

А К А Д Е М И Я Н А У К С О Ю З А С С Р

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Н. Е. КОБРИНСКИЙ

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ
ИЗМЕРЕНИЯ
УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ

ЕВ_1941_AKS_220

Ак.Р.

4289

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СОЮЗА ССР
МОСКВА—1941—ЛЕНИНГРАД

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
чл.-корресп. АН СССР Н. Г. БРУЕВИЧ

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
Краткий обзор литературы	3
I. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ	5
1. Центробежные тахометры	5
2. Часовые тахометры	13
3. Фрикционные тахометры	23
4. Вибрационные тахометры	27
5. Гидравлические и воздушные тахометры	28
II. МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКО- РОСТЕЙ	33
6. Магнитные тахометры	33
7. Электротахометры постоянного тока	37
8. Электротахометры переменного тока	40
9. Электротахометры импульсного тока	43
III. ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ	46
10. Стробоскопические приборы	46
11. Фотоэлектрические приборы	49
Литература	52

4289

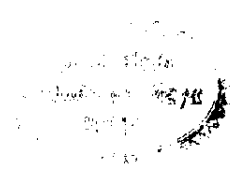


ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
чл.-корресп. АН СССР Н. Г. БРУСЕВИЧ

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
Краткий обзор литературы	3
I. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ	5
1. Центробежные тахометры	5
2. Часовые тахометры	13
3. Фрикционные тахометры	23
4. Вибрационные тахометры	27
5. Гидравлические и воздушные тахометры	28
II. МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКО- РОСТЕЙ	33
6. Магнитные тахометры	33
7. Электротахометры постоянного тока	37
8. Электротахометры переменного тока	40
9. Электротахометры импульсного тока	43
III. ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ	46
10. Стробоскопические приборы	46
11. Фотоэлектрические приборы	49
Литература	52

6866
4982



ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение машин-автоматов, отдельные звенья которых совершают неравномерное движение с быстрым изменением скоростей, ставит перед современной техникой измерений скоростей и ускорений ряд новых требований. Приборы, измеряющие скорости и ускорения, должны обладать высокой точностью и чувствительностью. В механизмах точной механики, кроме того, имеет существенное значение величина мощности, отнимаемой прибором от испытуемого вала.

Современные приборы, основанные на разнообразных принципах, механических, электрических, магнитных и т. д., применялись и применяются главным образом для измерения средних значений скоростей. Поведение этих приборов при неустановившемся режиме работы испытуемого объекта почти не исследовалось. Ни в русской ни в иностранной литературе вопросы, связанные с количественной оценкой точности, чувствительности и инерционности приборов, почти не освещались.

Учитывая своевременность и актуальность этих вопросов, Институт машиноведения Академии Наук СССР поставил в план своих работ тему „Методы и приборы измерения скоростей и ускорений“, в которой должны быть изучены все указанные выше вопросы.

Настоящая работа является первой частью этой темы. В ней дан обзор существующих методов и приборов для измерения скоростей и выведены количественные соотношения между угловой скоростью испытуемого объекта при равномерном движении его и перемещением указывающего органа. В первой главе рассмотрены приборы, основанные на механических принципах. Сюда отнесены центробежные, гидравлические, воздушные, часовые, фрикционные и вибрационные тахометры. Во второй главе рассмотрены приборы, основанные на магнитном и электрическом принципах. Сюда включены магнитные тахометры и электрические тахометры постоянного, переменного, многофазного и импульсного тока. Наконец, в третьей главе рассмотрены приборы, основанные на оптическом принципе. Сюда отнесены стробоскопические и фотоэлектрические приборы.

В начале работы дан краткий обзор литературы по методам и приборам измерения скоростей.

При выполнении настоящей работы мне оказал существенную помощь рядом полезных советов член-корр. Академии Наук СССР проф. Н. Г. Бруевич. Им также проведена научная редакция рукописи. Считаю своим приятным долгом выразить ему за это глубокую благодарность.

КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Литература, посвященная методам и приборам для измерения скоростей, чрезвычайно бедна. Это особенно относится к русской литературе, насчитывающей всего несколько небольших журнальных статей и отдельных параграфов в учебниках авиационных приборов. Да и за границей, за последнее десятилетие не появилось ни одной сколько-нибудь серьезной работы, освещающей современное состояние техники измерения скоростей.

Первая большая работа по тахометрам была издана в Германии в 1907 г. проф. Pflug. Fr. „Geschwindigkeitsmesser für Motorfahrzeuge und Lokomotiven“. В работе рассмотрены тахометры, служащие для измерения скоростей

в паровозах и автомобилях. Дано описание некоторых конструкций жидкостных, центробежных и часовых тахометров, а также способы их монтажа. Количественных и качественных оценок работы отдельных приборов автор не дает. В конце книги приведены описания некоторых патентов и обширная библиография за период с 1901 по 1907 г.

В 1916 г. появилась работа д-ра инженера Нейна „Die Geschwindigkeitsmesser mit Reibungsgetriebe“, в которой дано кинематическое и динамическое исследование фрикционных тахометров. Раздел, посвященный электрическим методам измерения скоростей, имеется в книге проф. Кейна „Die Technik elektrischer Messgeräte“, третье и наиболее полное издание которой вышло в 1928 г. В книге описаны некоторые магнитные и электрические тахометры, а также изложен стробоскопический метод измерения. Почти в том же объеме эта глава напечатана в „Archiv für technisches Messen“ за 1935 г.

1926 г. в энциклопедии „Handbuch der Physik“ был напечатан раздел по измерению скоростей. В нем изложены основные понятия о работе центробежных, магнитных, гидравлических и вибрационных тахометров. Количественные соотношения даны только для простейших случаев центробежных и гидравлических тахометров.

Почти в том же объеме изложена глава о тахометрах в книге Грамберга „Техническое измерение и испытание машин“, переведенной на русский язык.

Этим кратким перечнем в основном исчерпывается список литературы, посвященной специально тахометрам. Кроме того, в иностранных журналах напечатано большое количество статей по измерению скоростей. Эти статьи представляют собою главным образом фирменное описание того или иного вновь изготовленного тахометра. Как наиболее содержательную, следует отметить статью Воссэ „Un tachimetro a cella fotoelettrica“, напечатанную в Rivista Aeronautica, № 11 за 1932 г.; в которой упоминается о различных методах измерения скоростей и дано описание фотоэлектрического прибора, построенного в Неаполитанской инженерной школе.

На русском языке в 1936 г. был издан конспект лекций по тахометрии, сейсмографии и хронометрии проф. Шишелова. В конспекте выведены количественные соотношения для центробежных и магнитных тахометров и дано описание часового тахометра. Глава, посвященная исследованию и проектированию центробежных тахометров, напечатана в книге Щипанова „Расчет авиаприборов“. Наконец, небольшие разделы, в которых изложены элементарные понятия о тахометрах, даны в книгах Молчанова „Курс аэронавигации“ и Рубина „Электрические авиационные приборы“.

Из русских журнальных статей заслуживают внимание работы инж. Пятина, напечатанные в журнале „Точная индустрия“, № 9—10, 1938 г. В них даны описание и некоторые теоретические обоснования работы электрических часовых и импульсных тахометров.

Подробный перечень литературы и журнальных статей, использованных при составлении настоящей работы, приложен в конце.

I. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ¹

В этих приборах осуществлена механическая связь между испытуемым объектом и указывающим органом. Механизм тахометра может состоять либо из твердых звеньев либо наряду с твердыми могут применяться звенья жидкие и газообразные. Примером приборов, выполненных только с твердыми звеньями, служат центробежные, часовые и фрикционные тахометры. Гидравлические и воздушные тахометры могут служить примером приборов, в числе звеньев которых имеются жидкие и газообразные тела.

Для измерения механическими тахометрами необходимо непосредственное соприкосновение тахометра с испытуемым объектом.

1. Центробежные тахометры

1) Общие замечания

В центробежных тахометрах перемещение указывающего органа происходит под действием инерции неуравновешенных масс. Стрелка прибора связана с неуравновешенными массами, которые при вращении тахометра стремятся занять положение, соответствующее угловой скорости испытуемого вала. Неуравновешенные массы большей частью выполняются в виде грузов, прикрепленных в точках, не совпадающих с центром тяжести их, или в виде массивного кольца, расположенного несимметрично относительно оси вращения. Возвращение системы в исходное положение осуществляется посредством пружин.

Центробежные тахометры обладают следующими преимуществами:

- 1) простотой конструкции и малыми габаритами,
- 2) независимостью показаний прибора от температуры.

К недостаткам этих приборов следует отнести:

- 1) малую чувствительность и малую точность прибора,
- 2) необходимость применения редуктора при измерении скоростей в широком диапазоне,
- 3) неравномерность шкалы,
- 4) неудобства передачи показания прибора на расстояние.

Сравнительные достоинства и недостатки приборов с шаровыми грузами и приборов с кольцевыми грузами сводятся к тому, что тахометр с шаровыми грузами конструктивно более сложен, чем тахометр с кольцом, но зато он обладает меньшим весом и большей чувствительностью (при одинаковых пружинах). При одном и том же весе грузов и кольца число оборотов, необходимое для получения одного и того же угла отклонения регистрирующего органа, для тахометра с шаровыми грузами на 30% меньше, чем для кольцевого, а при одной и той же скорости вес грузов в 1.4 раза меньше веса кольца.²

¹ См. также лит. 49.

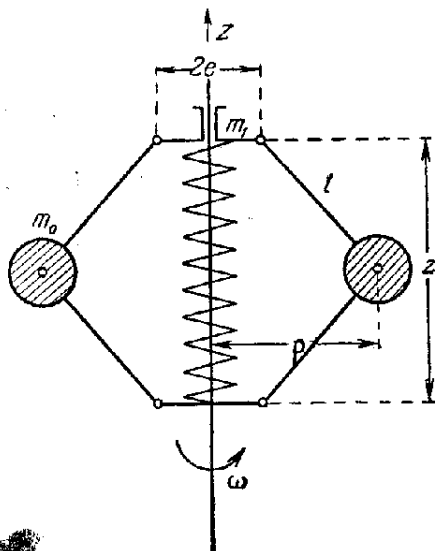
² См. также лит. 1.

2) Вывод основных соотношений¹

Ниже выведена приближенная зависимость между угловой скоростью вала тахометра и перемещением муфты указывающего органа для случая равномерного вращения вала. Силы трения при выводе не учтены. Рассмотрим два типа тахометра.

а) Центробежный конический тахометр с шарами (фиг. 1)

Обозначим массу груза через m_0 , число шариков через n , массу муфты через m_1 , коэффициент упругости пружины через k и координату муфты в свободном положении через z_0 . Приведенная к муфте сила инерции грузов:



$$Q_i = nm_0 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}. \quad (1')$$

Между ρ и z существует такая зависимость:

$$(\rho - e)^2 = l^2 - \frac{z^2}{4}, \quad (2')$$

откуда

$$\frac{\partial \rho}{\partial z} = -\frac{z}{4(\rho - e)}. \quad (2)$$

Из (1') получим

$$Q_i = -\frac{nm_0 \rho \omega^2 z}{4(\rho - e)}. \quad (1'')$$

Подставляя вместо ρ его значение

$$\rho = \frac{1}{2} \sqrt{4l^2 - z^2} + e, \quad (3)$$

получим:

$$Q_i = -\frac{nm_0 \omega^2 \cdot z}{4} \left[1 + \frac{2e}{\sqrt{4l^2 - z^2}} \right]. \quad (1)$$

Сила упругости пружины:

$$Q = -k(z - z_0). \quad (4)$$

Уравнения равновесия без учета сил веса и трения:

$$k(z - z_0) - \frac{nm_0 \omega^2 \cdot z}{4} \left[1 + \frac{2e}{\sqrt{4l^2 - z^2}} \right] = 0,$$

откуда найдем зависимость между ω и z :

$$\omega^2 = \frac{4k(z - z_0)}{nm_0 z \left[1 + \frac{2e}{\sqrt{4l^2 - z^2}} \right]}. \quad (I)$$

б) Центробежный тахометр с кольцевым грузом (фиг. 2)

Примем, что кольцо очень тонкое, и рассмотрим его как жесткую неупругую нить. Обозначим массу кольца через m , начальный угол кольца с горизонтальной осью XX через α_0 и коэффициент упругости пружин через k .

Силы инерции кольца лежат в горизонтальной плоскости. Элементарная сила инерции дуги центрального угла $d\beta$

$$dP'_i = m_1 \cdot d\beta \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \cos \alpha \quad (5')$$

m_1 — масса единицы длины):

Составляющая этой силы \perp осям ZZ и YY :

$$dP''_i = m_1 \cdot d\beta \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \cos \alpha \cdot \sin b; \quad (5'')$$

¹ См. также лит. 1, 2, 3, 12, 43.

элементарный момент этой силы относительно оси ZZ :

$$dM_i = dP_i'' \cdot \overline{CB} = m_1 \cdot \omega^2 \cdot r^3 \cdot d\beta \cdot \cos \alpha \cdot \sin b \cdot \sin \alpha. \quad (6')$$

Из прямоугольного сферического треугольника $OACB$, у которого угол между сторонами AOC и OCB прямой, имеем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha} &= \frac{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right)}{\sin \frac{\pi}{2}}; \\ \sin \alpha &= \sin \alpha \cdot \cos \beta. \end{aligned} \right\} \quad (6'')$$

Для того же треугольника:

$$\left. \begin{aligned} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) &= \cos b \cdot \cos \alpha; \\ \sin b &= \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\cos^2 \alpha}} = \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\cos \alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (6''')$$

Подставляя найденные значения из (6'') и (6''') в уравнение (6'), получим:

$$dM_i = m_1 \cdot \omega^2 \cdot r^3 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \cos^2 \beta \cdot d\beta. \quad (6)$$

Момент сил инерции кольца:

$$M_i = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} m_1 \cdot r^3 \cdot \omega^2 \cdot \sin 2\alpha \cdot \cos^2 \beta \cdot d\beta = \frac{\pi}{2} \cdot m_1 \cdot r^3 \cdot \omega^2 \cdot \sin 2\alpha,$$

или, имея в виду, что

$$2\pi r m_1 = m,$$

получим

$$M_i = \frac{mr^2}{4} \cdot \omega^2 \cdot \sin 2\alpha. \quad (7)$$

Равновесие наступит, когда момент упругих сил пружины будет равен моменту сил инерции:

$$k(a - a_0) - \frac{mr^2}{4} \omega^2 \cdot \sin 2\alpha = 0. \quad (8)$$

Отсюда найдем зависимость между ω и α :

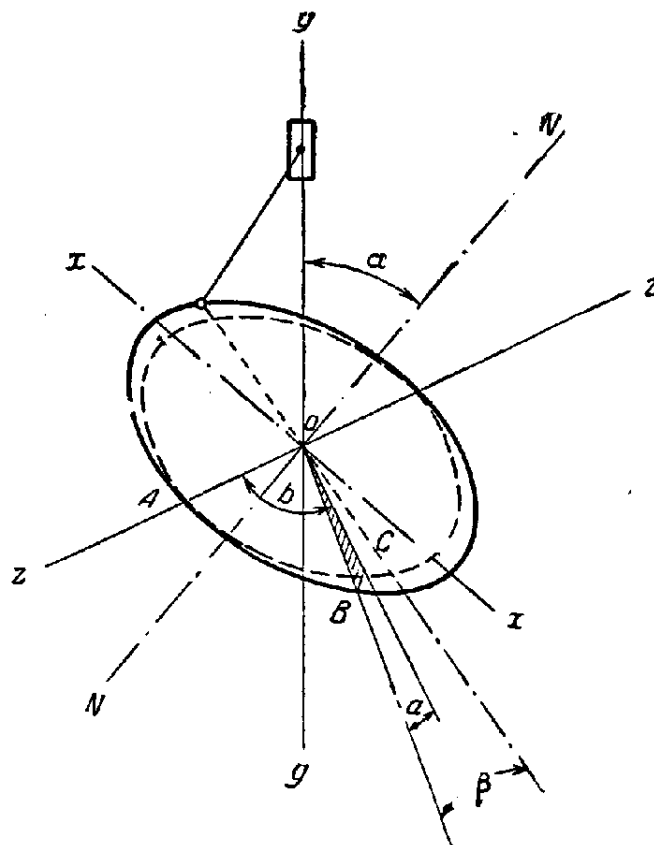
$$\omega^2 = \frac{4(a - a_0)}{mr^2 \cdot \sin 2\alpha}. \quad (II)$$

Формулы (I) и (II) показывают, что перемещение муфты или поворот кольца вокруг оси ZZ (а вместе с тем и указывающего органа) не пропорциональны угловой скорости и без выпрямляющего устройства шкала прибора будет неравномерной. Эти формулы можно преобразовать к виду:

$$z = f(\omega) \quad \text{и} \quad \alpha = f(\omega)$$

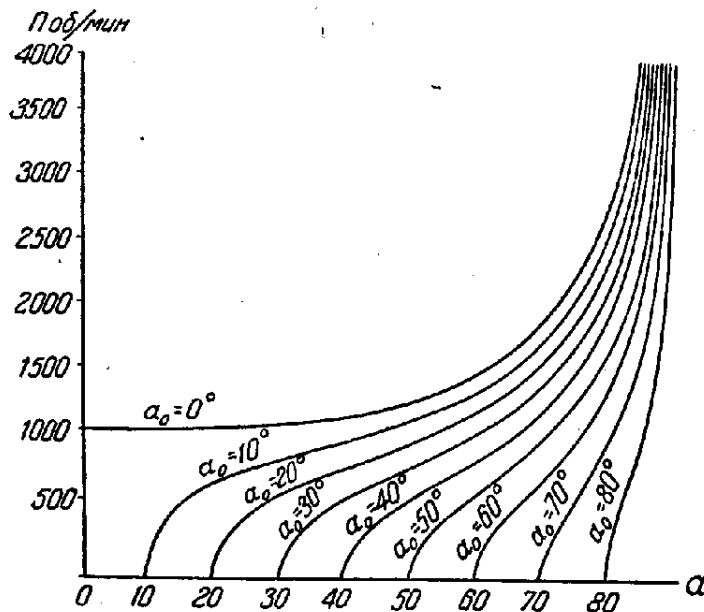
только для некоторых конструкций тахометров (в частности для конических тахометров, у которых $e = 0$).

Обычно рассматриваемые зависимости выражают графически. Кривые $z = f(\omega)$ и $\alpha = f(\omega)$, построенные для различных значений z_0 и a_0 , называют характеристиками. На фиг. 3 приведена характеристика $\alpha = f(n)$ для тахометра с коль-



Фиг. 2. Схема центробежного тахометра с кольцом

цевым грузом. Наиболее благоприятной частью характеристики является ее средняя отлогая часть. Здесь показания прибора будут наиболее точными, ибо малому изменению скорости соответствует значительное изменение координаты. Кроме того, в этой части связь между обеими величинами наиболее приближается к прямой пропорциональности.



Фиг. 3. Характеристики центробежного тахометра с кольцом

Оптимальное отношение верхнего предела измеряемой скорости к нижнему лежит в пределах от 4 ÷ 6.

в) Статическая устойчивость прибора¹

Определение понятия статической устойчивости прибора может быть сформулировано так. Допустим, что мы выводим систему из исследуемого равновесного положения, задавая ее точкам некоторые начальные отклонения и начальные скорости. Если эти отклонения и скорости можно подобрать так, чтобы в последующем своем движении система двигалась, не удаляясь от своего равновесного положения за границы, которые можно заранее установить, то равновесие устойчивое.

Достаточное условие устойчивости равновесия в консервативном силовом поле дается теоремой Лежена-Дирихле: если в положении равновесия системы потенциальная энергия ее имеет минимум, то это положение равновесия — устойчивое.

В центробежном тахометре силы пружин и инерции консервативны. Первые частные производные от потенциальной энергии по обобщенной координате дают обобщенные силы. В положении равновесия для конического тахометра (при $e=0$) и тахометра с кольцом получим соответственно:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = k(z - z_0) - \frac{nm_0 z}{4} \cdot \omega^2 = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \alpha} = k(\alpha - \alpha_0) - \frac{mr^2}{4} \omega^2 \cdot \sin 2\alpha = 0. \quad (10)$$

Нулевое значение первых производных указывает на то, что положению равновесия соответствуют экстремальные (т. е. либо максимальные либо минимальные) значения потенциальной энергии. Согласно теореме Дирихле, равновесие

¹ См. также лит. 46.

будет устойчивым, если экстремальное значение есть минимум. Для проверки экстремального значения установим знак второй производной.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = k - \frac{nm_0}{4} \omega^2, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} = k - \frac{mr^2}{2} \omega^2 \cdot \cos 2\alpha. \quad (12)$$

В обоих случаях вторая производная будет положительна (что соответствует минимуму потенциальной энергии), если

$$k > \frac{nm_0}{4} \omega^2 \text{ и} \\ k > \frac{mr^2}{2} \omega^2 \cdot \cos 2\alpha. \quad (13)$$

Для конического центробежного тахометра условие (13) будет соблюдено, если

$$k > \frac{nm_0}{4} \omega_{\text{наиб}}^2. \quad (14)$$

Для тахометра с кольцом неравенство (13) будет соблюдено, если удовлетворить неравенству

$$k > \frac{mr^2}{2} \omega^2, \quad (15')$$

и будет всегда соблюдено при

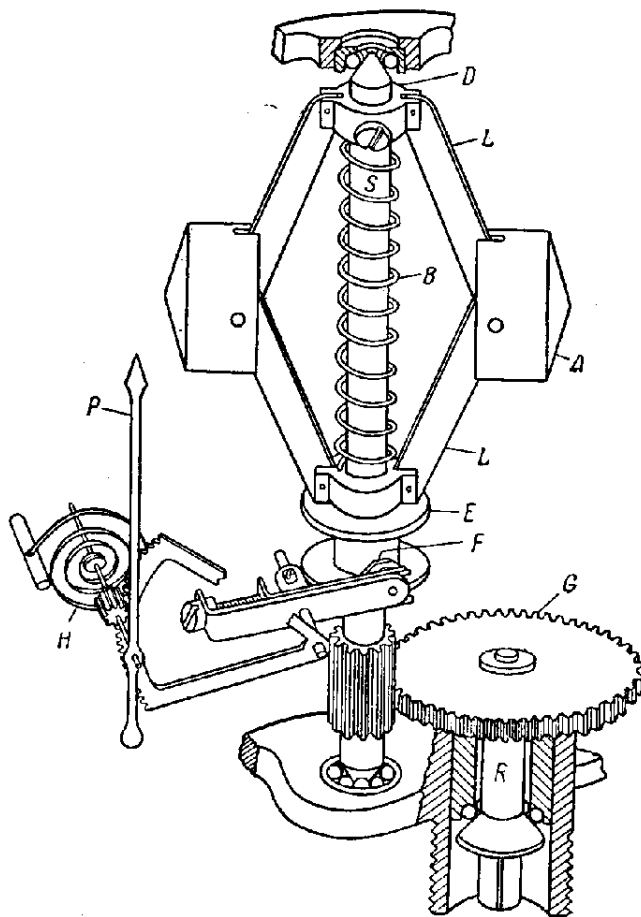
$$k > \frac{mr^2}{2} \cdot \omega_{\text{наиб}}^2, \quad (15)$$

$\omega_{\text{наиб}}$ — максимальное значение измеряемой угловой скорости.

