### 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 силинерции неуравновешенных масс от частоты вращения вала. В них центробежные силы инерции уравновешиваются 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.

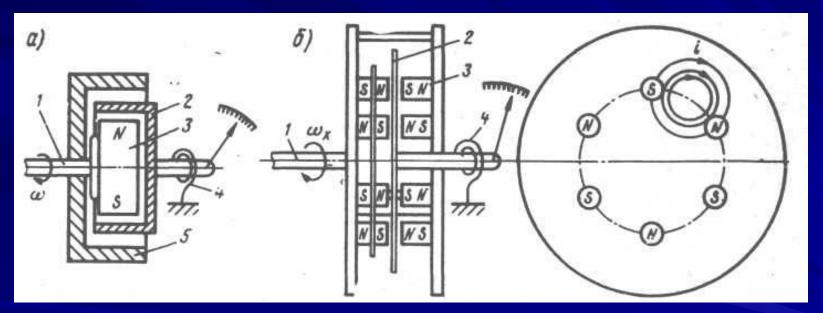


Рис 4.1. Магнитоиндукционные тахометры:

- 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 19 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 *Мер*, увлекающий цилиндр вслед за вращающимся магнитом.

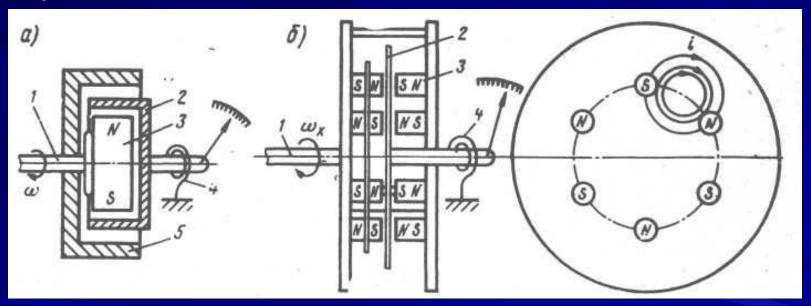
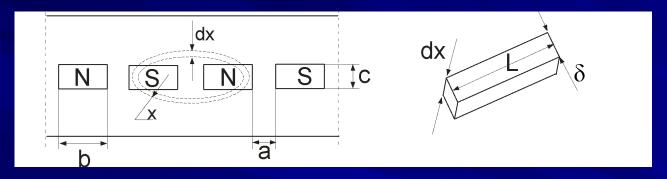


Рис 4.1. Магнитоиндукционные тахометры:

- 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 18 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 2р = 4)

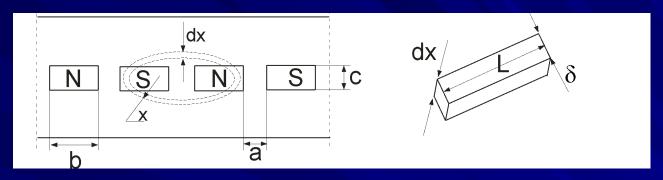


V = πDn/60 - линейная скорость перемещения магнитного поля относительно токопроводящего стакана; *D* – диаметр ЧЭ; *n* - угловая скорость вращения вала При получении соотношения использованы известные уравнения

$$V = \omega R; \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

- угловая скорость вращения поля постоянного магнита;

## 2.7. Авиационные магнитоиндукционные тахометры 17 типа ИТЭ-1 и ИТЭ-2



ЭДС от поля постоянного магнита Е

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

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

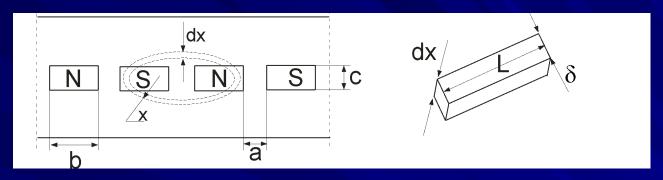
Величина тока di в элементарном контуре тока шириной dx и с сопротивлением dr di = 2E/dr

