», «слева», «внутри», «больше», «меньше» и т. д. Кроме того, созданы частные модели, перекрывающие относительно узкие области человеческой деятельности. Такие модели позволяют успешно реализовать диалог человека с компьютером в той или иной узкой области. Если условиться не выходить за рамки данной области, то такой диалог может уже сегодня быть практически неотличим от диалога с человеком. В качестве примера можно привести американскую модель «Психиатр», имитирующую диалог врача психиатра со своим пациентом.

Расширение круга таких специализированных моделей значительно приблизит нас к возможности удовлетворения упомянутому выше тесту Тьюринга. Правда, полное соответствие тесту может быть достигнуто лишь тогда, когда модель обнаружит способности к обучению. Автором еще в самом начале 60-х годов была выполнена работа по обучению компьютера распознаванию смысла простых фраз на русском языке. С тех пор работы по обучению распознавания смысла получили дальнейшее развитие.

Важным свойством человеческого интеллекта является планирование целесообразного поведения. Оно проявляется всюду, начиная с простейших житейских ситуаций. Суть же его заключается в том, чтобы, исходя из той или иной цели, составить план достижения этой цели. Например, поставив себе цель достать книгу с верхней полки книжного стеллажа, человек составляет план: найти лестницу, переставить

ее в нужное место, взобраться на лестницу и взять книгу. Подобное целенаправленное планирование в аналогичных ситуациях сегодня уже вполне доступно искусственному интеллекту (например, роботу «Исейки» Стэнфордского университета или системе глаз-рука Института кибернетики).

Более сложные задачи возникают при планировании целенаправленного поведения в быстро меняющихся ситуациях. В этом случае от искусственного интеллекта требуется уменьшить прогнозирование соответствующих изменений в условиях собственных целенаправленных действий. Подобные задачи в различных частных случаях сегодня также успешно решаются, хотя до полного решения проблемы сегодня еще достаточно далеко.

Задача планирования целенаправленных действий тесно связана с задачей логического вывода. Работы по автоматизации логического вывода с помощью компьютеров начались еще в 50-е годы и сегодня в этой области достигнуты немалые результаты. Сравнительно просто оказалось вложить в компьютерную программу правила аристотелевой формальной логики. Сегодня в компьютерах реализуются сложные программы логического вывода, заметно превосходящие средние человеческие возможности. Еще в 60-е годы Хао-Ванг в Англии построил программу, которая за несколько минут доказала пару сотен теорем из капитального труда по математической логике, принадлежащего Уайтхеду и Расселу, и попутно еще ряд новых теорем. В настоящее время построенны гораздо более мощные автоматические процедуры логического вывода (например, на основе так называемого робинсоновского метода резолюций).

Следует отметить, что все перечисленные примеры используют методы логического вывода, ориентированные на компьютеры, а не на человека. Существенно используется, в частности, огромное преимущество компьютеров перед человеком в скорости выполнения простейших логических операций. Представляет определенный интерес воплотить в компьютерах более «человеческие» методы логического вывода. Такие методы принято называть эвристическими. Их развитие применительно к логическому выводу ведет свое начало от работы Ньюэла и Саймона (США).

Успех работы по автоматизации логического вывода применительно к любому классу задач определяется не только программами, но и накопленным в памяти компьютеров объемом начальных знаний об этом классе. До последнего вре-

мени задаче накопления необходимой суммы исходных знаний уделялось недостаточное внимание даже в математико-классическом объекте, использующем средства логического вывода в качестве основного инструмента для своего развития. Именно этим обстоятельством объясняется прежде всего тот факт, что успехи автоматизации логического вывода относятся главным образом к начальным разделам математики (таким, как математическая логика), где объем исходных знаний достаточно мал.

Применительно к автоматизации вывода в развиваемых сегодня высших разделах математики создание соответствующей информационной базы и взаимодействия программ с этой базой приобретает решающее значение. Решению этой задачи посвящены и проводящиеся в настоящее время под руководством автора работы в Институте кибернетики Академии наук Украины. В этих работах предусматривается проведение наиболее сложных логических выводов в диалоге специалиста-математика с компьютером. Поэтому используемые в них методы, сохраняя преимущества компьютерной ориентации, развернуты в значительной мере в направлении другого партнера по диалогу, т. е. человека.

Особую разновидность задач планирования целесообразного поведения представляют так называемые игровые задачи. Основная их особенность — наличие сознательного противника, активно противодействующего составляемому плану. Несмотря на успешное развитие математической теории игр (ведущей свое начало от фон-Неймана), практические успехи автоматизации игровых задач связаны прежде всего с эвристическими методами. А успехи эти сегодня довольно впечатляющие. Для относительно простых игр (например, для 64-клеточных шашек) имеющиеся сегодня программы значительно превосходят способности не только средних, но и достаточно сильных игроков.

Значительные успехи достигнуты в последние годы в автоматизации игры в шахматы. Если первые программы использовали в основном «силовые» методы прямого перебора всех вариантов на несколько шагов вперед, то сегодня созданы гораздо более интеллектуальные программы. Лучшие из них приближаются по силе игры к шахматным мастерам и, во всяком случае, намного превосходят средний уровень мастерства людей, играющих в шахматы.

В планировании целенаправленного поведения, логическом выводе и игровых задачах, реализуемых сегодня компью-

терами, наряду с рутинными процедурами, отчетливо проявились многие элементы творческого мышления. Разумеется, до вершин творчества компьютерам пока еще довольно далеко. Однако, творческие способности среднего человека во многих областях деятельности они уже превысили. Наряду с уже рассмотренными областями сюда включается сочинение музыки, прикладное изобразительное искусство (например, нахождение новых видов расцветки тканей) и др. Уже выдаются авторские свидетельства на изобретения, сделанные, по существу, компьютерами. Компьютеры пишут абстрактные стихи, производят мультфильмы, лучше человека справляются с задачами улучшения (оптимизации) экономического планирования управления сложными технологическими процессами и т. д. и т. п.

Быстрые темпы развития искусственного интеллекта позволяют многим прогнозистам утверждать, что в начале следующего столетия искусственный интеллект выдержит тест Тьюринга. Более точно, его способности сравниваются со среднечеловеческими способностями практически во всех областях деятельности, а во многих областях существенно их превосходят.

Очень часто задают вопрос, а можно ли считать действительно творческими достижения компьютеров? Ведь они работают по программам, создаваемым людьми! При этом забывают, что и любой человек, прежде чем творить новое, долго и упорно «программируется» своими воспитателями и учителями. Правда, определенная программная основа закладывается в человека генетически. Кроме того, он способен не просто к обучению, но и к самообучению в процессе своего непосредственного взаимодействия с окружающей действительностью. Однако, теми же свойствами обладают и компьютеры.

Во-первых, успешно развивается автоматизация проектирования компьютеров, которая обеспечивает не только передачу от одного поколения компьютеров к другому достигнутого уровня интеллектуальности, но и непрерывный рост этого уровня. При этом определенная часть достигнутого интеллектуального уровня переводится из программного обеспечения компьютеров в их схемную реализацию, т. е., иными словами, в их конструкцию. Идея повышения подобного «врожденного» интеллектуального уровня компьютеров была высказана автором в 1959 г. и впервые реализована в советских миникомпьютерах серии МИР, выпускающихся

промышленностью с 1965 г. Тем самым для компьютеров возникает аналог генетического программирования, причем потенциальные возможности этого аналога заведомо превосходят возможности генетического предопределения интеллектуального уровня человека и других известных живых организмов.

Во-вторых, многие компьютерные программы уже сейчас включают в себя возможности самообучения, хотя и не все такие возможности, присущие человеку, сегодня достаточно изучены и тем более реализованы в автоматических устройствах. Необходимо, однако, отметить и тот факт, что в некоторых областях деятельности действующие ныне программы по своим способностям к самообучению намного превосходят способности человека.

Решающим моментом для признания за искусственным интеллектом определенной творческой самостоятельности является тот факт, что компьютерные программы могут получать и уже получают новые результаты, неожиданные для авторов этих программ! Более того, в ряде случаев человеку-творцу программы получить такие результаты без компьютера было бы невероятно трудно, а иногда и вовсе невозможно. Это обстоятельство было убедительно проиллюстрировано недавно успешным решением с помощью компьютера известной проблемы четырех красок, не поддававшейся усилиям лучших математиков на протяжении многих десятилетий. Ученик превосходит учителя! Разве не является это лучшим свидетельством права на творческую самостоятельность, апробированную тысячелетней практикой человеческих взаимоотношений?

Мы достаточно подробно остановились на успехах и проблемах развития искусственного интеллекта в узком смысле слова. Решающее значение для создания искусственного интеллекта в широком смысле слова имеет автоматизация чувственного восприятия и прежде всего моделирование человеческого зрения и слуха. Эта задача стала весьма актуальной в связи с созданием и выходом из лабораторий в промышленность так называемых интеллектуальных роботов.

«Зрение» таких роботов сегодня позволяет им разбираться в относительно несложных производственных ситуациях, например, различать детали машин и простые конструкции. В определенном смысле роботы решают такие задачи даже лучше человека: это проявляется, например, тогда, когда необходимо отличить одну от другой, не лежащие рядом, де-

тали, имеющие одинаковую форму и цвет и лишь слегка отличающиеся своими размерами. Значительные успехи достигнуты в автоматическом распознавании аэрокосмических фотоснимков. В целом «зрение» роботов пока еще очень сильно уступает человеческому зрению.

При моделировании слуха одной из наиболее трудных задач является распознавание слитной человеческой речи (а не отдельных слов). В последние годы в СССР и США достигнуты крупные успехи в решении этой задачи, которая некоторыми авторами продолжает считаться неразрешимой. Например, в киевском Институте кибернетики достигается надежное распознавание слитной речи, использующей словарь в тысячу слов. Правда, для достижения надежности распознавания компьютеру требуется примерно в течение получаса настроиться (самообучиться!) на голос человека, который придется распознавать.

В ряде специальных применений анализа звуковых сигналов искусственный слух уже сегодня значительно превосходит возможности человека. Задача полного производства возможностей слуха человека в автоматических устройствах еще достаточно далека от решения. То же самое относится и к таким чувствам, как осязание, обоняние и вкус.

Проще решается задача воспроизводства (синтеза) человеческого голоса. Автоматические системы, отвечающие на запросы синтетическим человеческим голосом, получили распространение в практике многих развитых стран. В рабочем органе современных промышленных роботов успешно воспроизводятся многие свойства и возможности человеческой руки. В ряде пунктов они даже превосходят возможности человека. Однако многие тонкие функции человеческой кисти и особенно пальцев еще достаточно далеки от практической реализации. Заметим, что с помощью специальных выходных устройств компьютеры могут реализовать, например, такую тонкую работу, как вычерчивание чертежей и штриховых рисунков со скоростью и точностью, намного превосходящими возможности человека.

Успешно развиваются работы по созданию ходящих роботов (хотя на практике обычно предпочитают пока колеса). В целом темпы работ по «очеловечению» роботов таковы, что можно рассчитывать на появление в начале следующего столетия универсальных человекоподобных роботов, способных заменить человека практически во всех областях деятельности, в которых он захочет себя заменить. Разуме-

ется, большое распространение получают и специализированные роботы, которым не обязательно будет придаваться человекоподобный вид.

Развитие робототехники поднимает немало острых социальных вопросов и среди них пресловутый вопрос о «бунте машин». Следует подчеркнуть, что вопреки мнению Н. Винера и ряда других ученых в этом вопросе нет и следа фатализма. В самом деле, с чем связывал свои опасения Н. Винер? Прежде всего с тем, что рост технической сложности неизбежно приведет к уменьшению надежности и увеличению возможности разного рода случайных ошибок и отказов. Однако для такого опасения в действительности нет оснований. Современная теория надежности указывает эффективные практические пути повышения неограниченной надежности систем сколь угодно большой сложности.

Об отсутствии фатальной неизбежности роста ненадежности при увеличении сложности технических систем убедительно свидетельствует и практика. Достаточно сравнить, например, число катастроф в эпоху становления авиации и космонавтики.

Второе опасение связано со сложностью программного обеспечения искусственного интеллекта и упоминавшейся уже выше возможностью непредвиденных реакций с его стороны. Однако и в этом случае теория и практика предоставляют в руки конструкторов достаточный арсенал эффективных средств, чтобы надежно заблокировать все реакции, опасные для человека. При этом автоматизация проектирования систем и прогнозирования их поведения позволяет предвидеть и блокировать не только секундные опасные реакции, но и реакции, опасные для будущего человечества.