3) Описание некоторых конструкций¹

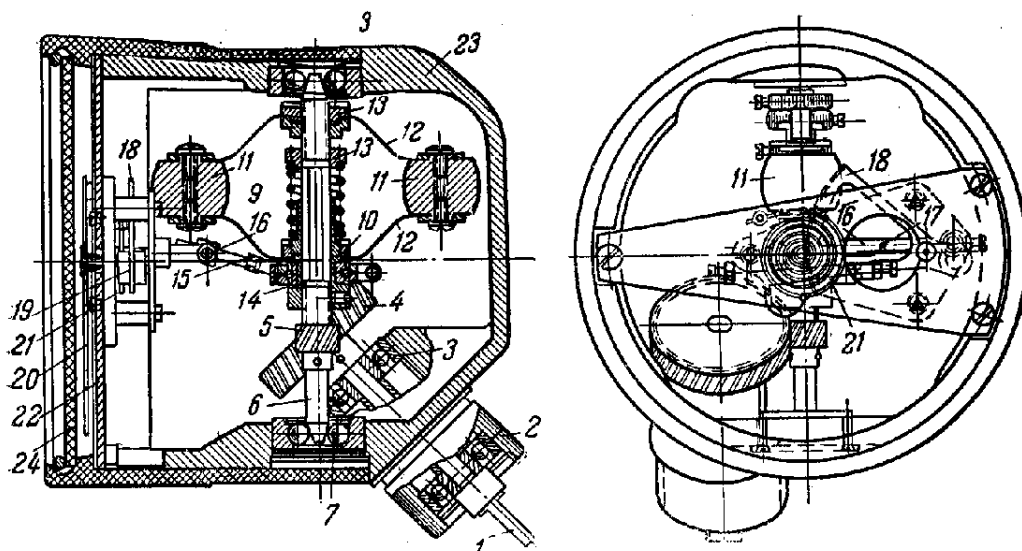
На фиг. 4 представлен конический центробежный авиационный тахометр фирмы „Piонер“. Он состоит из ведущего валика R , вертикального вала S , вращающегося в шариковых подшипниках и снабженного жестко соединенной с ним муфтой D и свободно скользящей муфтой E , цилиндрической пружины B , двух инерционных масс A и указателя P , связанного с нижней муфтой E . Каждая масса прикреплена к шарниру, соединяющему два рычага L . Другими концами рычаги прикреплены шарнирно к муфтам D и E . При измерении ведущий валик R соединяется с испытуемым объектом. Вращение передается вертикальному валу, а через него грузам. Грузы расходятся, муфта поднимается и перемещает указатель. Вся система занимает положение, соответствующее угловой скорости испытуемого объекта. Возвращение системы в исходное положение происходит под действием пружины B .

На фиг. 5 представлена несколько иная конструкция конического тахометра, выполненная в советском авиационном приборе. Здесь шаровые грузы перемещаются не на рычагах, а на рессорах 12 . При вращении вала тахометра рессора растягивается в длину и сдвигается. При этом муфта 10 поднимается вверх и сжимает пружину 9 . Рессоры, период колебания которых не совпадает

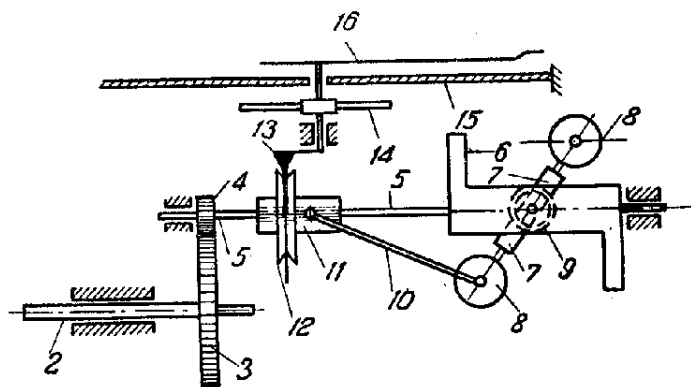


Фиг. 4. Тахометр фирмы „Piонер“

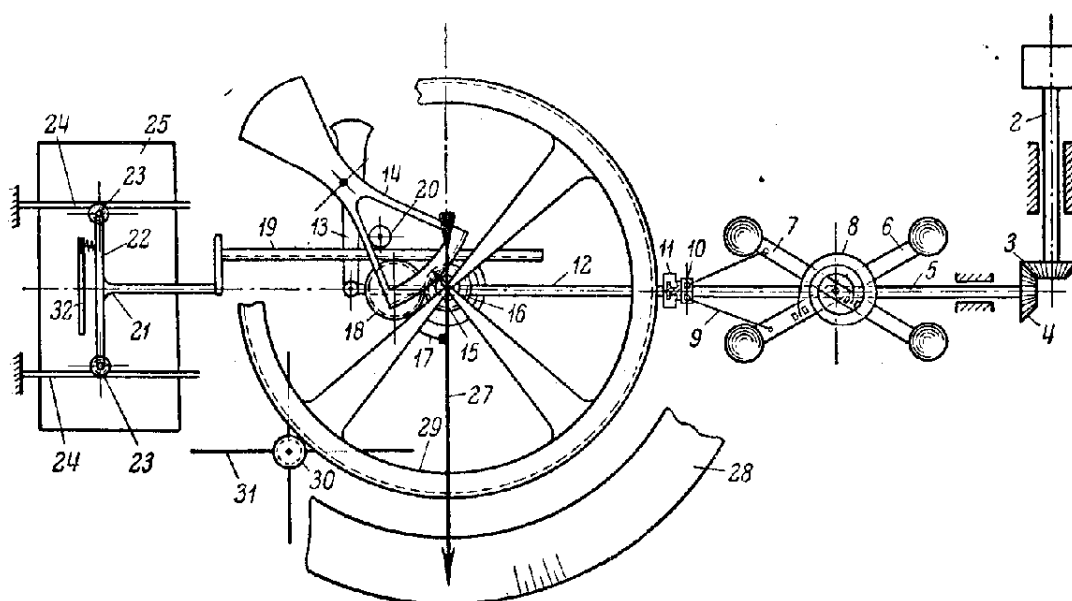
¹ См. также лит. 5, 7, 8, 9, 10, 16, 19, 35, 45.



Фиг. 5. Тахометр авиационный



Фиг. 6. Авиационный тахометр



Фиг. 7. Схема графотахометра „Horn“

с периодом колебания пружины 9, способствуют быстрому погашению колебания муфты и связанной с ней указывающей системы. Последняя устроена так. На подвижную муфту 10 насажен специальный шариковый подшипник 14, с наружным кольцом которого связана скоба с поводком 15. Поводок 15 соединен с валиком 16, к которому прикреплен другой поводок 17. Поводок 17 посредством упорного щитка поворачивает зубчатый сектор 18. Последний сцеплен с трибкой 19, на оси которой надета стрелка 20. Для поглощения люфтов к оси трибки прикреплен волосок 21.

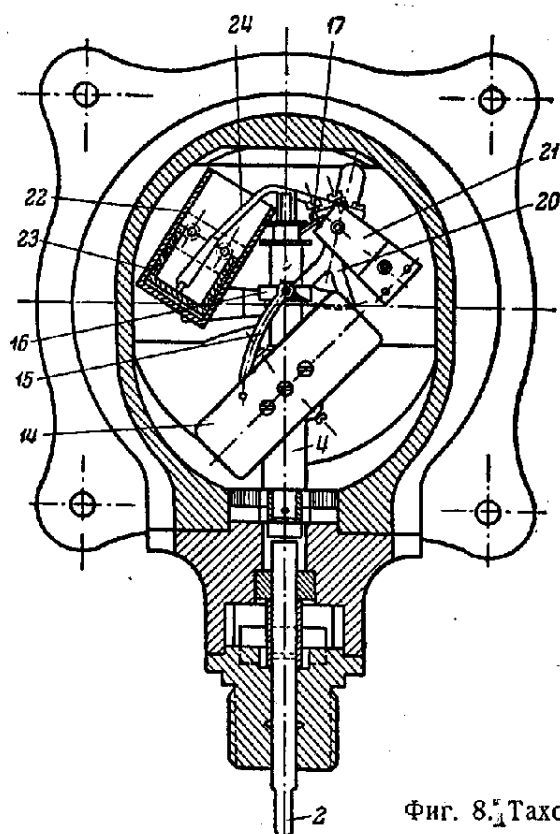
Иногда шаровые массы располагают по диагонали. Такая конструкция применена в тахометре авиационного типа, схема которого изображена на фиг. 6. Грузы 8 расположены на рычаге 7, средняя точка которого шарнирно соединена с фигурным звеном 6. Последнее вращается вместе с валом тахометра 5, который приводится от испытуемого объекта посредством валика 2 и зубчатой передачи 3, 4. По валу 5 скользит муфта 11, соединенная шатуном 10 с рычагом 7. Муфта ведет коленчатый рычаг 13 со стрелкой 16. При вращении вала 5 рычаг 7 с грузами поворачивается, муфта 11 вместе с рычагом 13 и стрелкой перемещаются, механизм занимает положение, определяемое угловой скоростью вращения и упругими свойствами пружины 9. Звено 6 служит для частичного уравновешивания сил инерции грузов 8.

Диагональное расположение шаров применено в несколько ином конструктивном выполнении в графотахометре фирмы „Hogn“ (фиг. 7). Перемещение муфты 10 происходит под действием двух пар диагонально расположенных шаровых масс, укрепленных на рычагах 6 и 7. Рычаги шарнирно соединены с валом тахометра 5. Перемещение муфты передается одновременно стрелке тахометра (посредством рычагов 12, 13 и зубчатого сектора 14, жестко связанного с рычагом 13) и записывающему прибору. Последний состоит из барабана 25, вращающегося от часового механизма, и пера, укрепленного на ползушке 22. Ползушка перемещается вдоль направляющей 23 посредством рейки 19, сцепленной через зубчатые колеса 15, 16 и 18 с зубчатым сектором 14. Зубчатый сектор 14 приводится в движение муфтой тахометра.

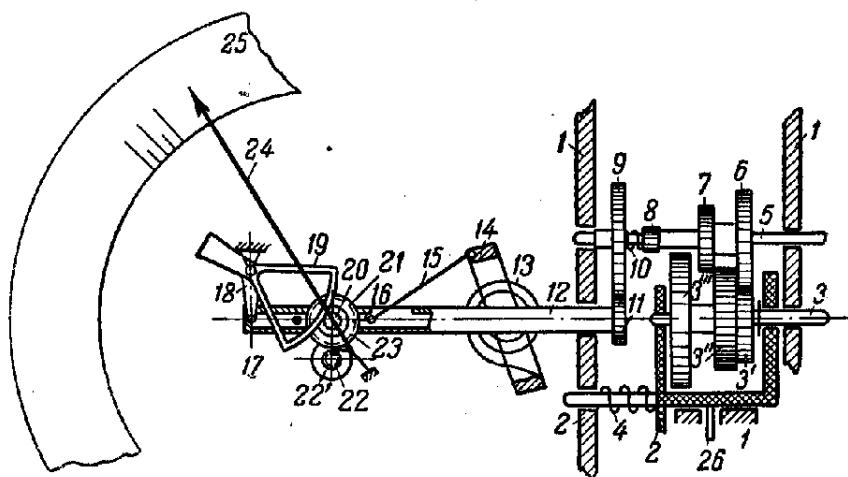
Значительно чаще встречаются центробежные тахометры с грузами, выполненными в виде кольца. На фиг. 8 представлен танковый тахометр АТ-1 отечественного производства. Он состоит из ведущего вала 2, вертикального вала 4 с кольцом 14, указывающего органа (звенья 15, 16, 17, 20) и устройства для погашения колебания стрелки. Кроме того, между вертикальным валом и кольцом вмонтирована пружина (на схеме не показано). Вращение испытуемого вала передается через ведущий вал тахометра вертикальному валу. Кольцевая масса поворачивается, стремясь стать нормально к оси вращения, и посредством рычага 15 заставляет муфту 16 перемещаться вдоль вала. При этом поводок 17, связанный с муфтой, заставляет поворачиваться зубчатый сектор 20. Последний сцеплен с трибкой и стрелкой (на схеме не показаны). Вся система занимает положение, соответствующее угловой скорости вращения. Для успокоения колебания стрелки служит воздушный демпфер. Он состоит из рычага 24, связанного с зубчатым сектором 20, поршня 23 и цилиндра 22. Сопротивление воздуха в цилиндре демпфера обеспечивает плавное смещение указывающей системы при резком изменении числа оборотов.

Для увеличения диапазона измеряемой скорости (особенно в сторону малого числа оборотов) центробежные тахометры часто снабжаются коробкой скоростей. На фиг. 9 представлена схема тахометра „Schäffer und Budenberg“. Передача на вал 12 тахометра с кольцевой массой 14 происходит от ведущего вала 3 посредством трехступенчатого редуктора. Включение различных пар колес для изменения передаточного числа производится путем смещения колес вдоль ведущего и промежуточных валов.

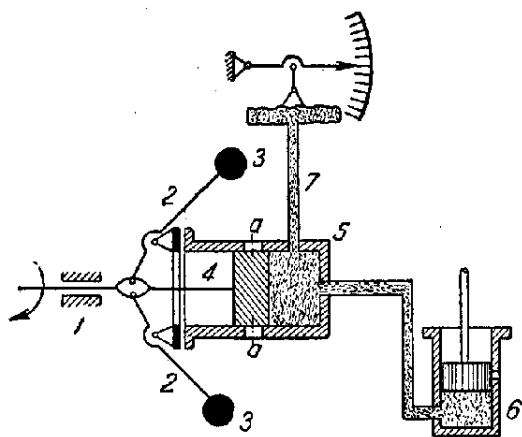
В дистанционном центробежном тахометре связь между датчиком и приемником осуществляется посредством сжатого воздуха. Принципиальная схема датчика представлена на фиг. 10. Он состоит из ведущего вала 1, с которым шарнирно соединены рычаги 2, 2, снабженные грузами 3, 3, поршня 4 и цилиндра 5. Цилиндр 5 заполнен сжатым воздухом, нагнетаемым специальной помпой 6



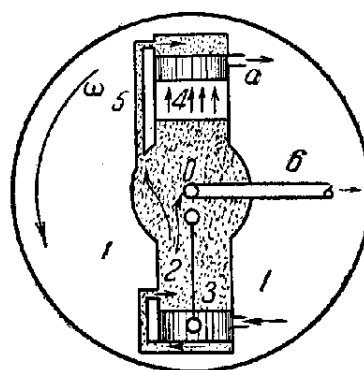
Фиг. 8. Тахометр АТ-1



Фиг. 9. Схема тахометра фирмы „Schäffer und Budenberg“



Фиг. 10. Схема дистанционного центробежного тахометра



Фиг. 11. Схема дистанционного тахометра фирмы „Askania“

(число оборотов мотора помпы и ход поршня строго постоянны), и имеет два отверстия aa , посредством которых он сообщается с внешней атмосферой. Алюминиевая трубка 7 соединяет датчик с приемником, выполненным в виде обычного манометра с градуировкой на числа оборотов. При измерении ведущий вал соединяется с испытуемым. Центробежная сила грузов заставляет перемещаться поршень 4, уменьшая ширину отверстий aa , через которые воздух вытекает наружу. Равновесие наступит при равенстве приведенной к поршню силы инерции грузов и силы давления сжатого воздуха. Следовательно, давление в цилиндре 5 будет соответствовать угловой скорости испытуемого объекта. Это давление регистрируется манометром (приемником). Прибор, построенный фирмой „Askania“, имеет несколько иное конструктивное оформление (фиг. 11). Он выполнен в виде вращающегося вокруг точки O картера 1, снабженного двумя цилиндрами. В одном цилиндре помещен поршень 3 насоса, закрепленный на шатуне 2, в другом цилиндре, снабженном отверстием a , расположен поршень 4 датчика. Воздух, нагнетаемый помпой при вращении картера от испытуемого вала, поступает по трубке 5 в цилиндр датчика. Давление воздуха уравнивает центробежную силу поршня 4.

В центре картера расположено выходное отверстие, через которое воздух по трубке 6 поступает в приемник.

2. Часовые тахометры

1) Общие замечания

В часовых тахометрах перемещение указывающего органа происходит непосредственно под действием крутящего момента испытуемого вала. Связь между испытуемым валом и указывающим органом осуществляется периодически в течение строго определенного промежутка времени. Включение и выключение указывающего органа производятся автоматически от часового механизма, являющегося составной частью тахометра. Указывающая система может состоять из звеньев, совершающих только вращательное движение (тахометры „Jaeger“, „Teloc“, „Spalazzi“), или часть звеньев может двигаться поступательно (тахометр „Tel“). В последнее время построены часовые тахометры, осуществляющие передачу показаний на расстояние (электрифицированные тахометры „Jaeger“, „Stover-Lang“, „Spalazzi“).

Часовые тахометры обладают рядом преимуществ:

1. Имеют кинематическую связь между испытуемым валом и указателем, благодаря чему показания приборов не зависят от трения между звеньями и от состояния пружин.

2. Показания прибора практически не зависят от температуры.

3. Математический, а не эмпирический способ разметки шкалы. Шкала прибора равномерна и показания во всех точках шкалы обладают одной и той же абсолютной погрешностью.

4. Большая точность показаний, сохраняемая в течение всей рабочей жизни прибора.

5. Легкость регулировки тахометра путем изменения периода колебания баланса часового механизма.

6. Устойчивость прибора против вибрации.

К недостаткам часовых тахометров следует отнести:

1. Чрезвычайную сложность прибора благодаря большому числу звеньев.

2. Чувствительность прибора к толчкам и ударам.

2) Вывод основных соотношений

Выведем соотношение между угловой скоростью испытуемого вала и перемещением указывающего органа прибора.

При наличии кинематической связи между валом и указателем с постоянным передаточным числом k перемещение указателя

$$S = k \cdot \Delta\alpha, \quad (16)$$

S — перемещение указателя, $\Delta\alpha$ — угол поворота испытуемого вала.

За период времени включения указывающей системы соотношение (16) можно переписать так:

$$S = k \cdot \frac{\Delta \alpha}{\Delta \beta} \cdot \Delta \beta, \quad (17)$$

$\Delta \beta$ — перемещение механизма включения за тот же период времени. Это перемещение в приборе постоянно:

$$\Delta \beta = k_1 \cdot \Delta t = C, \quad (18)$$

k_1 — передаточное число от вала часового механизма к ведущему звену механизма включения, Δt — период времени включения, который остается постоянным во все время работы прибора. Соотношение (17) можно написать так:

$$S = \frac{k}{k_1} \cdot C \cdot \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}, \quad (19)$$

т. е. перемещение указателя пропорционально средней угловой скорости за время Δt :

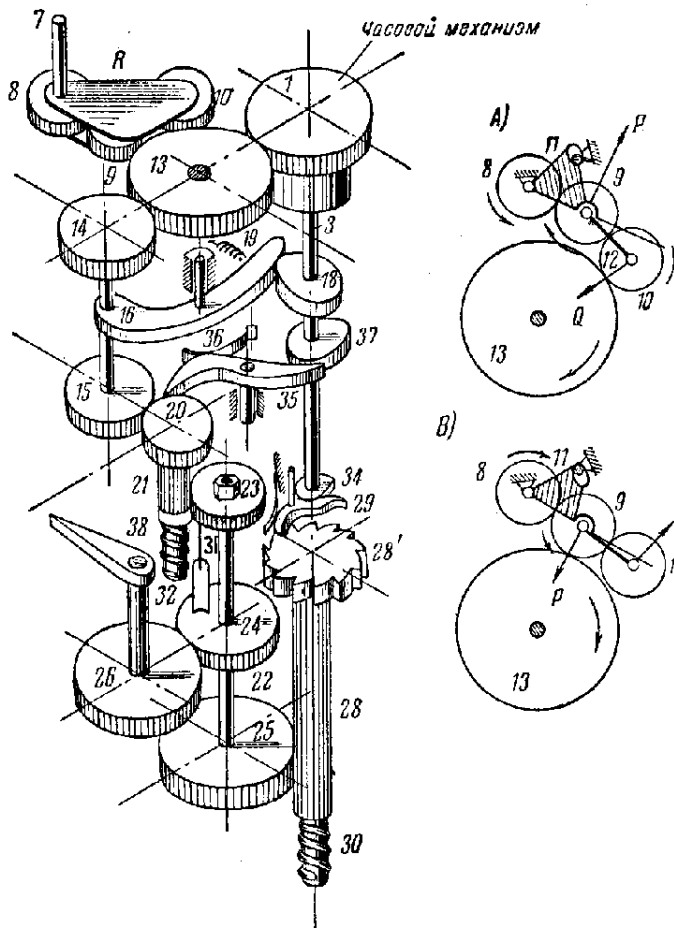
$$S = c_1 \omega = c \cdot n, \quad (III)$$

c_1, c — масштабы прибора, зависящие от выбранных передаточных чисел.

3) Описание некоторых конструкций¹

На фиг. 12 представлена развернутая и упрощенная схема тахометра „Telos“ фирмы Hasler, а на фиг. 13 даны фотографии его отдельных узлов. Все звенья прибора совершают вращательное движение.

Как все часовые тахометры, он состоит из передаточного механизма 7, R, 13, 14, 15, 20, 21, 23, 31, 32, 24, 26 и стрелки, часового механизма 1 — 6 с распределительным валом 3 и механизмов включения и выключения 18, 19, 37,



Фиг. 12. Схема часового тахометра „Telos“

35, 34, 29, 28 и 25. Приемный вал 7 передает вращение зубчатому колесу 13 через выпрямитель R всегда в одном и том же направлении. Это достигается благодаря специальному устройству выпрямителя, представленного на фиг. 12А и 12В. На оси колеса 8 свободно поворачивается рычаг 11. Другой конец этого рычага снабжен продольной прорезью, внутри которой находится неподвижный штифт, ограничивающий вращение рычага 11. На рычаге 11 сидит колесо 9. С колесом 9 шарнирно соединен рычаг 12, на другом конце которого сидит колесо 10, сцепленное с колесом 9. При вращении колеса 8 от валика 7 против часовой стрелки колеса располагаются по схеме, представленной на фиг. 12А, и вращение передается колесу 13 через колеса 9 и 10. При вращении колеса 8 по часовой стрелке система располагается по схеме 12В, и вращение передается через колесо 9 колесу 13 в том же направлении. Колесо 13 приводит в движение одновременно колесо 1 часового механизма и колесо 14. Колеса 14 и 15

¹ См. также лит. 1, 5, 29, 30, 45.

сидят на общей оси, укрепленной на рычаге 16. Звено 16 может поворачиваться вокруг своей вертикальной оси, и в зависимости от его положения колесо 15 будет либо находиться в зацеплении с колесом 20 либо зацепление будет нарушено. Колеса 14 и 13 находятся в зацеплении постоянно. С колесом 20 связана трибка 21, входящая в зацепление с колесом 23, сидящим свободно на валике 22.

Передача вращения от колеса 23 колесу 24 осуществляется посредством штифтов 31, 32 всегда в одном и том же направлении. С колесом 24 сцеплена шестерня 26, сидящая на одной оси со стрелкой прибора.

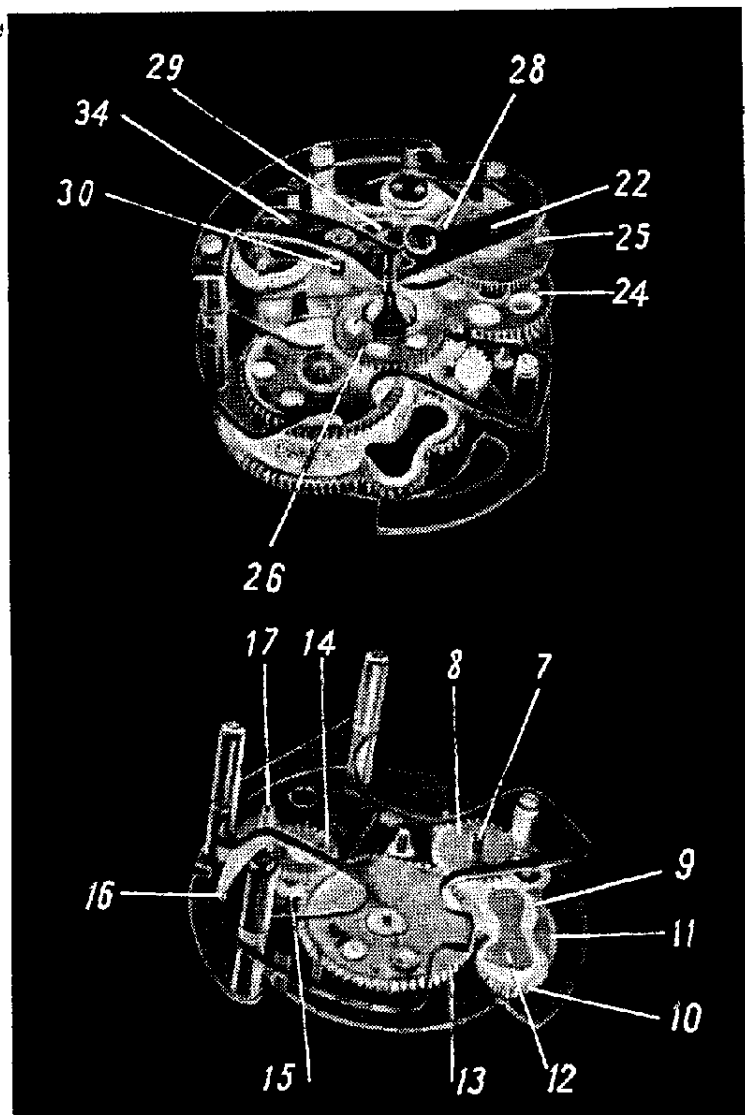
При вращении колеса 13 непрерывно заводится пружина часового механизма, связанная с корпусом фрикционно. Часовой механизм отрегулирован так, что распределительный валик 3 вместе с насаженными на нем кулачками 18, 34, 37 совершает один оборот в течение секунды.

