

# Лекция № 4

## Тема 2.1. Приборы и системы контроля работы авиадвигателей

### Авиационные тахометры

2.7. Авиационные магнитоиндукционные тахометры типа ИТЭ-1 и ИТЭ-2

2.8. Погрешности магнитоиндукционных тахометров и способы их компенсации

2.9. Датчики частоты вращения вала авиадвигателя

# Авиационные тахометры

**Тахометры** - приборы измеряющие частоту вращения (от греч. *tachos* - быстрота скорость).

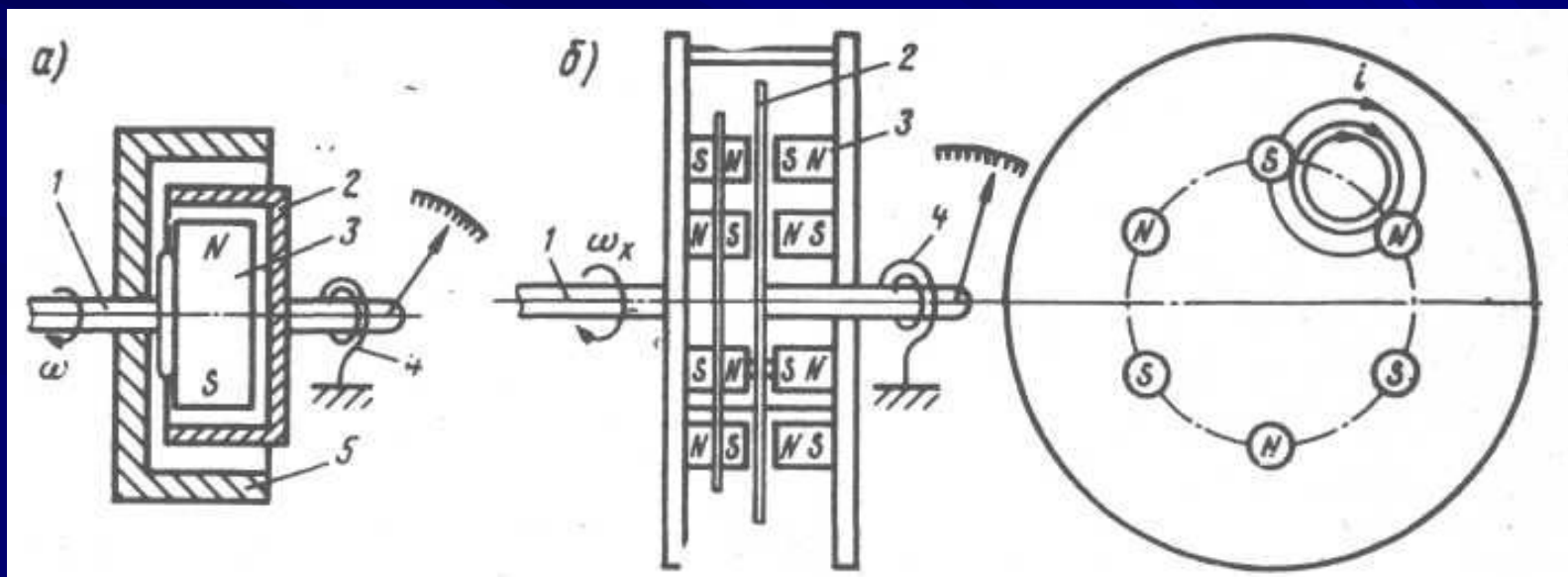
Авиационные тахометры служат для измерения частоты вращения вала поршневого авиадвигателя, ротора компрессора турбореактивного двигателя, турбины газотурбинного двигателя и т.д.

По принципу действия ЧЭ тахометры подразделяются на :

- **центробежные**, в которых используется зависимость центробежных сил инерции неуравновешенных масс от частоты вращения вала. В них центробежные силы инерции уравниваются силой упругой деформации пружины;
- **генераторные**, основанные на зависимости величины генерируемой в обмотке ЭДС от частоты вращения индуктора, связанного с валом. К этой группе относятся тахогенераторы постоянного и переменного токов;
- **магнитоиндукционные**, основанные на зависимости момента увлечения электропроводящего диска (цилиндра) полем постоянного магнита, вращаемого с измеряемой угловой скоростью;
- **частотно-импульсные**, в которых используется зависимость частоты ЭДС синхронного генератора, связанного с валом, от частоты его вращения.

## 2.7. Авиационные магнитоиндукционные тахометры<sup>19</sup> типа ИТЭ-1 и ИТЭ-2

**Принцип действия магнитоиндукционных тахометров** основан на явлении наведения вихревых токов в ЧЭ (металлическом теле) полем вращающегося постоянного магнита.



**Рис 4.1.** Магнитоиндукционные тахометры:  
а - с полым цилиндром; б - с диском;  
1 - ось измеряемого вращения; 2 – чувствительный элемент;  
3 - магнит; 4 - пружина; 5 - экран; 6 - термомагнитный шунт

## 2.7. Авиационные магнитоиндукционные тахометры типа ИТЭ-1 и ИТЭ-2

Вихревые токи возникающие в ЧЭ, создают магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита и создает вращающий момент  $M_{вр}$ , увлекающий цилиндр вслед за вращающимся магнитом.

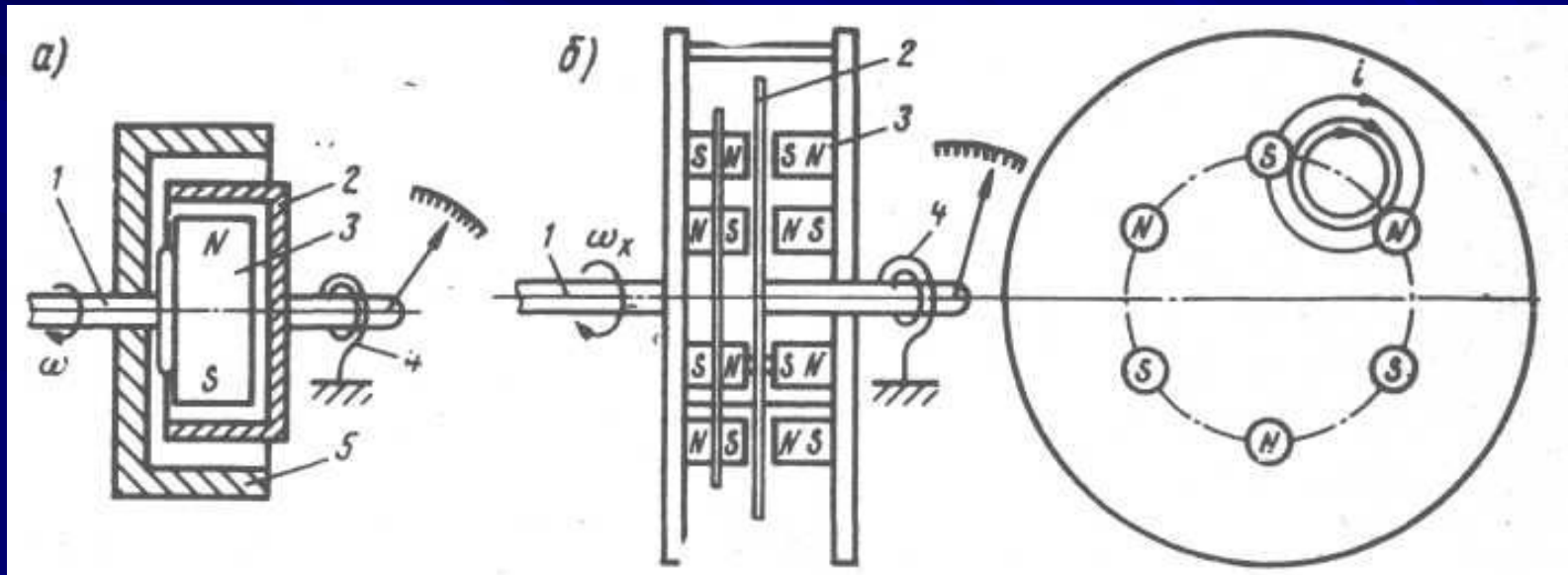
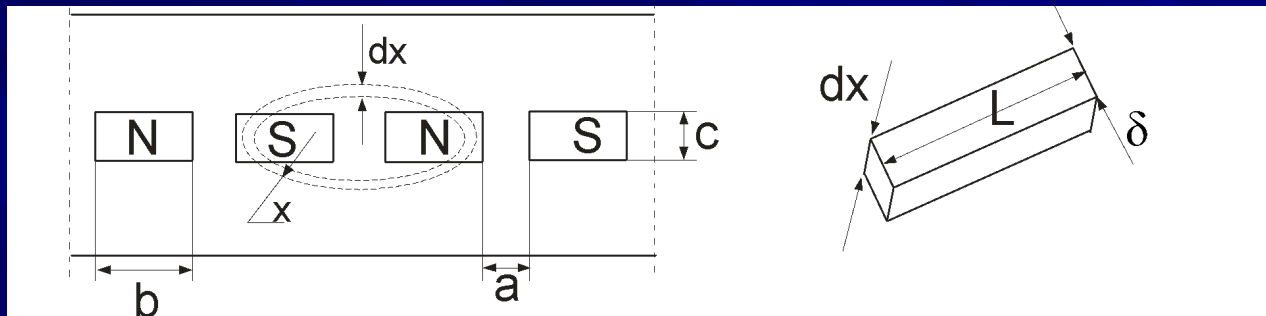