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 16 типа ИТЭ-1 и ИТЭ-2



Элементарное удельное сопротивление контура тока

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

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

di = 2E/dr

Полный ток  $\emph{I}$  под полюсом шириной  $\emph{b}$ 

$$I = 2\int_{0}^{\frac{b}{2}} di = \frac{BID\delta}{30\rho} n \ln \left[ 1 + \frac{\pi b}{2(a+c)} \right]$$

## 2.7. Авиационные магнитоиндукционные тахометры 15 типа ИТЭ-1 и ИТЭ-2

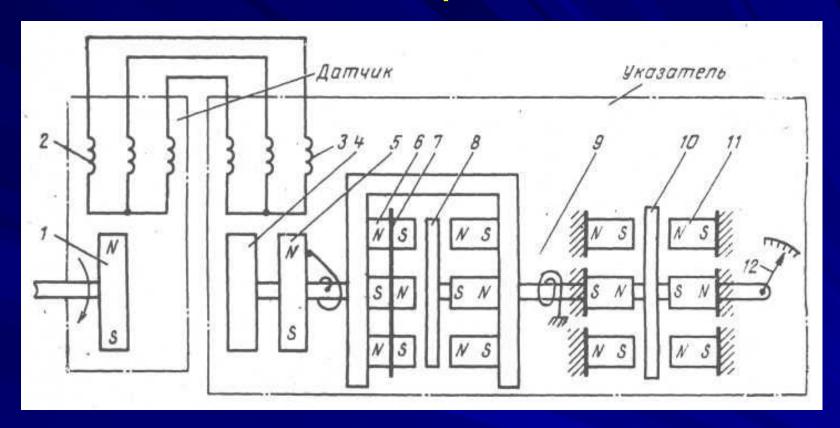
Этот ток создает свое магнитное поле. Сила взаимодействия поля постоянного магнита с магнитным полем тока I F = BI c

$$M_{ep} = F \cdot D/2 \cdot 2p = FD \ p = k_1 \ n$$

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

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

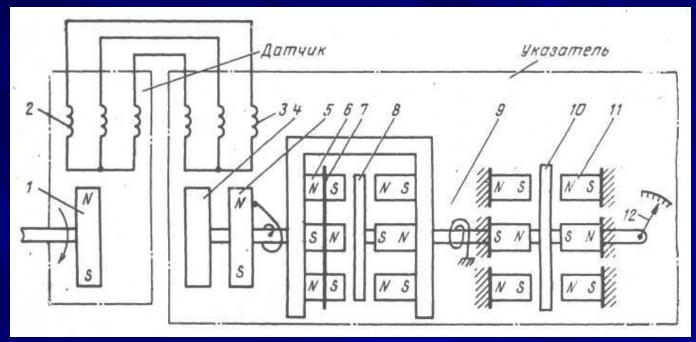
Таким образом статическая характеристика магнитоиндукционного тахометра линейна, шкала его указателя равномерная.



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

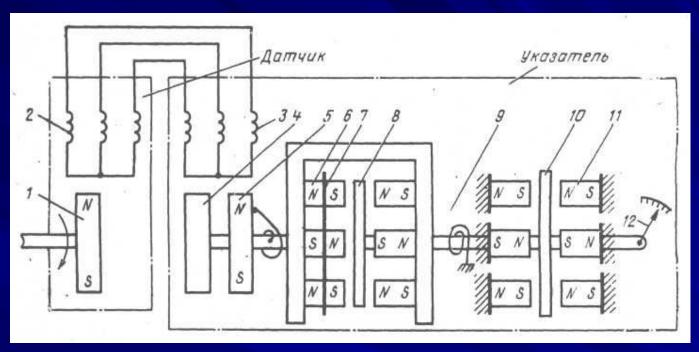
1 - неподвижная магнитная система; 2 - обмотка статора генератора; 3 - обмотка статора синхронного двигателя; 4 - гистерезисные диски; 5 - крестообразный магнит; 6 - постоянные магниты; 7 - термомагнитный шунт; 8 - диск (ЧЭ); 9 - пружина; 10 - диск демпфера; 11 - магнитный узел; 12 - стрелка