При пуске механизма в ход валик 7 тахометра соединяется с испытуемым валом, и вращение последнего передается через выпрямитель *R* и звенья 13, 14, 15, 20, 21, 23, 31, 32, 24 и 26 стрелке, которая поворачивается на угол, пропорциональный углу поворота вала за промежуток времени, в течение которого шестерни 15 и 20 остаются сцепленными. Пружины 30 и 38 взводятся. Затем колеса 15 и 20 расцепляются, и колесо 15 вращается некоторое время свободно.

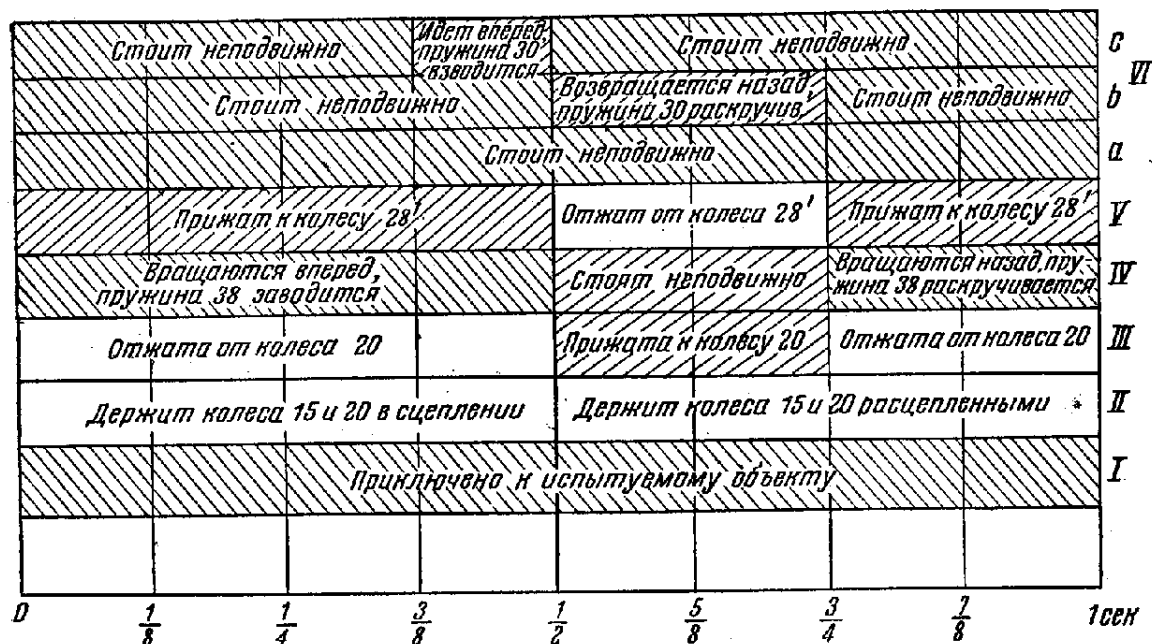
В течение этого промежутка времени стрелка вместе со звеньями 28, 25, 26 и 24 со штифтом 32 остается неподвижной, а колеса 20, 21, 23 со штифтом 31 отводятся под действием пружины 38 в исходное положение.

Второй и все последующие периоды работы тахометра представлены циклограммой 1. На ней изображена работа отдельных звеньев механизма в течение одного периода, продолжительность которого равна 1 секунде. Нижняя строка изображает движение ведущего звена 7, которое в течение всего периода приключено к испытуемому валу; вторая строка описывает работу рычага 16, третья — собачки 35, четвертая — системы колес 20, 21, 23 со штифтом 31, пятая — собачки 29 и, наконец, шестая — работу системы колес 28, 25, 24 со штифтом 32, колеса 26 и стрелки.

В течение первой половины периода ($\frac{1}{2}$ секунды) кулачок 18 заставляет рычаг 16 занимать положение, при котором колеса 15 и 20 сцеплены.



Фиг. 13. Конструктивные узлы тахометра „Telos“



Циклограмма 1. Тахометр „Telos“

I — звено 7
 II — рычаг 16
 III — собачка 35
 IV — колеса 20, 21, 23, штифт 31
 V — собачка 29
 VI — стрелка и колеса 28, 26, 25 и 24 со штифтом 32

VIa — скорость вала в рассматриваемый период равна скорости в предшествующий
 VIб — скорость вала в рассматриваемый период меньше скорости в предшествующий
 VIс — скорость вала в рассматриваемый период больше скорости в предшествующий

Собачка 35 в течение этого промежутка времени отжата от колеса 20, и последнее вместе с колесами 21, 23 и штифтом 31 вращается вперед. Колесо 23 вместе со штифтом 31 к концу этого промежутка времени оказывается повернутым на угол, пропорциональный углу поворота вала за $\frac{1}{2}$ секунды.

Пружина 38 взводится. Стрелка вместе с колесами 26, 25, 28 и 24 со штифтом 32 удерживается в начале этого промежутка времени неподвижно в положении, занимаемом ею в конце предыдущего периода, посредством собачки 29, сцепленной с храповиком 28'. Она остается неподвижной, если угловая скорость вала в течение рассматриваемого периода осталась равной или уменьшилась в сравнении со скоростью вала в течение предшествовавшего периода (строка VI, а, б). В этих случаях штифт 31 к концу первой половины рассматриваемого периода соответственно либо подойдет вплотную к штифту 32 либо не дойдет до него.

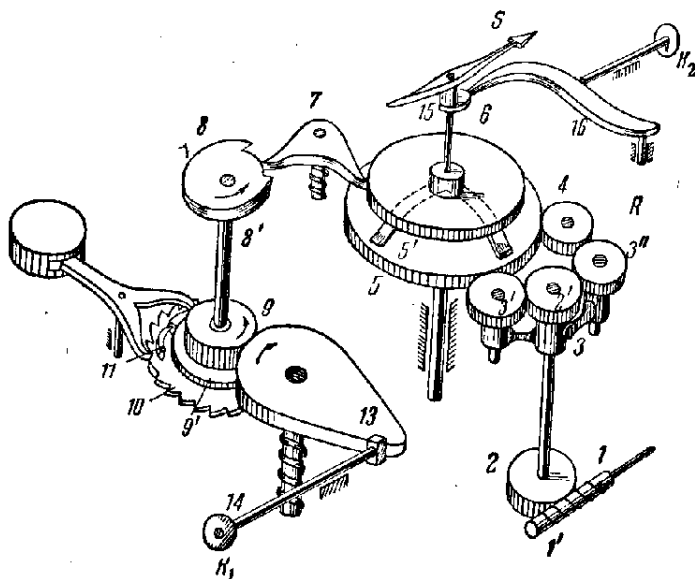
Если же скорость вала в течение рассматриваемого периода увеличилась в сравнении с предыдущим периодом, то штифт 31 повернется на больший угол и, захватив штифт 32, повернет его вместе со стрелкой и колесами 24, 25, 26 и 28 на угол, соответствующий новому значению скорости (строка VI, в). Пружина 30 получит дополнительный завод. Во второй половине периода пружина 19, работающая на сжатие, заставляет рычаг 16 занимать положение, при котором колеса 15 и 20 разъединены. Колесо 20 подхватывается собачкой 35 и удерживается некоторое время на месте. Затем собачка 35 отщелкивается от колеса 20, и последнее вместе с колесом 23 и штифтом 31 возвращается пружиной 38 в исходное положение. В этот же момент, когда собачка 35 подхватывает колесо 20, собачка 29 отщелкивается от храповика 28'.

Если скорость испытываемого объекта в течение рассматриваемого периода меньше, чем в предшествующий период, и штифт 31 не дошел до положения, занимаемого штифтом 32, система 28, 25, 26, 24 и стрелка возвратятся под действием пружины 30 назад до встречи со штифтом 31 (строка VI, б). Затем

собачка 29 снова защелкивает храповик 28', и стрелка остается до конца рассматриваемого периода неподвижной, регистрируя новое значение скорости. Если же скорость в рассматриваемый период равна или больше скорости в предыдущий период, то стрелка удерживается неподвижно в течение второй половины периода, сначала штифтом 31, а затем собачкой 29 (строка VI, *a* и VI, *b*).

На фиг. 14 представлена схема часового тахометра (тахоскопа), изготовляемого ФЗУ 1-го Госчасзавода по типу тахоскопа фирмы Jaquet. Вал 1, приводимый в движение от испытуемого объекта, вращает через червячную передачу 1', 2 и выпрямитель *R* шестерню 5, всегда в одном направлении. Выпрямитель состоит из зубчатого колеса 4, сцепленного с колесом 5, и колес 3' и 3'', оси которых свободно укреплены на тrenzеле 3. Тrenzель 3 свободно поворачивается на валу колеса 2.

При вращении червячного колеса по часовой стрелке тrenzель поворачивается по часовой стрелке, колесо 3' входит в зацепление с шестерней 5, и последняя вращается также по часовой стрелке. При вращении колеса 2 про-



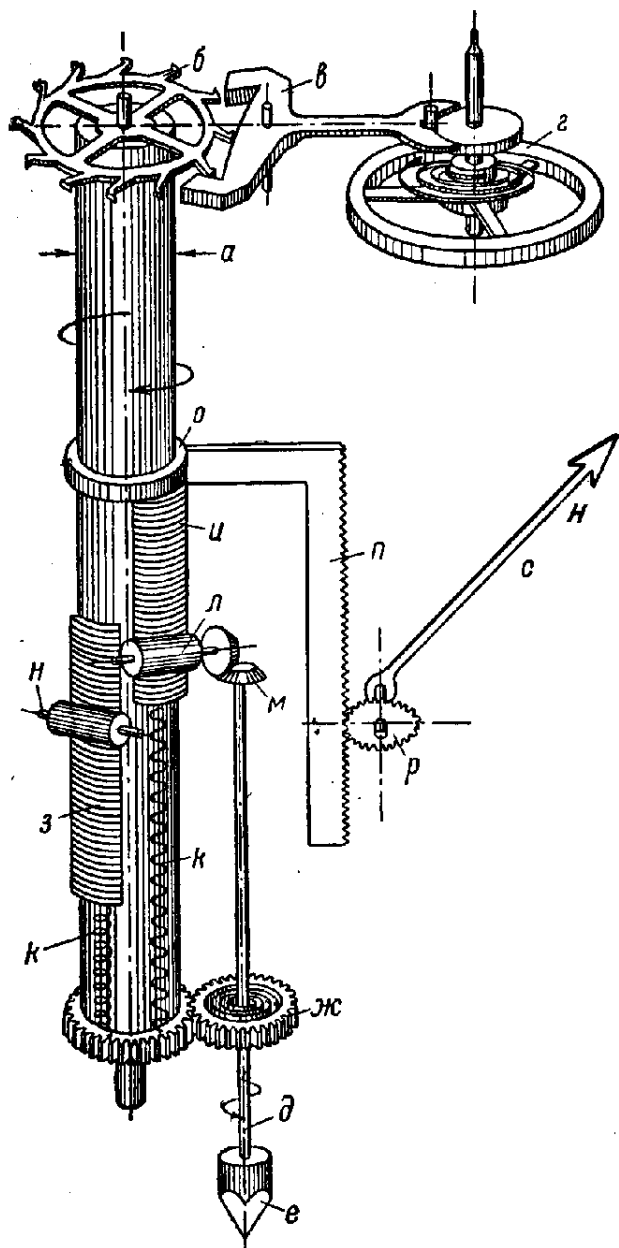
Фиг. 14. Схема тахоскопа ФЗУ 1-го Госчасзавода

тив часовой стрелки тrenzель поворачивается против часовой стрелки, и колесо 3'' входит в зацепление с колесом 4. Колесо 5 снова вращается по часовой стрелке. На оси колеса 5 сидит свободно зубчатое колесо 6, связанное фрикционно (трением об упругие пластинки 5') с колесом 5. Вращению колеса 6 препятствует собачка 7, управляемая от кулачковой шайбы 8. Последняя сидит на валике 8', приводимом во вращение часовым механизмом. Часовой механизм заводится специальной кнопкой k_1 . Нажимом кнопки поворачивают зубчатый сегмент 13 и заводят пружину 14. При освобождении кнопки, зубчатый сегмент под действием пружины 14 начинает вращать зубчатое колесо 9 с храповой шайбой 9'. В зубец последней упирается собачка 11, ось которой сидит на ходовом колесе 10 часового механизма. Ходовое колесо сидит жестко на валике 8', т. е. на одном валике с шайбой 8, и имеет постоянное угловое перемещение за единицу времени. При вращении кулачковая шайба нажимает на собачку 7 и освобождает колесо 6. Последнее начинает вращаться с угловой скоростью, пропорциональной скорости испытуемого объекта. По истечении 6 секунд кулачковая шайба освобождает собачку 7, и последняя защелкивает колесо 6. С осью колеса 6 фрикционно связана стрелка *S*, и угол поворота ее за шесть секунд будет пропорционален углу поворота испытуемого объекта за тот же промежуток времени. С большой стрелкой кинематически (посредством зубчатых колес) соединена малая стрелка, которая вращается в 10 раз медленнее большой (на схеме малая стрелка и передача к ней не показаны). Для установки стрелок на нуль служит рычаг 16, который нажимает на кулачок 15, жестко связанный со стрелкой. Нажим на рычаг производится кнопкой k_2 .



В тахометрах системы „Tel“ фирмы Hasler часть звеньев совершает поступательное движение (фиг. 15).

Вал ∂ , приводимый в движение от испытуемого объекта, вращает через систему зубчатых колес шестеренку $л$ всегда в одном направлении (на схеме передача показана упрощенно). Шестерня перемещает одну из трех реек $и$, $з$, $т$, расположенных на валу $а$. Вал $а$ приводится в движение от валика ∂ посредством шестеренки $ж$, соединенной с валиком фрикционно. Вращение вала



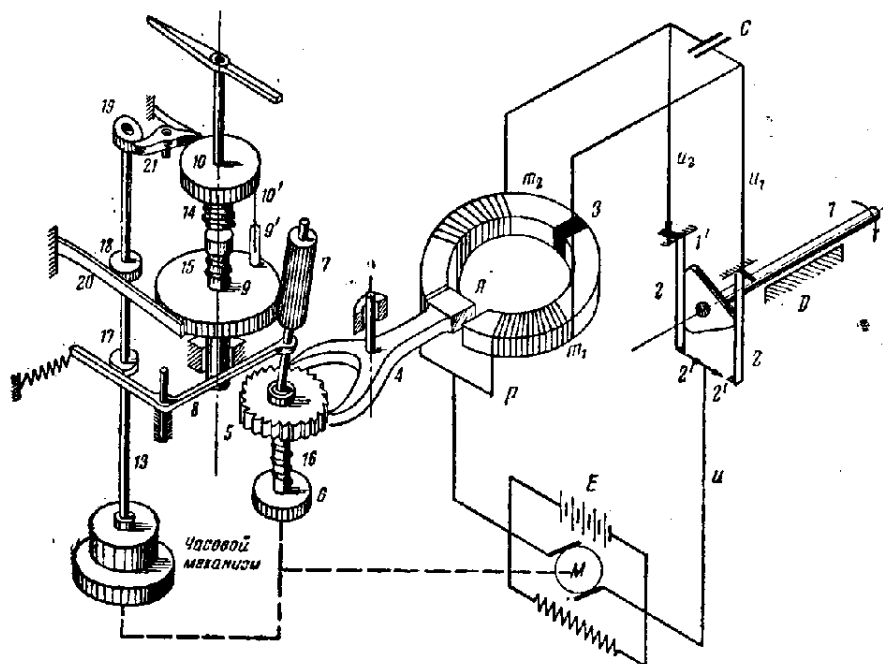
Фиг. 15. Схема тахометра „Tel“

$а$ регулируется часовым ходом $б$, $в$, $г$, балансир которого подобран так, что полный оборот вала происходит в течение 3 секунд. Благодаря этому каждая рейка находится в зацеплении с колесом $л$ в течение 1 секунды, и ее перемещение S пропорционально угловой скорости испытуемого вала. Перемещение рейки передается посредством звена $о$ и рейки $п$ зубчатому колесу $р$, связанному со стрелкой прибора. Рейка $и$, $з$, $т$, при выходе из зацепления с колесом $л$ удерживается в течение последующей секунды звеном $н$, затем освобождается и под действием пружины $к$ возвращается в исходное положение. Звено $о$ подхватывается следующей рейкой.

Для осуществления передачи входных данных прибора на расстояние часовой тахометр соединяется с электрической синхронной передачей. На фиг. 16 представлена упрощенная схема дистанционного часового тахометра фирмы „Jaeger“. Он состоит из датчика D импульсного типа и приемника P . Датчик D выполнен в виде кулачковой треугольной шайбы $1'$, двух пружинящих контактов $2, 2'$, неподвижных контактов $2', 2'$ и конденсатора C . Кулачковая шайба сидит на валу I , связанном с испытуемым объектом, и при вращении включает пружинящие контакты. Импульсы тока посылаются в приемник попеременно по про-

водам $и_1$, $и$ и $и_2$, $и$. Конденсатор C служит для гашения искр. Приемник состоит из шунтового моторчика M , магнитов m_1 и m_2 для синхронной передачи скорости вращения вала и измерительного механизма. Ток, посылаемый из датчика, попадает попеременно в обмотки электромагнитов m_1 и m_2 и заставляет якорь магнита колебаться с частотой, пропорциональной скорости вращения испытуемого вала. Колебательное движение якоря преобразуется во вращательное с помощью анкерной скобы 4 и ходового колеса 5 . При каждом качании анкерной скобы колесо 5 поворачивается на один зубец под действием пружины 16 . Последняя заводится непрерывно от моторчика M (передача от моторчика показана условно пунктиром). Вместе с ходовым колесом вращается трибка 7 ; скорость вращения трибки, таким образом, пропорциональна угловой ско-

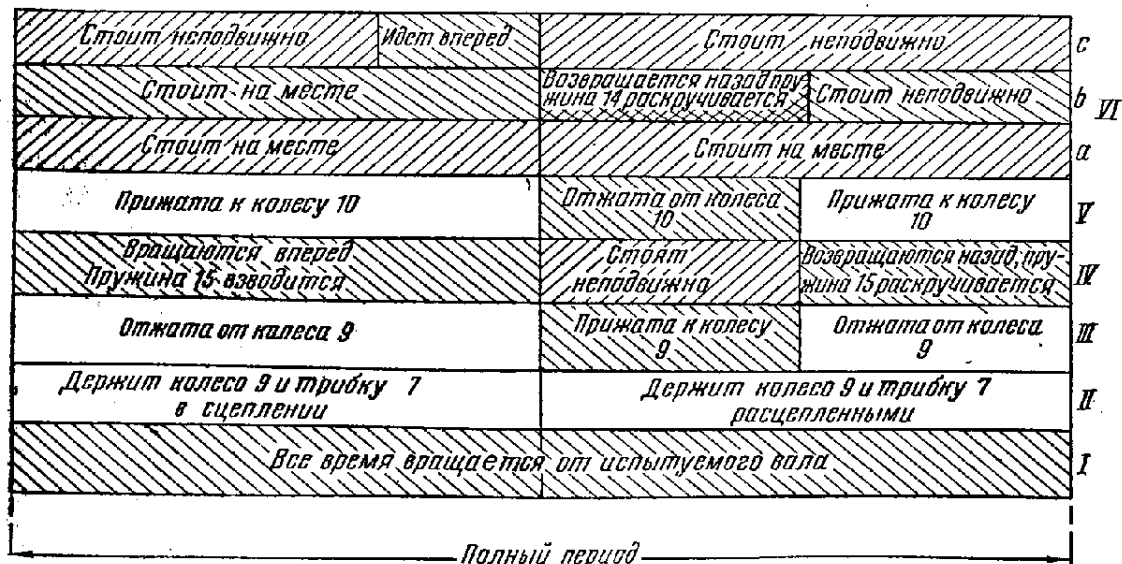
рости испытуемого объекта. Трибка 7 вводится в зацепление с колесом 9 с помощью часового механизма посредством кулачкового валика 13 и рычага 8. Далее с помощью штифтов 9' и 10' поворачивается колесо 10 и связанная с ним стрелка прибора на угол, пропорциональный углу поворота вала за промежуток времени, в течение которого продолжается зацепление. Затем трибка 7



Фиг. 16. Схема часового тахометра „Jaeger“

выключается, а колесо 10 остается на месте вместе с заторможенным колесом 9. Торможение колеса 9 осуществляется пружиной 20, управляемой кулачковым валиком часового механизма. Затем колесо 9 освобождается и под действием пружины 15 возвращается в исходное положение.

Второй и последующие периоды работы тахометра представлены циклограммой 2. Нижняя строка изображает работу трибки 7, которая в течение всего



Циклограмма 2. Тахометр „Jaeger“

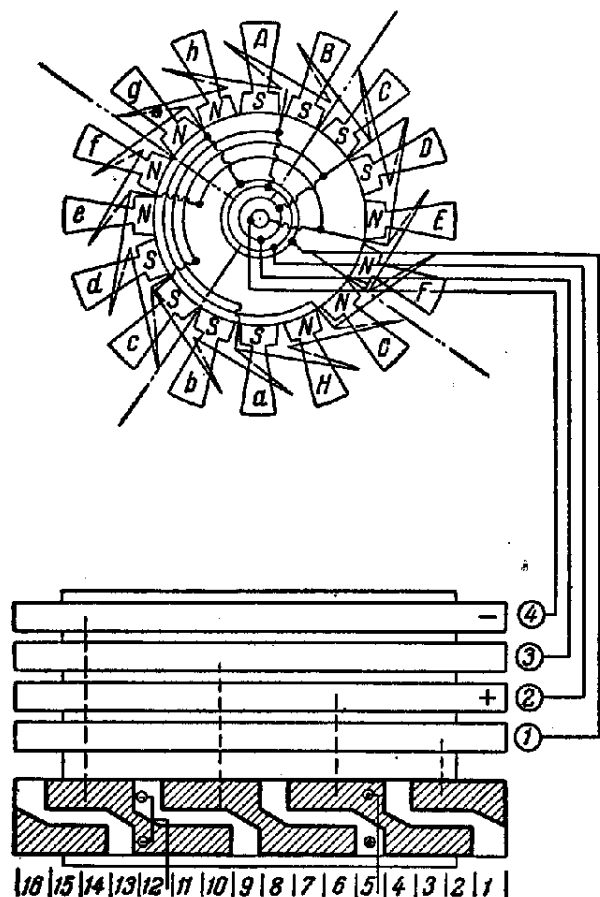
- I — звено 7
- II — рычаг 8
- III — пружина 20
- IV — колесо 9 и штифт 9'
- V — собачка 21
- VI — колесо 10 со штифтом 10' и стрелка

- VIa — скорость вала в рассматриваемый период равна скорости в предыдущий
- VIb — скорость вала в рассматриваемый период меньше скорости в предыдущий
- VIc — скорость вала в рассматриваемый период больше скорости в предыдущий

периода вращается от испытуемого вала, вторая — работу рычага 8, третья — пружины 20, четвертая — колеса 9 со штифтом 9', пятая — собачки 21 и, наконец, шестая — работу стрелки с колесом 10 и штифтом 10'. В течение первой половины периода кулачок 17 заставляет рычаг 8 занимать положение, при котором трибка 7 сцеплена с колесом 9. Пружина 20 в течение этой половины периода остается отжатой от колеса 9, и последнее вместе с штифтом 9' вращается вперед. К концу первой половины периода штифт повернется на угол, пропорциональный углу поворота испытуемого вала за этот же промежуток времени. В начале периода стрелка удерживается неподвижно посредством собачки 21. Она остается неподвижной до конца первой половины периода, если скорость испытуемого вала в рассматриваемый период равна или меньше его

скорости в предшествующий период (строки VI, *a*, *b*). В противном случае штифт 9' подхватит штифт 10' и повернет стрелку на угол, соответствующий новому значению скорости (собачка 21 допускает вращение колеса в сторону увеличения показаний стрелки).