Рис 4.1. Магнитоиндукционные тахометры:  
а - с полым цилиндром; б - с диском;  
1 - ось измеряемого вращения; 2 – чувствительный элемент;  
3 - магнит; 4 - пружина; 5 - экран; 6 - термомагнитный шунт

## 2.7. Авиационные магнитоиндукционные тахометры<sup>18</sup> типа ИТЭ-1 и ИТЭ-2

Для вывода градуировочной формулы магнитоиндукционного тахометра "развернем" поверхность цилиндра тахометра в виде ленты. На ее поверхности изобразим проекции полюсов магнитов (чаще всего  $2p = 4$ )

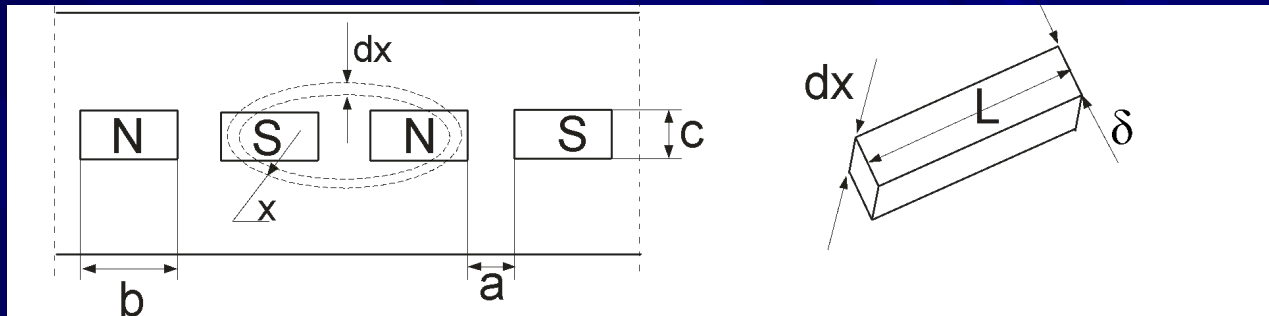


$V = \pi D n / 60$  - линейная скорость перемещения магнитного поля относительно токопроводящего стакана;  $D$  - диаметр ЧЭ;  
 $n$  - угловая скорость вращения вала

При получении соотношения использованы известные уравнения

$$V = \omega R; \quad \omega = \frac{2\pi n}{60} \quad \text{- угловая скорость вращения поля постоянного магнита;}$$

## 2.7. Авиационные магнитоиндукционные тахометры<sup>17</sup> типа ИТЭ-1 и ИТЭ-2



ЭДС от поля постоянного магнита  $E$

$$E = BcV = Bc \pi Dn/60$$

$c$  – длина полюса магнита (м);  $B$  – магнитная индукция (Т). В каждом контуре тока действуют две такие ЭДС, создаваемые двумя соседними полюсами магнита

Величина тока  $di$  в элементарном контуре тока шириной  $dx$  и с сопротивлением  $dr$   $di = 2E/dr$

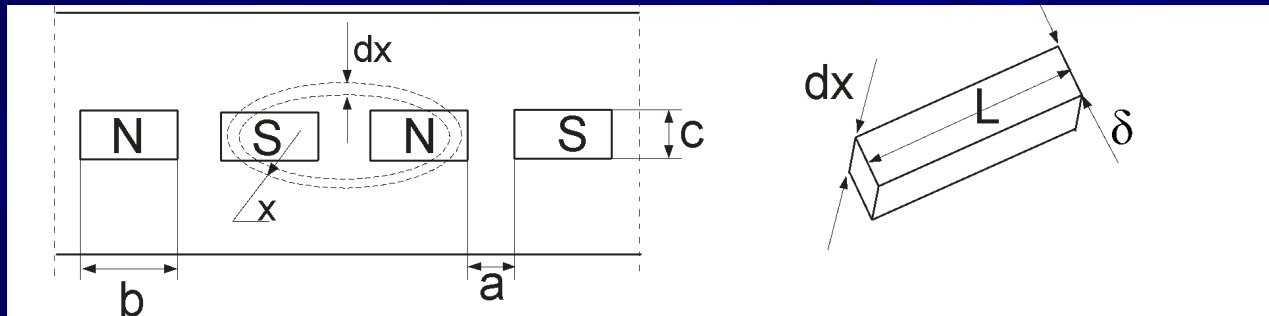
Геометрические размеры элементарного контура тока, соответственно площадь поперечного сечения и длина

$$S = \delta dx;$$

$$L = 2a + 2c + 2\pi x.$$



## 2.7. Авиационные магнитоиндукционные тахометры<sup>16</sup> типа ИТЭ-1 и ИТЭ-2



Элементарное удельное сопротивление контура тока

$$dr = \rho L / S = \rho(2c + 2a + 2\pi x) / \delta dx$$

$a$  – расстояние между полюсами постоянного магнита;  $x$  – переменный радиус закругления элементарного контура тока;  $\delta$  – толщина стенки цилиндра,  $\rho$  – удельное сопротивление материала токопроводящего цилиндра

$$di = 2E/dr$$

Полный ток  $I$  под полюсом шириной  $b$

$$I = 2 \int_0^{b/2} di = \frac{BID\delta}{30\rho} n \ln \left[ 1 + \frac{\pi b}{2(a+c)} \right]$$

## 2.7. Авиационные магнитоиндукционные тахометры<sup>15</sup> типа ИТЭ-1 и ИТЭ-2

Этот ток создает свое магнитное поле. Сила взаимодействия поля постоянного магнита с магнитным полем тока  $I$   $F = BIc$

$$M_{вр} = F \cdot D/2 \cdot 2\rho = FD\rho = k_1 n$$

$$I = 2 \int_0^{\frac{b}{2}} di = \frac{BID\delta}{30\rho} n \ln \left[ 1 + \frac{\pi b}{2(a+c)} \right]$$

$$k_1 = \frac{B^2 l^2 D^2 \delta \rho}{30\rho} \ln \left[ 1 + \frac{\pi b}{2(a+c)} \right]$$