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



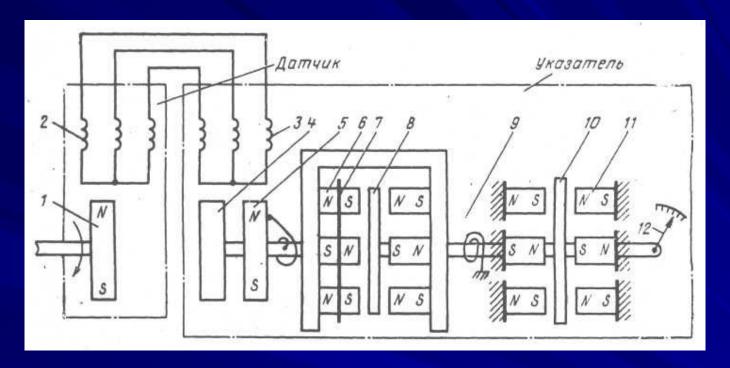
Датчиком является трехфазный синхронный генератор с возбуждением от постоянного магнита 1, расположенного на якоре. Он приводится через понижающую передачу от вала, частота вращения которого измеряется.

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.



Измерительная часть прибора состоит из магнитного узла с двумя дисковыми платами с впрессованными в них шестью 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.



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.

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

$$a = 2a_{g} - a\rho - a_{c}$$

где  $a_{\rm g}, a_{
ho}, a_{
ho}$  - температурные коэффициенты изменения индукции, сопротивления диска (или цилиндра) и модуля упругости пружины.

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

#### Особенности эксплуатации тахометров

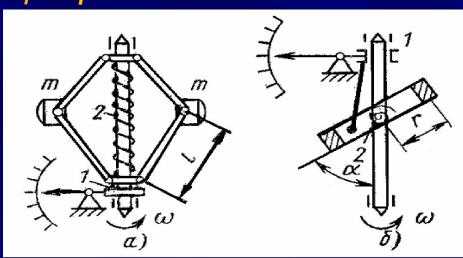
Для проверки тахометров типов ИТЭ, ТЭ используется установка типа КТУ-1М. Контроль проверяемого тахометра сводится к сопоставлению его показаний на проверяемых делениях шкалы с показаниями эталонного тахометра, в качестве которого используется ферродинамический нуль-индикатор, подключенный к эталонному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

### 2.9. Датчики частоты вращения вала авиадвигателя

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.

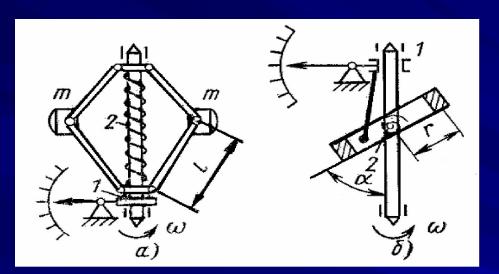
$$y = S\omega^2$$
  $S = nmy_0(1 + 2r_0/\sqrt{4l^2 - y_0^2})/4c_1$ 

- чувствительность

 $\overline{n}$ ,  $\overline{m}$ ,  $\overline{r}_0$  и  $\overline{c}_1$  - соответственно число грузов, масса груза, радиус муфты и коэффициент жесткости пружины

### 2.9. Датчики частоты вращения вала авиадвигателя

#### Центробежные датчики



а - конический тахометр;

б – кольцевой тахометр;

1- муфта; 2- пружина

В кольцевом тахометре при не вращающейся оси (ω =0) плоскость кольца наклонена по отношению к оси на угол С₀. При вращении оси кольцо стремиться занять положение, перпендикулярное оси вращения, однако этому препятствует пружина. Перемещению муфты 1 пропорционально приращению угла отклонения кольца