Следовательно, повышение надежности и безопасности любых систем искусственного интеллекта находится полностью в человеческих руках. Необходимо лишь, чтобы общество воспитывало у конструкторов таких систем обостренное чувство социальной ответственности и было бы готово платить за необходимые дополнительные меры по обеспечению надежности их созданий.

Разумеется, нельзя исключать возможность сознательного использования во вред человеку достижений робототехники силами зла на нашей планете. Однако в этом смысле робототехника отнюдь не является исключением. Гораздо большую опасность для человека представляет сегодня атомное оружие и другие средства массового уничтожения людей.

Возможность же устранения этой опасности определяется в первую очередь не техническими, а социально-историческими средствами, скорейшим торжеством человеческого разума и общества социальной справедливости.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНЖЕНЕРОВ

Практическая постановка задачи моделирования интеллектуальной деятельности человека связана с появлением и развитием компьютеров. Уже с момента своего возникновения компьютеры стали использоваться для автоматизации сложных инженерных расчетов. Например, на первом советском компьютере МЭСМ уже с 1951—1952 гг. были выполнены расчеты для будущей линии электропередач от проектировавшейся в то время гигантской гидроэлектростанции на Волге.

Сложность программирования и подготовки данных на первой стадии развития компьютеров ограничивали их применение, не позволяли осуществить комплексную автоматизацию даже расчетной части инженерных проектов, не говоря уже о других элементах сложного труда проектантов. Возникла задача упрощения общения человека с компьютером. Эта работа проводилась как в направлении совершенствования самих компьютеров — так называемого *хардвэра*, так и в совершенствовании их программного обеспечения — *софтвера*. В первом направлении — это совершенствование систем иерархической памяти, появление широкого набора терминального оборудования для организации диалога пользователей с компьютером (алфавитно-цифровые и графические дисплеи и др.) для ввода и вывода графической информации, для работы с компьютерами, расположенными на большом удалении, через каналы связи, и др. Важное значение имеет направление повышения исходного (не программированного) машинного интеллекта за счет встраивания в *хардвэр* развитых алгоритмических языков, облегчающих организацию эффективного диалога с пользователями. Эта линия, начатая советскими миникомпьютерами серии МИР, прочно вошла в практику мирового электронного машиностроения.

Новые возможности широкого использования компьютеров в инженерном труде открыло развитие сетей компьютеров с удаленными терминалами. Тем самым открылась принци-

пимальная возможность объединения вычислительно-информационных мощностей, в национальных и международных масштабах и использования их непосредственно с рабочих мест каждым инженерно-техническим работником.

В области софтвера развитие операционных систем и современных систем автоматизации программирования резко упростили эффективное использование сложных вычислительных комплексов и сетей компьютеров для решения широкого круга задач, интересующих современного инженера. В настоящее время получили широкое применение так называемые пакеты прикладных программ, ориентированные на различные области применений. В пакетах с достаточным уровнем «интеллектуальности» используется язык описания данных и программ их обработки, максимально приближенный к тем языкам, которыми соответствующие группы пользователей привыкли описывать свои задачи при обычных «ручных» методах их решения.

Например, пакет программ для решения задач геометрической оптики в качестве исходных данных использует понятные любому специалисту-оптику описания комбинаций с указанием их взаимного расположения, форм поверхностей и оптических свойств материалов. Программы пакета, рассчитывающие те или иные характеристики заданной системы (величины аберраций, увеличение, угол зрения и др.), также имеют привычные для специалиста-оптика наименования и легко вызываются для работы в любой последовательности после загрузки пакета в память компьютера. В подобный «интеллектуальный» пакет обычно включаются также специальные программы, позволяющие быстро изменять те или иные элементы данных (например, расстояния между линзами, кривизну поверхностей и т. п.), отображать заданную систему и рассчитанные ее характеристики на экранах дисплеев и т. п. Если к тому же используется достаточно мощная вычислительная система или сеть компьютеров, то, как правило, удастся организовать одновременное пользование пакетом со многих рабочих мест, снабженных соответствующими терминальными устройствами. В целях разгрузки центральной части системы от многих подготовительных операций та или иная часть этих операций может выполняться непосредственно на рабочих местах, снабжаемых для этой цели специальными так называемыми интеллектуальными терминалами (использующими относительно дешевые мини-или микрокомпьютеры).

Помимо рассмотренного примера узко специализированного пакета, существуют пакеты общинженерного применения. Простейший из них — формульный пакет — позволяет вводить в компьютер любые формулы (записываемые в обычно принятом «немашинном» виде) и, подставляя в них данные также в естественной форме ($x = 1,272$; $\alpha = 0,1 \cdot 10^6$), производит необходимые расчеты. Впрочем, современное развитие микроэлектроники привело к появлению дешевых карманных программируемых компьютеров, позволяющих эффективно автоматизировать процесс вычислений по формулам (пока относительно несложным). Карманные электронные компьютеры успешно вытесняют такой привычный каждому инженеру старшего поколения инструмент, как логарифмическая линейка. Особое место в практике автоматизации проектно-конструкторских работ занимают так называемые графические пакеты. Развитые графические пакеты позволяют решать достаточно широкий круг задач с чертежами как плоских, так и объемных конструкций. Это прежде всего задачи быстрого поиска нужных элементов чертежа (линий, поверхностей, объемов) по их наименованиям, автоматического снятия размеров и др. Сюда добавляются программы, позволяющие осуществлять любые преобразования чертежей и связанные с ними расчеты, которые изучаются всеми студентами инженерных специальностей в курсах технического черчения и начертательной геометрии. В качестве примеров можно указать задачи изменения масштабов, сдвигов, поворотов, нахождения различных проекций и сечений и т. п. Сюда добавляются расчетные задачи типа определения расстояний площадей и объемов.

Обязательными составными частями графических пакетов являются программы ввода и вывода графической информации. В качестве устройств ввода употребляются специальные планшеты или графические дисплеи со световым пером для рисования эскизов. Имеются также устройства для автоматического ввода чертежей и рисунков. В качестве устройств вывода, помимо графических дисплеев, употребляются также одно и двухкоординатные графопостроители (плоттеры), позволяющие получать готовые чертежи с соблюдением всех принятых в техническом черчении стандартов. Помимо различия в толщине и характере вычерчиваемых линий (сплошные, пунктирные), некоторые плоттеры позволяют вычерчивать линии различных цветов. При этом интеллектуальные пакеты должны «понимать» слова, которыми инженер-про-

ектант описывает особенности вывода тех или иных линий. В трехмерном графическом пакете, разработанном в Институте кибернетики АН УССР для компьютера БЭСМ-6 (система АСПРО), предусмотрена также возможность «сборки» чертежа из тех или иных стандартных элементов (деталей или узлов конструкций), хранящихся в специальном машинном архиве. «Листая» страницы архива путем нажима на специальную клавишу, инженер-проектировщик видит изображенные на этих страницах элементы конструкций в одном из узлов графического дисплея. Находя подходящий элемент, инженер может переместить его световым пером или специальным подвижным маркером в нужное место чертежа, после чего происходит автоматическое совмещение масштабов и вставка элемента в чертеж.

В случае больших размеров архива подобный постраничный поиск будет занимать слишком много времени. Для уменьшения времени поиска в пакет вводится программа поиска деталей в архиве по их словесным описаниям. В случае использования стандартизованных описаний (шифров деталей) задача подобного поиска решается относительно просто. Одной из важных задач, которую предстоит решить в рамках создания искусственного интеллекта, является обучение компьютера пониманию любых словесных описаний на естественных человеческих языках. Определенные шаги в этом направлении уже сделаны, для полного решения задачи предстоит преодолеть еще немало трудностей.

Само собой разумеется, что по желанию пользователя архив может расширяться и корректироваться. С этой целью в развитых графических пакетах предусматривается возможность автоматического преобразования эскизов, рисуемых пользователем на дисплее или планшете, в точные чертежи. С этой целью пользователь должен ввести в компьютер, разумеется, кроме эскиза, дополнительную информацию о точных размерах, масштабе чертежа и т. п. Наличие такой возможности наряду со средствами автоматического считывания чертежей позволяет пользователю непрерывно пополнять архив новыми элементами. Программа пакета должна также предусматривать возможность исключения из архива устаревшей информации, перенумерации страниц, изменения системы обозначений деталей и т. п.

Многие графические пакеты снабжаются дополнительными программами, позволяющими автоматически или в режиме диалога с конструктором размещать плоские элементы в

заданной площади или объемные элементы в заданном объеме. При этом используются различные методы оптимизации, позволяющие получать лучшие инженерные решения. Обычно такие методы специализируют применительно к тем или иным классам задач. В современной практике автоматизированного проектирования получили широкое распространение такие задачи, как оптимизация процесса вырезки заготовок (для последующей штамповки) из плоского прямоугольного листа, задачи размещения радиотехнических элементов и соединяющих их проводников на многослойных платах, задача оптимизации конфигурации трубопроводов на химических предприятиях и т. п. Подобные задачи наряду с точными методами математического программирования используют и различные эвристические методы, заимствованные из опыта работы квалифицированных проектантов.

Развитые графические пакеты, будучи совмещенными с соответствующими проблемно-ориентированными расчетными пакетами, позволяют создавать комплексные системы автоматизации проектно-конструкторского диалога человек-компьютер. При этом за человеком остается наиболее творческая часть процесса — проектирование — определение общего замысла конструкции и наброска эскизов как ее общего вида, так и отдельных (нестандартных) ее узлов.

Вся же расчетная и оформительская часть работы, вплоть до выдачи полной технической документации (чертежей, спецификаций и др.) в соответствии с принятыми стандартами, выполняется компьютером. При этом, как показывает опыт, достигается ускорение процесса проектирования (в ряде случаев в десятки раз) с одновременным улучшением качества проектных решений. Так, созданная Институтом кибернетики АН УССР совместно с одним из проектных институтов города Киева автоматизированная система проектирования сборных железобетонных зданий ускорила процесс проектирования более чем в 20 раз. Стоимость проектирования при этом сократилась в 6—7 раз. Заметно улучшились и качественные показатели. Подобные системы созданы и продолжают создаваться и в других отраслях народного хозяйства. Анализ работ по созданию автоматизированных систем проектирования в машиностроении и строительстве приводит к постановке одной важной задачи перед разработчиками компьютеров и их программного обеспечения. Прежде всего, как уже отмечалось выше, современные компьютеры плохо приспособлены к обработке графической информации. Поз-

тому необходимо, чтобы при разработке компьютеров новых поколений одновременно разрабатывался бы стандарт представления графической информации в разрабатываемых компьютерах и развитый пакет программ для обработки графической информации. Как показывает несложный анализ, многие трудности, которые испытывают программисты, создающие графические пакеты для уже выпускаемых промышленностью машин, могут быть существенно уменьшены при внесении соответствующих изменений в *хардвэр*. Далее, заказчики (проектные институты и КБ) предъявляют различные требования к объемам оборудования систем автоматизации проектирования и к конфигурациям этого оборудования. Поэтому (как и в ряде других областей применения) для целей автоматизации проектно-конструкторских работ промышленность должна перейти к разработке программно-технических комплексов, ориентированных на классы применений. Рассмотрим как пример комплекс, ориентированный на автоматизацию проектно-конструкторских работ в машиностроении и строительстве. Такой комплекс должен набираться из отдельных модулей, в качестве которых могут быть процессоры различной производительности и, возможно, специализированные блоки памяти разных типов и периферийное оборудование, включая как интеллектуальные, так и обычные удаленные терминалы и специальные рабочие места конструкторов.

Применительно к каждой такой конфигурации должны генерироваться развитый пакет программ трехмерной графики и эффективная операционная система, удовлетворяющая принятым стандартам документирования на выходе и входе. Расчетные пакеты, кроме обычного формульного пакета, должны содержать все геометрические расчеты (включая автоматический выбор формул для определения длин и объемов), а также все расчетные методы курса общинженерной подготовки: теоретической механики, сопротивления материалов, теории машин и механизмов, деталей машин, электротехники и др.

В состав комплекса должна, разумеется, входить мощная система автоматизации программирования для подготовки специфических расчетных программ, употребляемых лишь для определенных видов конструкций (судов, самолетов и т. п.). Причем система автоматизации программирования должна обеспечивать автоматическое считывание данных генерируемыми его программами непосредственно с хранящихся

в машинной памяти чертежей. В комплексе, само собой разумеется, должны быть предусмотрены средства ведения архива стандартных элементов конструкций, о котором уже говорилось выше. Поскольку в математическое обеспечение подобного комплекса включены наиболее трудоемкие программы, то его можно очень быстро приспособить к любым специфическим задачам.

Разумеется, описанный комплекс не охватывает всех областей автоматизации проектно-конструкторских работ. Понятно, например, что для проектирования радиоэлектронных изделий (в том числе компьютеров) желательно несколько видоизменить состав его первичного математического обеспечения. Аналогичное положение имеет место и для ряда других инженерных специальностей (химическая технология, мелиорация, электрические сети и др.). Вообще, до сих пор мы рассматривали прежде всего лишь чисто конструкторский аспект проектирования (да и то лишь некоторую его часть). Между тем менее важным аспектом процесса проектирования является проектирование технологий.

Рассмотрим в качестве примера технологическое проектирование в машиностроении, скажем, проектирование технологии обработки деталей на металлорежущих станках. Здесь, как и на чисто конструкторском этапе, созданы пакеты программ, рассчитывающих и оптимизирующих процессы резания металла. Новым качеством, привнесенным в технологию металлообработки научно-технической революцией, является широкое распространение программно-управляемого оборудования и прежде всего станков с числовым программным управлением (ЧПУ).

Разработка технологии для станков ЧПУ является сегодня гораздо более трудоемким процессом, чем разработка обычной ручной технологии. Дело в том, что при современном уровне «интеллектуальности» ЧПУ выходной «документ» (лента для станка с ЧПУ) должен, как правило, определять каждое элементарное движение режущего инструмента и другие столь же мелкие подробности процесса, которые опытному рабочему не нужны. Поэтому возникли специальные системы автоматизации подготовки программ для станков с ЧПУ. Эти системы используют особые языки, нацеленные на описание обрабатываемых поверхностей и режимов обработки, автоматически переводя сделанные на этих языках описания в окончательные технологические документы — ленты для станков с ЧПУ.

Развитие подобных систем ставит два вопроса, требующих решения. Первый — проектирование системы автоматизированного конструкторского проектирования с системами автоматизации технологического проектирования. В результате такой интеграции для программно-управляемой технологии изготовления вновь спроектированного изделия можно устранить значительную часть обычной чертежной документации, оставив из нее только то, что необходимо человеку для контроля работы соответствующего программно-управляемого оборудования.

Второй вопрос — повышение уровня «интеллекта» программно-управляемого оборудования с целью упрощения приготовления необходимой для его работы информации. Для решения этого вопроса необходимо включать в состав программно-управляемого оборудования (станков или станочных линий с ЧПУ) мини- или микрокомпьютеры, способные в реальном темпе работы оборудования интерпретировать обобщенные команды на «технологических» языках достаточно высокого уровня в последовательности элементарных движений резца и других элементарных технологических операций.

Подобное оборудование для ряда технологических процессов уже создано. В качестве примера можно указать на разработанный в Институте кибернетики АН УССР специализированный миникомпьютер «Киев-70» для программного управления процессом электронно-лучевой обработки. Обобщенные технологические команды, которые интерпретирует «Киев-70», состоят из трех частей. Первая часть определяет вид геометрической фигуры, которая должна быть обработана электронным (или ионным) лучом (круг, сектор, прямоугольник, ряд точек и т. п.). Вторая часть команды задает размеры фигуры и ее расположение на обрабатываемой пластинке. Третья, собственно технологическая, часть команды определяет частоту, величину и число импульсов, которые должны быть посланы в каждую элементарную площадку (определяемую поперечным сечением луча) обрабатываемой площади.

Следует отметить, что за последние годы программно-управляемая технология получила широкое развитие в новых направлениях. Особо отметим появление и начало внедрения в практику универсальных промышленных роботов. От специализированного программно-управляемого оборудования универсальный робот отличается прежде всего наличием универсального исполнительного органа-аналога человеческой

руки. Будучи помещена на конвейер, такая «рука» (соответствующим образом запрограммированная) способна выполнять различные сборочные операции. Будучи помещена на программно-управляемую движущуюся тележку, рука робота способна работать как универсальное подъемно-транспортное устройство. Это устройство может перемещать детали от одного станка к другому, снимать и устанавливать эти детали на станок, менять режущий инструмент и т. п. Особо эффективным такое устройство становится тогда, когда оно снабжается аналогом человеческого глаза и встроенным в него дальномером.

Наличие подобных универсальных роботов наряду с программно-управляемыми станками, прессами и другим программно-управляемым оборудованием позволяет строить полностью автоматические цехи и целые машиностроительные заводы, способные быстро перестраиваться на выпуск различной продукции. Более того, не обладая инерцией человеческих навыков, робот практически мгновенно может менять характер своей работы без потери производительности, иными словами, конвейер (и целый завод), на котором вместо людей работают роботы, способен в режиме массового, поточного производства выпускать индивидуализированную продукцию. Разумеется, использовать эту возможность следует разумно, ибо в интересах конечного потребителя — человека некоторые свойства изделий (например, внешний вид) желательно индивидуализировать, а другие (например, размер патрона в электролампе) оставить стандартными.

Как бы там ни было, а новые возможности, открывающиеся перед автоматизацией производственных процессов, ставят и новые задачи перед автоматизацией проектирования. Проект нового изделия, предназначенного для выпуска на полностью автоматизированном предприятии, не может заканчиваться обычными чертежами и описаниями. Выходная документация проекта — это полный набор согласованных друг с другом программ работы всех единиц программно-управляемого оборудования (включая универсальные роботы).

Необходимость точного согласования (во времени и пространстве) работы каждой единицы программно-управляемого оборудования в масштабах целого предприятия (а впоследствии и целых групп взаимосвязанных друг с другом предприятий) выводит нас в другой класс задач, которые сегодня принято относить к организационному управлению. Таким

образом, задача проектирования нового изделия должна оканчиваться не только проектированием технологии его изготовления (на данном заводе), но и проектированием организации всего процесса его изготовления (включая материально-техническое снабжение, организацию профилактики и ремонта оборудования и т. д.).

Разумеется, чтобы сделать решение такой задачи более простым и реальным, необходимо повышать уровень интеллектуальности всех единиц программно-управляемого оборудования. Особо следует подчеркнуть наличие достаточно интеллектуального координирующего центра-автоматического менеджера, способного эффективно интерпретировать обобщенные команды организационного управления, выдаваемые системой автоматизированного проектирования.

К слову сказать, задача проектирования организационного управления при организации выпуска новых изделий решается уже сегодня во многих АСУ на машиностроительных и приборостроительных заводах — это так называемая задача технической подготовки производства. Разумеется, сегодня задача эта решается применительно не к вполне автоматизированному производству. Да и сами организационные АСУ, предназначенные для управления не только механизмами, но и людьми, работают (и в этих условиях не могут работать иначе) в человеко-машинном, а не в чисто автоматическом режиме.

Широкое внедрение в народное хозяйство универсальных промышленных роботов сегодня уже в первую очередь не чисто научная, а скорее — экономическая задача. Дело в том, что сегодня для управления такими роботами (особенно обладающими «зрением») употребляются весьма мощные и достаточно дорогие компьютеры. В период перехода от частичной к полной автоматизации производства будет происходить все большее и большее смещение деятельности инженеров-производственников от текущих проблем управления производством к перспективным проблемам его развития и совершенствования. Иными словами, повышение «интеллектуальности» средств автоматизации технологических и организационно-управленческих процессов будет приводить к непрерывному увеличению доли творческого труда в деятельности инженеров-производственников, к постепенному сближению характера их деятельности к деятельности инженеров-проектантов.

Уже сегодняшние, хорошо спроектированные АСУ организационного управления высвобождают инженеров-производственников от многих видов рутинного труда. Вместе с тем хорошие организационные АСУ представляют собой мощный инструмент для детального анализа технико-экономических показателей работы предприятий, выявления узких мест, мешающих развитию производства. Руководители, получившие в свои руки подобные АСУ, уже сегодня принимают меры для переориентации деятельности своих инженеров в этом направлении. Для этого необходимо, чтобы инженеры овладели новыми возможностями, которые дает им АСУ, активно использовали и развивали эти возможности, а освобождающееся от рутинных операций время использовали бы для творческого осмысливания проводимых с помощью АСУ анализов и выработки новаторских творческих предложений по дальнейшему совершенствованию производства.

Для более полного раскрытия всех этих новых возможностей необходимо постоянное внимание к развитию измерительных и контрольно-испытательных функций АСУ. Необходимость ускоренного развития этих функций диктуется также постоянным усложнением современного производства, усложнением выпускаемых изделий и постоянным усилением требований к их качеству.

Успехи современной вычислительной техники привели сегодня к настоящей революции в технике измерений и контрольно-испытательных операций. Прежде всего появление дешевых микропроцессоров (на базе электронных микросхем с большим уровнем интеграции) сделало возможным непосредственное их встраивание во многие измерительные приборы. Обладая свойствами запоминания и обработки измеряемой информации, измерительные приборы приобретают принципиально новые качества, освобождающие людей от многих рутинных операций. Например, лазерный дальномер со встроенным в него микропроцессором. Будучи должным образом запрограммированным, он вместо одного измерения в считанные секунды выполняет многие тысячи измерений, вычисляет среднее значение измеряемого расстояния, среднеквадратичную ошибку его измерения и выдает готовые результаты в цифровом виде.

Для организации надежного и высококачественного производства многих промышленных изделий сегодня уже на стадии проектирования технологии разрабатываются сложные системы автоматического контроля различных производст-

венных операций и специальные системы тестов для испытаний на различных стадиях производства и отладки как самого изделия, так и отдельных его блоков и узлов. В состав программно-управляемого оборудования сегодня все в большей степени включаются программно-управляемые контрольно-испытательные стенды. Для испытаний особо сложных объектов создаются комплексные системы автоматизации испытаний.

В таких системах комплексно решается целая группа вопросов. Во-первых, организация получения информации с большого количества (многих сотен, а иногда и тысяч) разнообразных датчиков, а также программного управления очередностью и частотой получения информации. Далее, в состав системы включается вычислительный комплекс, осуществляющий первичную и вторичную обработку поступающей информации и документальное оформление результатов такой обработки (графики, таблицы, текстовый материал).

Во многих случаях жесткие фиксированные заранее программы испытаний оказываются недостаточно эффективными, занимая слишком много времени и не выявляя с достаточной полнотой все скрытые дефекты. Поэтому в лучших системах автоматизации испытаний в состав систем включаются средства оптимизации планирования и управления испытаниями, учитывающие результаты уже проведенных этапов испытаний.

В ряде случаев используется предварительная запись поступающей от датчиков информации (возможно, предварительно частично обработанной) на машинные носители (магнитные ленты, гибкие магнитные диски др.) для последующей обработки в специальных информационно-вычислительных центрах. Таким образом, строится большинство автоматизированных систем испытаний подвижных объектов (самолетов, судов и др.).

Автоматизация процессов испытаний и контроля в процессе производства тесно связана с автоматизацией управления технологическими процессами, являясь зачастую составной частью последних. Особенно ярко это обстоятельство проявляется в наладочных операциях, которые занимают сегодня все больший удельный вес в производстве сложных машин и приборов. Увеличивающаяся сложность изделий с одной стороны, и широкая автоматизация процессов наладки — с другой, делают труд наладчиков все в большей и большей

степени разнообразностью инженерного труда. Здесь, как и в других случаях, автоматизация разгружает наладчиков в первую очередь от рутинных операций, постоянно увеличивая долю их творческого труда.

Аналогичное положение имеет место для автоматизированных (человеко-машинных) систем управления сложными технологическими процессами самых различных классов. Операторы, работающие на таких системах, во многих случаях должны иметь инженерную подготовку с большой долей творческого, неформализуемого сегодня начала в характере их труда.

Важное значение для инженеров всех специальностей и направлений деятельности (особенно для проектантов, конструкторов и технологов) имеют различного рода автоматизированные справочно-информационные системы. Речь идет прежде всего об автоматизации поиска необходимой патентной и справочной информации.

Так, конструктора новых машин могут интересовать данные о новейших конструкционных материалах, инженера-химика — о методах синтеза новых химических соединений и т. п. Первоначально такие системы создавались локально, в масштабах отдельных отраслей народного хозяйства или даже отдельных фирм и институтов. Появление и развитие сетей компьютеров и техники работы с компьютерами с удаленных терминалов сделало актуальной задачу создания автоматизированных справочно-информационных систем (обслуживающих инженеров и научных работников различных специальностей) в национальных и даже в межнациональных масштабах. Определенные шаги в этом направлении в ряде стран уже сделаны. Однако немало вопросов еще ждут своего решения. Среди вопросов, которые предстоит решить, — организация эффективных, широко доступных (для инженеров и научных работников соответствующих специальностей) автоматизированных фондов информации, получаемой в результате дорогостоящих или уникальных исследований. Причем речь идет о фондах первичной информации, полученной в результате измерений, а не о сделанных в результате ее обработки выводах и результатах. Смысл создания таких фондов состоит в возможности последующей обработки этой информации с помощью новых методов или под углом зрения новых задач. В качестве примера такой информации можно указать данные, получаемые в результате геофизической разведки новых месторождений полезных ископаемых.

В справочно-информационных системах, имеющих дело с новыми идеями (например, с патентной информацией), оказывается возможным и целесообразным увеличивать уровень их «интеллектуальности». Помимо большей свободы в отношении языка запросов, в последнее время появились возможности наряду с новыми идеями, зафиксированными в системе, получать автоматически от системы различного рода идеи, возникающие в результате комбинаций уже известных идей. Такой подход (применительно к новым результатам в области дедуктивных наук) развивается в настоящее время в Институте кибернетики АН УССР. Он включает в себя, помимо собственно справочно-информационной системы, систему интерпретации специально разработанного для этой цели языка практической математической логики (представляющего собой расширенный фрагмент обычного русского языка) и так называемого алгоритма очевидности, автоматически выводящего очевидные (с точки зрения этого алгоритма) новые факты, вытекающие логически из уже известных систем фактов.

Здесь мы вплотную подходим к проблемам автоматизации таких творческих элементов процесса проектирования, которые до сих пор оставались прерогативой человека. Ведь хорошо известно, что многие удачные проектно-конструкторские решения (в том числе и обладающие патентной чистотой) возникают в результате счастливых комбинаций уже известных идей. Сегодня ряд ученых предпринимают попытки автоматизировать процесс возникновения новых конструкторских идей как результат комбинаций уже известных идей. Практически полезные системы подобного вида потребуют сегодня, по всей видимости организации диалога с человеком для более эффективного поиска удачных комбинаций за счет отбрасывания заведомо бесперспективных направлений такого поиска.

Еще одно перспективное направление автоматизации более высоких творческих разделов инженерно-конструкторского труда — разработка так называемых алгебр конструкций. Алгебра конструкций должна в первую очередь иметь специальный символично-цифровой язык, позволяющий записывать конструктивные решения в виде аналогов (как правило, значительно более сложных) обычных алгебраических формул. Далее, каждой такой алгебре сопоставляется система эквивалентных преобразований ее формул, не меняющих некоторые, заранее фиксированные инварианты (определяю-

щие функциональное назначение конструкции). В обычной алгебре, например, преобразование формулы $ab + ac$ в формулу $a(b + c)$, меняя внешний вид формулы, не меняет вычисляемого по ней значения. Это значение и будет в данном случае инвариантом преобразования. В случае, если для того или иного класса конструкций удастся построить алгебру, задача инженера-конструктора состоит в том, чтобы найти какое-то (не обязательно лучшее или даже просто хорошее) решение стоящей перед ним конструкторской проблемы. Представив это решение в виде формулы в алгебре, он может подвергнуть его формальным эквивалентным преобразованиям и получить в результате некоторого целенаправленного поиска лучшее (если не самое лучшее из всех возможных) решение. Для сложных алгебр такие преобразования лучше всего выполнять в диалоговом (человеко-машинном) режиме, поручив всю технику эквивалентных преобразований и расчеты эффективности получаемых решений компьютеру.

Особенно эффективным подобный метод является в том случае, когда удастся построить полную систему эквивалентных преобразований, т. е. такую, что в результате преобразований из любого данного конструкторского решения можно получить любое другое решение с тем же самым функциональным назначением (системой инвариантов).

Автору удалось построить такую алгебру для решения задач проектирования компьютеров. Алгебры с достаточно богатыми системами эквивалентных преобразований построены для задач проектирования некоторых классов электрических схем, шарнирно-рычажных механизмов и др. Однако в целом задача алгебраизации конструкторских решений еще весьма далека от своего полного решения.

Еще одной важной областью применения компьютеров для решения инженерных задач является системный анализ и управление разработками сложных (больших) систем. Актуальность задач этого класса определяется тем, что сегодня все чаще приходится разрабатывать и реализовывать инженерные проекты столь большой сложности, что их невозможно в сколько-нибудь полном виде охватить одному человеку. Разбивая же задачу на части и поручая их решение различным специалистам, мы, как правило, утрачиваем представление о системе в целом, результатом чего могут быть непредвиденные отрицательные (а иногда и катастрофические) последствия функционирования системы.

Выход из положения даст предварительное моделирование поведения системы на компьютерах (как правило, особо мощных). Для облегчения подобного моделирования разрабатываются специальные языки, направленные на описание не столько конструктивных особенностей отдельных элементов системы, сколько на описание поведения таких элементов и их взаимодействия друг с другом. Специальная система программ позволяет по этим описаниям восстановить шаг за шагом поведение рассматриваемой системы во времени и пространстве в различных внешних условиях (также описываемых на соответствующем языке). Строящиеся таким образом автоматизированные системы моделирования сложных систем обычно осуществляют также и автоматическое документирование результатов моделирования. В лучших же системах осуществляется в той или иной мере автоматизация процесса планирования и управления машинными экспериментами, составляющими сущность процесса моделирования.

Очень важной особенностью подобных систем является то, что отдельные части системы могут описываться специалистами в самых различных областях науки и техники, зачастую даже плохо понимающими друг друга. В машинной же модели восстанавливается та необходимая для анализа ее поведения целостность восприятия системы, которая утрачена людьми в силу исторически вынужденного процесса специализаций знания.

Заметим, что современные методы математического моделирования (с использованием компьютеров) применимы и там, где отсутствуют классические математические описания (в виде формул, уравнений и т. п.) и даже возможность точного количественного определения интересующих нас параметров. Это обстоятельство особенно ценно в связи с тем, что многие современные инженерные проекты связаны с экологическими и социальными проблемами, плохо или даже совсем не приспособленными для обычных числовых характеристик.

Подобные системы, представляющие своеобразный синтез машинного и коллективного человеческого интеллекта, успешно используются сегодня для анализа сложных систем социальной и биологической природы, в которых нет ни одного количественного параметра, характеризуемого обычными числами. Системы такого рода успешно используются для прогноза развития науки и техники и управления научно-техническим прогрессом. Одна из возможных методик создания подобного рода систем (в двух вариантах) была предло-

жена авторам и ныне реализована в действующих системах.

Отметим в заключение, что разработка сложных инженерных проектов требует сегодня (даже с учетом развития автоматизации проектирования) согласованной работы многотысячных коллективов инженеров различных специальностей. Эффективное планирование и управление такими разработками требует специальных автоматизированных (человекомашинных) систем управления. Такие системы используют специальный математический аппарат, сложную технику, требуют специальных технологических и организационно-управленческих знаний. Необходимость создания и работы с такими системами вызывает потребность еще в одной инженерной специальности, а именно инженера-организатора управления разработками. Такое же положение имеется и в других областях, где используются АСУ. Таким образом, широкое внедрение компьютеров не только меняет характер труда инженеров традиционных специальностей, но и создает новые инженерные специальности.

КИБЕРНЕТИКА И ТВОРЧЕСТВО *

(реальность и поиски)

Проблема использования кибернетики в различных областях науки и культуры, т. е. в различных областях творческого труда, была и остается одной из интереснейших и перспективнейших. Эта проблема рассматривалась на многих конференциях и симпозиумах у нас и за рубежом, и посвященная ей обильная литература растет с каждым днем. Лет десять тому назад споры вокруг темы «Кибернетика и творчество» носили характер во многом чисто теоретический. Теперь пришло время реалистического обсуждения современного положения дел и дальнейших поисков.

Сначала несколько слов о возникающих трудностях.

На данном этапе развития кибернетики еще нельзя считать окончательно сложившейся терминологию этой науки. Некоторые применяемые термины, такие, например, как «общение человека с машиной», «искусственный интеллект» и другие, в известной мере условны, метафоричны, хотя уже

* В кн.: НТР и развитие художественного творчества. Л.: Наука, 1980, с. 166—175.

вошли в специальную литературу (отметим, что проблема «искусственного интеллекта» именно в этом обозначении включена в план работы Комитета по системному анализу при Президиуме Академии наук СССР). Такие выражения, как «автоматизация творческого процесса», часто режут слух представителям литературоведческих и искусствоведческих специальностей, более того, в них видят грубое посягательство на тончайшие и сложнейшие области духовной жизни человека ¹. Но здесь необходимо подчеркнуть, что сам термин «автоматизация» в данном случае не содержит обыденного, привычного смысла. Даже в тех ограниченных пределах, в которых уже применяется или будет применяться ЭВМ в определенных областях творчества, не может быть и речи (тем более сегодня) о передаче всех полномочий машине.

В связи с этим остановимся на вопросе о сути общения человека с машиной. Это общение упрощено за счет широкого развития различных устройств ввода и вывода, которые помогают нам давать ЭВМ информацию и получать информацию от нее в привычной для нас форме. Уже созданы различные читающие автоматы, способные воспринимать печатный текст, и ставится вопрос о вводе в машину заданий непосредственно с голоса. Вопрос ввода в ЭВМ текста непосредственно с машинописных листов, можно сказать, уже решен теоретически. Однако трудности экономического характера сдерживают возможность практического его решения.

Общение человека с машиной упростится, если ученые и конструкторы до максимума повысят «интеллектуальность» ЭВМ, т. е. заложат в нее определенную способность «мышления», чтобы не «объяснять» ей элементарных вещей (например, как найти синус какой-то величины и т. п.).

Надежная техническая база, которая совершенствуется

¹ Следует отметить как положительное явление факт включения проблемы «Кибернетика и творчество» в круг проблем, интересующих Комиссию комплексного изучения художественного творчества при Научном совете по истории мировой культуры АН СССР. Так, в выпущенном ею сборнике «Художественное и научное творчество» (Л., 1972) целый раздел посвящен рассмотрению этой проблемы на различных уровнях, как философско-теоретическом, так и практическом. Здесь подвергнуты обсуждению и серьезные практические вопросы использования ЭВМ в целях рационализации труда в литературоведении и искусствоведении. Перспективна и сама установка Комиссии на объединение для разработки проблемы усилий специалистов-кибернетиков и специалистов в области изучения художественной культуры.

из года в год, дает возможность реально поставить вопрос об автоматизации определенных процессов, например, в таких сферах человеческой деятельности, как живопись, музыка. Первые попытки дали хорошие результаты. Программы, созданные для ЭВМ, обнаруживали достаточный уровень «интеллектуальности».

Каковы же конкретные возможности и результаты применения ЭВМ в различных областях творчества в настоящее время?

Начнем с примеров, касающихся архитектуры и конструкторского труда. Если говорить об автоматизации конструкторского труда (с помощью разных систем по автоматизации проектирования), то здесь роль человека сохраняет свое важнейшее значение. Скажем, проектируются жилые дома или пассажирские теплотходы. Машина может намного лучше, чем человек, разместить каюты в корабле или жилые комнаты в доме, но может и допустить элементарную ошибку (где-то не будут открываться двери в коридор), поскольку в программе не была предусмотрена эта «мелочь». А конструктор сразу видит все недостатки проекта, быстро оценивает их и устраняет.

В Институте кибернетики АН УССР уже создана автоматизированная система для проектирования новых вычислительных машин. Состоит она не из каких-то специальных агрегатов и установок, а из набора программ. Все задания по проектированию решает машина под контролем человека, ведущего с ней диалог.

Конечно, было бы намного проще дать машине лишь исходное задание: спроектировать ЭВМ с определенной скоростью, определенного назначения и стоимости. Однако машина пока еще не способна выполнить такой приказ. Она даст лишь структурную схему задания, в которой будут указаны основные блоки будущей конструкции и характер взаимодействия между ними; больше ничего без нашего приказа электронный мозг сделать не в состоянии. После этого мы поручаем ЭВМ вычислить структуру каждого из блоков. Когда и эта работа выполнена успешно, приказываем перейти к последней стадии проектирования — созданию чертежей и схем. Таким образом, весь процесс идет по линии все большей детализации и углубления, так сказать, в недра будущей ЭВМ, и все это происходит при постоянном диалоге машины с человеком. Да иначе и быть не может. Ведь случается, что машина предлагает технически неосуществимые проекты.

Новый метод значительно облегчает работу конструктора. Если раньше на конструирование одной большой машины многотысячный коллектив затрачивал более пяти лет, то сегодня двадцать человек с помощью электронного мозга выполняют эту работу за месяц.

В автоматизированных системах учтена обратная связь конструктора с машиной. План квартиры, отраженный на экране, дает возможность конструктору оценить расположение комнат. Он считает, например, что какую-то стену нужно переместить вправо или влево, и тут же сообщает об этом машине. С помощью светового карандаша конструктор перечеркивает «дефектную» деталь и стрелкой показывает, в каком направлении и на какое расстояние следует передвинуть стену. Перед ним сразу же возникает новый чертеж, который оценивается снова. Так продолжается до тех пор, пока конструктор не решит окончательно, что чертеж полностью отвечает его требованиям. Таким образом, человек все время дает направление поиску. Машина лишь предлагает варианты, но последнее слово остается за человеком. Желательно, конечно, чтобы машина сама могла отбрасывать, не тратя времени на пересмотр, бесперспективные варианты проекта. Но для этого в нее нужно заложить определенную «интуицию».

Очень важной задачей является автоматизация процессов научных исследований. Проблема подобных современных автоматизированных систем существенна как для гуманитарных, так и для физико-математических наук. В математике, например, делаются попытки создания автоматизированной системы доказательства теоремы.

Известен факт, когда математик одну теорему доказывал на 280 страницах. Эту работу немногие дочитали до конца, но и те, кто дочитали, не могли с уверенностью сказать, что там нет ошибок и что теорема действительно доказана.

Угроза, что не все, чем мы пользуемся при обосновании, скажем, теорем, доказано, является сегодня в математике вполне реальной. Можно хорошо ощущать математическую идею, ее можно понять, ею можно восхищаться, однако техника доказательства может подвести, особенно когда доказательство широкое. Систему доказательств — одну из отраслей математического творчества — можно с успехом контролировать с помощью ЭВМ.

Работа с ЭВМ полезна прежде всего самому математику: сумел объяснить машине принцип доказательства теоремы,

значит, сам хорошо разобрался в ней, не сумел — не доказал ее.

Для обоснования математических выкладок нужен специальный язык, ориентированный на математику. Нужна формализация понятия очевидности, создание машинного алгоритма, который доказывал бы очевидные вещи. Ведь такие понятия, как «машинная очевидность» и «человеческая очевидность», совсем различны. Аспекты очевидности немного смещены, и это нужно учитывать при создании формализованного языка. Математик иногда пытается «разжевать» подробно какое-то положение, которое абсолютно ясно машине. В машине могут быть сконцентрированы знания, которые по крупницам «рассыпаны» в целом коллективе научных работников.

Для решения проблемы автоматизации доказательства теоремы мы разрабатываем (кстати, впервые в мире) человеко-машинную систему доказательства, которая даст возможность значительно ускорить творческий процесс. При этом наиболее творческие элементы оставляют человеку, а поиск в заданном направлении, оформление решения, различные выкладки передаются машине, которая делает это в сотни тысяч раз быстрее.

При этом само понятие «творчество» наполняется новым содержанием. Так, например, в шахматах раньше вершиной творчества считалась комбинация, а сегодня ЭВМ по шахматным программам, сделанным нами, создает комбинации лучше гроссмейстера. Таким образом, комбинация перестала быть творческим элементом. А вот оценка позиции или составление стратегических планов в шахматах намного труднее поддаются автоматизации, однако в принципе автоматизация возможна и в этих случаях.

Когда мы говорим о создании человеко-машинной системы для игры в шахматы, которую, при условии, что она будет сделана хорошо, никто не сможет победить, ни человек, ни машина, то имеем в виду включение в такую систему самого обыкновенного шахматиста, а не чемпиона. С помощью этой системы он победит любого гроссмейстера.

Перейдем к проблемам автоматизации процессов, которые связаны с творчеством, носящим прикладной характер.

При монтаже фильмов, особенно при создании мультипликационных лент, человеко-машинная система работает почти так же, как и система автоматизации проектирования.

Память машины сохраняет колоссальное количество различных элементов из предыдущих фильмов, нарисованных художниками-мультипликаторами и заложенных в нее. Кроме того, есть специальный «язык», с помощью которого можно «разговаривать» с машиной. Объясним это конкретнее. Художник монтирует кадры будущего мультфильма. Скажем, ему нужно нарисовать двухэтажный дом. Он нажимает соответствующие клавиши и, обращаясь к машине на понятном ей языке, вызывает на экране изображение дома. Это первый вариант. Художника он не устраивает. Он вновь нажимает кнопку, листает страницы специального альбома разных двухэтажных домов, находящихся в памяти машины. И в тот же миг изображения этих домов появляются на экране. Наконец он останавливается на каком-то варианте. Но его не устраивают размеры дома. Он несколько велик для кадра. Тогда дается команда: изменить масштаб. Изображение изменяется в соответствии с требованиями и размещается именно там, где нужно, ибо существует возможность передвигать его на экране. Затем может понадобиться, например, дерево в правой части экрана, а в левой — фигура человека. Изображение человека можно смонтировать по своему усмотрению. При этом прежде рисуется начальная позиция фигуры, затем конечная, а все промежуточные позиции нарисует машина.

Словом, художник освобождается от необходимости рисовать множество кадров, и изготовление мультипликационных фильмов с помощью такой человеко-машинной системы сокращается с полугода до нескольких недель, даже до трех-четырех дней, в зависимости от объема информационной базы машины. Если же художник не нашел в памяти машины того, что ему нужно, он берет электронное перо и тут же рисует новое изображение. Оно также остается в памяти машины и может быть использовано затем при создании другого фильма.

Немалую помощь может оказать ЭВМ и художникам в области прикладного искусства при создании декоративных комбинаций или разнообразных орнаментов в процессе рисовки тканей. Здесь комбинаторные способности машины так велики, что человеку состязаться с ней нелегко. «Живой мольберт» соответственно запрограммированной машины может дать большое количество вариантов цветовой гаммы, сочетающихся линий, штрихов различной густоты. Во всем этом процессе, однако, ведущая роль все же будет принадлежать человеку. Он может корректировать результат, пред-

ложенный машиной, в соответствии со своим вкусом, индивидуальным восприятием действительности.

Сложнее обстоит дело с применением ЭВМ, когда мы выходим за рамки художественного творчества, носящего прикладной характер. Таковы опыты, относящиеся к музыке. Человеко-машинные системы способны уже сегодня создать мелодии, грамотные с точки зрения композиции. Однако и тут ведущая роль принадлежит человеку. Машина по вашей программе «творит» музыку. После прослушивания, скажем, двухсот вариантов человек находит тот, который его удовлетворяет. В нашей прессе неоднократно освещались эксперименты, во время которых в различных аудиториях демонстрировались относительно простые мелодии, сочиненные ЭВМ, и мелодии, сочиненные профессиональными композиторами. При этом аудитории не сообщалось, какие именно мелодии «машинные». При закрытом анкетном опросе выяснялось, что слушатели не только не могли отличить первые от вторых, но чаще всего, а иногда и целиком отдавали предпочтение «машинным» мелодиям.

Разумеется, не может быть и речи о «замене» композитора машиной. Пусть музыковеды и композиторы решат, какие реальные возможности предоставляет им этот феномен. Ведь если посмотреть на опыты сочинения музыки машиной без предубеждения, то это действительно феномен, рожденный НТР! Этим открытием, разумеется, могут воспользоваться ремесленники, которые, впрочем, и без машин, сами фабрикуют свои однообразные, автоматизированно-однотонные мелодии. Но разве ссылкой на ремесленников можно закрыть самую проблему?

Большие перспективы открываются в развитии электронной музыки, демонстрирующей новые тембровые и оркестровые звучания. Такая музыка была написана для многих фильмов, например для «Соляриса». При сочинении ее композитор вводит в машину определенную мелодию, которую машина аранжирует, выдавая принципиально новые звучания, до этого не существовавшие. С помощью машины можно как угодно изменять тембр, получая такую окраску, которую не способен дать ни один инструмент. Композиторов, работающих в области создания электронной музыки, привлекает именно неограниченность возможностей машины в этом направлении, а также то, что композитор становится одновременно и оркестрантом, сам создает своеобразный оркестр без участия исполнителей. К тому же во много раз со-

кращается время написания музыкальных произведений. И самое главное, пожалуй, — появляются возможности написания музыки, которую каким-либо иным способом создать просто невозможно.

Но особенно поразительным является факт создания при помощи электронно-вычислительной техники сложных музыкальных произведений в стиле широко известных композиторов.

Уже имеются программы для ЭВМ в основном двух типов: для создания мелодий с учетом законов музыкальной композиции вообще и для имитации уже известных мелодий с учетом особенностей стиля автора. Сначала машина выявляет особенности музыкального стиля композитора, например, Баха, а затем, вводя элемент случайности, не нарушающей особенностей стиля, сочиняет какую-то органную музыку, фугу или токкату. При этом даже у знатоков (если программа для ЭВМ составлена квалифицированно) не возникает сомнений, что они слушали Баха. Как могут быть использованы такие опыты? Конечно, не для всякого рода мистификаций, а прежде всего в помощь познанию и исследованию характерных особенностей стиля и «почерка» Баха или какого-либо иного композитора.

ЭВМ открывает и другие возможности для теории и истории музыки. Еще на конгрессе Международной федерации по технике информации (1968) тема одного из докладов была связана с проблемой применения электронно-вычислительной техники в музыковедении. Ныне совместными усилиями программистов-математиков и музыковедов создаются машинные архивы музыки. Так, например, существует архив испанской музыки XVI столетия. Музыковед, изучающий историю музыки XVI столетия в Испании, может проверить свои обобщения, обратясь к колоссальной музыкальной памяти машины, в принципе неограниченной.

Немало споров вызывал вопрос о том, в какой степени ЭВМ может «создавать» литературные произведения. Конечно, сейчас можно составить такие программы, на основании которых машина «сочинит», например, стихотворение. Однако возникает вопрос зачем, ибо практически такого рода системы конкурировать с подлинными писателями не смогут. Да и трудности, которые нужно преодолеть при составлении соответствующих программ, себя не оправдывают. Сегодня всем очевидно, что интуиция человека, его жизненный опыт — элементы, недоступные для ЭВМ. У машин есть свои преимущ-

щества: они владеют колоссальной скоростью выполнения поручаемых им операций. Современная ЭВМ выполняет миллион арифметических операций за секунду, но не владеет гибкостью мышления, вытекающей из каких-то интуитивных источников.

Но есть проблемы, над которыми стоит работать. Это прежде всего автоматизация переводов с одного языка на другой. Как выглядел бы процесс перевода? Представим себе электронный переводчика с двумя специальными экранами. На один из них подается текст оригинала, на другой — машинный перевод. Кроме этого, устанавливается специальный читающий автомат, который соответствующим образом настраивается на текст, точнее — на шрифт. К сожалению, мы еще не имеем таких универсальных автоматов, которые могут читать любой шрифт с большой скоростью.

Мы даем машине первую страницу-образец, написанную на том или ином языке. Машина, читая ее, делает необходимые вычисления и настраивает свою читающую часть (устройство) именно на данный шрифт, затем она с большой скоростью прочитывает весь текст и запоминает его. После этого работает примитивный алгоритм перевода. Понятно, по качеству такой перевод не может конкурировать (особенно если это художественный перевод) с переводом, выполненным специалистом. Но возможности улучшения полученного перевода существуют. Допустим, машине необходимо перевести русский текст на английский язык. Сначала, особенно когда машина еще не стала «профессиональным» переводчиком, может получиться так, что она не справится с каким-то словом, еще не зная его английского значения. На экране идет английский текст, а в нем одно непереведенное русское слово. Писатель-переводчик следит за этим. У него есть печатная машина, соединенная с соответствующим экраном, и световой карандаш. Увидев непереведенное русское слово, писатель переводит его и впечатывает в текст. Таким образом, переводчик заполнил пробел, сделанный машиной. Когда перевод готов, его нужно отредактировать. Что это означает? Какие редакционные операции делают современные дисплеи? У переводчика, как упоминалось, есть специальный световой карандаш, пользуясь которым можно заменять или вычеркивать те или иные слова. Вместо одного или нескольких слов можно вмонтировать другие.