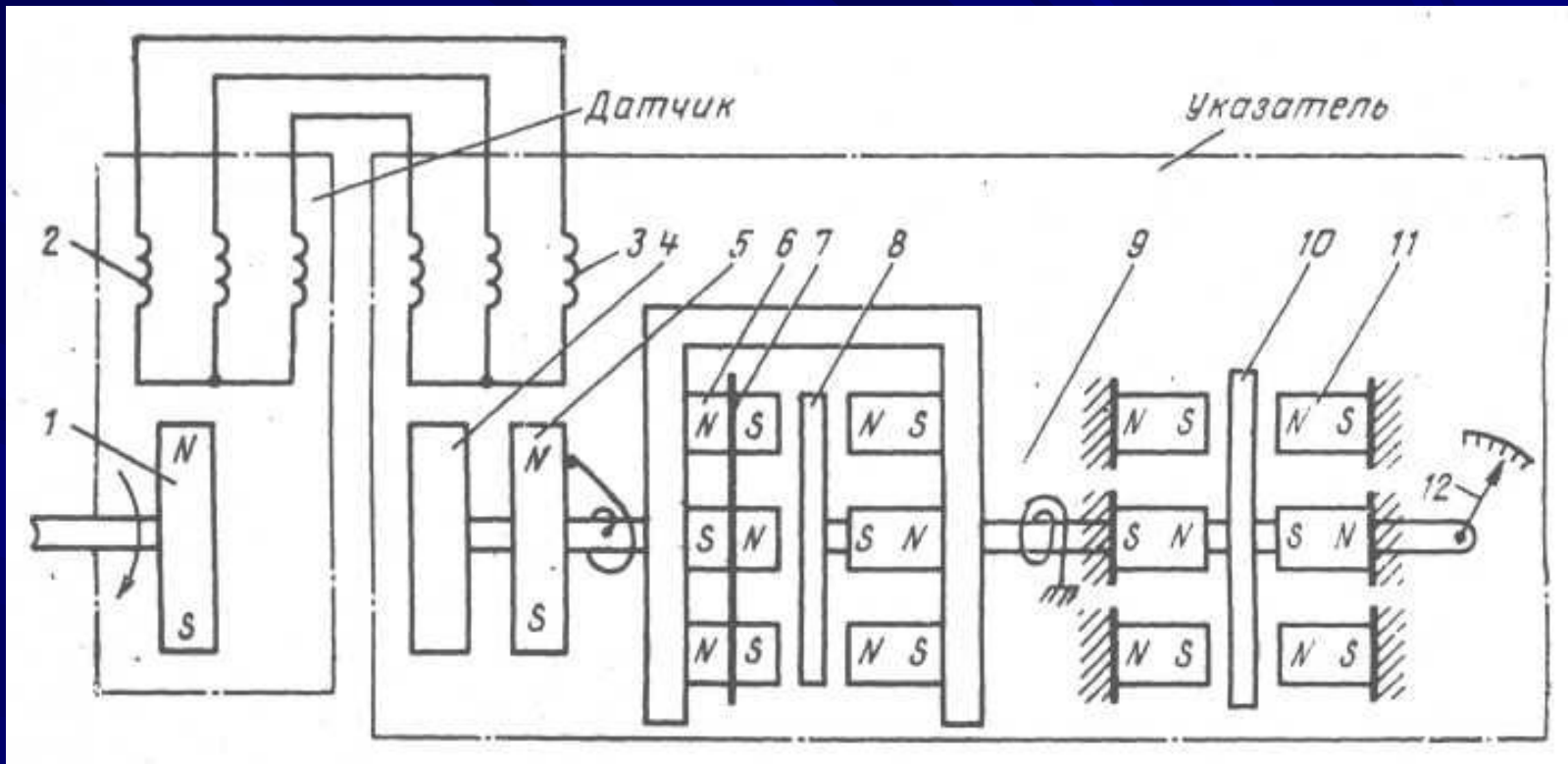
$$M_{пр} = c\phi$$

$$\text{При } M_{вр} = M_{пр}$$

$$\phi = \frac{k_1}{c} n = k n$$

**Таким образом статическая характеристика магнитоиндукционного тахометра линейна, шкала его указателя равномерная.**



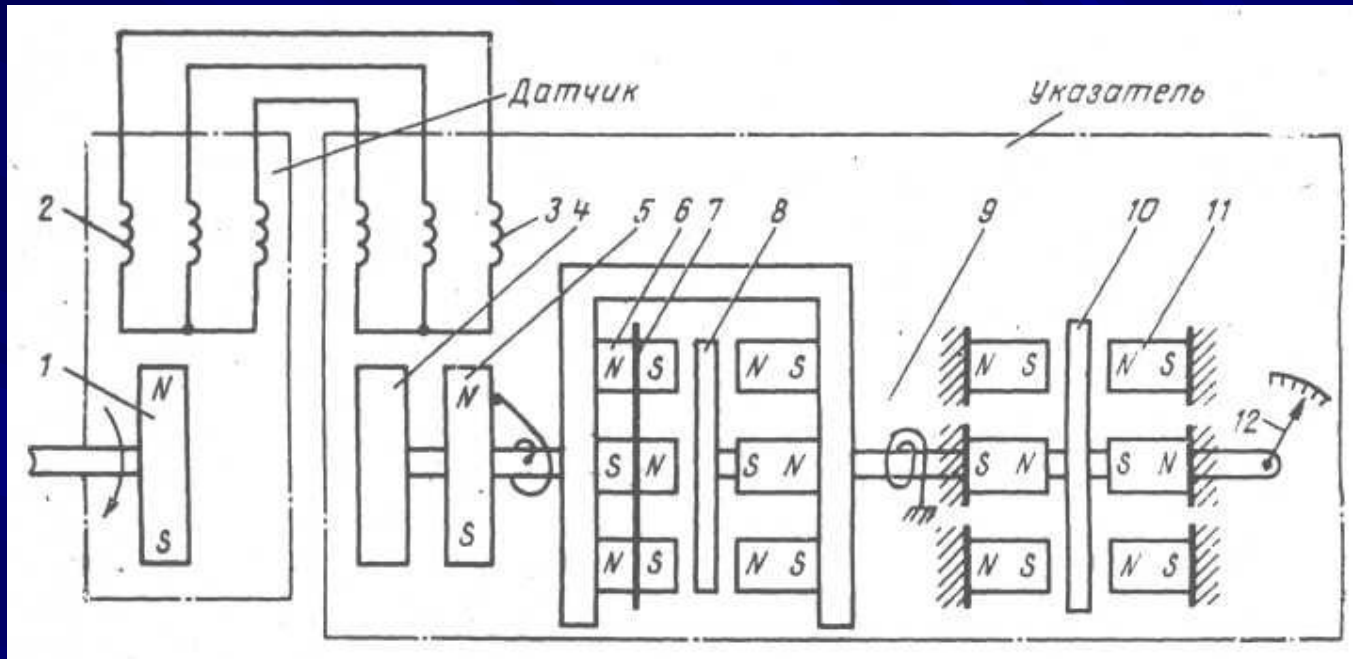


**Рис 4.2. Электрокинетическая схема тахометра ИТЭ-1:**

1 - неподвижная магнитная система; 2 - обмотка статора генератора; 3 - обмотка статора синхронного двигателя; 4 - гистерезисные диски; 5 - крестообразный магнит; 6 - постоянные магниты; 7 - термомагнитный шунт; 8 - диск (ЧЭ); 9 - пружина; 10 - диск демпфера; 11 - магнитный узел; 12 - стрелка

# Тахометр ИТЭ-1

Состоит из датчика ДТЭ-1 и указателя ИТЭ-1.