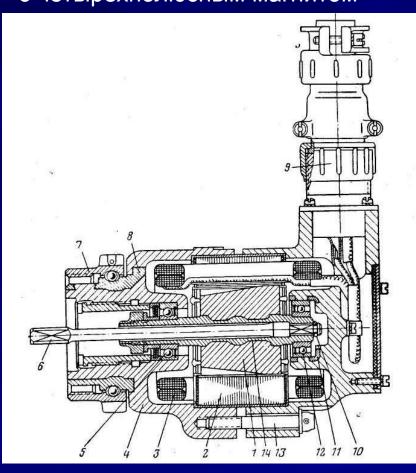
$$\alpha = S\omega^2$$

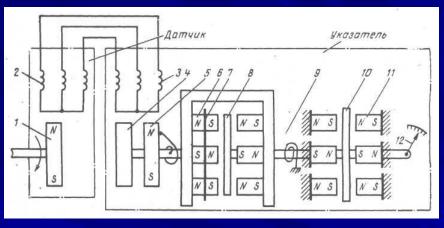
$$oldsymbol{lpha} = oldsymbol{S} oldsymbol{\omega}^2$$
  $S = mr^2 \sin^2 2lpha_0 / 2c_1$  - чувствительность

 $m, r, c_1$  – 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;

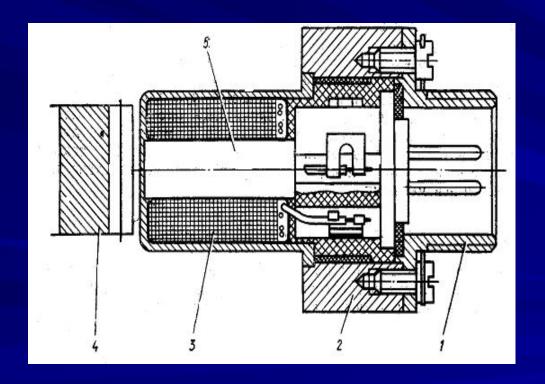
**11 –** обойма; **13 –** винт; **14 –** втулка

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.

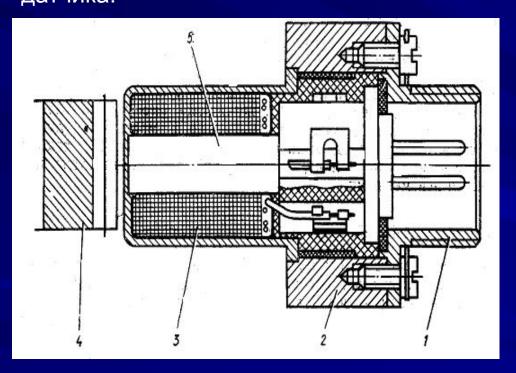


1 – штепсельный разъем; 2 – корпус; 3 – катушка; 4 – индуктор; 5 – постоянный магнит.

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.



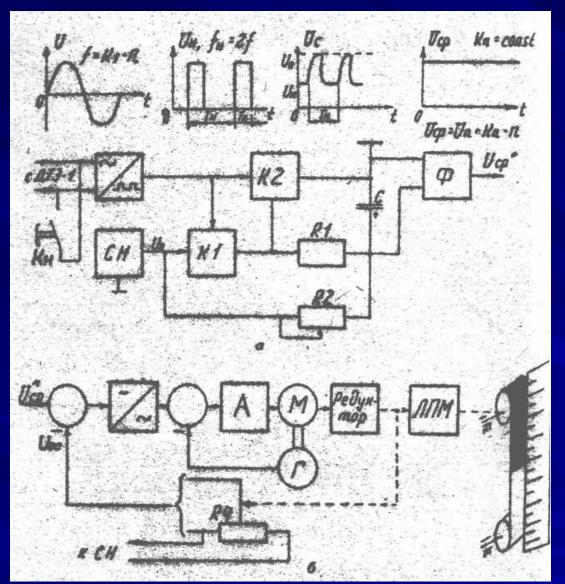
Частота импульсов напряжения, снимаемая с датчика, соответствует частоте прохождения зубьев мимо его торца, зависит от частоты вращения индуктора и, следовательно, вала двигателя.