Во второй половине периода рычаг 8 выводит трибку 7 из зацепления с колесом 9, и последнее подхватывается пружиной 20. Собачка 21 отжимается от колеса 10, и последнее либо удерживается штифтом (9') [если скорость вала в рассматриваемый период равна или больше скорости в предшествующий (строка VI, *a*, *c*)] либо под действием пружины 14 возвращается назад, до встречи со штифтом 9' [если скорость вала в рассматриваемый период была меньше скорости в предшествующий (строка VI, *b*)]. Затем собачка 21 защелкивается и удерживает колесо 10 до конца периода, а пружина 20 отжимается от колеса 9, и последнее под действием пружины 15 возвращается в исходное положение. Питание всей системы осуществляется от источ-



Фиг. 17. Схема синхронной передачи тахометра „Spalazzi“

ника постоянного тока *E*. Завод часовой пружины производится электромоторчиком (условная связь показана пунктиром).

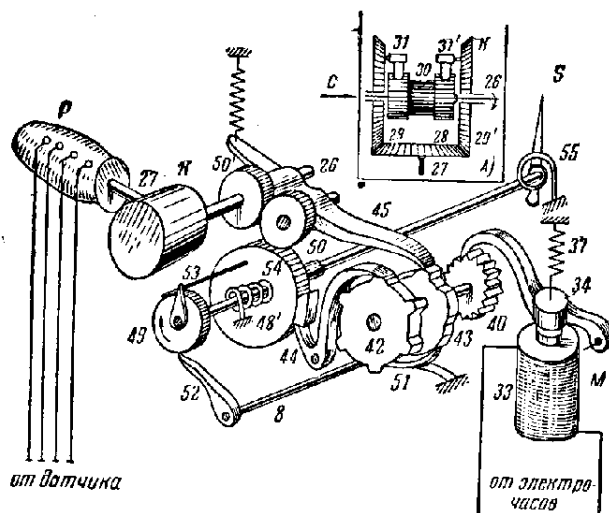
В итальянском тахометре системы „Spalazzi“ передача входных данных прибора осуществляется четырехпроводной синхронной передачей, а механизм включения управляется электрическими часами, обслуживающими одновременно несколько приборов. Электрическая схема синхронной передачи представлена на фиг. 17. Она состоит из датчика, несущего 4 кольца и коллектор, и приемника, выполненного в виде синхронного мотора, статор которого несет 16 полюсов. К коллектору датчика, состоящему из четырех ламелей подведен постоянный ток (+), (—). Каждая ламель электрически связана с одним из четырех колец (электрическая связь показана на схеме пунктиром). При положении, показанном на схеме, ток (+) от ламели попадает на кольцо 2, затем в обмотку статора и создает магнитное поле, ориентирующее положение якоря мотора. Из статора ток возвращается через кольцо 4 к ламели, соединенной с отрицательным полюсом. При повороте датчика на $\frac{1}{16}$ оборота щетки займут положение 6—13, ток попадет в статор через кольца 2, 3 и создаст в нем новое магнитное поле

(под током будут находиться обмотки двух пар полюсов), которое заставит якорь мотора повернуться на $\frac{1}{32}$ оборота (передача построена с передаточным числом $i_{д.п.} = 2:1$). Ток вернется к ламели отрицательного полюса через кольцо 4 и т. д.

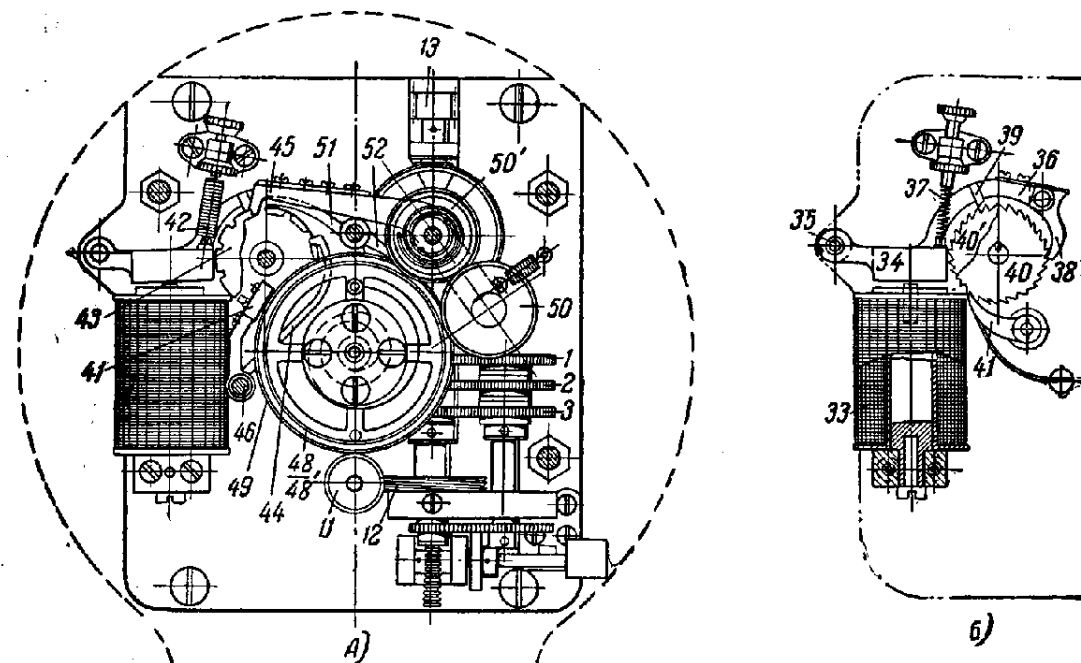
Упрощенная механическая схема тахометра представлена на фиг. 18, а фотографии отдельных узлов на фиг. 19. Вращение мотора приемника *P* передается через выпрямитель к колесу 50 всегда в одном направлении.

Схема выпрямителя представлена на фиг. 18А. На валике 27 сидит коническое колесо 28, сцепленное с двумя коническими колесами 29 и 29', свободно сидящими на валу 26. На валике 26 закреплено звено 30, несущее на себе два храповика. С храповиками могут сцепляться собачки 31 и 31', оси которых укреплены на колесах 29 и 29' соответственно.

Если вращать вал 27 по часовой стрелке, то при наблюдении со стороны стрелки с колесо 29 вращается против часовой стрелки, а колесо 29' вместе со звеном 30 и валом 26 будет вращаться по часовой стрелке. Собачка 31 свободно скользит по храповику. Если изменить направление вращения вала 27, то звено 30 будет подхвачено собачкой 31, вращающейся вместе с колесом 29 по часовой стрелке, а собачка 31' колеса 29', вращающегося против часовой стрелки, будет свободно



Фиг. 18. Кинематическая схема тахометра „Spalazzi“



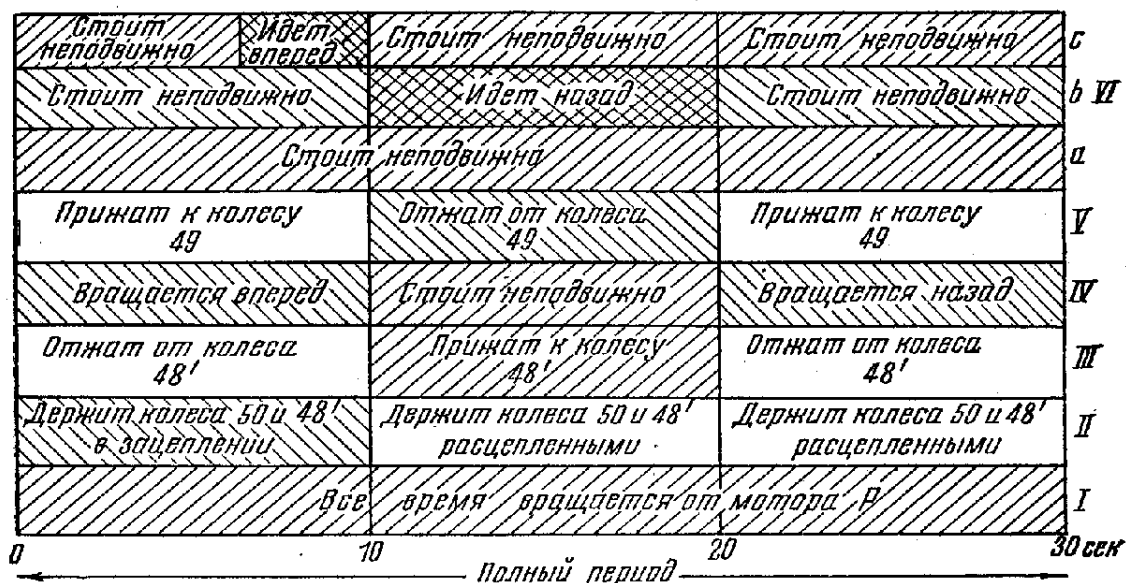
Фиг. 19. Конструктивные узлы тахометра „Spalazzi“

скользить по своему храповику. Вал 26 и колесо 50' будут вращаться снова по часовой стрелке.

С колесом 50' сцеплена шестерня 50, скорость которой, таким образом, пропорциональна скорости вращения испытуемого вала. Колесо 50 периодически вводится в зацепление с колесом 48', которое посредством штифта и поводка вращает колесо 49 и связанную с ним стрелку прибора на угол, пропорциональный

углу поворота испытуемого вала за период времени включения (10 секунд). Затем зацепление между колесами 50 и 48' нарушается, и колесо 50 вращается вхолостую, а колесо 48' со штифтом возвращается назад под действием пружины. Стрелка вместе с колесом 49 удерживается неподвижно до наступления второго периода работы.

Второй и последующие периоды работы механизма тахометра представлены на циклограмме 3.



Циклограмма 3. Тахометр типа „Spalazzi“

- I — звено 50'
- II — рычаг 45
- III — рычаг 44
- IV — колесо 48 со штифтом
- V — собачка 52
- VI — колесо 49 с поводком 53 и стрелкой

- VIa — скорость вала в рассматриваемый период равна скорости в предшествующий
- VIb — скорость вала в рассматриваемый период меньше скорости в предшествующий
- VIc — скорость вала в рассматриваемый период больше скорости в предшествующий

Первая строка изображает работу колеса 50', которое в течение всего периода вращается от мотора, вторая — работу рычага 45, третья — работу рычага 44, четвертая — колеса 48' со штифтом, пятая — собачки 52 и, наконец, шестая — работу колеса 49 с поводком 53 и стрелки. Продолжительность периода 30 секунд. В течение этого периода ток от электрочасов посылается в электромагнит три раза, через каждые 10 секунд. При каждом импульсе якорь 34 электромагнита притягивается и поворачивает колесо 40 на один зубец. (Специальное устройство, состоящее из зубца 39 и собачки 41, обеспечивает поворот колеса 40 только на один зуб, фиг. 196.) Вместе с колесом 40 поворачиваются колеса 42 и 43. В течение первых 10 секунд колесо 43 заставляет рычаг 45 занимать положение, при котором колеса 50 и 48' находятся в зацеплении. Рычаг 44, управляемый колесом 42, отжат от колеса 48', и последнее вместе со штифтом вращается вперед. Пружина 54 взводится. К концу этого промежутка времени штифт колеса 48' повернется на угол, пропорциональный углу поворота испытуемого вала за это же время. Собачка 52, управляемая колесом 43, удерживает стрелку в положении, занимаемом ею в конце предшествующего периода. Стрелка остается неподвижной в течение 10 секунд, если скорость испытуемого вала в течение рассматриваемого периода осталась равной или уменьшилась в сравнении с предшествующим периодом (строка VI, a, b). Если же скорость вала увеличилась, то штифт колеса 48', повернувшись на больший угол, захватит поводок 53 колеса 49 и повернет стрелку на угол, соответствующий новому значению скорости (строка VI, c). (Собачка 52 допускает вращение колеса 49 вперед.) В течение последующих 10 секунд рычаг 45 занимает положение, при котором зацепле-

ние между колесами 50 и 48' отсутствует. Колесо 50 вращается вхолостую, а колесо 48' со штифтом удерживается неподвижно рычагом 44, остающимся прижатым к колесу 48' в течение 10 секунд.

Собачка 52 отжата от колеса 49. Стрелка вместе с колесом 49 и поводком 53 удерживается штифтом колеса 48', если скорость вала в течение рассматриваемого периода равна или больше скорости в предшествующий период (строки VI, а, с). Если же скорость вала уменьшилась, то колеса 49 и стрелка повернутся назад под действием пружины 55 до встречи со штифтом (строка VI, б). Наконец, в течение последних 10 секунд рычаг 45 продолжает оставаться в положении, при котором колеса 50 и 48' разъединены, а рычаг 44 отжимается от колеса 48'. Последнее вместе со штифтом возвращается под действием пружины 54 в исходное положение. Собачка 52 прижата к колесу 49 и удерживает стрелку на месте.

3. Фрикционные тахометры

1) Общие замечания

Во фрикционных тахометрах перемещение указывающего органа происходит под действием сил трения. Силы трения возникают между звеном, приводимым в движение от испытуемого объекта, и звеном, вращающимся с постоянной, известной, угловой скоростью. Вращение звена с постоянной, известной, угловой скоростью осуществляется посредством часового механизма или мотора, снабженного регулятором скорости. Фрикционные тахометры большей частью выполняются либо в виде лобовой фрикционной передачи, либо в виде передачи с грибообразным фрикционом. Иногда встречаются тахометры с двумя дисками и тахометры с угловой передачей (т. е. с двумя цилиндрическими фрикционами, расположенными под углом). Фрикционные тахометры обладают следующими достоинствами:

- 1) малыми размерами,
- 2) отнимают незначительную мощность от испытуемого объекта,
- 3) их показания устойчивы по отношению к вибрациям и практически не зависят от температуры.

К их недостаткам можно отнести:

- 1) проскальзывание между трущимися поверхностями, которое возрастает при работе тахометра во влажном помещении и ведет к неточности показаний,
- 2) прибор дает правильные показания только при установившемся постоянном значении угловой скорости,
- 3) неудобство передачи показания на расстояние.

Кроме того, им свойственны недостатки, связанные с наличием часового механизма.

2) Вывод основных соотношений¹

Установим зависимость между угловой скоростью испытуемого вала и перемещением указывающего органа основных типов тахометров.

Угловую скорость испытуемого вала будем во всех случаях обозначать через ω , а угловую скорость вала, приводимого в движение от часового механизма, через ω_1 .

а) Тахометр с лобовой передачей (фиг. 20)

Диск 1 вращается часовым механизмом с постоянной скоростью всегда в одном направлении. Вал 3, приводимый в движение от испытуемого объекта, снабжен винтовой резьбой; ролик 2 выполнен за одно целое с гайкой.

При установившемся движении винта 3 ролик 2 установится на расстоянии x от оси диска 1. При этом угловая скорость ролика будет равна угловой

¹ См. также лит. 12, 13, 15 и 6.

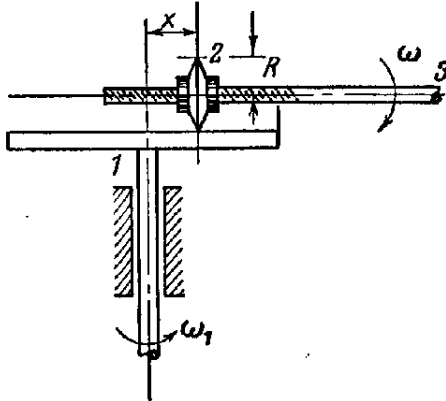
скорости винта (относительная скорость ролика по отношению к винту равна нулю). Расстояние x , передаваемое указывающему органу, определится из соотношения:

$$\omega \cdot R = \omega_1 \cdot x, \quad (20)$$

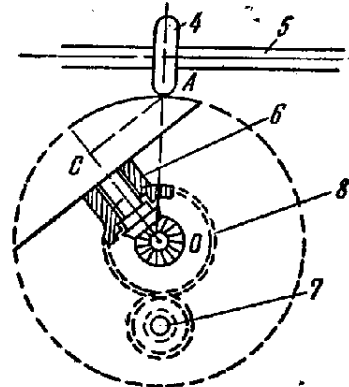
откуда

$$x = \frac{R}{\omega_1} \cdot \omega, \quad (IV)$$

следовательно, расстояние x пропорционально угловой скорости испытуемого вала. Шкала этого тахометра равномерна.



Фиг. 20. Схема фрикционного тахометра с лобовой передачей



Фиг. 21. Схема тахометра с грибообразным фрикционом

б) Тахометр с грибообразным фрикционом (фиг. 21)

При установившемся положении ролика, соприкасающегося с грибом в точке A , можно составить следующее соотношение:

$$\omega \cdot R = \omega_1 \cdot AC. \quad (21)$$

Величина AC может быть выражена через радиус грибка:

$$AC = R_1 \cdot \sin \alpha, \quad (22)$$

α — угол поворота грибка, фиксируемый указывающим органом,

$$\sin \alpha = \frac{R}{R_1 \omega_1} \cdot \omega = C \cdot \omega. \quad (V)$$

Шкала этого прибора неравномерна. Для ее выпрямления можно применить синусный механизм.

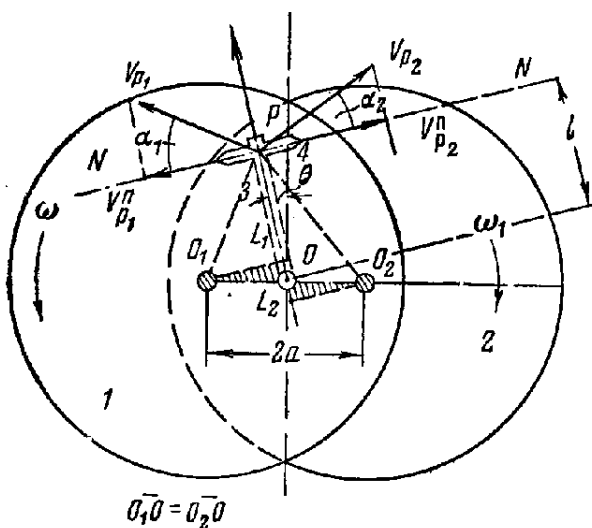
в) Тахометр с двумя дисками (фиг. 22)

При установившемся положении рычага 3 с роликом 4 проекции скоростей точек соприкосновения дисков с роликом на нормаль к оси ролика должны быть равны и противоположны

$$v_{P_1}^n = v_{P_2}^n. \quad (23)$$

Из чертежа видно, что:

$$\begin{aligned} v_{P_1}^n &= v_{P_1} \cdot \cos \alpha_1 = \omega \cdot \overline{O_1 P} \cdot \cos \alpha_1, \\ v_{P_2}^n &= v_{P_2} \cdot \cos \alpha_2 = \omega_1 \cdot \overline{O_2 P} \cdot \cos \alpha_2, \end{aligned} \quad (24)$$



Фиг. 22. Схема фрикционного тахометра с двумя дисками

но

$$\cos \alpha_1 = \frac{\bar{P}L_1}{\bar{O}_1P}; \quad \cos \alpha_2 = \frac{\bar{P}L_2}{\bar{O}_2P}, \quad (25)$$

поэтому

$$\frac{\omega}{\omega_1} = \frac{\bar{P}L_2}{\bar{P}L_1} = \frac{\bar{O}P + a \cdot \sin \theta}{\bar{O}P - a \cdot \sin \theta}, \quad (26)$$

откуда после образования:

$$\sin \theta = \frac{l}{a} \cdot \frac{\omega - \omega_1}{\omega + \omega_1}, \quad (27)$$

$$\theta = \arcsin \frac{l}{a} \cdot \frac{\omega - \omega_1}{\omega + \omega_1}. \quad (VI)$$

Угол поворота указывающего органа не пропорционален угловой скорости, вала, и шкала прибора неравномерна. Тахометры этого типа в практике почти не применяются.

2) Тахометр с угловой передачей (фиг. 23)

При установившемся положении вала (II) с цилиндрическим катком должно быть выполнено следующее соотношение:

$$v_{P_2} = v_{P_1} \cdot \cos \alpha, \quad (28)$$

но

$$v_{P_1} = \omega_1 R_1; \quad v_{P_2} = \omega \cdot R, \quad (29)$$

поэтому

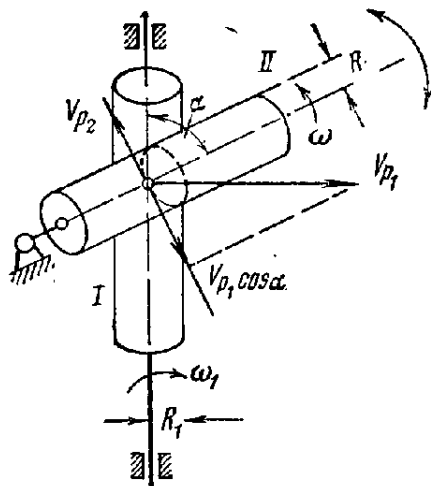
$$\omega \cdot R = \omega_1 \cdot R_1 \cdot \cos \alpha, \quad (30)$$

откуда

$$\cos \alpha = \frac{R}{\omega_1 R_1} \cdot \omega = c \cdot \omega,$$

$$\alpha = \arccos c \cdot \omega. \quad (VII)$$

Шкала прибора неравномерна. Для измерения скорости этим тахометром удобно применять косинусный механизм.



Фиг. 23. Схема фрикционного тахометра с угловой передачей

3) Описание некоторых конструкций

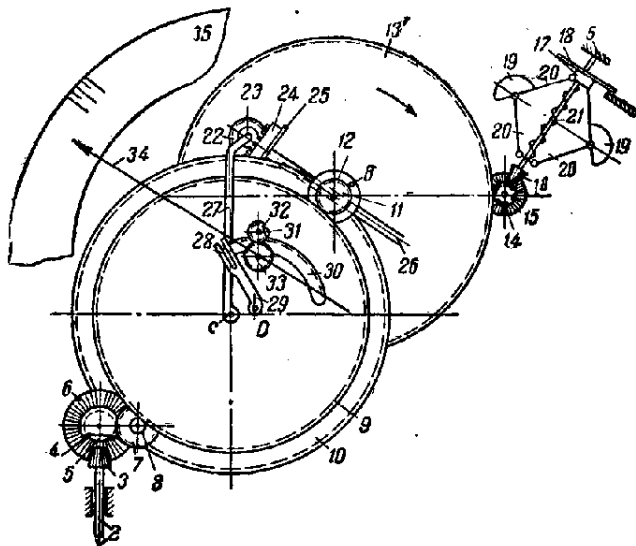
В практике наиболее часто применяются тахометры с лобовой передачей. Один из тахометров, изготавливаемый фирмой „Behrens“, представлен на фиг. 24. Он состоит из передаточного механизма, лобовой фрикционной передачи, фрикционного конического регулятора и указывающего органа. Вращение испытуемого вала передается посредством валика 2 тахометра и системы зубчатых колес 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 16 фрикционному диску 13' и центробежному коническому регулятору трения. Между звеньями 4 и 6 находится фрикционная муфта 5, передающая движение только в одну сторону. Колесо 11 соединено с осью фрикционной муфтой 12. Благодаря этому колесо 13 и диск 13' вращаются с постоянной скоростью, пропорциональной скорости вращения оси регулятора. С диском 13' соприкасается ролик 25, который приводится в движение от вала тахометра 2 посредством колес 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 22, 23 и 24.

При равенстве скоростей на ролике и диске, рычаг 27, на котором сидит ось колес 22 и 23, стоит неподвижно. При неравенстве же скоростей ролик приближается или удаляется от центра, так как колесо 10 заставляет катиться по себе колесо 22; это продолжается до тех пор, пока скорости не сравняются; ось 26 проскальзывает при этом поперек диска. Происходящий от этого по-

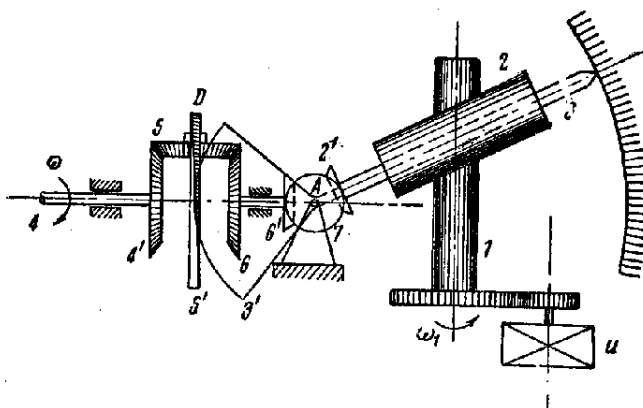
ворот рычага 27 передается пальцем 28, кулиссой 29, зубчатым сектором 30, жестко связанным с кулиссой, и колесами 31, 32 и 33 регистрирующей стрелке 34.