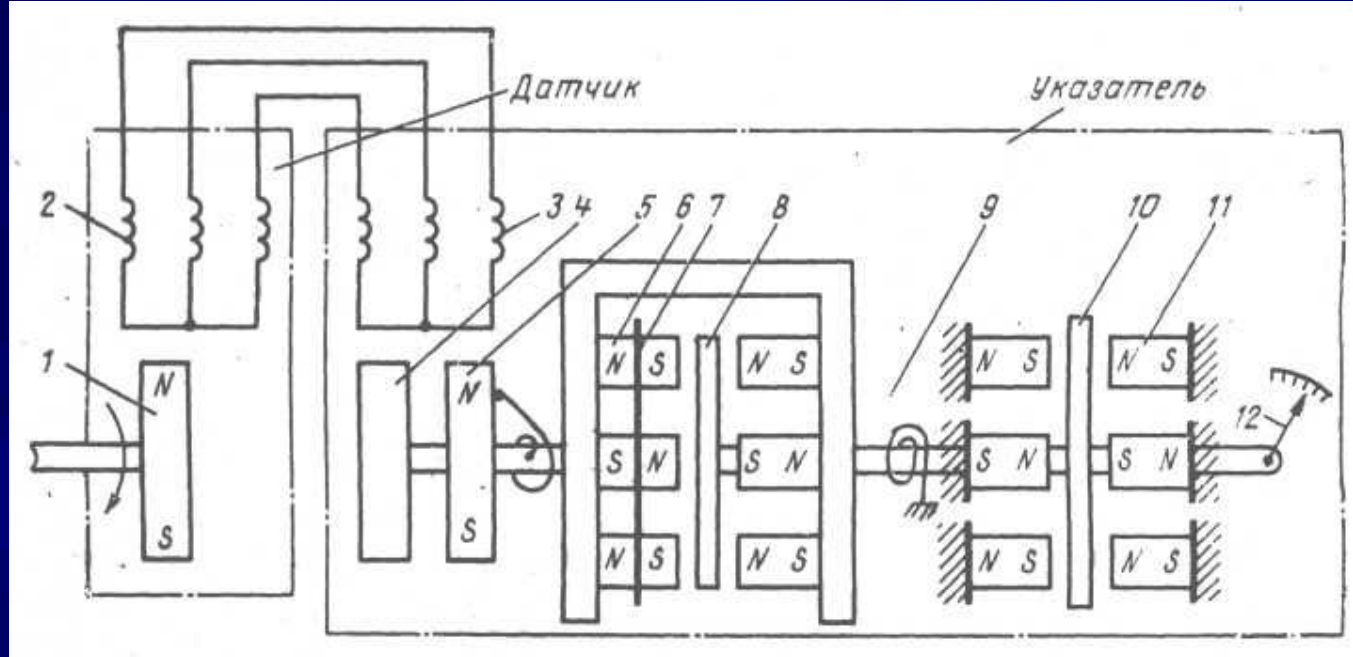


**Датчиком** является трехфазный синхронный генератор с возбуждением от постоянного магнита 1, расположенного на якоре. Он приводится через понижающую передачу от вала, частота вращения которого измеряется.

Датчик ДТЭ-1 и подключенный к нему синхронный двигатель указателя ИТЭ-1 образуют электрическую синхронную передачу - систему электрического вала, осуществляющего дистанционную передачу скорости вращения вала авиадвигателя.

# Тахометр ИТЭ-1

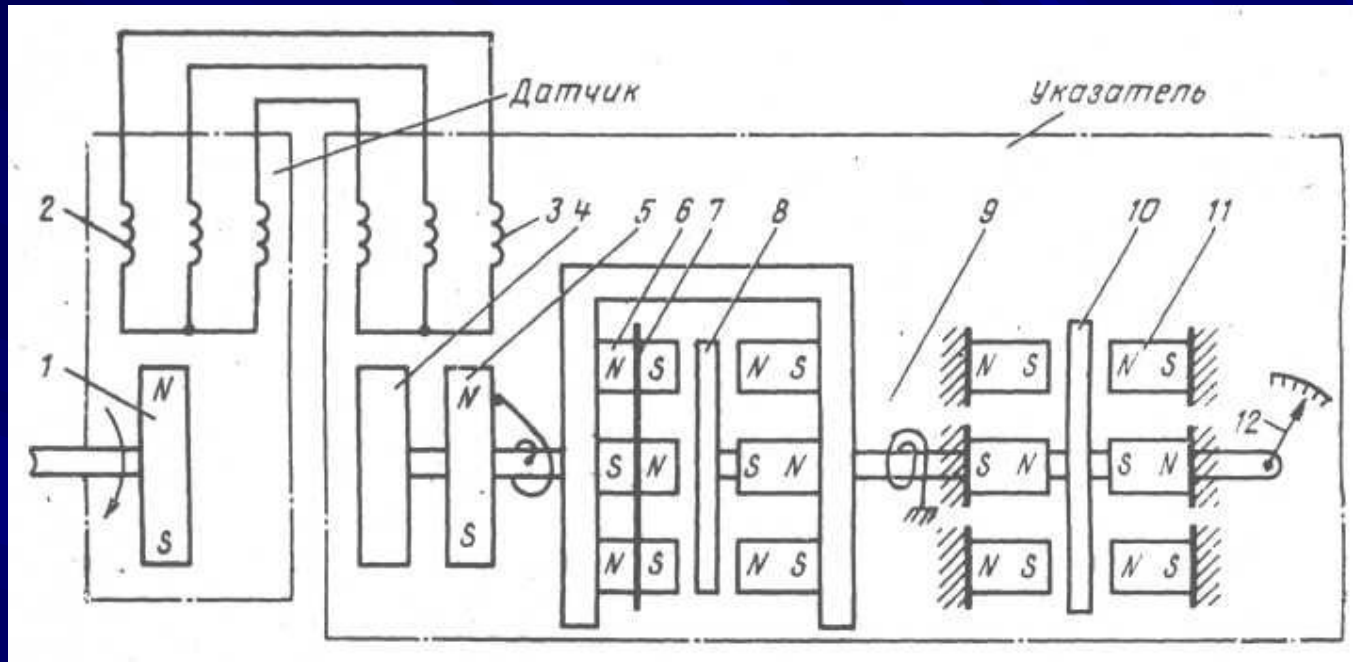
12



**Измерительная часть** прибора состоит из магнитного узла с двумя дисковыми платами с впрессованными в них шесть парами постоянных магнитов 6. В воздушном зазоре между торцами противоположных полюсов магнитов расположен ЧЭ - диск 8, изготовленный из медно-марганцевого сплава с малым температурным коэффициентом.

Таким образом, магнитный узел укреплен на конце вала синхронного двигателя и вращается с синхронной скоростью, а ЧЭ - диск связан через ось со стрелкой 12, перемещающейся по шкале.

# Тахометр ИТЭ-1



Для исключения влияния непостоянства температуры в месте установки указателя на изменение величины магнитного сопротивления магнитопроводов, а соответственно и изменение магнитной индукции в зазоре в измерительном узле используется термомагнитный шунт 7, который надевается на постоянные магниты. Шунт выполнен из сплава, магнитное сопротивление которого с ростом температуры увеличивается в большей степени, чем сопротивление остального магнитопровода.

## Тахометр ИТЭ-2

В измерителях ИТЭ-2 в отличие от ИТЭ-1 в корпусе размещены два одинаковых измерительных узла и два синхронных двигателя, аналогичные рассмотренным. Они имеют две соосные стрелки и предназначены для измерения частоты вращения валов двух двигателей или валов двух ступеней компрессора одного двигателя. Магнитоиндукционные демпферы в них отсутствуют. Необходимое демпфирование обеспечивается за счет моментов трения зубчатых передач.



## 2.8. Погрешности магнитоиндукционных тахометров<sub>9</sub> и способы их компенсации

Магнитоиндукционным тахометрам свойственны инструментальные погрешности, которые в нормальных условиях определяются трением в опорах подвижной системы измерителя, неточностью градуировки, разбалансом подвижной системы. В условиях, отличных от нормальных, дополнительные погрешности возникают из-за изменения температуры, которая влияет на параметры магнитоиндукционного чувствительного элемента ( $B$ ,  $\rho$ ) и противодействующей пружины ( $c$ ).

Если пренебречь изменением геометрических размеров элементов, то общий температурный коэффициент равен

$$a = 2a_B - a_\rho - a_c$$

где  $a_B$ ,  $a_\rho$ ,  $a_c$  - температурные коэффициенты изменения индукции, сопротивления диска (или цилиндра) и модуля упругости пружины.

Подбором материалов общий коэффициент  $a$  сводят к минимальному значению. Дальнейшее уменьшение температурных погрешностей осуществляется термомагнитным шунтом. Положение шунта вдоль оси магнитного измерительного узла может регулироваться для изменения коэффициента  $a$  в разных образцах тахометров.



## Особенности эксплуатации тахометров

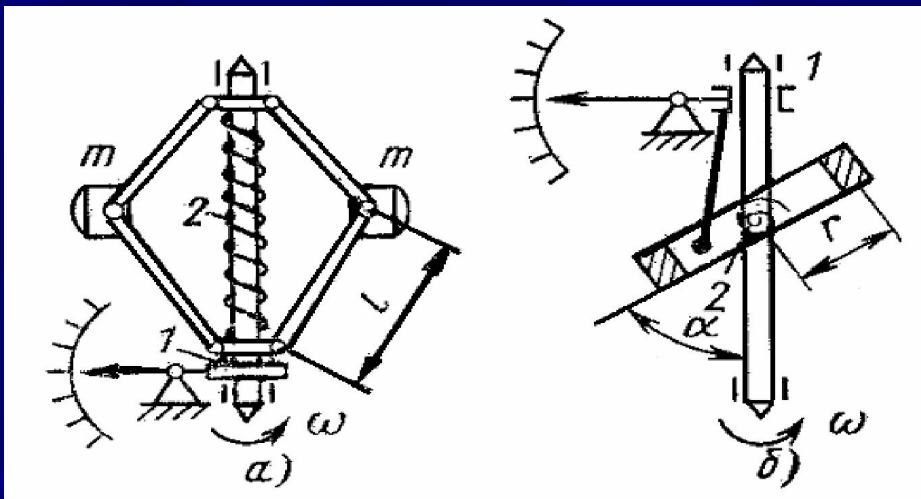
Для проверки тахометров типов ИТЭ, ТЭ используется установка типа КТУ-1М. Контроль проверяемого тахометра сводится к сопоставлению его показаний на проверяемых делениях шкалы с показаниями эталонного тахометра, в качестве которого используется ферродинамический нуль-индикатор, подключенный к эталонному двухфазному датчику. Датчики эталонного и проверяемого тахометров устанавливаются на одном валу.

## 2.9. Датчики частоты вращения вала авиадвигателя <sup>7</sup>

По принципу действия ЧЭ датчики подразделяются на :

- центробежные,
- магнитоиндукционные,
- генераторные,
- частотно-импульсные

### Центробежные датчики



а – конический тахометр;  
б – кольцевой тахометр;  
1- муфта; 2- пружина

В коническом тахометре на шарнирах, вращающихся вместе с осью, установлены грузы  $m$ , которые под действием центробежных сил расходятся, перемещая вдоль оси муфту 1 и сжимая пружину 2.

$$y = S\omega^2$$

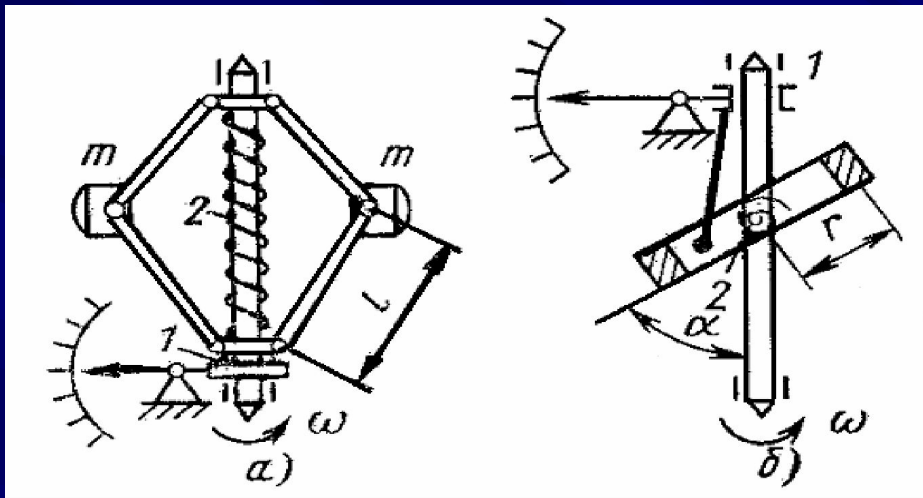
$$S = nmy_0(1 + 2r_0 / \sqrt{4l^2 - y_0^2}) / 4c_1$$

- чувствительность

$n$ ,  $m$ ,  $r_0$  и  $c_1$  - соответственно число грузов, масса груза, радиус муфты и коэффициент жесткости пружины

## 2.9. Датчики частоты вращения вала авиадвигателя <sup>7</sup>

### Центробежные датчики



а – конический тахометр;  
б – кольцевой тахометр;  
1- муфта; 2- пружина

В кольцевом тахометре при не вращающейся оси ( $\omega = 0$ ) плоскость кольца наклонена по отношению к оси на угол  $\alpha_0$ . При вращении оси кольцо стремится занять положение, перпендикулярное оси вращения, однако этому препятствует пружина. Перемещению муфты 1 пропорционально приращению угла отклонения кольца

$$\alpha = S\omega^2$$

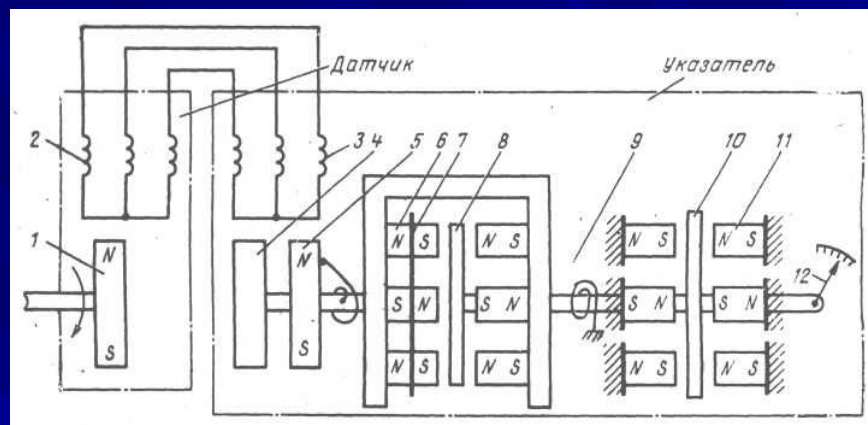
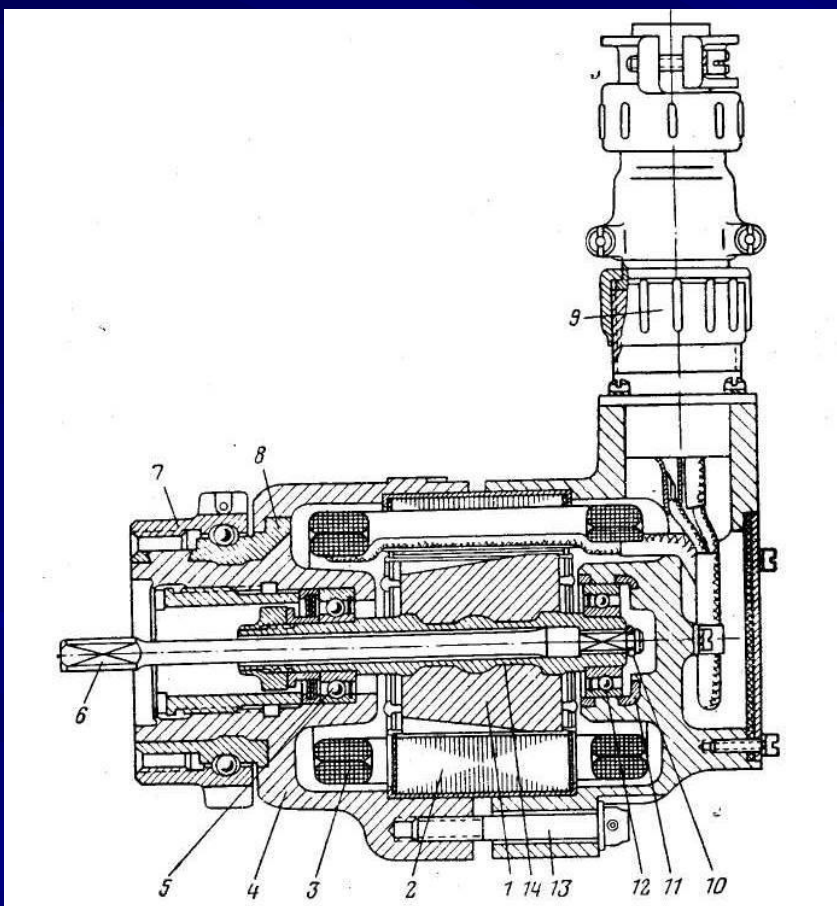
$$S = mr^2 \sin^2 2\alpha_0 / 2c_1 \quad \text{- чувствительность}$$

$m, r, c_1$  – соответственно масса и радиус кольца, и коэффициент жесткости пружины.

## 2.9. Датчики частоты вращения вала авиадвигателя 6

### Генераторные датчики.

ДТЭ-1 предназначены для выдачи электрического сигнала с частотой, пропорциональной частоте вращения вала двигателя, и представляют собой трехфазные магнитоэлектрические генераторы переменного тока с четырехполюсным магнитом



- 1 – постоянный магнит-ротор; 2 – статор; 3 – обмотка; 4 – крышка; 5, 12 – шарикоподшипники; 6 – хвостовик; 7 – накидная гайка; 8 – втулка; 9 – штепсельный разъем; 10 – пружинное кольцо; 11 – обойма; 13 – винт; 14 – втулка

$$f = (p n) / 60$$

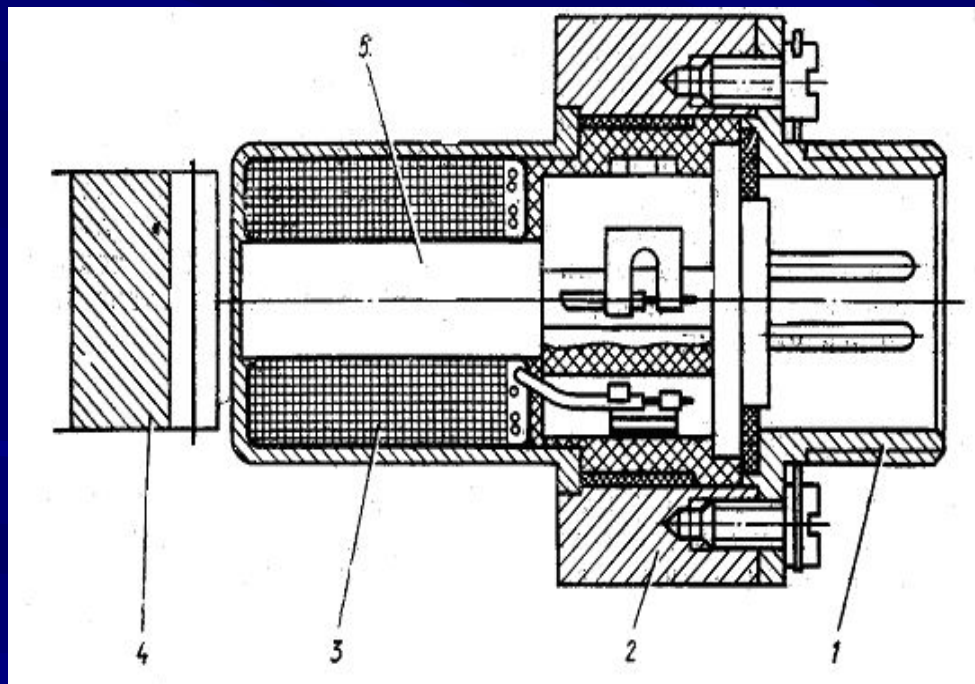


## 2.9. Датчики частоты вращения вала авиадвигателя 5

### *Частото-импульсные датчики.*

Используется зависимость частоты следования электрических импульсов напряжения от частоты вращения вала авиадвигателя.

В качестве датчиков в таких системах могут использоваться датчики частоты вращения ДЧВ-2500, ДТА-10Е, ДТЭ-1.



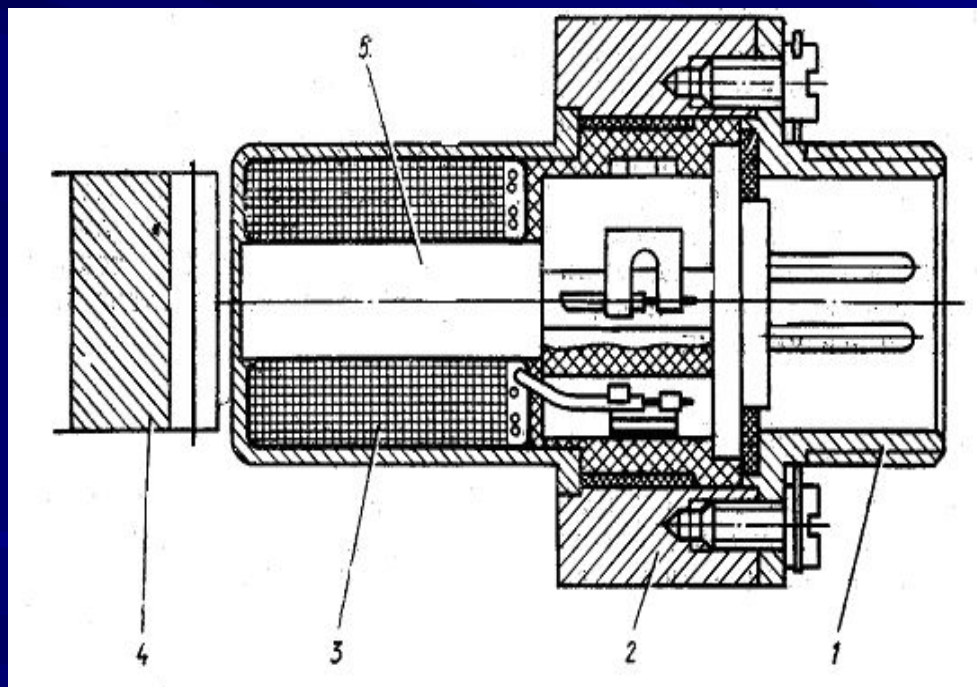
1 – штепсельный разъем; 2 – корпус; 3 – катушка; 4 – индуктор; 5 – постоянный магнит.

Принцип действия датчика ДЧВ-2500 заключается в индуцировании электрических импульсов напряжения в обмотке датчика за счет изменения сопротивления магнитной цепи при вращении индуктора под торцом датчика.

## 2.9. Датчики частоты вращения вала авиадвигателя 4

### Частото-импульсные датчики

Датчик является генератором электрических импульсов напряжения и работает следующим образом: при вращении индуктора 4 каждый из его зубьев проходит в непосредственной близости от торца датчика, результатом чего является возникновение ЭДС, индуцируемой в катушке датчика.



Частота импульсов напряжения, снимаемая с датчика, соответствует частоте прохождения зубьев мимо его торца, зависит от частоты вращения индуктора и, следовательно, вала двигателя.

Зависимость частоты следования электрических импульсов напряжения от частоты вращения

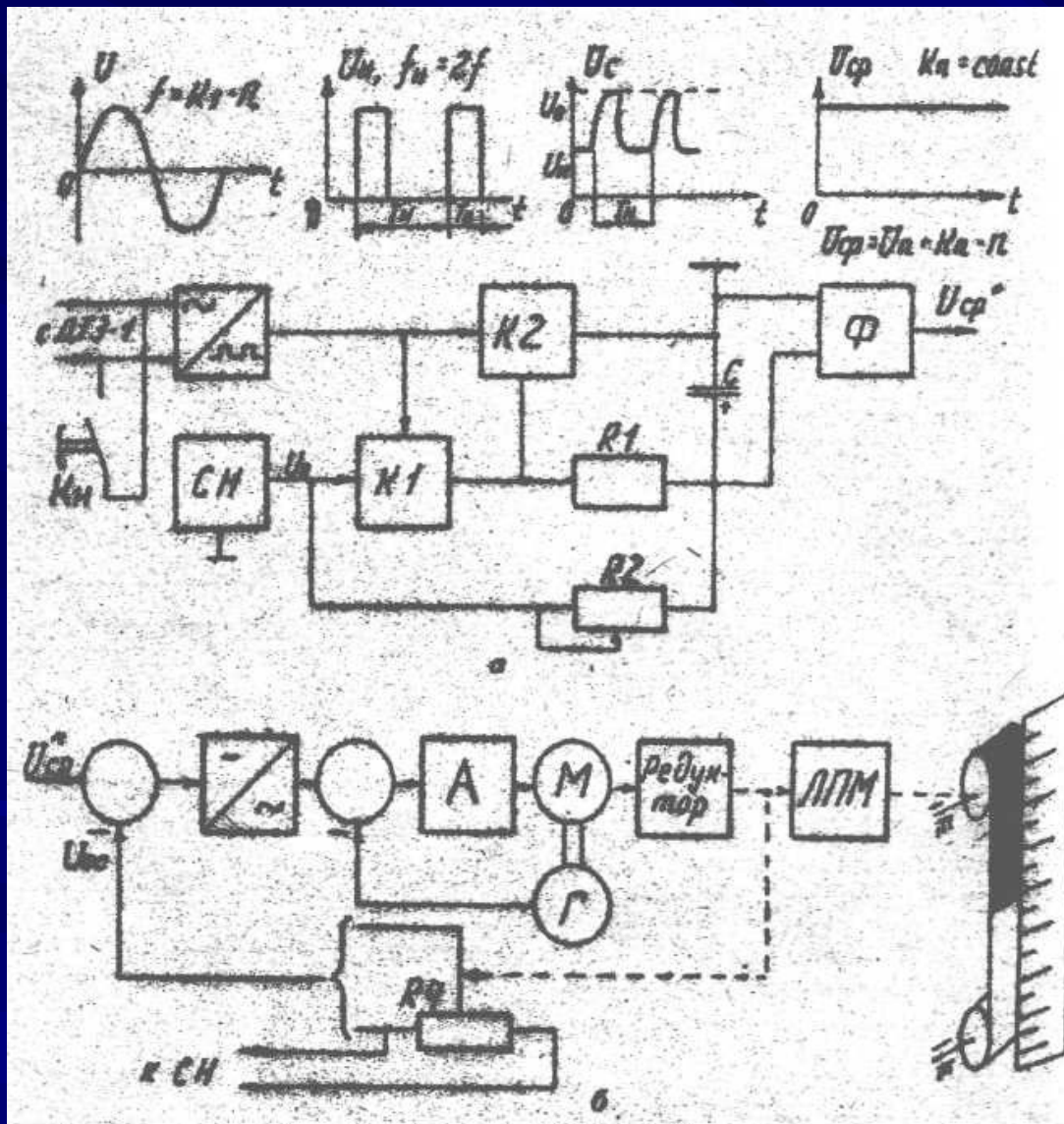
$$f = \frac{zn}{60}$$

$z$  – число зубьев



## 2.9. Датчики частоты вращения вала авиадвигателя 3

### Частото-импульсные тахометры

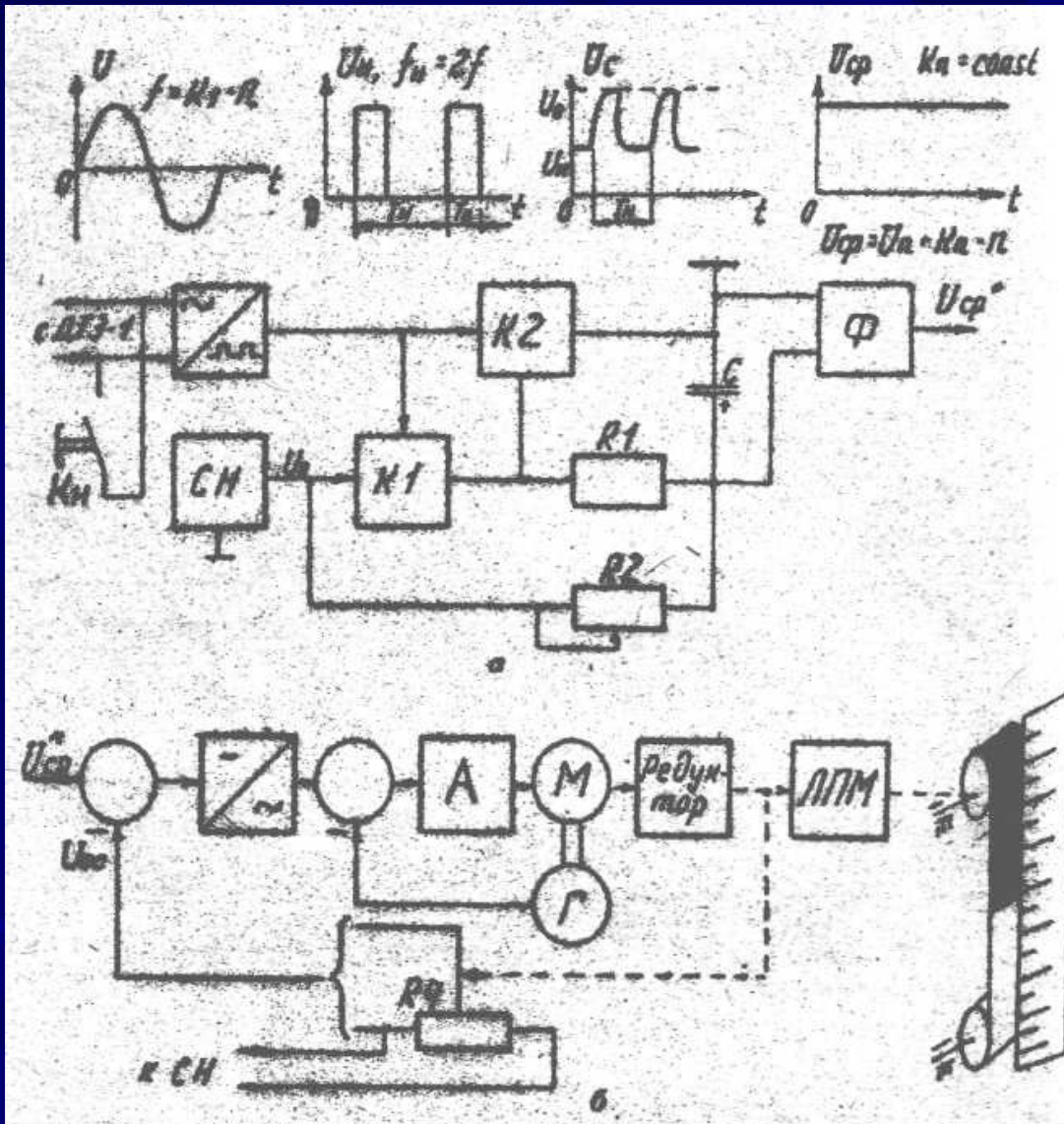


Работа основана на преобразовании частоты  $f$  сигнала датчика в пропорциональное ей напряжение постоянного тока и измерении этого напряжения автокомпенсационным методом.

Тахометрическая аппаратура ТА-6А:

а - преобразователь тахометрической аппаратуры ПТА-6;

б - измеритель тахометрической аппаратуры ИТАП-6.



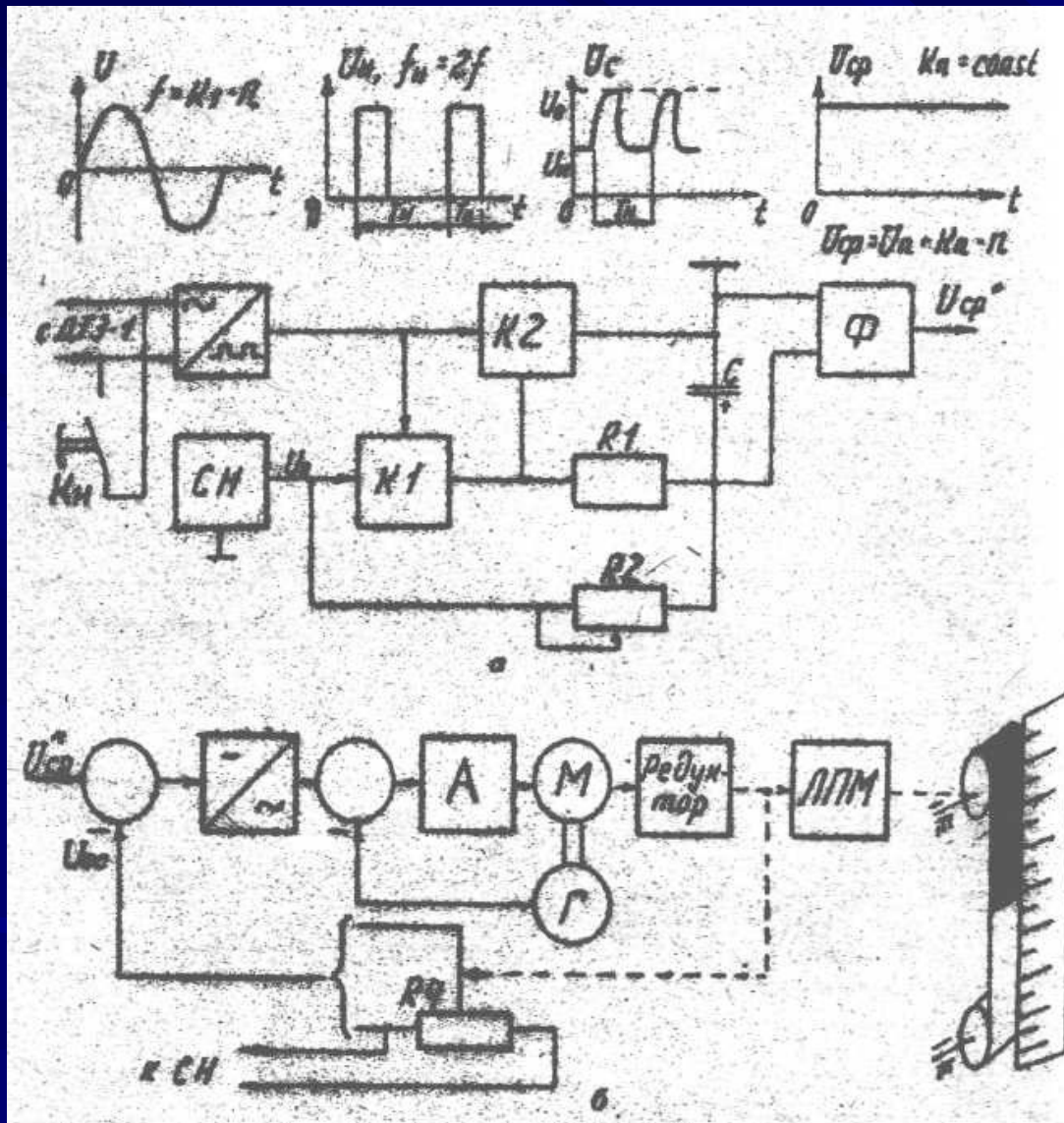
Сигнал измеряемой частоты  $f$  с датчика ДТЭ-1 поступает в преобразователь ПТА (рис. 4.6) на схему формирования прямоугольных импульсов напряжения постоянной длительности  $T_0$  и частоты  $f_n = 2f$  (схема включает удвоитель частоты и ждущий мультивибратор). Эти импульсы управляют транзисторными ключами  $K1$  и  $K2$ , которые обеспечивают заряд и разряд  $C$  до напряжения  $U_0$  и  $U_n$ . Среднее значение  $U_{ср}$  импульсного напряжения на конденсаторе  $C$  при  $U_0 = const$  и  $T_0 = const$  является функцией частоты импульсов  $f$ , следовательно, и частоты вращения  $n$ :

$$U_{ср} = U_n + k_n n$$



# Частото-импульсные тахометры

1



Для измерения  $U_{cp}(t)$  используется автокомпенсационный метод. Напряжение  $U_{cp}(t)$  сравнивается с эталонным напряжением  $U_{oc}$ , которое снимается с потенциометра  $R4$  обратной связи следящей системы измерителя ИТАП-6. Сигнал рассогласования после модуляции и усиления подается на обмотку управления двигателя  $M$  (типа ДГ-0,5ТА). Двигатель одновременно перемещает подвижный контакт потенциометра  $R4$ , устраняя рассогласование и через лентопротяжный механизм (ЛПМ) - черно-белую ленту индикатора, которая

перемещается относительно вертикальной неподвижной шкалы

Тахогенератор  $\Gamma$  служит демпфером следящей системы.