Весьма продуктивно можно использовать ЭВМ с целью рационализации труда литературоведа и искусствоведа.

Известны случаи, когда при посредстве ЭВМ решался вопрос об авторстве анализируемого произведения, вопрос, бывший спорным на протяжении длительного времени. Благодаря колоссальной скорости чтения и практически безошибочной памяти ЭВМ сразу уже запоминает особенности того или иного писательского стиля и сравнивает его со стилем исследуемого текста. Таким способом с достаточной убедительностью была подтверждена мысль о том, что «Илиада» и «Одиссея» написаны одним автором — Гомером.

ЭВМ могут быть использованы в литературоведении и искусствознании с различными справочно-библиографическими и информационными целями: для составления библиографий, автоматического индексирования, накопления и семантического поиска информации. Широкие возможности открываются в составлении словарей литературного языка, словарей рифм, синонимов и т. д. — не только с целью исследования творчества, но и в помощь писательскому труду.

Особая область использования электронных опознающих систем — текстология, чтение черновых рукописей классиков, а также экспертное установление авторства того или иного произведения путем сравнения почерков. При этом предстоит составление «азбук» — образцов почерков различных писателей. Таким образом, развитие кибернетической текстологии не только увеличит достоверность анализа «не опознанных» в отношении авторства произведений, но и освободит ученого от одного из самых сложных и утомительных этапов его работы, важного не только для изучения процесса создания литературного произведения, но необходимого и при подготовке к печати академических собраний сочинений, учитывающих не только основные тексты, но и черновые варианты ².

Нет сомнения, что по мере развития и усовершенствования электронной техники увеличатся возможности ее применения в самых разных областях, в том числе и в тех, которые связа-

² Эти вопросы подробно освещались литературоведами совместно с представителями точных наук на симпозиумах и в сборниках Комиссии комплексного изучения художественного творчества при Научном совете по истории мировой культуры АН СССР (см.: Изв. АН СССР. Сер. лит. и яз., 1963, № 5 (выступления Д. С. Лихачева, Б. С. Мейлаха, Л. И. Крайзера и других); *Мейлах Б. С., Сочинко В. П.* Вопросы использования электронных информационных и опознающих систем в литературоведении. — В кн.: Художественное и научное творчество. М., 1972).

ны с литературным трудом. В принципе возможности работы системы на основе «общения человека с машиной» исключительно широки.

В истории кибернетики было немало сомнений в возможностях ЭВМ. Так, кое-кто уверял, что машина никогда не смоделирует условных рефлексов. Сегодня даже ученики, знакомые с кибернетикой, могут составить программу поведения животных в определенных условиях, а каких-то пять лет назад подобное казалось невозможным. Моделирование условных рефлексов — дошкольный уровень кибернетики.

Сейчас речь идет о том, что сегодня целесообразнее всего доверить машине.

Человеку свойственно естественное стремление противодействовать сведению его деятельности к механизированным операциям. Если, например, построить машину для разгадывания кроссвордов, то множество людей все равно будут разгадывать их своими силами. Стремление к интеллектуальному труду, к художественному творчеству заложено в самой природе человека. Поэтому в дальнейшем нужно, усовершенствуя машины, стремиться прежде всего к тому, чтобы способствовать с их помощью развитию творческих сил человека, а не угнетению их. Это возможно лишь тогда, когда автоматизацией творческих процессов будут заниматься люди, понимающие суть творчества. Случайный в искусстве человек не сможет даже с помощью ЭВМ создать что-либо ценное. Наивным было бы считать, что чуть ли не каждый с помощью ЭВМ сможет создавать стихи или музыкальные произведения.

Когда же автоматизированные системы (если они так удобны и полезны) можно будет применять в широких масштабах с целью облегчения и ускорения литературного труда, освобождения времени и сил тех, кто им занимается, для непосредственно творческой деятельности?

Сегодня автоматизированные системы нужнее всего в области науки и конструирования. Без их внедрения немыслимы дальнейшие стремительные темпы технического прогресса. И, понятно, народные средства будут вложены прежде всего в создание таких систем. Задача ученых — непрерывно совершенствовать машины, чтобы можно было справиться наконец и с такими сложными проблемами, как создание «искусственного интеллекта». Прогресс в таких областях, которым посвящена наша статья, будет способствовать удешевлению пока еще дорогостоящей электронной техники: предполага-

ется, что в недалеком будущем будут созданы ЭВМ, равные по стоимости цветному телевизору. Однако все это не значит, что уже сегодня не следует работать над проблемами использования ЭВМ не только в технике, но и в сфере художественного творчества и гуманитарных наук. Ученые-гуманитарии в сотрудничестве со специалистами-кибернетиками могут расширять уже начатые работы, накапливать опыт, который затем позволит двигаться дальше быстрыми темпами. Кое-что в этом направлении уже сделано сегодня.

Цель этой статьи — способствовать активизации интереса литературоведов, искусствоведов, практиков художественного творчества к проблеме «Кибернетика и творчество», способствовать их контактам с представителями точных наук. Именно на этом пути возможны реальные успехи в дальнейшем.

ОСНОВАНИЯ МАТЕМАТИКИ И ПРОБЛЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ДЕДУКТИВНЫХ ПОСТРОЕНИЙ

Еще на заре развития науки люди стали задумываться над вопросом: «Как человек мыслит? Развитие дедуктивных наук и, в первую очередь, математики привело к более специальной постановке этого вопроса: Каким образом из одних утверждений следуют другие? Что такое «очевидно»?

Первая систематизация элементарных мыслительных актов, из которых складываются дедуктивные построения, была сделана Аристотелем. Эта систематизация, однако, была далеко не полной и не могла служить основой для сколько-нибудь сложных дедуктивных построений. Со всей остротой этот факт был выявлен развитием математического анализа в XVIII и особенно в XIX столетии. Столкнувшись со сложными дедуктивными построениями в области, где обычная интуиция и здравый смысл переставали быть надежными советниками, математики остро ощутили зыбкость границы между правильным и неправильным доказательством. Это обстоятельство поставило на повестку дня вопрос о строгом обосновании математики.

Решение этого вопроса требует, с одной стороны, строгого определения всех фундаментальных понятий, с которыми оперирует математика, а с другой — детального анализа и

систематизации законов логики, по которым из одних утверждений следуют другие. Возникнув в рамках единой проблемы, эти два круга проблем стали в дальнейшем все более удаляться друг от друга. Исследование фундаментальных математических понятий породило теорию множеств, топологию, современную абстрактную алгебру и другие новые разделы содержательной математики. Углубленный же анализ проблем логического вывода породил современную математическую логику.

Огромным достижением математической логики явилось построение в известном смысле полной системы элементарных правил логического мышления: логических аксиом и правил вывода. Полнота, о которой идет речь, означает, что любое из имеющихся доказательств самых сложных математических предложений может в принципе (после введения надлежащих определений) быть построено из этих элементарных правил. Вместе с тем подобные разложения для сколько-нибудь сложных теорем содержательных разделов математики оказываются столь громоздкими, что полностью теряют какое-либо практическое значение.

Здесь напрашивается аналогия с огромным зданием, которое пытаются сложить из миниатюрных кирпичиков. В содержательных разделах математики, изучающих те или иные объекты геометрической, алгебраической или функциональной природы, здания доказательств строятся, как правило, из гораздо более крупных строительных блоков.

Быстрое развитие математики приводит к непрерывному росту средней сложности доказательств вновь открываемых фактов. Доказательства многих теорем, полученные в последние десятилетия, даже при условии использования крупных блоков, оказываются весьма громоздкими, занимая десятки (а иногда и сотни) страниц печатного текста. На поиск и оформление таких доказательств уходят многие годы (а иногда десятилетия) упорного труда, успешный исход которого в значительной мере зависит от случая. Неудивительно, что задача автоматизации поиска доказательств теорем приобретает в современной математике большую актуальность.

В принципе любое доказательство в математике может быть получено с помощью перебора всех возможных последовательных комбинаций элементарных строительных блоков. Поэтому естественным образом рождается мысль об использовании огромного быстрогодействия современных компьютеров

(электронных вычислительных машин) для фактического осуществления такого перебора. Простейшие оценки показывают, однако, что с ростом сложности доказательства количество перебираемых вариантов растет столь быстро, что резервы быстрогодействия компьютеров оказываются очень быстро исчерпанными.

Необходимы поэтому методы, направляющие перебор в сторону наиболее перспективных вариантов и отбрасывающие бесперспективные варианты целыми группами, без их предварительного перебора. В случае, когда поиск доказательства ведет человек, эти методы составляют сущность того свойства человеческого мышления, которое принято называть интуицией. Хотя несомненно, что в основе интуиции лежит опыт, позволяющий быстро оценивать ситуации по сложным комплексам признаков, сам аппарат интуиции изучен еще весьма плохо. Неудивительно поэтому, что машинное моделирование интуиции для сколько-нибудь сложных ситуаций пока приводит к процедурам, заметно уступающим мощи человеческой интуиции.

Напрашивается мысль соединить преимущества быстрой реализации перебора вариантов и других формализованных процедур, даваемые современными компьютерами, с изощренностью и гибкостью человеческой интуиции. Иными словами, решение задачи автоматизации процесса поиска доказательства теорем следует искать сегодня в человеко-машинных системах, использующих наиболее сильные стороны как своих человеческих, так и машинных компонент.

Для решения этой задачи необходимо прежде всего построить формализованный язык для записи доказательств теорем в различных содержательных областях математики. Как было сказано ранее, таким языком не может служить обычный язык современной математической логики, он должен быть в гораздо большей степени приближен к тому языку, которым фактически пользуются математики, развивающие те или иные области математики. Этот язык, который естественно называть языком практической математической логики, относится к нынешнему языку математической логики, как современный развитый алгоритмический язык (Алгол, Фортран, PL-1 и др.) к языку простейших универсальных машин Тьюринга.

Второй, не менее важной стороной является формализация понятия очевидности в построенном языке практической математической логики. В полном соответствии с практиче-

ской направленностью языка алгоритм очевидности в нем должен также носить ярко выраженную практическую направленность. В частности, в этот алгоритм наряду с обычными правилами логического вывода исчисления предикатов должны быть включены различные процедуры аналитических преобразований как в рамках классического математического анализа и алгебры, так и для произвольных алгебраических систем.

Алгоритм очевидности должен иметь блочную иерархическую структуру, а при представлении его системой машинных программ он должен управляться специальной организующей программой — специализированной операционной системой.

Нижний уровень иерархии должен состояться блоками с наиболее мелкими шагами вывода. Доказательство, понятное этому уровню, должно быть очень подробным: каждый шаг доказательства должен действительно быть очевидным для любого математика, не имеющего специальных знаний и навыков в конкретной области, к которой относится данное доказательство. Следующие уровни должны «понимать» все более и более крупные шаги доказательств, как это делает человек по мере приобретения опыта работы в той или иной конкретной области математики.

Организация алгоритма очевидности должна допускать возможность неограниченного пополнения его все новыми и новыми блоками с целью создания более высоких уровней иерархии. Для практических применений алгоритма очевидности важное значение имеет достижение такого уровня его развития, при котором средняя длина доказательств (включая построения опровергающих примеров) сравнивается со средней длиной доказательств, приводимых в учебниках и монографиях, а затем — и в специальных статьях. При этом, разумеется, помимо собственного алгоритма очевидности должна развиваться информационная база системы, включающая в себя описание (на языке практической математической логики) различного рода понятий, используемых в рассматриваемой конкретной математической теории, а также свойств этих понятий, процедур построения и исследования примеров и т. п. Все это информационное богатство должно использоваться алгоритмом очевидности, подобно тому, как это делается человеком.

Достижение алгоритмом очевидности доказательной силы учебников и специальных монографий дает возможность

впервые в истории математики изложить ее содержательные разделы без всякого палета субъективизма. А ведь все современные попытки такого изложения, в том числе и такие блестящие по замыслу и исполнению, как цикл монстрафий Бурбаки, грешат одним фундаментальным недостатком: понятие очевидности, на котором строятся доказательства, строго не определено, зависит от склада мышления, опыта и навыков автора. В принципе это явление того же плана, как и пресловутое «смотри!» древних греков, которое (вместе с соответствующим чертежом) заменяло доказательства геометрических теорем.

Возведение здания математики, в котором каждый шаг проверен строго формальным объективным путем, само по себе представляло бы принципиально важное достижение. Вместе с тем достижение алгоритмом очевидности достаточной доказательной силы позволило бы решить еще несколько важных практических задач. Прежде всего появилась бы возможность построения автоматизированных справочно-информационных систем принципиально нового типа. Такие системы могли бы не просто давать справки о тех или иных известных фактах, но и о различных следствиях, вытекающих из этих фактов в результате применения алгоритма очевидности. Появилась бы возможность организации математических журналов, в которых проверка правильности публикуемых результатов проверялась бы автоматически с помощью компьютеров.

Немалую пользу можно было бы получать и для целей обучения и контроля приобретаемых знаний. Взяв, скажем обучение аспирантов-математиков. Сегодня руководитель аспирантами, желая проверить, действительно ли его ученик разобрал то или иное сложное доказательство из специальной статьи, намеренно «притупляет» свое индивидуальное понятие очевидности, требуя, чтобы ему растолковали более подробно каждый шаг доказательства. Имея блочную иерархическую структуру алгоритма очевидности, можно применить тот же самый способ, заменив руководителя компьютером. Для этой цели необходимо иметь пульты, с которых обучающиеся могли бы вводить в компьютер последовательные шаги доказательства. Отключив верхние уровни алгоритма очевидности, можно добиться того, чтобы он понимал лишь достаточно «разжеванные» доказательства. Если обучающийся смог ввести с пульта доказательство, каждый шаг которого понятен «оглушенному» таким образом алгоритму очевидности, то это

свидетельствует о том, что он сам вполне разобрался в доказательстве.

Заметим, что в процессе подобного обучения происходит одновременно и пополнение информационной базы системы.

Наконец, наличие достаточно мощного алгоритма очевидности приближает нас к решению основной задачи: автоматизации (на основе совместной работы человека и машины) поиска доказательств новых теорем.

Для этой цели помимо уже описанных компонент (языка, алгоритма очевидности и информационной базы) в систему должны быть введены дополнительные средства. Это прежде всего язык диалога системы с пользователями, включающий следующие основные возможности: во-первых, возможность получения справок от информационной части системы об уже известных результатах и их доказательствах. При этом пользователь должен иметь возможность регулировать степень подробности выдаваемых системой доказательств. Вторая возможность — ввод в систему новых результатов и их доказательств со специальных пультов. При этом, в случае необходимости, система должна автоматически перестраиваться, поскольку добавление в нее новых результатов, особенно результатов обобщающего характера, позволяет перестроить доказательства уже известных теорем с целью их упорядочения, изменить порядок изложения и т. п.

При этом появляется объективный критерий ценности подобных результатов, в качестве которого можно принять уменьшение суммарной длины изложения ранее введенных в систему теорем и их доказательств. Поскольку уменьшение объема изложения может быть получено также и за счет увеличения мощности алгоритма очевидности, то впервые становится возможным измерить единой мерой достижения в столь различных областях, как собственно математика, программирование и вычислительная техника. Ведь упрощение изложения уже известных фактов может быть выполнено при укрупнении шагов, понятных алгоритму очевидности. А это зависит не только от информационной базы и качества самого алгоритма, но и от конкретных особенностей представления алгоритма в машине, размещения данных в иерархической системе памяти, а также качества используемого компьютера и его операционной системы.

Третья возможность языка диалога — возможность различного рода «подсказок» алгоритму очевидности. Эти подсказки могут быть как прямыми, так и косвенными. В прямой

подсказке пользователь вводит в систему скелет предполагаемого доказательства, промежуточные цели и т. п. В первую очередь это касается различного рода конструкций, связанных с кванторами существования. Например, выбор подмножества, которое имеет пересечение с заданными подмножествами, удовлетворяющими тем или иным свойствам. Более сложной формой диалога является косвенная подсказка: использовать методы, примененные в доказательстве таких и таких-то теорем, попробовать использовать конструкции такого-то класса и т. п.

Наконец, в распоряжении пользователя должен находиться язык, на котором можно быстро программировать те или иные специальные процедуры поиска доказательства. Этот язык должен использоваться как для пополнения процедур, составляющих алгоритм очевидности, так и для программирования специальных приемов доказательства только конкретно рассматриваемой в данный момент теоремы.

Расширение алгоритма очевидности должно производиться прежде всего в направлении поиска различного рода способов уменьшения перебора строящихся алгоритмов конструкций. Чтобы понять суть проблемы, рассмотрим конкретный пример. Пусть речь идет о доказательстве теоремы, утверждающей существование нетривиального центра у группы J , удовлетворяющей нормализаторному условию. Теорема будет доказана, если мы найдем элемент g группы J , отличный от единицы и перестановочный со всеми элементами группы. В распоряжении системы должны находиться различного рода приемы (называемые нами конструкциями), позволяющие фактически строить различные элементы группы из уже известных объектов. Примеры таких конструкций: «пусть g — произвольный элемент группы, отличный от единицы», «пусть g — элемент группы J , перестановочный с элементами J и не принадлежащий подгруппе J_1 группы J », и т. п. Смысл доказательства большинства теорем состоит прежде всего в построении конструкции, задающей требуемый объект, а затем в доказательстве того, что построенный объект, действительно обладает требуемыми свойствами. Вторая часть при этом оказывается обычно гораздо более простым делом, чем первая. Успех же в первой части зачастую решает счастливая догадка. На первых этапах своего развития алгоритм очевидности перекрывает задачи второй части. Первая же часть, составляющая «скелет» доказательства, остается за человеком.

По мере дальнейшего развития алгоритм очевидности начинает захватывать и первую часть. С этой целью в информационную базу системы вводится список элементарных конструкций, а в алгоритм очевидности — процедуры суперпозиции этих конструкций и перебора таких суперпозиций. При этом с самого начала должны использоваться различные приемы, уменьшающие перебор. Среди таких приемов может быть упомянут принцип релевантности строящихся конструкций. Суть этого принципа состоит в том, что в конструкции должны использоваться все условия доказываемой теоремы.

Действительно, если бы доказательство теоремы обеспечивала бы конструкция, не использующая те или иные условия теоремы, то эти условия были бы, очевидно, лишними, так что формулировка теоремы должна была быть уточнена.

Для различных частных случаев могут быть построены гораздо более эффективные процедуры уменьшения числа переборов (примером могут служить алгоритмы для доказательств тождеств в некоторых алгебрах или разрешающие процедуры в некоторых разрешающих теориях). Успешное использование подобных процедур алгоритмов очевидности требует решения задачи распознавания. Иными словами, требуется уметь распознавать ситуации, когда то или иное доказательство (или его часть) может быть построено в результате применения одной из ускоренных процедур вывода. Задачу распознавания таких ситуаций на первых порах целесообразно поручить человеку, введя в язык диалога средства, позволяющие по возможности более наглядно и естественно представить пользователю возникающие в системе ситуации. Например, при геометрических доказательствах таким средством могут быть чертежи и рисунки.

При дальнейшем развитии системы задачи распознавания должны все в большей мере передаваться на автоматическое решение, на первых же порах роль человека здесь будет решающей.

Ситуацию, которая здесь возникает, можно пояснить на примере автоматизации шахматной игры. Как известно, в переборе вариантов и в расчете комбинаций машины уже сегодня намного превосходят человека. Вместе с тем сегодняшние шахматные программы по силе игры заметно уступают шахматным мастерам и гроссмейстерам. Причина здесь состоит прежде всего в том, что опытный шахматист гораздо лучше, чем современные шахматные программы, оценивает

позиции (распознает ситуации). Кроме того, помимо простейшей рутинной процедуры выбора очередного кода в результате просчетов возможных вариантов ответов противника и оценок получающихся позиций, хороший шахматист владеет большим числом специальных процедур (особенно в дебютах и эндшпилях). Он умеет распознавать ситуации, при которых следует применить ту или иную процедуру, ставит промежуточные цели и меняет оценки элементов позиции в связи с этими целями. И если обогащение шахматных программ указанными специальными процедурами представляет в принципе достаточно простую (хотя и громоздкую в реализации) задачу, то эффективное решение задач распознавания и перестройки оценочных функций представляет сегодня немалые принципиальные трудности. Поэтому наиболее эффективным методом автоматизации шахматной игры сегодня и в ближайшем будущем будет создание человеко-машинных систем, где оценки позиции и постановка промежуточных целей (плана игры) остается за человеком, а расчет вариантов, как в рутинных, так и в специальных процедурах, будет поручен машине. Такая система будет, разумеется, эффективной лишь в том случае, когда заключительные позиции, получающиеся в результате рассчитываемых компьютером вариантов, будут быстро отображаться для оценки их человеком в наглядной привычной для него форме, а именно — в виде рисунков (высвечиваемых на экране) с изображением позиций в виде, принятом сегодня для публикаций. У пользователя системы должны быть также средства для быстрой постановки очередных задач перед компьютером.

Примерно по такой же схеме должна быть построена система взаимодействия человека с машиной и при доказательстве теорем. Хотя задача наглядного отображения возникающих ситуаций здесь гораздо сложнее и многограннее. Разумеется, такая система не может быть статичной. Она должна все время развиваться как за счет увеличения информационной базы, так и за счет непрерывного совершенствования алгоритма очевидности, обогащения его все новыми и новыми специальными процедурами. Успех дела будет в значительной мере определен фронтом работ, который будет обеспечен начальным вариантом системы.

Создание действительно эффективной системы потребует усилий большого числа людей в течение многих лет и даже десятилетий.

В первую очередь это отношение к проблеме создания и

непрерывного расширения информационной базы системы, особенно если речь идет об автоматизации не одного какого-либо раздела, а всей математики.

Преимущество такого подхода состоит прежде всего в том, что система будет давать практическую отдачу задолго до момента полной автоматизации всего процесса доказательства. По мере наращивания мощности системы она будет все в большей и большей мере увеличивать производительность труда математиков, да и не только математиков. Ведь, как нетрудно понять, при создании соответствующей информационной базы система с таким же успехом может быть использована всеми, кто имеет дело с развитием строгих дедуктивных теорий, и прежде всего физиками-теоретиками.

По мере увеличения доказательной силы алгоритма очевидности многие факты, которые сегодня требуют достаточно сложных доказательств, сделаются очевидными. Тем самым (что в конечном счете самое главное) будет создана основа для построения и осмысливания теорий столь сложных, что они принципиально не могут быть созданы и осмыслены сегодня.

Описанная в настоящей статье программа работ уже начала осуществляться в Институте кибернетики АН УССР. Создан достаточно удачный вариант языка практической математической логики и первый вариант алгоритма очевидности. Начата работа по созданию серии монографий на языке практической математической логики, в которых каждый шаг доказательства формально проверяем алгоритмом очевидности. Сделаны первые шаги в создании программного обеспечения и информационной базы будущей системы. Результаты проделанной работы являются весьма обнадеживающими и позволяют надеяться на успех в создании практической и эффективной человеко-машинной системы автоматизации доказательств и построения дедуктивных теорий.

5. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВЗАИМОСВЯЗИ КИБЕРНЕТИКИ И БИОЛОГИИ

ФЛУКТУАЦИОННАЯ СИСТЕМОЛОГИЯ *

Наука о системах — системология — в начальный период своего развития имела дело главным образом с техническими системами, т. е. с такими системами, которые являются результатом сознательной деятельности человека. Проблемы проектирования, изготовления и наладки сложных технических систем составили предмет специального раздела технических наук, получившего наименование системотехники. В то же время для систем естественного происхождения (биологических, биохимических и др.) системология до сих пор ограничивается преимущественно изучением их строения и функционирования, так сказать, в готовом виде. История же их возникновения и становления с позиций системологии (общей теории систем) изучалась до сих пор недостаточно. Совершенно не рассматривался, например, с этих позиций такой важный и интересный вопрос, как происхождение жизни.

В настоящем сообщении предлагается новый подход к изучению механизмов возникновения и становления систем естественного происхождения с позиций теории флуктуаций. Как известно, теория флуктуаций родилась и развивалась в рамках статистической физики. Одним из первых ее результатов явилось установление факта существования случайных локальных уплотнений в газовой среде, которые получили название флуктуаций. Они возникают в результате случайной концентрации в малом объеме хаотически движущихся молекул. Срок жизни каждой такой флуктуации весьма мал: образование уплотнения вызывает локальное увеличение давления, что, в свою очередь, приводит к быстрому разлету создавших уплотнение «лишних» молекул. В силу закона больших чисел в достаточно большом объеме газа с вероятнос-

* Кибернетика, 1979, № 2, с. 114—115.

тью, пренебрежимо мало отличающейся от единицы, постоянно существует в любой данный момент определенное число флуктуаций, однако время существования каждой отдельной флуктуации ничтожно мало. Это обстоятельство является характерной чертой классической теории флуктуаций.

Сделаем теперь новый шаг, вводя понятие системной флуктуации. От понятия классической флуктуации оно отличается тем, что системная флуктуация является устойчивым образованием — системой с относительно длительным периодом существования.

Для уточнения понятия системной флуктуации прежде всего необходимо точно охарактеризовать возникающую в результате такой флуктуации систему. Рассматриваемые здесь системы характеризуются, во-первых, пространственной конфигурацией этих элементов в системе. Кроме того, может быть задан дополнительно закон распределения времени существования системы.

Далее необходимо охарактеризовать системную среду, в которой образуются системы в результате ее случайных флуктуаций. Эта среда характеризуется прежде всего своим полным объемом и средними плотностями концентрации элементов различных типов (предполагается, что в среде имеются элементы всех типов, которые нужны для образования системы). Кроме того, необходимо задать характеристики случайных процессов, которые представляют собой векторы скоростей движения в среде элементов различных типов (чаще всего в естественных системах это броуновское движение).

Следующая составная часть определения (дополняющая и расширяющая определение системы) — характеристика областей в фазовом пространстве (координат и скоростей движения элементов), при попадании в которые происходит «сцепление» элементов в системы.

В более тонких случаях приходится дополнительно учитывать законы взаимодействия элементов, способствующие или препятствующие образованию систем. Например, большая флуктуация в газовой среде может в принципе создать такую неоднородность распределения масс, что силы тяготения преодолеют силы, вызывающие разлет молекул. В результате этого флуктуация будет развиваться дальше, «выметая» молекулы газа из окрестности флуктуации, что приводит в конечном счете к образованию звезды или так называемой черной дыры.

Учет сил системного сцепления (а не только простейших закономерностей теории идеальных газов) вводит определенную коррекцию в методику применения второго начала термодинамики. В частности, нужно учитывать, что при наличии таких сил вследствие действия закона больших чисел в среде, содержащей достаточно много элементов, с большой вероятностью будет поддерживаться определенный уровень системной организации. Иными словами, энтропия среды стремится не к абсолютному максимуму, а колеблется вокруг некоторой величины, меньшей этого максимума. Эта величина может быть фактически определена в результате сопоставления двух вычисляемых величин, а именно средней длительности T существования систем и математического ожидания n_0 числа систем, возникающих в результате флуктуаций среды в единице объема за единицу времени.

При малом уровне системной организации среднее число $N_{\text{ср}}$ систем в объеме v в любой данный момент времени будет выражаться простой формулой $N_{\text{ср}} = n_0 v T$.

В случае, когда система составляется из устойчивых подсистем, флуктуационный процесс может быть ступенчатым: в результате флуктуаций в среде, состоящей из элементов, возникает среда, содержащая подсистемы. Из этих подсистем в результате флуктуаций второго уровня возникают системы, из этих систем — еще более сложные системы и т. д. Особо высокий уровень системной организации среды в результате подобного процесса может быть достигнут в том случае, когда возникшие случайно системы начинают размножаться и развиваться.

Весьма правдоподобно, например, что жизнь на Земле возникла именно в результате такого иерархического флуктуационного процесса. Как известно, наиболее трудным для объяснения, тем более для воспроизведения в лабораторном эксперименте, является процесс возникновения клетки.

Расчеты показывают, что при достаточно разумных предположениях относительно концентрации первичных элементов (молекул белков и нуклеиновых кислот) в поверхностных слоях мирового океана в течение сотен миллионов лет вероятность возникновения устойчивой системы любой конфигурации из нескольких десятков таких элементов практически равна единице. Если такие устойчивые системы существуют, то цикл флуктуации второго уровня при тех же пространст-

венных и временных масштабах может также с вероятностью, практически равной единице, породить любую их устойчивую комбинацию, состоящую из десятков подсистем. Но в таких комбинациях будет насчитываться уже несколько тысяч первичных элементов, что, по-видимому, достаточно для получения простейших клеток.

Такой двуступенчатый флуктуационный цикл оказывается теоретически возможным при применении голого вероятностного подхода без введения каких-либо дополнительных сил (действующих на расстояниях порядка размеров клетки и более), которые помогали бы процессам сцепления элементов в устойчивые системы и подсистемы, при наличии таких сил возможно обойтись и одним уровнем флуктуационной иерархии.

Решающую роль для положительного исхода подобного «флуктуационного» (естественного) эксперимента играют его масштабы. Будучи повторен в обычных лабораторных масштабах (в пробирке или колбе на протяжении месяцев и даже лет) этот эксперимент не приведет к успеху практически с той же достоверностью, что и большой естественный эксперимент. При концентрации элементов в среде примерно на k десятичных порядков ниже их концентрации в системе получаем в ограниченном эксперименте приблизительно ту же вероятность, что и в большом, но для числа элементов, меньшего на $m = (1/k) (\lg T/t + \lg V/v)$, где (T, V) и (t, v) — соответственно время и объем большого и малого экспериментов. Если $k = 1$, а масштаб эксперимента уменьшить, скажем, с $T = 100$ млн. лет до $t = 1$ г с $V = 100$ млн. км³ (примерно 300-метровая толщина вод современного океана) до $v = 1$ л, то величина m будет равна $8 + 26 = 34$. Подобное уменьшение числа элементов можно вывести из класса устойчивых систем, что и приводит к отрицательному исходу эксперимента.

Если гипотеза о флуктуационном механизме происхождения жизни на Земле верна, то легко объясним тот факт, что до сих пор не удалось воспроизвести его экспериментально. Ссылка на какие-то «особые» условия, существовавшие на Земле в момент возникновения на ней жизни, не выдерживает критики, поскольку в современной лаборатории можно воспроизвести все мыслимые физико-химические условия. Невоспроизводимы лишь временные и пространственные масштабы великого эксперимента, породившего жизнь.

Разумеется, гипотеза не исключает воспроизведения когда-либо живой клетки в лаборатории методами, в чем-то напоминающими сознательное создание человеком различного рода технических систем. Гипотезу эту можно опровергнуть, лишь получив естественные условия устойчивого воспроизводства клеток из смесей белков, нуклеиновых кислот и другого первичного клеточного строительного материала. Еще более интересным было бы экспериментальное определение всех величин, необходимых для точных подсчетов вероятности возникновения первой клетки в результате флуктуационных процессов. Ведь не исключено, что эта вероятность много больше, чем в оценке, сделанной автором даже в современных условиях. С точки зрения флуктуационной системологии (в данном случае флуктуационной биологии) известные опыты Пастера вовсе не доказывают абсолютной невозможности самозарождения клетки в изученных им условиях. Они доказывают лишь чрезвычайно малую вероятность такого явления в тех масштабах, в которых проводился эксперимент. Возможно, что при достаточно больших масштабах эксперимента результат будет иной.

Именно для определения этих масштабов и нужна уточненная априорная оценка вероятностей срабатывания флуктуационного механизма. Ситуация здесь напоминает ситуацию с экспериментами по улавливанию нейтрино. Лишь априорные оценки вероятности взаимодействия нейтрино с веществом позволили определить должные масштабы эксперимента для надежного решения этой задачи. Без таких оценок опыты, производимые в малых масштабах, могли бы дать по отношению к нейтрино столь же убедительно отрицательные результаты, как и опыты Пастера по отношению к явлению самозарождения жизни.

Аналогично флуктуационной биологии может представить интерес и флуктуационная химия. Правда, применительно к расширенному толкованию флуктуационного механизма (с учетом сил межмолекулярного и межатомного взаимодействия) все химические реакции можно рассматривать с флуктуационной точки зрения. Но действительный интерес представляли бы в первую очередь те случаи, где идет флуктуационный процесс накопления сложных устойчивых молекул вещества, получающегося из вещества среды в результате эндотермических реакций. Поскольку такие процессы должны протекать весьма медленно, для их обнаружения в заметных

масштабах должны использоваться соответственно и широко-масштабные эксперименты.

Не исключено, разумеется, что процессы естественной случайной диссоциации подобных сложных молекул протекают настолько быстро, что их накопление в сколько-нибудь заметных количествах вовсе не может произойти. Во всех случаях, однако, было бы весьма полезно рассмотреть подобные процессы с точки зрения флуктуационной системологии в теоретическом плане, произведя необходимые вероятностные оценки.

КИБЕРНЕТИКА — ЛЮБОВЬ МОЯ*

Существует очень давняя загадка природы, которая постоянно волновала людей: как человек мыслит? Я интересовался этой проблемой еще со школьной скамьи. Читал научные книги, выходящие за пределы программы. Так вот, кибернетика дает весьма эффективный метод изучения этого процесса. Другие науки изучают мышление в основном наблюдательно. А кибернетика позволяет моделировать протекающие процессы. Ученые хорошо знают достоинства такого метода познания, который делает для меня эту науку наиболее привлекательной.

Проблема искусственного интеллекта, моделирование интеллектуальной деятельности — вот что интересует меня в кибернетике больше всего. К тому же, занимаясь ею, я смог удовлетворить свою тягу, с одной стороны, к математике, а с другой, — к различного рода радиоэлектронным устройствам, системам автоматического управления.

И наконец, кибернетика привлекательна для меня тем, что в настоящее время она является одной из наиболее важных и перспективных наук для развития экономики, науки, техники в целом, т. е. ее отличает большая общественная значимость.

Теоретические работы в области кибернетики группируются вокруг проблем искусственного интеллекта, а также создания основ теории таких сложных систем обработки информации, как современные электронно-вычислительные машины и системы вычислительных машин. Это — и развитие прикладной математической логики, и теории алгоритмов, и проблемы распознавания образов, решение которых ведет к моделированию чувственных восприятий человека.

Очень важны и такие прикладные направления, как техническая кибернетика, позволяющая на базе электронно-вычислительной техники осуществить действительно полную автоматизацию, создать интегральные системы управления.

Освобождение людей от утомительного физического труда за счет использования промышленных роботов — еще одна ответственная задача. Не менее важное приме-

* В кн.: Захарченко В. В. Наперегонки со временем, 1982.

нение находят кибернетические методы и в экономике. Они позволяют, с одной стороны, по-новому изучать экономические системы, с другой, — по-новому организовать само информационное обеспечение в экономике, планировании, управлении. Самое широкое, повсеместное использование этих методов приведет к тому, что мы сможем выявить и поставить на службу социалистическому и коммунистическому строительству огромные резервы, которые содержатся в нашей экономике.

Биологическая и медицинская кибернетика благодаря комплексному моделированию организмов животных и человека оказывает помощь врачам при проведении сложных операций, при лечении больных, особенно в критических ситуациях, когда дороги минуты и секунды. Здесь же можно назвать и проблему охраны окружающей среды, которая ныне стоит очень остро в связи с бурным развитием промышленности и сопутствующим этому процессу загрязнением атмосферы, водной среды. Изучению кибернетическими методами поддаются и вопросы, связанные с исследованием различного рода сообществ биологических организмов, с принципами их взаимодействия с природой.

В изучении социологических проблем, возникающих в обществе социальных процессов, кибернетика совместно с другими науками дает возможность глобального анализа.

ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ ГЛУШКОВ
КИБЕРНЕТИКА.
ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

Утверждено к печати Ордена Ленина институтом
кибернетики имени В. М. Глушкова АН УССР

Редактор Е. Е. Чернова-Столярова.

Редактор издательства А. А. Боровая

Художественный редактор Н. А. Фильчагина

Технические редакторы

И. Н. Жмуркина, Л. Н. Золотухина

Корректоры А. Б. Васильев, Г. Н. Джиоева

ИБ № 31556

Сдано в набор 09.08.85.

Подписано к печати 27.12.85. Т-24901

Формат 84×103¹/₁₆. Бумага книжно-журнальная

Гарнитура обыкновенная. Печать высокая.

Усл. печ. л. 25,3. Усл. кр. отт. 25,72. Уч.-изд. л. 28,3

Тираж 7200 экз. Тип. зак 1759.

Цена 2 руб.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Наука»

117664 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., 90.

2-я типография издательства «Наука»

121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 6.



**ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ
ГУШКОВ**