Тахометры с грибообразным фрикционом очень часто применяются в механизмах точной механики. Его кинематическая схема и конструктивное выполнение чрезвычайно просты и мало отличаются от изображенной на фиг. 21. Валик сегмента обычно приводится от часового механизма. Обойма сегмента связана с указующим органом.

Тахометры с угловой передачей и особенно тахометры с двумя дисками встречаются весьма редко. На фиг. 25 представлена схема тахометра D.R.P. № 277830. В нем один цилиндрический фрикцион 1 приводится в движение



Фиг. 24. Схема тахометра „Behrens“



Фиг. 25. Тахометр с угловой передачей
D. R. P. № 277830

от часового механизма и посредством зубчатых колес, а цилиндрический фрикцион 2 вращается свободно на рычаге 3. Последний поворачивается вокруг точки А. Привод цилиндрического фрикциона 2 осуществляется от испытуемого вала посредством валика 4 и системы зубчатых колес. Колесо 2' сидит на оси фрикциона и сцеплено с колесом 7, сидящим на рычаге 3 и поворачивающимся вместе с ним. При включении тахометра рычаг 3 поворачивается вместе с фрикционом 2 и устанавливается в положении, соответствующем угловой скорости испытуемого вала. Для того чтобы компенсировать влияние поворота рычага на угловую скорость фрикциона, вращение испытуемого вала передается на фрикцион посредством дифференциала D. Поводок дифференциала связан с рычагом 3 посредством колеса 5' и сегмента 3'. При повороте рычага на некоторый угол поворачивается и поводок дифференциала, а от него колесо 6 и т. д. до фрикциона, где поворот рычага компенсируется.

Установим, при каких значениях передаточных чисел будет достигнута компенсация.

Для дифференциального механизма 4', 5, 5', 6 формула Виллиса напишется так:

$$\frac{\omega_4 - \omega_{5'}}{\omega_6 - \omega_5} = -1.$$

То же для дифференциала 7, 2', 3, 6';

$$\frac{\omega_7 - \omega_3}{\omega_{2'}} = i_{72'},$$

но

$$\omega_7 = \omega_6 \cdot i_{76}; \quad \omega_{5'} = \omega_3 \cdot i_{5'3}$$

(передаточное число $i_{ks} = \frac{\omega_k}{\omega_s}$).

Выражая из первого соотношения

$$\omega_6 = 2\omega_{5'} - \omega_4 = 2 \cdot \omega_3 i_{5'3} - \omega_4$$

и подставляя во второе, получим

$$\omega_3(2i_{5'3} \cdot i_{76} - 1) = \omega_{2'} \cdot i_{72} + \omega_4 \cdot i_{76}$$

Как показывает полученная формула, для уничтожения влияния вращения третьего звена на вращение цилиндра 2 вокруг его оси необходимо скобки, стоящие в левой части, сделать равными нулю.

Тогда

$$i_{5'3} = \frac{1}{2i_{76}}. \quad (A)$$

При этом

$$\frac{\omega_{2'}}{\omega_4} = -\frac{i_{76}}{i_{72}} = -i_{76} \cdot i_{27};$$

чтобы иметь

$$\omega_{2'} = \omega_4,$$

необходимо сделать

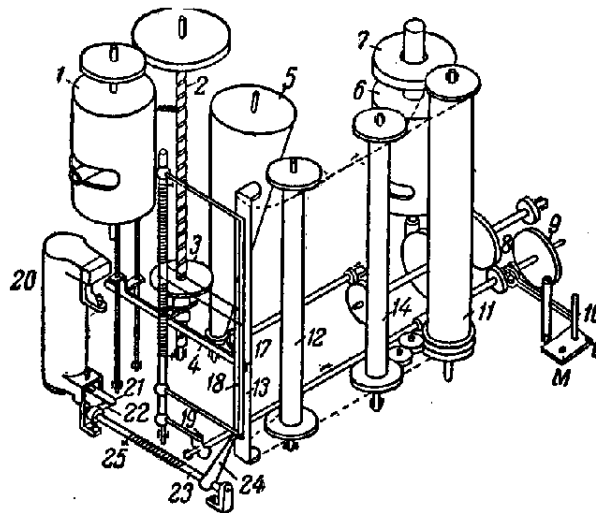
$$i_{76} \cdot i_{27} = -1. \quad (B)$$

Из равенства (A) и (B) можно, задавшись одним из передаточных чисел, вычислить остальные.

На фиг. 26 представлена схема фрикционного тахометра ЦАГИ Т-2. Он состоит из синхронной передачи, фрикционного механизма, электромотора со скоростным регулятором и записывающего устройства. Датчик синхронной передачи (на схеме не показанный) связан с распределительным валом авиамотора. Приемный мотор синхронной передачи 1 смонтирован на корпусе тахографа и вращается со скоростью, равной скорости вращения испытуемого вала.

Мотор 1 приводит во вращение винт 2 фрикционного механизма, на котором вращается ролик 3, трущийся о фрикционный конус 5. Конус 5 приводится во вращение с постоянной угловой скоростью от электромоторчика 6, причем постоянство угловой скорости обеспечивается центробежным электрическим регулятором 7.

В зависимости от скорости вращения синхронного мотора 1, ролик 3 останавливается на определенном расстоянии от нижнего основания конуса 5. С роликом 3 связана посредством валика стрелка 4, движущаяся по направляющим струнам. На конце стрелки помещена пила 17, которая накальвает запись на бумаге. Накол производится пружинной ударной рамкой 18, приводимой в движение от моторчика 6 посредством кулачкового механизма 19. Бумажная лента перемещается с постоянной скоростью, наматываясь на барабан 11, приводимый во вращение от того же моторчика 6. Механизм снабжен отметчиком времени 20, работающим от электрочасов.



Фиг. 26. Тахометр ЦАГИ Т-2

4. Вибрационные тахометры

1) Общие замечания

К приборам, основанным на механическом методе, следует отнести также и вибрационные тахометры. Они основаны на резонансе упругих колебаний указателя с вынужденными колебаниями испытуемого объекта, происходящими от периодического действия неуравновешенных сил. Период неуравновешенных сил обычно совпадает с числом оборотов вала.

Достоинством этих тахометров являются их чрезвычайная простота и независимость показания от температурных влияний.

Недостаток их заключается в сравнительно небольшой точности показаний и необходимости иметь целый набор тахометров.

Вибрационные тахометры наиболее пригодны для измерений скоростей вращений главных валов машин, обладающих неуравновешенными массами (паровых машин, двигателей внутреннего сгорания и т. д.).

Соотношение между угловой скоростью вала и частотой колебаний указателя весьма просто.

$$N = k \cdot n_{\text{вала}},$$

N — частота колебаний, k — целое число (резонанс может наступить не только при совпадении, но и при кратности); ориентировочное число оборотов испытуемого вала должно быть известно заранее.



Фиг. 27. Схема вибрационного тахометра

2) Описание конструкции¹

На фиг. 27 представлен вибрационный тахометр „Фрама“. Он состоит из стойки 1, к которой прикреплен ряд пластинок, отличающихся друг от друга периодом свободных колебаний. При тесном соприкосновении тахометра с испытуемым объектом пластинки начнут колебаться, причем с наибольшей амплитудой будет вибрировать пластинка, у которой период свободных колебаний совпадает или кратен периоду вынужденных колебаний, сообщаемых испытуемым объектом. Пластины заранее разградуированы на числа оборотов.

5. Гидравлические и воздушные тахометры

1) Общие замечания

Среди гидравлических тахометров наиболее широкое распространение получили тахометры, в которых перемещение указывающего органа происходит под действием сил веса при изменении формы поверхности вращающейся жидкости (тахометры поплавкового типа). Указывающий орган связан с поплавком, плавающим на поверхности, причем иногда роль поплавка играет жидкость с другим удельным весом.

Кроме того, существуют еще два типа гидравлических тахометров, по аналогии с которыми выполнены также и воздушные тахометры. В одних перемещение указывающего органа происходит под давлением жидкости или воздуха, создаваемым вращением испытуемого вала (тахометры нагнетательного типа). В других перемещение указывающего органа происходит под действием сил трения вращающейся жидкости или воздуха (вязкостные тахометры).

Существенным недостатком всех гидравлических и воздушных тахометров является неточность показаний под влиянием изменения температуры. Гидравлические тахометры, кроме того, обладают большими габаритами (особенно первые два типа) и стационарны, а гидравлические тахометры второго типа для измерения скорости в больших диапазонах требуют наличия нескольких приборов. Воздушные тахометры обладают ограниченным диапазоном измеряемой скорости, особенно в сторону минимального числа оборотов.

Общим достоинством гидравлических и воздушных тахометров является простота конструкции. Воздушные тахометры вместе с тем весьма компактны.

2) Вывод основных соотношений

Ниже выведены соотношения между угловой скоростью вала и положением указывающего органа в гидравлических тахометрах поплавкового и насосного типов. Для остальных типов вывод аналитической зависимости связан с большими трудностями и имеет малое практическое значение.

¹ См. также лит. 4, 18, 43.

а) Поплавковый тахометр (фиг. 28)¹

При вращении сосуда вокруг вертикальной оси YY свободная поверхность жидкости изменит свою форму, и поплавок Π опустится. Каждая частица жидкости находится под действием силы веса:

$$P_g = m \cdot g \quad (31)$$

и силы инерции

$$P_i = m \cdot \omega^2 \cdot x, \quad (31')$$

x — координата частицы. Равнодействующая этих сил нормальна к поверхности жидкости

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{\omega^2 x}{g}, \quad (32)$$

откуда

$$y = \frac{\omega^2}{2g} x^2 + S. \quad (33)$$

Поверхность жидкости принимает форму параболоида вращения.

Из равенства объемов в покое и движении (h — высота жидкости в покое)

$$\begin{aligned} v &= \pi r^2 \cdot h = \\ &= \pi r H - \frac{1}{2} \pi r^2 (H - S) \end{aligned} \quad (34)$$

получим

$$H = 2h - S. \quad (35)$$

Для верхней точки жидкости $x = r$, $y = H$, и уравнение (33) примет вид

$$H = \frac{\omega^2}{2g} \cdot r^2 + S = 2h - S, \quad (36)$$

откуда

$$S = h - \frac{\omega^2 r^2}{4g} = h - c\omega^2 \quad (\text{VIII})$$

Величина параметра S характеризует угловую скорость вала. Шкала прибора неравномерна.

б) Тахометр насосного типа (фиг. 29)

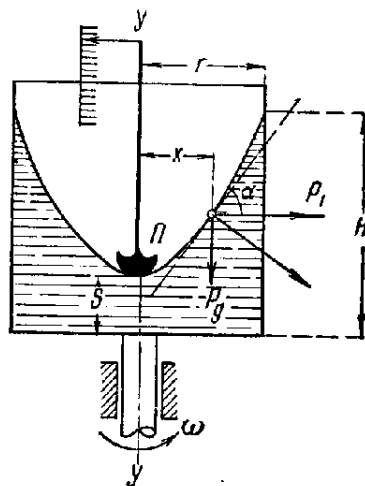
При вращении диска 2 тахометра жидкость будет выжиматься из радиальных отверстий и под давлением поступать в трубочку T . При постоянной угловой скорости жидкость находится в относительном покое, и поэтому можно составить уравнение Эйлера в виде:²

$$F_x = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (37)$$

F_x — проекция на ось XX сил, действующих на единичную массу, ρ — плотность жидкости, P — давление в произвольной точке, r — радиус в произвольной точке.

В направлении оси XX действует только сила инерции

$$F_x = \omega^2 \cdot r. \quad (38)$$



Фиг. 28. Схема гидравлического поплавок-ного тахометра

¹ См. также лит. 43.

² Проф. Есьман. Гидравлика.

Поэтому

$$\omega^2 r = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (39)$$

$$P = \rho \omega^2 \int_{r_0}^{r_1} r \cdot dr =$$

$$= \rho \frac{\omega^2}{2} (r_1^2 - r_0^2).$$

Имея в виду, что $\rho = \frac{\gamma}{g}$, где γ — уд. вес жидкости, получим

$$P = \frac{\gamma \omega^2}{2g} (r_1^2 - r_0^2). \quad (40)$$

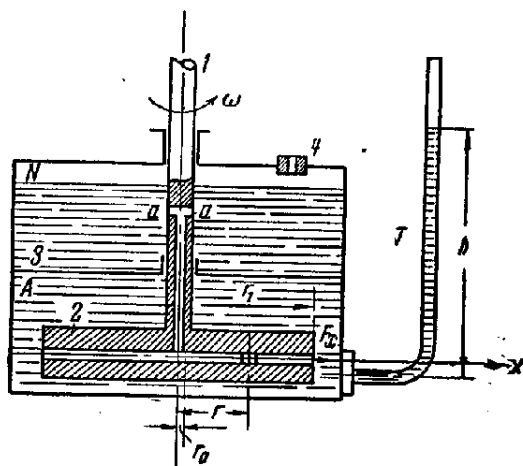
Высота жидкости в пьезометрической трубке

$$h = \frac{P}{\gamma} = \frac{\omega^2}{2g} (r_1^2 - r_0^2) \quad (41)$$

и окончательно

$$h = c \omega^2. \quad (IX)$$

Высота жидкости в трубке характеризует угловую скорость вращения вала с дисками. Шкала прибора неравномерна.



Фиг. 29. Схема гидравлического насосно-го тахометра

3) Описание отдельных конструкций¹

На фиг. 30 представлен тахограф поплавкового типа, изготовляемый фирмой „Karlik“. Он состоит из сосуда 2, указывающего органа и записывающей системы.

Сосуд 2, залитый ртутью, имеет трехтрубную форму. В средней трубке помещен поплавок 26, связанный системой рычагов с пером 47 записывающей системы и со стрелкой 44. Сосуд вращается в шариковых опорах и приводится в движение посредством шкива 4 и шнуровой передачи от испытуемого вала. В покое поплавок 26 занимает положение, указанное отметкой 86. При вращении ртуть в крайних трубках поднимается, а в средней опускается. Вместе с ртутью опускается поплавок и перемещает стрелку тахометра и перо записывающего устройства в положение, соответствующее угловой скорости вала. Барабан 87 записывающего устройства вращается от часового механизма 21.

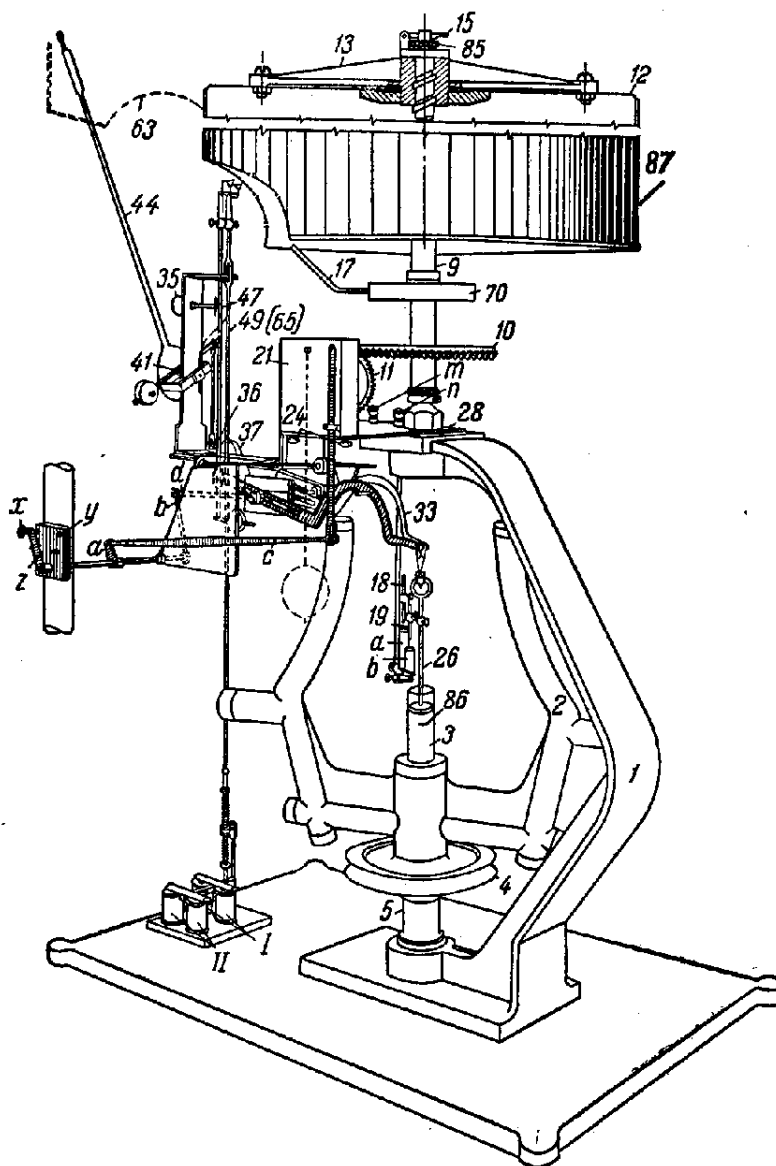
Для изменения масштаба диаграммы служит устройство, состоящее из рычагов *a*, *b*, *c* и *d*. При перестановке рукоятки *z* из положения *X* в *Y* ход пера увеличивается вдвое, а скорость часового механизма в 18 раз. Для фиксации угловой скорости в определенный момент времени служит отметчик 49, приходящий в действие от электромагнита 1.

Управление магнитами дистанционно.

Тахометры насосного типа выполняются различных конструкций. Фирма Veeder-Root выполняет тахометры, у которых на валу сидит колесо с прямолинейными лопатками. Лопатки сделаны прямолинейными для замера скорости вала при любом направлении вращения. Жидкость нагнетается в пьезометрическую трубку. Высота жидкости в трубке соответствует угловой скорости вращения. Фирма изготовляет тахометры на различные диапазоны измеряемой скорости.

¹ См. также лит. 45.

Тахометр насосного типа с дисками, изготовленный в ЦАГИ, представлен на фиг. 29. Вал тахометра 1 с помощью гибкого вала соединяется с испытуемым объектом. На вал насажен диск 2 с радиальными отверстиями. Вдоль вала высверлено отверстие с выходами по радиусу. Корпус тахометра разбит на две изолированные друг от друга части. Крышка 3 разделяет область высокого давления А от области N, в которой давление равно атмосферному благодаря пробке 4 с отверстием. Камера А сообщается с пьезометрической трубкой Т. Обе камеры тахометра наполнены жидкостью. При вращении вала тахометра жидкость под действием центробежных сил выжимается из отверстия диска 2 и создает в камере А повышенное давление, а в центре вала разрежение. Благодаря этому жидкость из камеры N засасывается через отверстие *aa* в диск. Давление внутри камеры заставляет жидкость подняться в пьезометрической трубке до высоты, соответствующей угловой скорости вала. При уменьшении скорости вращения давление в камере А падает, и жидкость из трубки Т поступает через радиальные отверстия и отверстия в валу обратно в камеру N до тех пор, пока не будет достигнуто равенство давления в трубке Т и камере А. Тахометр снабжен несколькими дисками различных диаметров для измерения скоростей в различных пределах.



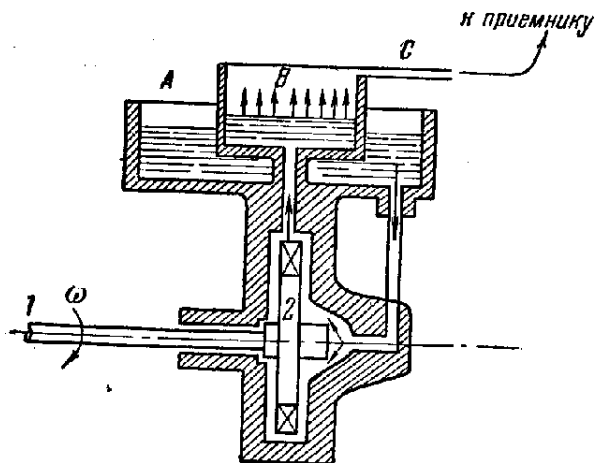
Фиг. 30. Гидравлический тахограф фирмы „Karlik“.

Схема гидравлического дистанционного тахометра нагнетательного типа представлена на фиг. 31. Испытуемый вал, расположенный горизонтально, вращает ведущий вал 1 тахометра, на котором насажен ротор 2 с радиальными лопатками. Жидкость (масло) засасывается из сообщающегося с атмосферой резервуара А и нагнетается в резервуар В, наполненный воздухом. Сжимаемый поднимающимся столбом масла воздух поступает из резервуара В по трубке С в приемник, выполненный в виде манометра. Этот прибор не получил широкого распространения благодаря большой температурной ошибке.

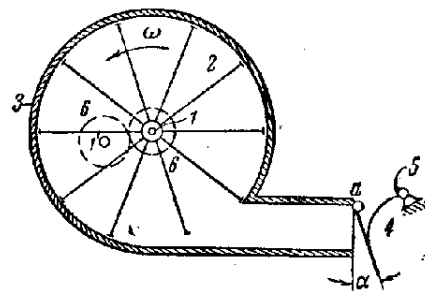
Воздушные тахометры нагнетательного типа изготавливаются в Советском Союзе. Схема этого тахометра представлена на фиг. 32. Вал 1 тахометра снабжен колесом 2 с радиальными лопатками. Колесо 2 вращается всегда в одном направлении (указанном стрелкой) внутри металлического кожуха 3, имеющего тангенциальный выход. Выход прикрыт заслонкой 4, подвешенной на оси *aa*.

При вращении испытуемого вала в сторону, указанную стрелкой, тахометр приключается валиком 1. При вращении в противоположную сторону тахометр приключается валиком 1', и вращение передается колесу 2 через пару зубчатых колес 66. Лопатки колеса 2 нагнетают воздушную струю по направлению тангенциального выхода и приподнимают заслонку. Сила давления воздуха на заслонку и угол поворота последней зависят от угловой скорости испытуемого вала. Величина угловой скорости отмечается стрелкой прибора. Для возвращения указывающей системы в начальное положение служит пружина 5.

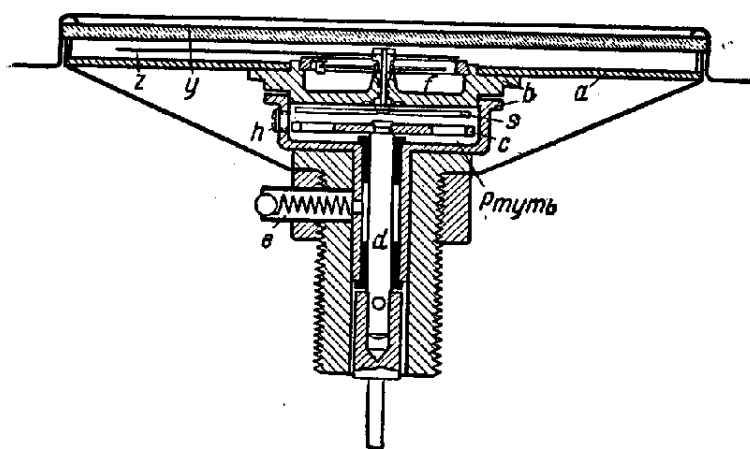
Вязкостный гидравлический тахометр, выполненный фирмой „Lehmbek“, представлен на фиг. 33.



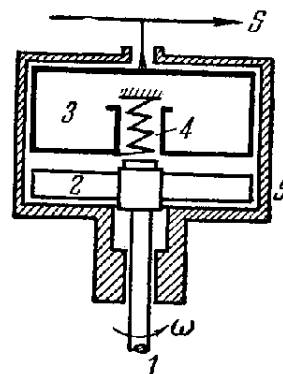
Фиг. 31. Схема гидравлического дистанционного тахометра



Фиг. 32. Воздушный тахометр



Фиг. 33. Гидравлический вязкостный тахометр „Lehmbek“



Фиг. 34. Схема воздушного тахометра фирмы „Perboom und Schürmann“

На ведущий вал d тахометра насажен диск c с отверстиями, расположенный внутри герметически закрытого сосуда, заполненного ртутью. При вращении диска c приходит во вращение ртуть и увлекает трением легкий диск S , расположенный в том же сосуде. Диск S удерживается от вращения волоском f . Угол поворота диска S со стрелкой z соответствует скорости вращения испытуемого объекта.

На фиг. 34 дана схема воздушного вязкостного тахометра фирмы „Perboom und Schürmann“. Вал 1 тахометра, приводимый в движение от испытуемого объекта, снабжен колесом 2 с радиальными лопатками. При вращении вала с колесом создается воздушный поток, увлекающий трением легкий металлический цилиндр 3, вращающийся в подшипниках. Цилиндр 3 связан со стрелкой прибора, которая устанавливается в положение, соответствующее угловой скорости вращения. Пружина 4 удерживает цилиндр от вращения и возвращает стрелку в начальное положение.

II. МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

В магнитных и электрических тахометрах осуществлена соответственно магнитная и электрическая связь между испытуемым объектом и указывающим органом. Мощность, отнимаемая прибором от испытуемого вала, преобразуется в работу магнитных и электрических сил, под действием которых происходит перемещение указывающего органа.

Существуют электрические системы постоянного тока, переменного однофазного и двухфазного токов и импульсного тока. Магнитные приборы обычного типа не допускают передачи показания на расстояние. В последнее время появились дистанционные магнитные тахометры, снабженные синхронной передачей (тахометр Коллсмана, ДТ-1). Электрические системы — дистанционные. Магнитные и электрические тахометры при измерении должны быть введены в соприкосновение с испытуемым объектом.

6. Магнитные тахометры

1) Общие замечания

Принцип действия магнитных тахометров основан на явлении магнитной индукции. При вращении металлического диска в магнитном поле в нем образуются вихревые токи (токи Фуко). Эти токи создают магнитное поле, взаимодействующее с основным полем.

В магнитных тахометрах магнит вращается от испытуемого вала, а металлическое звено, выполненное в виде легкого цилиндра, удерживается от вращения спиральной пружиной. Благодаря скольжению цилиндра относительно магнитного поля постоянного магнита между ними возникают силы взаимодействия, дающие момент, пропорциональный величине скорости скольжения. К цилиндру и корпусу тахометра прикрепляют пружину, развивающую моменте, пропорциональный углу поворота цилиндра. В результате цилиндр вместе с присоединенной к нему стрелкой поворачивается на угол, пропорциональный скорости вращения. Возвращение всей подвижной системы в начальное положение осуществляется той же спиральной пружиной.

Магнитные тахометры обладают рядом преимуществ, обуславливающих их широкое применение:

- 1) простота конструкции,
- 2) пропорциональность шкалы прибора,
- 3) большой диапазон измеряемой скорости,
- 4) хорошее успокоение подвижной системы прибора без специальных тормозящих устройств.

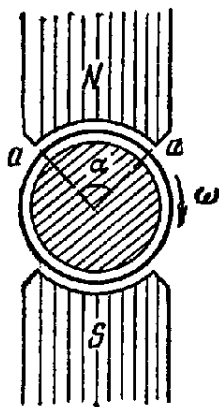
Самый существенный недостаток этих тахометров заключается в изменении точности показаний от температуры. При изменении температуры меняется электрическое сопротивление металлических цилиндров, величина токов Фуко и плотность магнитного потока постоянных магнитов. Поэтому в современных тахометрах цилиндры изготавливаются из специальных сплавов, обладающих малым температурным коэффициентом. Таким способом удается снизить ошибки в показаниях до 0.83% , на каждые 10°C (Horn).¹

¹ См. также лит. 17, 18, 48.

Другой способ температурной компенсации заключается в изменении плотности магнитного потока при изменении температуры. Это достигается либо с помощью специального дополнительного магнита, расстояние которого до основных магнитов можно изменять, увеличивая или уменьшая таким образом плотность магнитного потока в рабочем зазоре, либо полюсы основных магнитов соединяют между собою пластинками из особого сплава, магнитная проницаемость которых при повышении температуры уменьшается. Вследствие этого в рабочем зазоре плотность магнитного потока с изменением температуры остается постоянной.¹

2) Вывод основных соотношений²

Предположим, что металлический цилиндр вращается с постоянной угловой скоростью между магнитными полюсами $N-S$ (фиг. 35). Внутри цилиндра помещен неподвижный железный сердечник. При вращении в цилиндре будет индуцироваться электродвижущая сила



$$E = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (42)$$

Φ — магнитный поток.

Благодаря наличию неподвижного железного сердечника магнитные силовые линии будут пересекать цилиндр по радиусу. Пренебрегая толщиной стенок цилиндра, получим:

$$\Phi = B \cdot \alpha \cdot R \cdot b, \quad (43)$$

B — магнитная индукция, α — угол дуги aa' цилиндра, являющейся проекцией части боковой поверхности цилиндра, пересеченной магнитными линиями, R — радиус, b — высота цилиндра. Тогда э. д. с.

$$E = - B \cdot R \cdot b \cdot \frac{d\alpha}{dt} \cdot 10^{-8} \quad (\text{вольт}). \quad (42')$$

Фиг. 35. Схема магнитного тахометра

При постоянной угловой скорости

$$E = - B \cdot R \cdot b \cdot \omega \cdot 10^{-8} \quad (\text{вольт}). \quad (42'')$$

Индуктированный ток

$$I = \frac{E}{r}, \quad (43')$$

r — сопротивление части цилиндра под полюсами. Оно может быть выражено так

$$r = k_1 \cdot \frac{\rho}{\delta \cdot 10^4}, \quad (44')$$

k_1 — коэффициент пропорциональности, определяемый характером распространения тока, δ — толщина стенок цилиндра, ρ — удельное сопротивление.

Сила тока выразится так:

$$I = \frac{B \cdot R \cdot b \cdot \omega \cdot \delta \cdot 10^{-4}}{k_1 \cdot \rho} = k \cdot \omega. \quad (43)$$

Индуктированный ток создает магнитное поле, взаимодействующее с основным полем. Величина силы взаимодействия

$$F = \frac{1}{9810} \cdot B \cdot I \cdot b \quad (\text{грамм}). \quad (44')$$

Момент этой силы

$$M = \frac{2}{9810} B \cdot I \cdot b \cdot R \quad (\text{г/см}), \quad (45')$$

¹ См. лит. 48.

² См. лит. 1, 48.

или

$$M = D \cdot \omega, \quad (45'')$$

где

$$D = \frac{2 \cdot B^2 \cdot R^2 \cdot b^2 \cdot \delta}{9810 \cdot k_1 \cdot \rho} \cdot 10^{-4}.$$

Момент (в кгсм)

$$M = 0.001 D \omega.$$

Если предположить теперь, что магниты вращаются, а цилиндр удерживается пружиной с коэффициентом упругости k_2 , то момент противодействия пружины

$$M_{\text{пр}} = k_2 \cdot \beta, \quad (46)$$

β — угол поворота пружины.

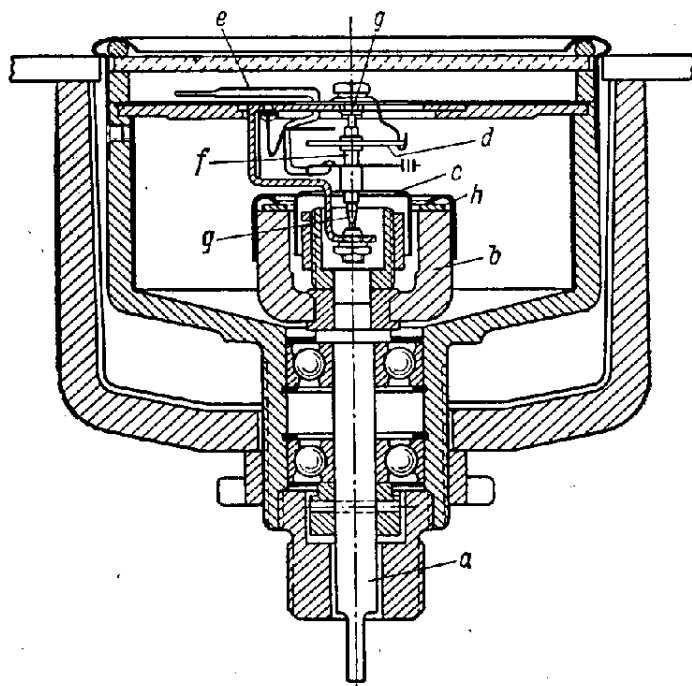
Из равенства моментов (при равномерном вращении) получим

$$\beta = 0.001 \frac{D}{k_2} \cdot \omega. \quad (\text{радиан}). \quad (X)$$

Угол поворота цилиндра пропорционален числу оборотов. Шкала прибора равномерная.

3) Описание отдельных конструкций¹

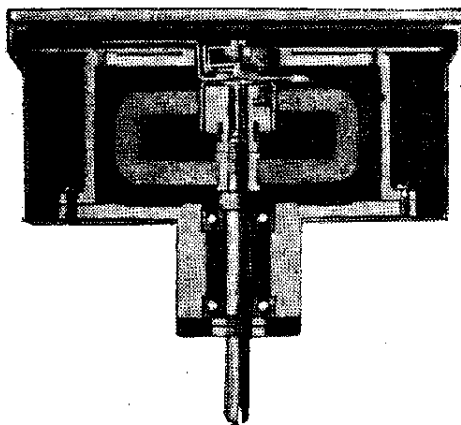
На фиг. 36 представлен магнитный тахометр „Deuta-Werke“. Колоколообразный магнит b насажен на вал a тахометра и приводится во вращение от испытуемого объекта. Внутри магнита помещен алюминиевый барабан c , вращающийся



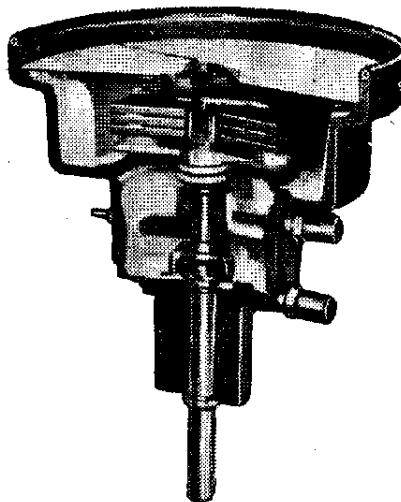
Фиг. 36. Магнитный тахометр фирмы „Deuta-Werke“

в специальных подшипниках g . Для увеличения плотности магнитного потока внутрь алюминиевого барабана помещен сердечник из мягкого железа, вращающийся вместе с магнитом. Магнит снабжен пластинкой h , играющей роль температурного компенсатора. На одной оси с алюминиевым барабаном сидит стрелка тахометра, которая при вращении магнита перемещается вместе с барабаном на угол, пропорциональный скорости вращения испытуемого вала. Возвращение стрелки в начальное положение происходит под действием пружины d .

¹ См. также лит. 5, 10, 16, 17, 18, 22, 24, 25, 45.



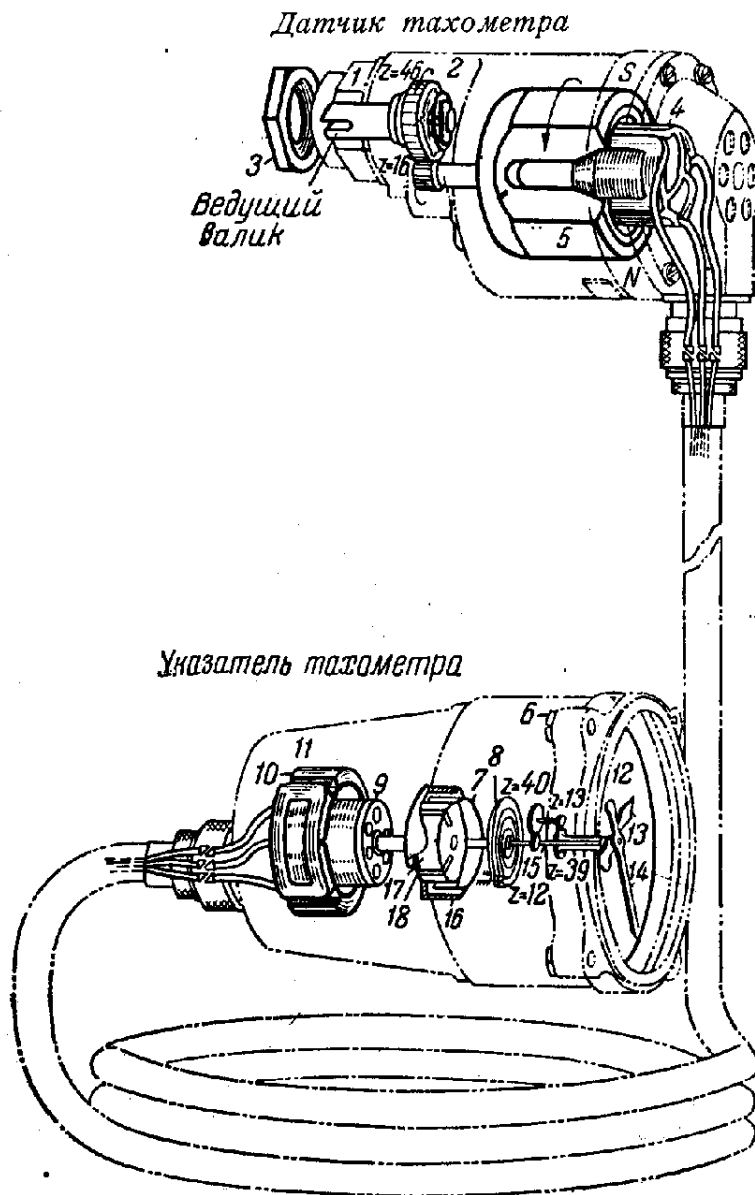
Фиг. 37. Магнитный тахометр



Фиг. 38. Магнитный тахометр

В некоторых магнитных тахометрах вращающемуся магниту придают С-образную форму (фиг. 37) или он выполняется из отдельных круговых плоских дисков (тахометр Нотт, фиг. 38).

Дистанционный магнитный тахометр, построенный фирмой Коллсман и по образцу которого выполнен советский тахометр ТЭ-21, состоит из синхронной передачи и обычного магнитного тахометра (фиг. 39). Датчик синхронной передачи представляет собою трехфазный синхронный генератор с постоянным магнитом в качестве ротора. Ток от генератора поступает в трехфазный статор реактивного мотора, смонтированный вместе с магнитным тахометром, и возбуждает в нем вращающееся магнитное поле, скорость вращения которого всегда равна скорости вращения ротора генератора. На валу ротора мотора укреплен звездообразный магнит, в поле которого помещен металлический колпачок с малым температурным коэффициентом сопро-



Фиг. 39. Дистанционный магнитный тахометр Коллсмана

тивления. Колпачок удерживается от вращения волоском. Указывающая система состоит из двух стрелок: одной для грубого отсчета, другой для точного.

7. Электротаксометры постоянного тока

1) Общие замечания

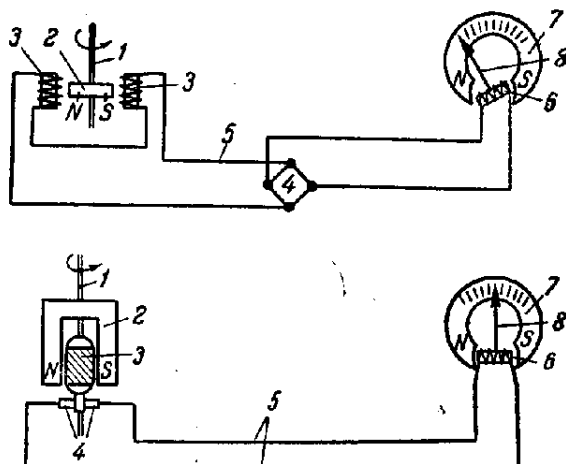
Электрические тахометры постоянного и переменного тока состоят из датчика и приемника, связанных между собой электрически (фиг. 40). В тахометрах постоянного тока датчиком является динамомашинка постоянного тока, которая приводится в движение от испытуемого вала. Напряжение, возникающее на зажимах датчика, пропорционально числу оборотов и измеряется приемником, выполненным в виде обычного вольтметра или другого электроизмерительного прибора.

Датчики постоянного тока выполняются двух типов:

- а) с постоянным магнитом,
- б) с электромагнитом постоянного тока.

Электрические тахометры постоянного тока просты по конструкции и позволяют измерять скорость в широких диапазонах.

Общим недостатком приборов постоянного тока является необходимость применения щеток и вращающегося коллектора, у которых электрическое сопротивление не отличается постоянством. Изменение сопротивления в контактах ведет к искажению показаний. В тахометрах с постоянными магнитами неточность показаний может, кроме того, последовать в результате размагничивания магнитов, обусловленного тряской, изменением температуры и т. д. Поэтому обычно применяются магниты из стали, отличающейся большой коэрцитивной силой.



Фиг. 40. Схема электрического тахометра

2) Вывод основных соотношений

На основании закона электромагнитной индукции при движении проводника с постоянной скоростью в равномерном магнитном поле в нем индуцируется э. д. с., величина которой определяется соотношением:

$$E = B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \quad (\text{вольт}), \quad (47)$$

B — магнитная индукция в гауссах, l — рабочая длина проводника в см, v — скорость перемещения в см/сек.

Подставляя вместо B , l и v их значения, получим

$$E = c \cdot \Phi \cdot n, \quad (XI)$$

c — постоянная генератора, Φ — магнитный поток, n — число оборотов якоря в минуту.

Напряжение при постоянном магнитном потоке пропорционально числу оборотов.

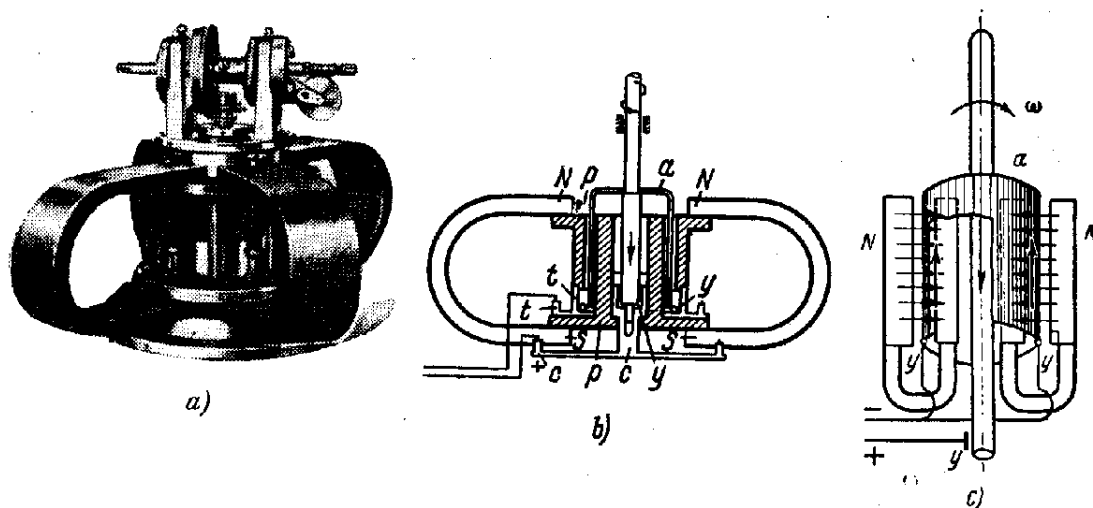
3) Описание некоторых конструкций¹

Датчик с постоянными магнитами, выполненный в виде униполярной машины (фирма „Stepper“), представлен на фиг. 41. Магнитное поле создается четырьмя постоянными магнитами $N-S$ с наконечниками P . В поле этих магнитов вра-

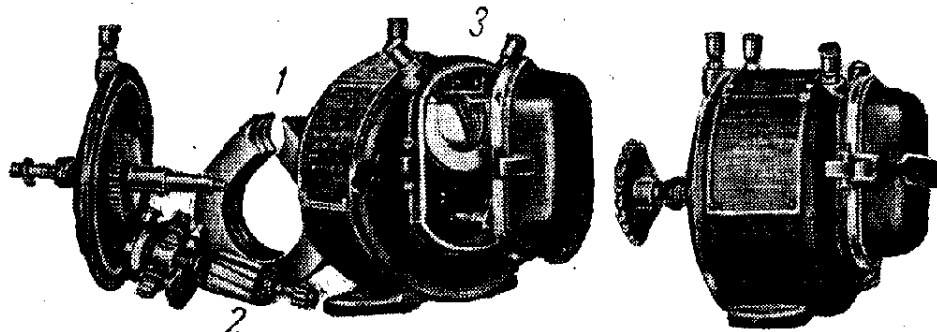
¹ См. также лит. 16, 17, 18, 26, 27, 28, 44, 45.

щается медный барабан a , в котором индуцируется э. д. с., пропорциональная скорости вращения. Снятие тока осуществляется через ртутные контакты y . Сопротивление якоря не превосходит $0.3 \text{ м}\Omega$. Напряжение на клеммах достигает 10 мВ на каждые 1000 об/мин . Максимальное число оборотов, измеряемое этими тахометрами, достигает 5000 об/мин . Недостатком этих машин является их сравнительная сложность и слишком низкое напряжение, что вызывает необходимость применения чувствительных электроизмерительных приборов.

В целях повышения напряжения в качестве датчика постоянного тока применяют обычно коллекторные машины. Наиболее распространенная конструкция датчика дана на фиг. 42 (Horn, Noris, Brown). Он состоит из постоянного магнита 1 под-



Фиг. 41. Электротахометр фирмы „Stepper“

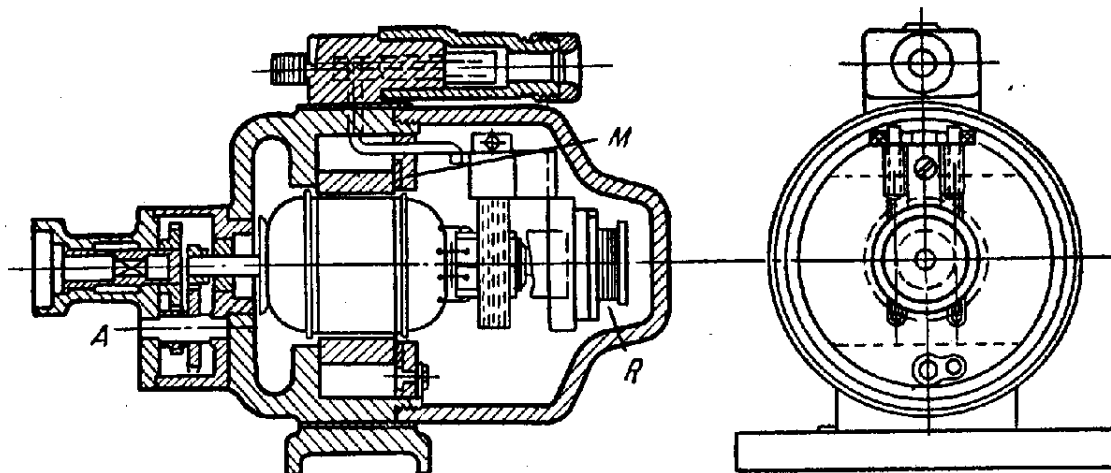


Фиг. 42. Электротахометр постоянного тока

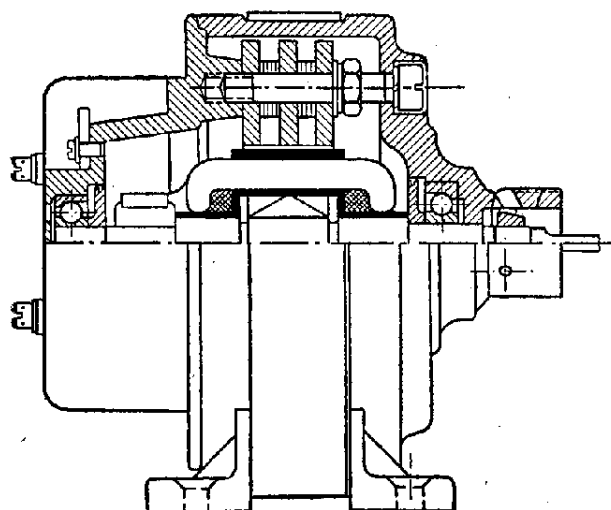
ковообразной формы, составленного из трех ламелей, выполненных из вольфрамовой стали. Магнит тщательно обрабатывается и создает мощное магнитное поле. Между полюсами магнита вращается якорь 2 , в косых пазах которого расположена обмотка. Пазы делаются косыми для того, чтобы уменьшить пульсацию снимаемого тока. Концы обмотки припаяны к ламелям коллектора. Съем тока производится угольными щеточками, обладающими малым сопротивлением. Датчик заключен в пыле- и водонепроницаемый кожух 3 . Максимальное число оборотов якоря 2500 об/мин . Наибольшее напряжение, развиваемое машиной, доходит до 150 вольт .

Приемник представляет собою вольтметр с вращающейся катушкой и достаточно мощными постоянными магнитами.