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*

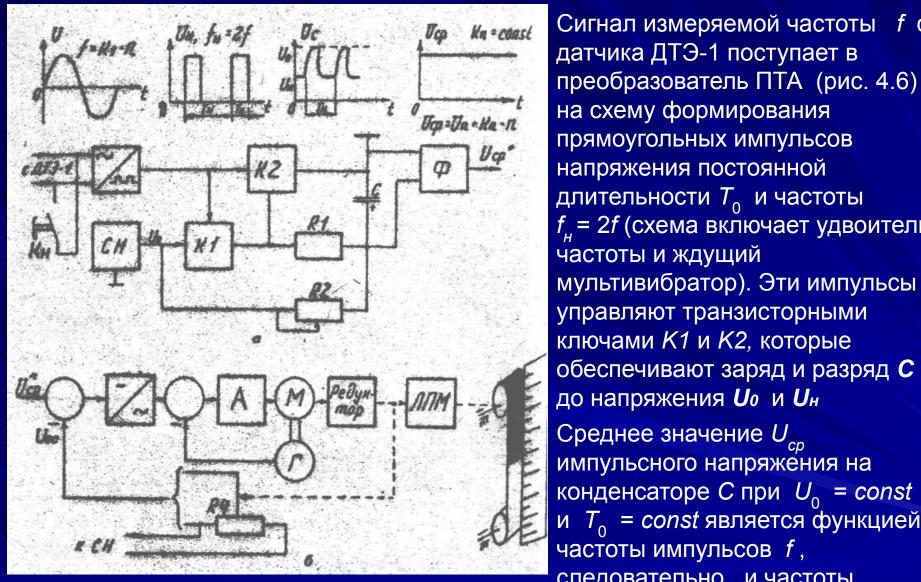


Работа основана на преобразовании частоты *f* сигнала датчика в пропорциональное ей напряжение постоянного тока и измерении этого напряжения автокомпенсационным методом.

Тахометрическая аппаратура ТА-6А:

- а преобразовательтахометрической аппаратурыПТА-6;
- б измеритель тахометрической аппаратуры ИТАП-6.

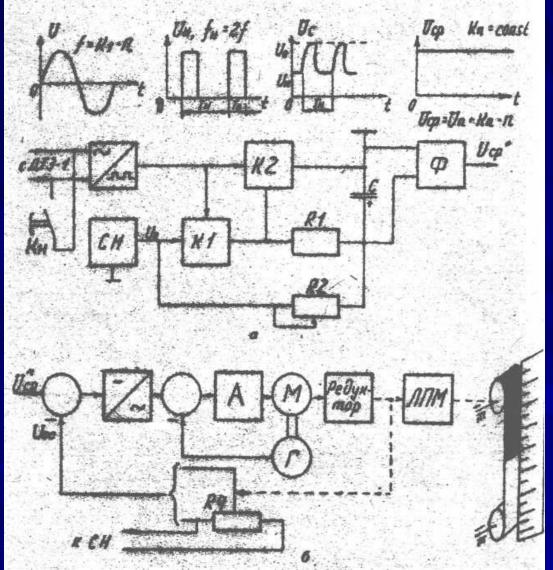
#### Частото-импульсные тахометры



напряжения постоянной длительности  $T_0$  и частоты  $f_{\mu}$  = 2f (схема включает удвоитель частоты и ждущий мультивибратор). Эти импульсы управляют транзисторными ключами *К1* и *К2,* которые обеспечивают заряд и разряд С до напряжения **U**₀ и **U**н Среднее значение  $U_{cp}$ импульсного напряжения на конденсаторе C при  $U_0 = const$ и  $T_0 = const$  является функцией частоты импульсов f, следовательно, и частоты вращения *n*:

Сигнал измеряемой частоты *f* с

#### Частото-импульсные тахометры



Для измерения  $U_{cp}(t)$ используется автокомпенсационный метод. Напряжение  $\overline{U_{cp}}(t)$  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 *М* (типа ДГ-0,5TA). 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 Г служит демпфером следящей системы.