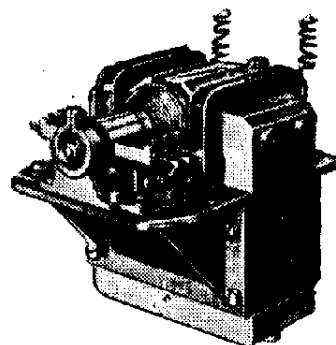
Фирмы „Рекорд“ и „Вестон“ изготовляют датчики для обслуживания одновременно двух приемников (фиг. 43). В левой части датчика расположена передача A к якорю. Справа от коллектора расположено добавочное сопротивление R , эквивалентное сопротивлению одного приемника. Это сопротивление включается параллельно с одним приемником при выключении другого. Для



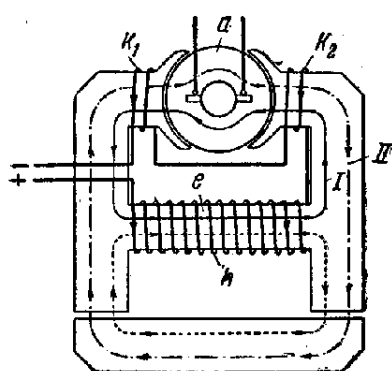
Фиг. 43. Электротахометр фирмы „Рекорд“



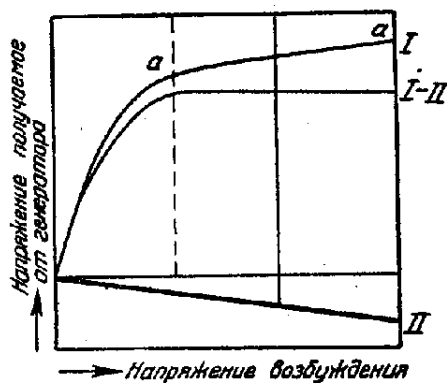
Фиг. 44. Электротахометр СЭТ



Фиг. 45а. Электротахометр А. Е. Г.



Фиг. 45б. Электротахометр А. Е. Г.



Фиг. 46. График

регулировки генератора на постоянное напряжение предусмотрен специальный магнитный шунт M .

Постоянство магнитного поля поддерживается специальными шунтами и в советском электротехнометре СЭТ, датчик которого представлен на фиг. 44. Шунты расположены снаружи внешнего щита (на чертеже не показаны). Доведение магнитного поля до расчетной величины осуществляется путем смещения шунтов. Перемещение к центру вызывает уменьшение магнитного поля, от центра — увеличение.

Тахометр постоянного тока с посторонним возбуждением в исполнении фирмы А. Е. Г. дан на фиг. 45.

В нем питание обмотки возбуждения происходит не от батарей, так как это связано с большими затруднениями, а от сети. Для компенсации колебания напряжения предусмотрено специальное устройство. Машина выполнена так.

Якорь a машины пронизывается двумя магнитными полями: насыщенным магнитным полем I (главное поле) и слабо насыщенным полем II (компенсационное поле). Главное поле образуется от соленоида h , сердечник которого e обладает малым поперечным размером, и поэтому быстро образует насыщенное магнитное поле. Компенсационное поле возникает от двух катушек K_1 и K_2 , соединенных последовательно с катушкой h . Его магнитный путь проходит через слабо намагниченное железо и встречает несколько воздушных зазоров. Компенсационное поле направлено в сторону, противоположную главному, и изменяется при изменении напряжения сети от нуля по линейному закону. Наклон этой характеристики (фиг. 46) относительно горизонтальной оси выбирается так, чтобы он был равен наклону части кривой намагничивания aa главного потока за перегибом. Суммарное поле получается в виде разности полей I и II и остается постоянным при колебаниях напряжения в пределах до 50%.¹

Коллектор динамомашины выполнен из качественной стали, мало изнашиваемой. Ток снимается тремя парами медноугольных щеточек. Максимальное напряжение, вырабатываемое машиной, 30 V.

8. Электротехнометры переменного тока¹

1) Общие замечания

Вследствие больших трудностей, возникающих при эксплуатации машин постоянного тока из-за наличия в них коллекторов и щеток, в последнее время чаще применяются тахометры с генераторами переменного тока. В этих генераторах обмотки неподвижны, и поэтому никаких трудностей с отводом тока не возникает. Для измерения эффективного напряжения, величина которого пропорциональна угловой скорости, можно применять тепловые, электромагнитные, феррадинамические и детекторные приборы (с купроксными выпрямителями, фиг. 40). Последние два типа являются наиболее чувствительными. Очень удобно в качестве измерителя при датчике переменного тока применять частотомеры, так как их показания не зависят от колебания напряжения. Датчики переменного тока выполняются с вращающимися магнитами или с неподвижными магнитами и вращающимся сердечником. Большей частью приборы работают на однофазном токе, но некоторые приборы выполняются с двухфазными датчиками и измерителями. Двухфазные системы применяются тогда, когда нужно установить направление вращения испытуемого вала, чего однофазными приборами сделать нельзя.

Недостатками тахометров переменного тока являются малая чувствительность прибора, что заставляет применять генераторы повышенной мощности, и изменения показания приемников под влиянием температуры. В приборах с выпрямителями температура сказывается, кроме того, на работе выпрямителей.

¹ См. предыдущую ссылку, стр. 37.

2) Вывод основных соотношений

Допустим, что надлежащим выбором формы полюсного наконечника индуктора и внутренней поверхности тела статора удалось создать магнитное поле, радиальная составляющая которого меняется по синусоидальному закону. Тогда амплитуда переменной электродвижущей силы, наводимой в проводнике:

$$E_{\max} = B_{\max} \cdot l \cdot v \cdot 10^{-9} \quad (\text{вольт}), \quad (48')$$

эффективное значение э. д. с. за половину периода:

$$E = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} B \cdot l \cdot \frac{\pi D}{60} \cdot 10^{-8} \cdot n \quad (\text{вольт}), \quad (48)$$

при p парах полюсов:

$$\Phi = \frac{B \cdot \pi \cdot D \cdot l}{2p} \quad (49')$$

и N проводниках:

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\Phi \cdot N \cdot p}{60} \cdot 10^{-8} \cdot n = c \cdot n \quad (\text{вольт}), \quad (\text{XII})$$

частота:

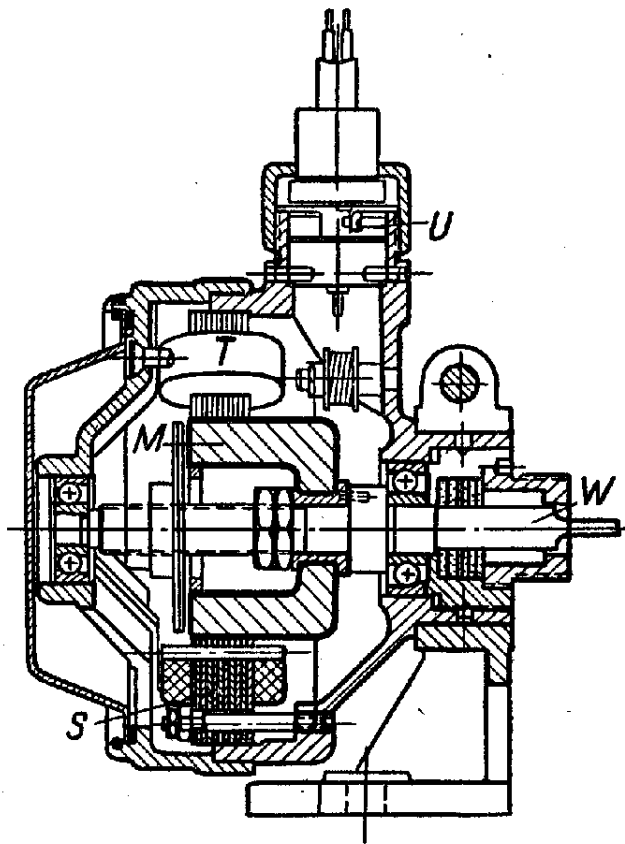
$$f = \frac{p \cdot n}{60}. \quad (\text{XIII})$$

Напряжение и частота тока пропорциональны числу оборотов.

3) Описание некоторых конструкций¹

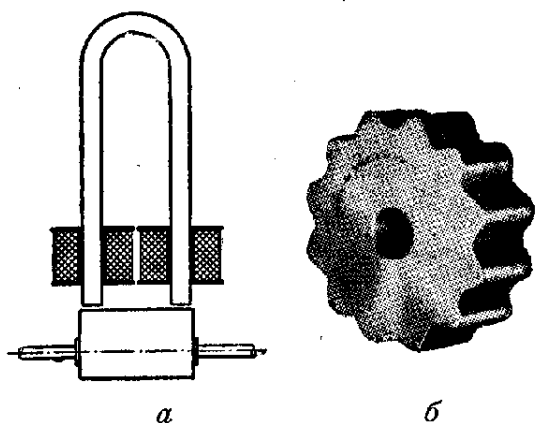
Тахометр переменного тока с вращающимися магнитами (фирмы „Morell“) представлен на фиг. 47. На валу W насажен магнит M из кобальтовой стали с 6 полюсами. На статоре укреплены обмотки T . При вращении вала с магнитами, приводимого от испытуемого объекта, создается переменное магнитное поле. Благодаря этому в обмотке наводится э. д. с., пропорциональная угловой скорости вала. При 1000 об/мин. напряжение составляет 30V.

Наиболее просты по конструкции тахометры, у которых и магниты и обмотка неподвижны. Схема такого тахометра представлена на фиг. 48а. На неподвижно расположенном магните намотана обмотка. Под полюсами магнита расположен вращающийся вал, приводимый в движение от испытуемого объекта. На этом валу укреплен эксцентрично круглый сердечник из мягкого железа. При вращении вала с сердечником магнитный поток изменяется благодаря изменению воздушного зазора, и в обмотке индуцируется ток, переменный по величине. Одному обороту вала будет соответствовать полный

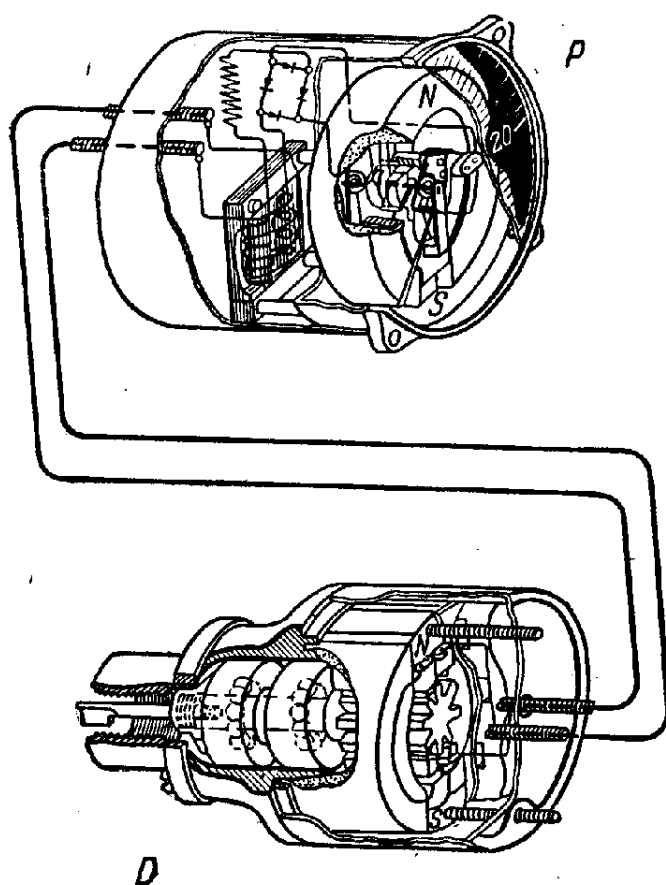


Фиг. 47. Электротахометр фирмы „Morell“

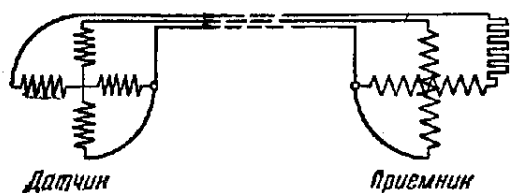
¹ См. также лит. 17, 18, 32, 44.



Фиг. 48. Тахометр переменного тока



Фиг. 49. Схема тахометра "Дженерал-Электрик"



Фиг. 50. Схема тахометра двухфазного тока

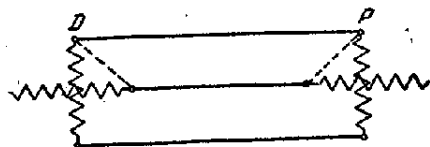
тока. Подобная конструкция период изменения величины применяется большей частью для измерения больших скоростей. При малых и средних скоростях применяются кулачковые шайбы (фиг. 48б). В качестве измерительного прибора к этим датчикам лучше всего применять самопишущие частотомеры или для визуальных отсчетов — тепловые и детекторные приборы.

На фиг. 49 представлен тахометр фирмы „Дженерал-Электрик“. Он состоит из датчика *D* и магнито-электрического приемника *P*, в одном корпусе с которым смонтирован купроксный выпрямитель и трансформатор. Датчик представляет собой генератор переменного тока с восьмиполюсным якорем из мягкого железа. Якорь вращается между полюсами постоянного магнита с обмотками на полюсных наконечниках и приводится в движение от испытуемого вала. При вращении в обмотках магнита индуцируется переменный ток, поступающий в первичную обмотку трансформатора приемника. Трансформатор рассчитан так, что насыщение его сердечника наступает при напряжении генератора, соответствующем ста оборотам в минуту. После того как сердечник трансформатора насыщен, во вторичной обмотке его образуется ток, напряжение которого зависит только от частоты тока в первичной обмотке. Благодаря этому колебания напряжения датчика, происходящие от изменения магнитной индукции, не оказывают влияния на показания приемника. Из вторичной обмотки трансформатора ток поступает в купроксный выпрямитель и из него в приемник.

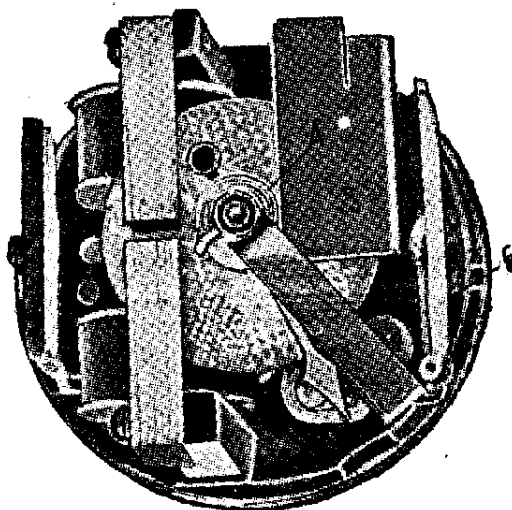
Схема тахометра на двухфазном переменном токе (фирмы Сименс и Гальске) представлена на фиг. 50. Он состоит из двух-

фазного датчика и двухфазного ферродинамического приемника. Одна фаза датчика прикреплена к неподвижной обмотке измерительного прибора, содержащей активное и индуктивное сопротивление, причем в этой обмотке активное сопротивление мало сравнительно с индуктивным. Вследствие этого вектор

тока отстает от вектора напряжения почти на 90° . Подвижная система измерительного прибора приключена ко второй фазе и содержит добавочное активное сопротивление, которое достаточно велико, и поэтому ток в этой фазе совпадает с напряжением. Вокруг обмоток создаются магнитные поля, силы взаимодействия которых зависят от напряжения в фазах. Подвижная обмотка поворачивается на угол, зависящий от углов скорости вала датчика.



Фиг. 51. Электрическая схема тахометра „Pioneer“



Фиг. 52. Приемник тахометра „Pioneer“

Электрическая схема двухфазного авиатахометра фирмы „Pioneer“ изображена на фиг. 51. Его датчик — генератор — имеет неподвижный, собранный из листов высокосортной кремнистой стали статор с двухфазной обмоткой и ротор, выполненный в виде двухполюсного (Т-образного) магнита. Для увеличения скорости вращения ротора с ним вместе смонтирован мультипликатор числа оборотов ведущего вала (скорость вращения увеличивается в 9 раз). Указатель тахометра состоит из двухфазной индукционной системы и подвижного диска с пониженным электрическим температурным коэффициентом сопротивления (фиг. 52).

Неподвижные обмотки 1, 1 возбуждают в своих сердечниках переменные магнитные поля, сдвинутые по фазе на 90° (так как каждая обмотка присоединена к отдельной фазе датчика), пронизывающие диск 2. В нем наводятся вихревые токи, отстающие по фазе на 90° от вызвавших их магнитных потоков, т. е. ток, индуцированный одним из сердечников, совпадает по фазе с магнитным потоком второго сердечника. Благодаря этому диск находится под действием момента, направленного всегда в одну и ту же сторону. Противодействующий момент создается спиральной пружиной 4. Постоянный магнит 3 служит для демпфирования колебаний диска вместе с укрепленной на нем стрелкой. Температурная компенсация достигается введением в ротор генератора парамагнитного никель-алюминиевого материала. Диск измерителя изготовлен из специального сплава. Кроме того, в измеритель вмонтирована компенсационная катушка из двух плоских обмоток 5, 5.

9. Электротахометры импульсного тока

1) Общие замечания

В электротахометрах импульсного тока испытуемый вал соединен с датчиком, при вращении которого в цепь измерителя посылаются одинаковые по величине импульсы тока. Частота импульсов зависит от угловой скорости вала. Импульсный ток создается посредством конденсатора, который либо вращается вместе с испытуемым объектом, либо остается неподвижным, но снабжается вращающимся коммутатором.

Электротахометры этого типа появились в самое последнее время и не получили еще широкого промышленного применения. Метод, положенный в их основу, обладает рядом преимуществ:

- 1) отпадает необходимость в применении динамомашин,
- 2) в качестве измерителя могут быть использованы приборы магнито-электрической системы, достоинства которых общеизвестны.

К недостаткам этих приборов следует отнести зависимость показания от колебания напряжения в сети и от температурного изменения емкости конденсатора. В качестве измерителя может применяться чувствительный прибор с малым внутренним сопротивлением.

2) Вывод основных соотношений¹

Выведем зависимость между угловой скоростью испытуемого объекта и силой тока в приборе с неподвижным конденсатором. Конденсатор в течение первого полупериода заряжается от источника тока, в течение второго полупериода разряжается на приемник. Количество электричества q , накопившееся в конденсаторе спустя t секунд после его включения под напряжением u , определяется формулой:

$$q = c \cdot u \cdot (1 - e)^{-\frac{t}{\tau_1}}, \quad (50)$$

где c — емкость конденсатора, τ_1 — постоянная времени цепи, в которую включен конденсатор,

$$\tau_1 = R_1 \cdot c, \quad (50')$$

R_1 — активное сопротивление контура.

Процесс разряда конденсатора на активное сопротивление R_2 происходит по закону:

$$q = Q_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (51)$$

Q_1 — заряд конденсатора в момент включения в цепь приемника, τ_2 — постоянная времени нового контура.

$$\tau_2 = R_2 \cdot c. \quad (51')$$

Теоретически процесс длится бесконечно большое время, но практически с точностью до 0.25% его можно считать установившимся, если время заряда или разряда

$$T \geq 6\tau_1, \quad T \geq 6\tau_2. \quad (52)$$

Для соблюдения этого условия сопротивления контуров должны быть подобраны так, чтобы

$$R \leq \frac{T}{6c}. \quad (53')$$

Время заряда или разряда зависит от числа оборотов датчика и от числа ламелей на нем:

$$T = \frac{60}{n \cdot z}, \quad (54)$$

z — число ламелей коммутатора.

Следовательно, сопротивление контура должно удовлетворять условию:

$$R \leq \frac{10}{c \cdot n \cdot z}. \quad (53)$$

При этом условии можно считать, что конденсатор получает от каждой ламели количество электричества

$$q = c \cdot u. \quad (55)$$

Откуда среднее значение тока

$$J = \frac{z \cdot n}{2 \cdot 60} \cdot c \cdot u = k \cdot n. \quad (XIV)$$

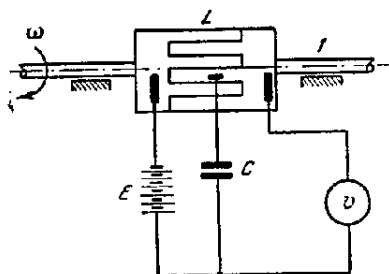
В формулу (XIV) введена величина $\frac{z}{2}$, так как в процессе заряда или разряда участвует половина общего числа ламелей.

¹ См. также лит. 30.

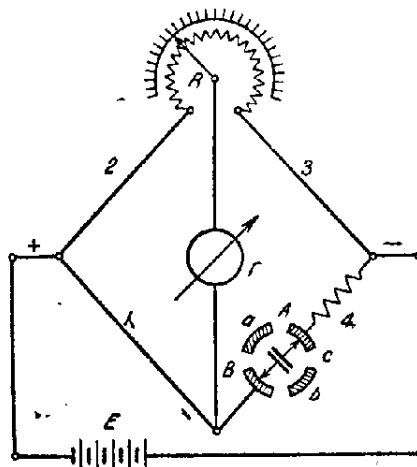
Ток в приемнике при постоянном напряжении пропорционален числу оборотов испытуемого вала. Магнито-электрический прибор может быть проградуирован на число оборотов.

3) Описание отдельных приборов¹

На фиг. 53 дана принципиальная схема импульсного электротакметра с неподвижным конденсатором (прибор Гофмана). Коммутатор I состоит из двух изолированных друг от друга металлических цилиндров с ламелями L . Коммутатор вращается от испытуемого вала и включен в цепь источника энергии E , магнито-электрического приемника V и конденсатора C . При вращении коммутатора средняя щетка соединяет конденсатор поочередно то с батареей (щетка соединена с левым барабаном), от которой он получает заряд, то с приемником (щетка соединена с правым барабаном), куда он посылает заряд в виде импульса тока. Отклонение стрелки прибора пропорционально числу импульсов в единицы времени или числу оборотов испытуемого вала. Схема прибора с вращающимся конденсатором (Неаполитанская инженерная школа) представлена на фиг. 54. Прибор выполнен в виде мостика Уитстона, в одно из плеч которого включен вращающийся



Фиг. 53. Схема импульсного тахометра



Фиг. 54. Электротакметр импульсного тока

конденсатор C , приводимый во вращение от испытуемого вала. При вращении конденсатор попеременно замыкает то контакты A и B плеча 4, то a и b неподвижного коллектора.

В первом случае через плечо 4 проходит ток от батареи E , и конденсатор заряжается, во втором — через плечо 4 ток не идет, а конденсатор разряжается. Таким образом, в плече 4 вызывается прерывистое протекание тока, а конденсатор C действует как переменное сопротивление, кажущаяся величина которого пропорциональна числу импульсов в единицу времени или, что то же самое, числу оборотов испытуемого вала. В зависимости от величины кажущегося сопротивления мостик Уитстона будет уравниваться при различном значении добавочного сопротивления R . Положение рукоятки реостата (при отсутствии тока в гальванометре G) соответствует угловой скорости вала. Прибор может применяться с успехом только для замера угловой скорости при установившемся режиме.

¹ См. также лит. 39.

III. ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

В этих приборах осуществлена оптическая связь между испытуемым объектом и указывающим органом. Измерение оптическим методом может быть основано:

- 1) на свойствах человеческого глаза (стробоскопический способ),
- 2) на свойствах фотоэлементов (фотоэлектрический способ).

В первом случае световые явления, сопровождающие работу прибора, воспринимаются непосредственно глазом наблюдателя, во втором — световые явления воспринимаются фотоэлементом, преобразующим энергию света в работу электрических сил. Последние воздействуют на указатель.

Приборы, основанные на оптическом методе, не отнимают мощности от испытуемого объекта, так как они не вводятся в непосредственное соприкосновение с ним. Это представляет большие удобства в тех случаях, когда мощность испытуемого вала очень мала или когда приключение тахометра почему-либо невозможно.

10. Стробоскопические приборы

1) Общие замечания

Стробоскопический метод основан на свойстве глаза удерживать некоторое время зрительное впечатление от предмета, уже скрывшегося из поля зрения (инерция глаза). Существуют два типа стробоскопических приборов. В одних (стробоскопы с механическим затвором) наблюдение за испытуемым объектом ведется через отверстие в неподвижном экране; за экраном помещен диск, имеющий одно или несколько отверстий. Наблюдаемый предмет виден лишь в те мгновения, когда неподвижное отверстие совпадает с отверстием диска. При синхронности вращения диска с испытуемым валом последний будет казаться неподвижным. В других (стробоскопы со световой вспышкой) испытуемый объект освещается периодически источником света, лишенным инерции. При частоте вспышек, синхронном числу оборотов, испытуемый вал будет казаться неподвижным. В качестве источников света большей частью применяются неоновые лампы, так как они почти безынерционны. Частота вспышек регулируется посредством колеблющегося камертона или вращением мотора.

Главными требованиями, предъявляемыми к стробоскопу любого типа, является резкость очертания „остановленного“ объекта и хорошая видимость.

Резкость очертания определяется скоростью движущегося объекта и продолжительностью времени, в течение которого этот объект виден за каждый период. Хорошая видимость определяется количеством света, получаемым глазом от наблюдаемого объекта.

В стробоскопах с механическим затвором нужно для получения большей резкости делать отверстие в диске по возможности уже. Однако в очень узкую щель пройдет мало света, и видимость объекта ухудшится. Поэтому стробоскопы этого типа обладают сравнительно ограниченным диапазоном действия.

В стробоскопах со световой вспышкой большая резкость очертания достигается уменьшением промежутка времени вспышки, который в современных приборах исчисляется микросекундами, а хорошая видимость достигается применением мощных неоновых трубок.

Стробоскопический метод обладает большой простотой, сравнительно большой точностью и пригоден для измерения скоростей в широком диапазоне.

Недостатком стробоскопических приборов является необходимость в постоянном присутствии наблюдателя (невозможность автоматической регистрации показаний прибора посредством какого-либо указывающего органа).

2) Вывод основных соотношений

Зависимость между периодом T работы стробоскопического прибора и угловой скоростью испытуемого объекта, при которой последний будет казаться неподвижным, очень проста:

$$T = k \cdot \frac{60}{n} \text{ (сек.)}, \quad (\text{XV})$$

n — число оборотов испытуемого вала, k — целое число (впечатление неподвижности получается не только при синхронизме, но и при кратности).

Для стробоскопа с вращающимся диском с числом отверстий в нем, равным z :

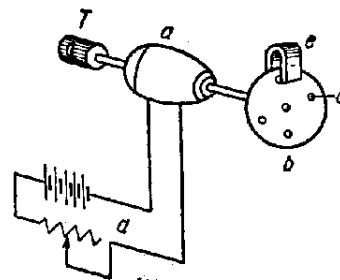
$$n_{\text{диска}} = \frac{k}{z} \cdot n = c \cdot n. \quad (\text{XVI})$$

Число k должно быть известно, или, иначе говоря, надо знать ориентировочное число оборотов испытуемого вала.

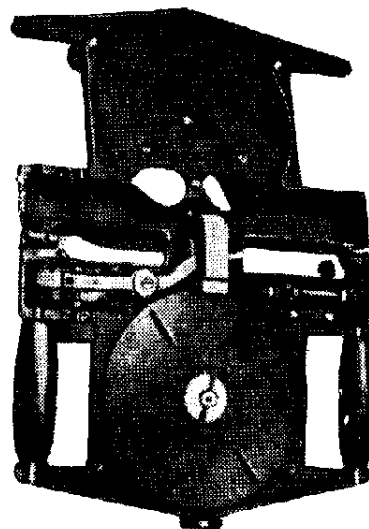
3) Описание некоторых конструкций¹

На фиг. 55 представлена схема ручного стробоскопа фирмы Цейсса, а на фиг. 56 — его внешний вид. Небольшой моторчик a , работающий на постоянном токе напряжением 12 и 24 вольта, снабжен диском b с отверстиями c . Регулировка числа оборотов производится реостатом d специальной конструкции. Точная подгонка осуществляется посредством тормоза, основанного на токах Фуко. Тормоз состоит из магнита e , в магнитном поле которого вращается диск b . Перемещением магнита по отношению диска создают различные по величине тормозящие моменты и добиваются доводки скорости вращения диска до необходимой величины. Число оборотов диска фиксируется магнитным тахометром T , вмонтированным в стробоскоп. Добившись синхронности вращения и зная число прорезей в диске, вычисляют угловую скорость испытуемого вала. Посредством этого прибора можно измерять числа оборотов до 120 000 в минуту.

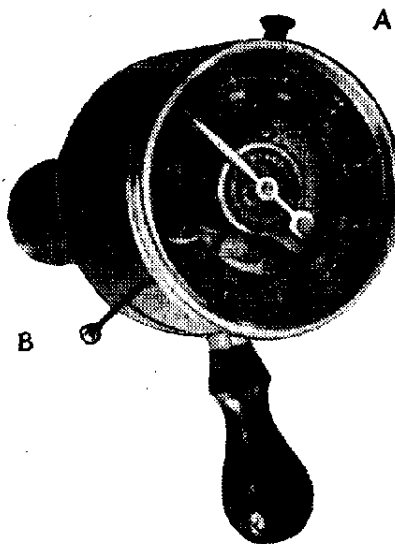
В стробоскопе фирмы „Ashodown“ вал приводится в движение от часового механизма. На валу сидит цилиндр с окнами, прорезанными вдоль его образующей. Размеры окон — 10 мм ширины и 30 мм длины. Число оборотов вала регулируется регулятором и зубчатым редуктором в пределах от 400 до 16 000 в минуту.



Фиг. 55. Схема стробоскопа Цейсса

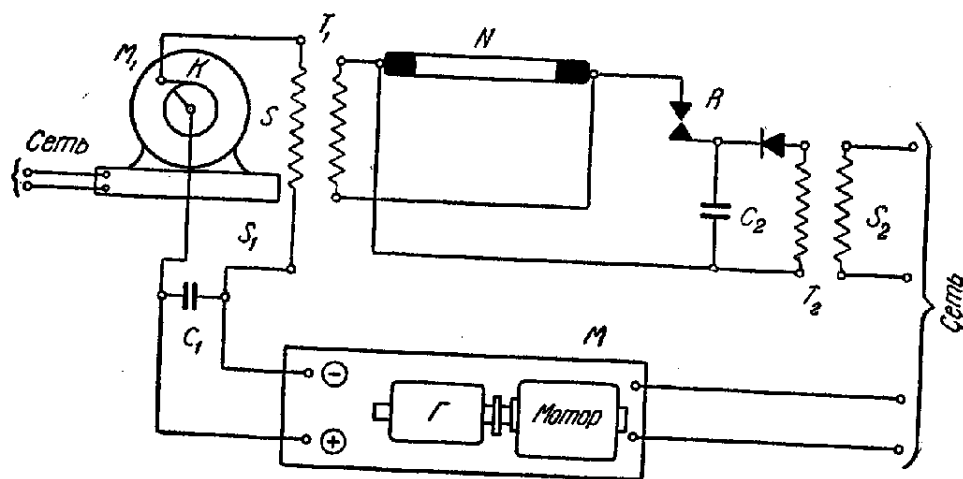


Фиг. 56. Общий вид стробоскопа Цейсса

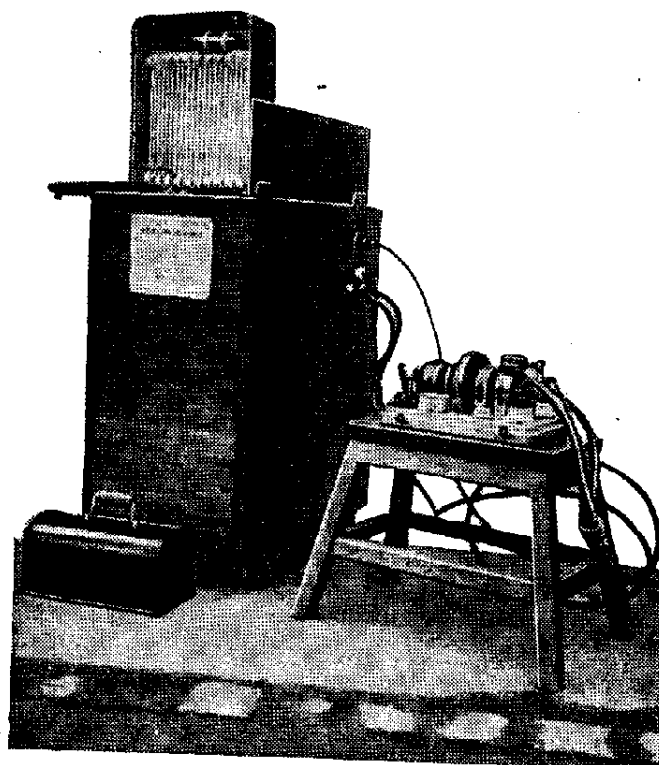


Фиг. 57. Стробомерта

¹ См. также лит. 10, 12, 17, 37, 38, 45, 47.



Фиг. 58. Электрическая схема строборамы



Фиг. 59. Общий вид строборамы

По этому же принципу построена строборета фирмы „Recherches Mecaniques Physiques“ (фиг. 57). Диск с прорезью насажен на вал, приводимый от часового механизма. Пуск механизма осуществляется посредством рукоятки В, регулировка — посредством маховичка А. Число оборотов изменяется от 300 до 12 500 в минуту.

Упрощенная электрическая схема строборамы фирмы „Recherches Mecaniques Physiques“ представлена на фиг. 58. Она состоит из двух самостоятельных цепей: цепи синхронизатора S_1 и осветительной цепи S_2 . Синхронизатор S выполнен в виде мотора M_1 с регулируемым числом оборотов и контактора K . В цепь синхронизатора включен генератор Γ , конденсатор C_1 , трансформатор T_1 и неоновая лампа N . Генератор Γ заряжает конденсатор C_1 , обладающий малой емкостью. При замыкании контакта K конденсатор разряжается в первичную обмотку трансформатора T_1 . В виду малого промежутка времени замыкания контакта, во вторичной обмотке возбуждается импульс тока с амплитудным напряжением в несколько сот вольт. Ко вторичной обмотке трансформатора подключена неоновая лампа. Однако напряжение в обмотке недостаточно для зажи-

гания лампы. Добавочное напряжение сообщается от дополнительного источника тока (обычно от сети) с частотой тока, равной числу оборотов контактора.

Это достигается так. В осветительную цепь включен разрядник R . При возникновении тока во вторичной обмотке трансформатора T_1 воздушный зазор между концами разрядника пробивается, и конденсатор C_2 осветительной цепи разряжается на неоновую лампу.

Неоновая лампа, зажигаясь, освещает испытуемый объект. Регулируя числа оборотов мотора, добиваются совпадения частоты вспышек с числом оборотов вала. Последний будет при этом казаться неподвижным. По числу оборотов мотора судят о числе оборотов испытуемого объекта.

Описанное устройство позволяет регулировать яркость освещения испытуемого объекта подбором емкости конденсатора C_2 . Общий вид строборама представлен на фиг. 59.

По такому же принципу выполнен советский стробоскоп типа СП-1, 5-1 образца 1937 г. завода „Буревестник“. В качестве синхронизатора в нем применен мотор с лобовой фрикционной передачей (с переменным передаточным числом). Питание цепи синхронизатора осуществляется от сети переменного тока напряжением в 120 В через трансформатор и кенотрон. Конденсатор цепи синхронизатора разряжается в первичную обмотку катушки Румкорфа. Вторичная обмотка подключена к неоновой трубке. Питание осветительной цепи осуществляется от сети через трансформатор и газотрон. Изменением передаточного числа фрикционной передачи добиваются совпадения частоты вспышек с числом оборотов испытуемого объекта. Частота вспышек, соответствующая различным значениям передаточного числа фрикционной передачи, нанесена на шкале синхронизатора.

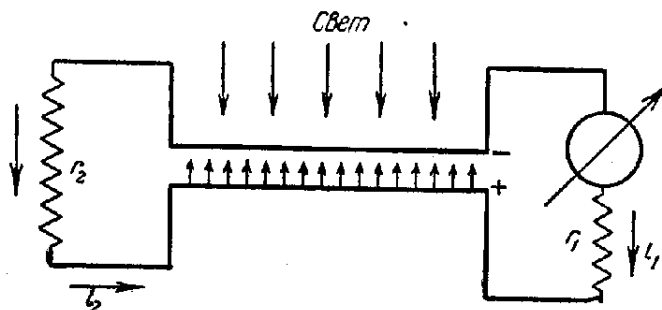
11. Фотоэлектрические приборы

1) Общие замечания

Применение фотоэлектрических приборов для измерения скоростей не получило еще широкого распространения и практиковалось только в отдельных лабораторных исследованиях. Это объясняется сложностью аппаратуры и капризным поведением фотоэлементов. На работе фотоэлементов существенно сказывается влияние температуры, влажности и т. д. Их показания с течением времени изменяются. Фотоэлектрический способ может быть наиболее пригоден для измерения скоростей при переходных неустановившихся режимах. В практике применяются большей частью селеновые фотоэлектрические элементы, так как они более чувствительны и более удобны в обращении. Однако их показания изменяются с течением времени, и они обладают инерционностью при переменном режиме освещения. Поэтому для более точных и продолжительных работ применяют элементы со щелочными металлами. Для усиления фотоэлектрических токов применяют усилители с электронными лампами.

2) Вывод основных соотношений (фиг. 60)

На схеме включения селенового элемента через r_1 обозначено сопротивление внешней цепи, через r_2 — сопротивление утечки. Общий ток элемента i разветвляется на i_1 — ток во внешней цепи и i_2 — ток утечки:



Фиг. 60. Схема фотоэлектрического приемника

$$i = i_1 + i_2, \quad (56)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}. \quad (57)$$

Линейная зависимость между фототоком и освещенностью наблюдается только при коротком замыкании внешней цепи.

$$i = i_0 L, \quad (58)$$

i_0 — фототок короткого замыкания при освещенности в один люмен, L — освещенность.

Из (56), (57) и (58) получим

$$i_1 = \frac{i_0 \cdot L}{1 + \frac{r_1}{r_2}}. \quad (59)$$

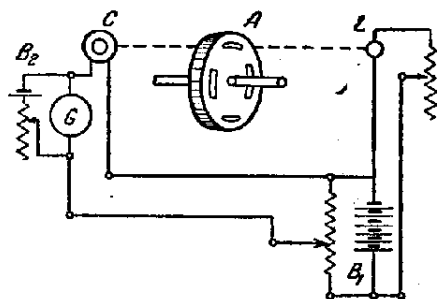
Сопротивление r_2 зависит от освещенности. Поэтому зависимость тока от освещенности выражается кривой

$$i_1 = f(L). \quad (60)$$

Если освещение фотоэлемента происходит через отверстие в теле, вращающемся с постоянной угловой скоростью ω , то освещенность фотоэлемента будет переменной и обратно пропорциональной угловой скорости

$$L = \frac{k}{\omega}, \quad (61)$$

где k — постоянная величина, зависящая от силы света лампы, конструкции окон и т. д. Соотношение между током и угловой скоростью



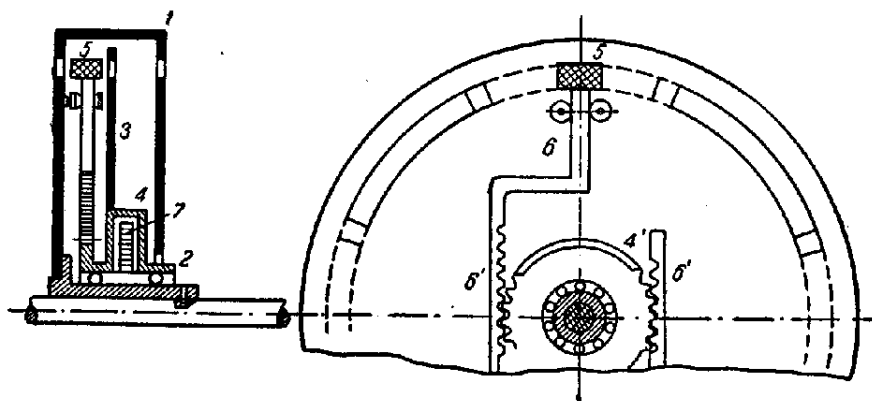
$$i_1 = f_1(\omega) \quad (\text{XVII})$$

выражается кривой, характер которой зависит от освещенности элементов, от конструкции отверстия и т. д. Шкала прибора неравномерна.

3) Описание некоторых приборов¹

Фиг. 61. Схема фотоэлектрического прибора

На фиг. 61 представлена схема фотоэлектрического прибора, построенного в Неаполитанской инженерной школе. Он состоит из обтюратора² А, помещенного на испытуемом валу, лампочки L с соответствующим конденсатором, питаемой аккумуляторной батареей B₁, фотоэлектрического



Фиг. 62. Обтюратор

элемента С и чувствительного гальванометра G. Вся эта аппаратура защищена экраном, так что на элемент не падает другого света, кроме света лампочки.

Конструкция обтюратора представлена на фиг. 62. Он состоит из коробки 1, связанной с муфтой 2, вращающейся вместе с испытуемым валом, диска 3,

¹ См. также лит. 39, 40, 41.

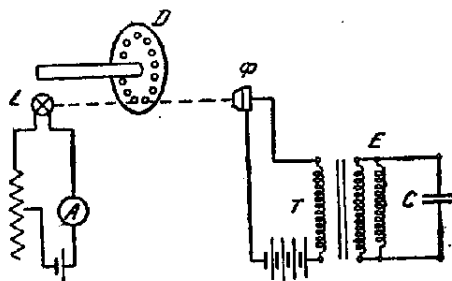
² Прерыватель.

соединенного со втулкой 4, двух грузов 5, сидящих на звеньях 6, 6' и пружины 7. На втулке 4 сидит зубчатое колесо 4', входящее в зацепление с рейками 6', 6, нарезанными на звеньях 6', 6. Звенья 6', 6 удерживаются направляющими роликами. Диск 3 и коробка 1 снабжены отверстиями, которые в покое системы перекрывают друг друга и свет не имеет доступа к фотоэлементу.

При вращении испытуемого вала грузы 5 под действием центробежных сил расходятся и посредством зубчатых реек и колеса заставляют диск поворачиваться и открывают таким образом сквозное отверстие. Величина отверстия будет зависеть от угловой скорости вала. Через отверстия световой поток попадает на фотоэлемент и возбуждает ток. Ток усиливается усилителем и подводится к гальванометру. Отклонение стрелки гальванометра соответствует угловой скорости испытуемого вала.

В другом приборе (фиг. 63) посредством фотоэлектрического элемента создается колебательный контур, частота колебания в котором пропорциональна угловой скорости вала. Прибор состоит из диска D с отверстиями, сидящего на испытуемом валу, лампы L , фотоэлемента Φ , включенного в цепь батареи и первичной обмотки трансформатора, и системы измерителя E . При вращении вала через отверстия диска на фотоэлемент падают лучи света, вызывая в нем прерывистый ток. Этот ток подается в первичную обмотку трансформатора T .

С этой обмоткой связан колебательный контур, состоящий из вторичной обмотки трансформатора, конденсатора C и измерителя E . Соответствующим подбором индуктивности и емкости этого контура можно добиться резонансных колебаний обоих контуров. Напряжение, снимаемое с конденсатора и зависящее от числа колебаний, поступает в измеритель, которым служит электронный осциллограф. Диаграмма напряжения снимается осциллографом на фотоленту, а по ней подсчитывается угловая скорость вала. Для поддержания постоянной освещенности в лампе с ней последовательно включается реостат и амперметр.



Фиг. 63. Схема фотоэлектрического прибора

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишелов. Конспект лекций по тахометрии, сейсмографии и хронометрии.
2. Щипанов. Теория, расчет и проектирование авиаприборов.
3. Ноздровский. Общая теория и методика расчета измерительных приборов.
4. Грамберг. Технические измерения и испытание машин.
5. Pflüg Fr. Geschwindigkeitsmesser für Motorfahrzeuge und Lokomotiven.
6. Neup. Die Geschwindigkeitsmesser mit Reibungsgetriebe.
7. Горн. Современные тахометры. Maschinenbau, XII, № 4, стр. 98, 1933.
8. Измерение числа оборотов. Technische Rundschau, № 8, 1937.
9. Тахометр „Амбит“, Machinery Market, № 1913, 1937.
10. Горн. Тахометры. V. D. I., т. 81, № 48, 1937.
11. Альбом тахометров, составленный лабораторией прикладной механики Военно-воздушной академии.
12. Добровольский В. В. Руководство к лабораторным занятиям по теории механизмов и машин.
13. Пчельников. Приборы управления артогнем.
14. Молчанов. Аэронавигационные приборы.
15. Приборы и аппаратура для летных испытаний самолетов. ЦАГИ. 1940.
16. Заводские описания тахометров АТ-1, АТ-2, промышленного типа, ДТ-1, СЭТ-1400, ТЭ-21 и др.
17. Кейнат. Электроизмерительная техника.
18. Электротахометры. Archiv f. Technisches Messen, № 45, 1935.
19. Ручные тахометры. Werkstatt und Betrieb, т. 70, № 42, 1937.
20. Ручной точный тахометр. Там же, № 1—2, 1937.
21. Новый электрический тахометр „Пионер“ U. S. Air-Servies, т. 19, № 8, 1936.
22. Ручной тахометр вихревого типа Werkstatttechnik, № 11, 1938.
23. Тахометры. Power Plant Eng., т. 39, № 1, 1935.
24. Тахометр Коллсмана, Aviation, XIII, т. 36, стр. 46, 1937.
25. Тахометр Люнкена, Automotive Ind., X, т. 27, 1937.
26. Электротахометр фирмы Форстер. „Точная индустрия“, № 8, 1934.
27. Новые электрические тахометры. Там же, № 3, 1935.
28. Электротахометр. Там же, № 2, 1936.
29. Пятин. Электрифицированные дистанционные часовые тахометры фирмы „Jaeger“ и „Stover-Lang“. Там же, № 5, 1936.
30. Пятин. Электрические дистанционные тахометры, основанные на импульсном методе. Там же, № 9—10, 1938.
31. Тахометр Bryce. Engineering, т. 144, стр. 311, 312, 1937.
32. Тахометры Дженерал-Электрик. Automotive Industrie, т. 72, 73, 1935; General Electr. Review, т. 35, 1932, т. 38, 1935; Aero-Digest, т. 25, 1935.
33. Тахометры для станков, Eng. Progress, т. XVII, № 4, 1936.
34. Тахометр по вихревому принципу. Die Messtechnik, № 7, 1934.
35. Тахометр „Askania“. L'Aeronautique, № 146, 1931.
36. Электротахометр. Instruments, т. 8, № 8, 1935.
37. Стробоскопический тахометр. Engineering, т. 138, № 3581, 1934.
38. Thevenon. Considerations diverses sur la Mesure Industrielles en Mecanique et en Electricité.
39. Восс. Тахометр с фотоэлементами. Rivista Aeronautica т. 8, № 1, 1932.
40. Graff. Einrichtung zur Messung von Umdrehungszahl mittels leichtelektrischer Zelle. Elektrotechnischer Anzeiger, т. 50, № 50, 1933.
41. Измерение мгновенных скоростей. V. D. I., № 13, 1939.
42. Электрический тахометр. „Новости техники“, № 23—24, 1939.
43. Handbuch der Physik.
44. Рубин. Электрические авиационные приборы.
45. КATALOGI фирм Horn, Noris, Hassler, Schäffer und Budenberg, Brawn, Deuta-Werke, Jaquet, Jaeger, Veeder-Root, Peerboom und Schürman, Zeiss, Recherches, Mecaniques et Physiques, Karlik, Askania, Pioneer.
46. Лойцянский А. Г., проф., и А. И. Лурье, проф. Курс теоретической механики.
47. Герасимов. Тахометрия и динамометрия.
48. Пятин. Магнитные тахометры. „Точная индустрия“, № 4, 1940.
49. „Техническая энциклопедия“, т. 22, статья „Тахометры“.

Подписано в печать 14/XI 1940 г. Печатных листов 3 $\frac{1}{4}$, Учетно-издат. листов 4.13. В печ. листе 49600 тип. зн.
А31299. Тираж 1500 экз. Цена книги 3 руб.

1-я Образцовая типография Огиза РСФСР треста „Полиграфкнига“. Москва, Валовая, 28. Заказ № 3504.

ОПЕЧАТКИ

<i>Стр.</i>	<i>Строка</i>	<i>Напечатано</i>	<i>Следует</i>
42	1 св.	тока	период тока
50	8 св.	Сопротивление r_3	Сопротивление внутреннее
Методы и приборы измерения угловых скоростей			

Гор. Оп

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Н. Е. КОБРИНСКИЙ

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ
ИЗМЕРЕНИЯ
УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СОЮЗА ССР
МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД