

# Тема №2. Регулирование напряжения авиационных генераторов

## 2.1. Необходимость регулирования напряжения авиационных генераторов

Из теории авиационных электрических машин известно, что уравнение генератора постоянного тока имеет вид:

$$U = E - I_{я} \cdot R_{я} = c_e \cdot n \cdot \Phi - I_{я} R_{я}$$

В процессе работы генератора величины  $n$  и  $I_{я}$  могут изменяться в довольно широких пределах из-за изменения скорости вращения авиадвигателя и величины тока нагрузки. Следовательно, напряжение на зажимах генератора также будет изменяться в широких пределах.

Однако, необходимо чтобы напряжение на выходе генератора оставалось постоянным во всем диапазоне скоростей вращения авиадвигателя и изменении тока нагрузки от нуля до номинального.

Как следует из уравнения генератора постоянного тока

$$U = E - I_{я} \cdot R_{я} = c_e \cdot n \cdot \Phi - I_{я} R_{я}$$

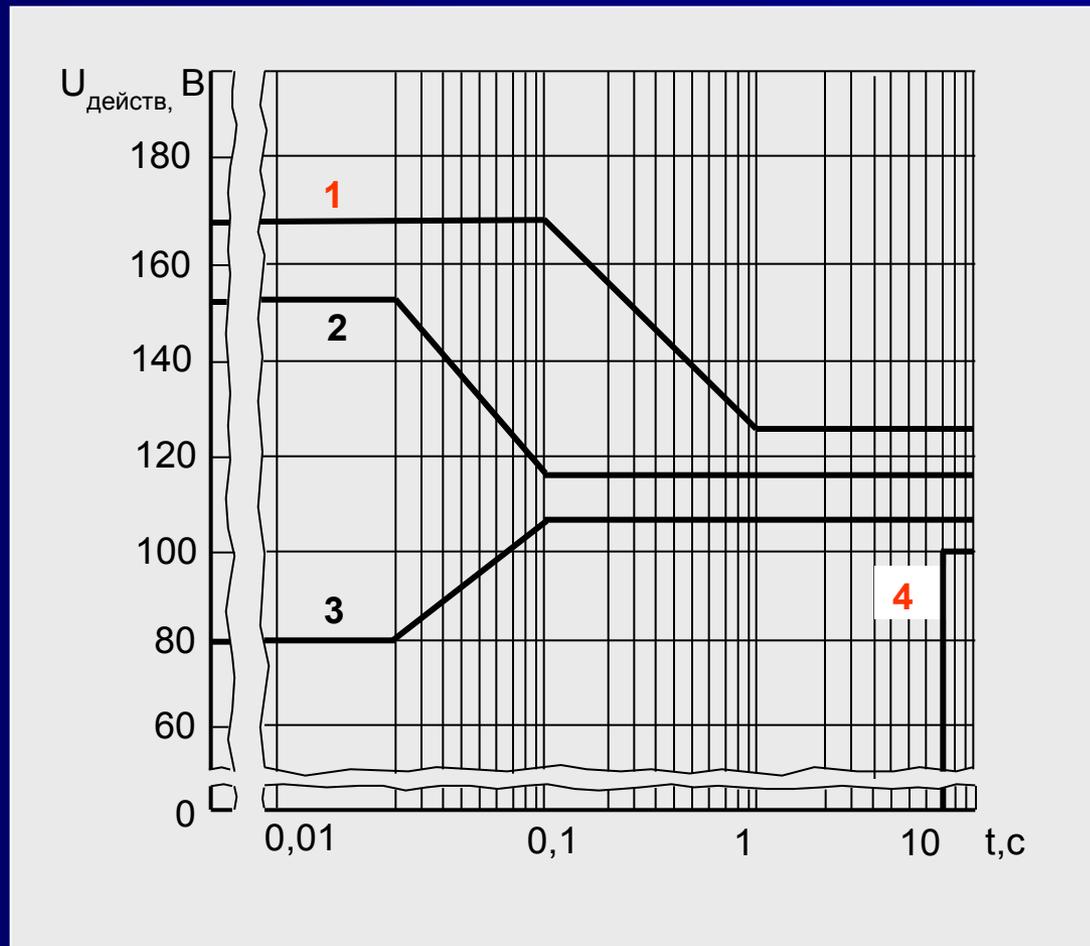
добиться этого можно соответствующим изменением магнитного потока  $\Phi$ .

## 2.2. Требования к точности поддержания и форме кривой напряжения

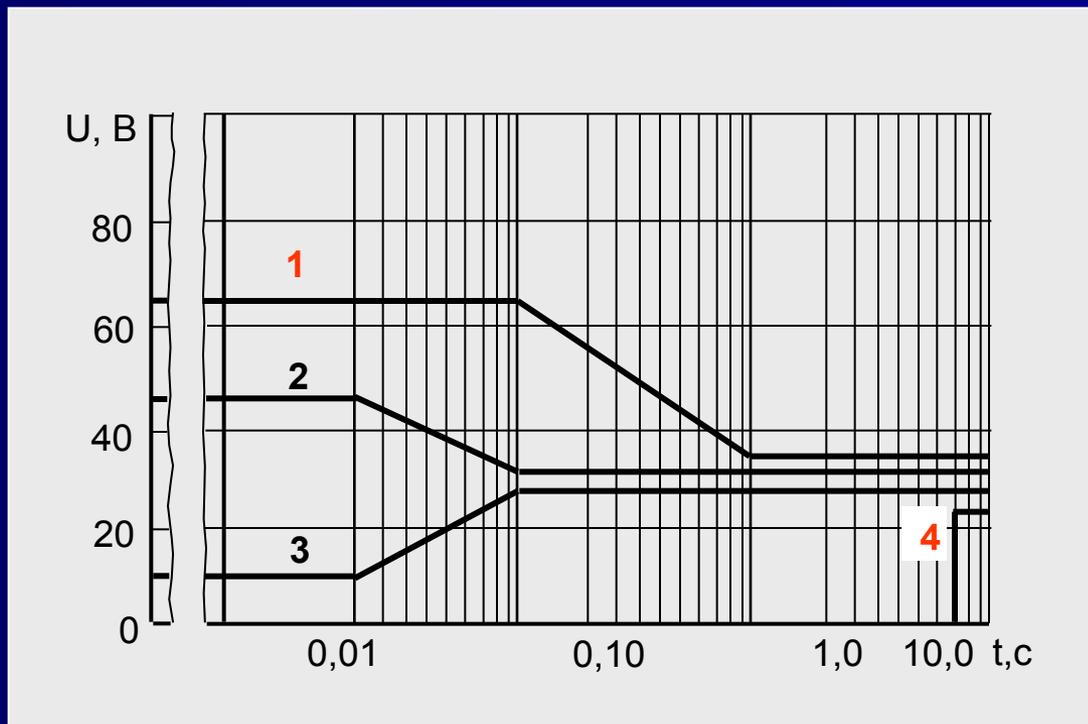
Требования к параметрам качества ЭЭ подробно изложены в ГОСТ Р 54073-2010 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Требования к качеству электроэнергии».

Согласно ГОСТ предельно допустимые значения отклонений напряжений при нормальном и частичном режимах работы СЭС приняты при условии внезапных изменений нагрузки от 10% до 160% номинальной мощности системы.

# Рис.2.1. Пределы значений приведенных переходных напряжений переменного тока



## Рис.2.2. Пределы значений приведенных переходных напряжений постоянного тока



Допустимые значения установившегося напряжения для принятых режимов работы СЭС постоянного тока :

Точка измерения	Диапазон напряжения, В, при работе системы		
	нормальной или частичной	ненормальной	аварийной
Выводы приемника	24,0-29,4	21,0-31,5	18,0-31,0
Точка регулирования в системе с регулируемым источником	27,0-29,0	24,0-31,5	20,0-29,0
Точка подключения нерегулируемого выпрямительного устройства	25,4-29,4	21,0-31,5	20,0-31,0

Оценка искажений формы кривой напряжения переменного тока согласно ГОСТу 19705-89 проводится по следующим показателям:

- коэффициенту искажения формы кривой напряжения в установившемся режиме:

$$k_{\phi} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2} U_i^2}}{U_1} 100\%,$$

где  $U_1$  и  $U_i$  – действующие значения соответственно первой и  $i$ -й гармоник напряжения;

- коэффициенту гармоник - отношению действующих значений  $i$ -й и первой гармоник напряжения:

$$k_2 = \frac{U_i}{U_1} 100\%;$$

- величине постоянной составляющей напряжения  $U_0$  ;
- коэффициенту амплитуды:

$$k_\alpha = \frac{U_m}{U},$$

где  $U_m$  и  $U$  - соответственно амплитудное и действующие значения напряжения

Приведенные выше показатели не должны превышать соответственно:

$$k_\phi < 8\%; \quad k_\gamma < 5\%; \quad U_0 = \pm 0,1\text{В}; \quad k_\alpha = 1,41 \pm 0,15$$

Для оценки пульсаций напряжения постоянного тока, т.е. разности между максимальным и минимальным значениями переменной составляющей напряжения в установившемся режиме, используют коэффициент пульсации, равный:

$$k_n = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}}{2U_{\text{ср}}} 100\%,$$

где  $U_{\text{макс}}$ ,  $U_{\text{мин}}$  и  $U_{\text{ср}}$  - соответственно максимальное, минимальное и среднее значения напряжения постоянного тока.

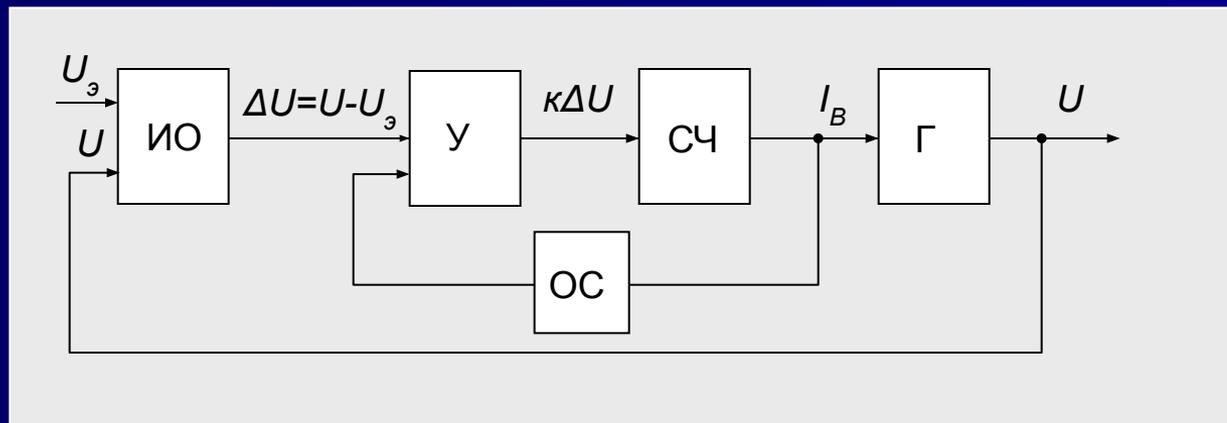
Коэффициент пульсаций напряжения постоянного тока не должен превышать  $k_n < 7,4\%$ .

## 2.3. Принципы построения систем регулирования напряжения

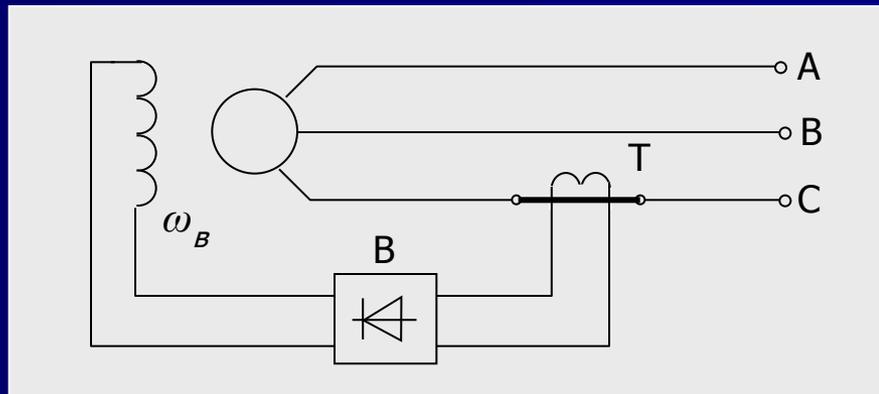
Построение системы регулирования напряжения возможно по следующим принципам:

- по отклонению;
- по возмущению;
- комбинированный способ.

На рисунке представлена структурная схема системы регулирования напряжения «по отклонению»:



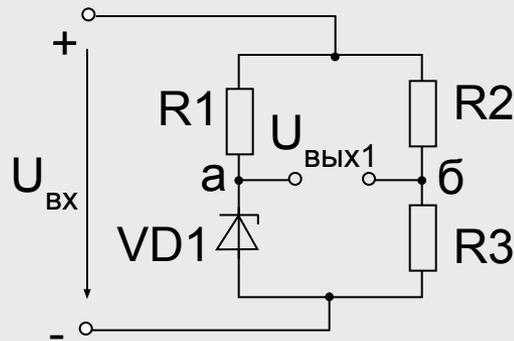
На рисунке представлена структурная схема, поясняющая принцип действия системы регулирования напряжения «по возмущению» (токового компаундирования):



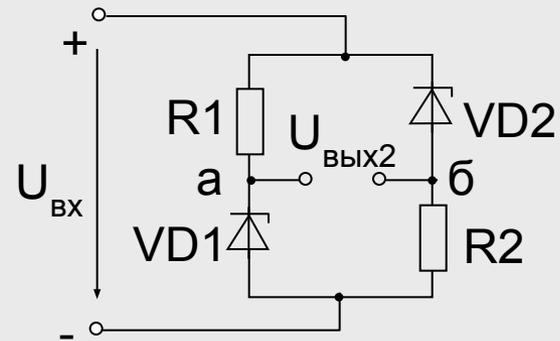
Системы регулирования напряжения, объединяющие оба выше приведенных способа регулирования называются «комбинированными».

## 2.4. Измерительные органы регуляторов напряжения

Мостовые схемы измерительных органов на стабилитронах и их выходные характеристики:



а)



б)

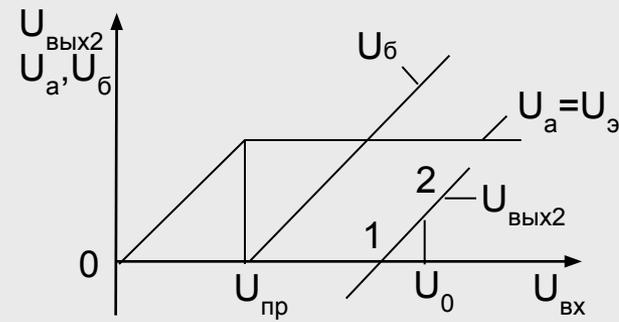
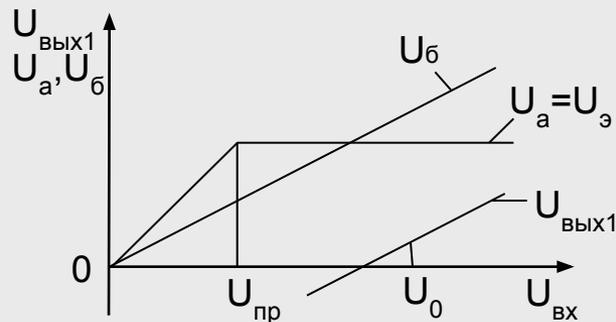
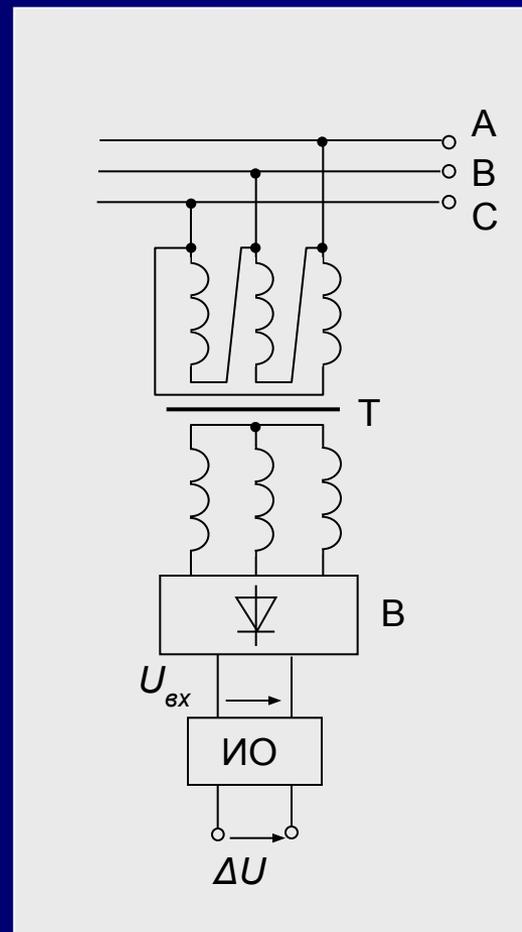


Схема включения измерительного органа на среднее линейное напряжение:



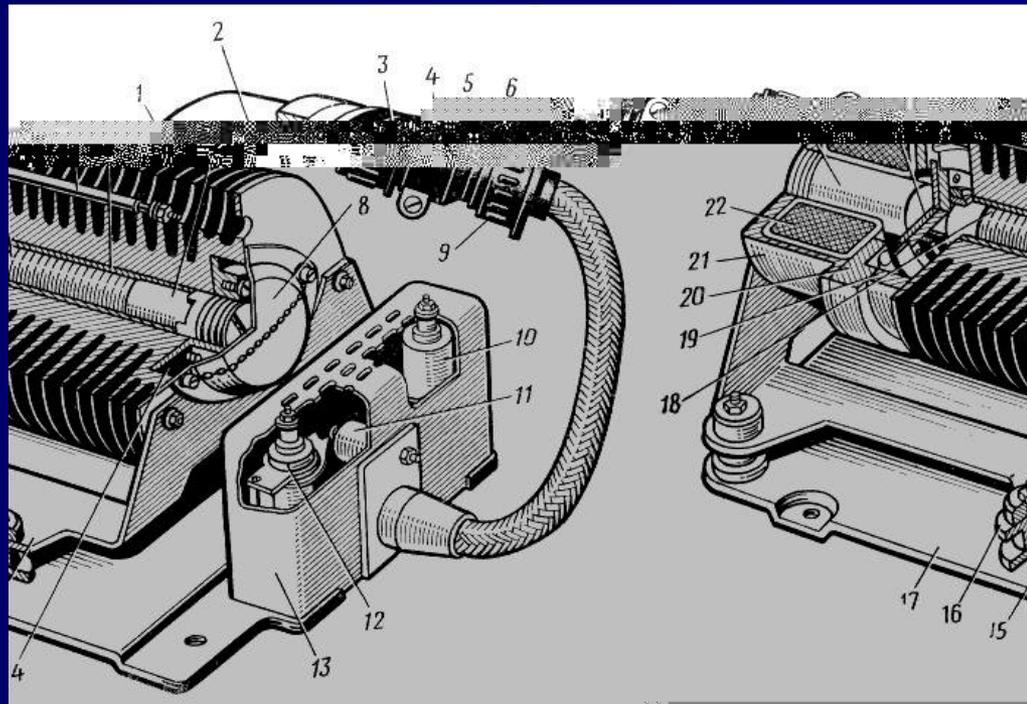
## 2.5. Регуляторы напряжения: классификация, конструкция и принцип действия

По типу исполнительного органа серийные регуляторы делятся на:

- угольные;
- на магнитных усилителях;
- транзисторные;
- тиристорные.

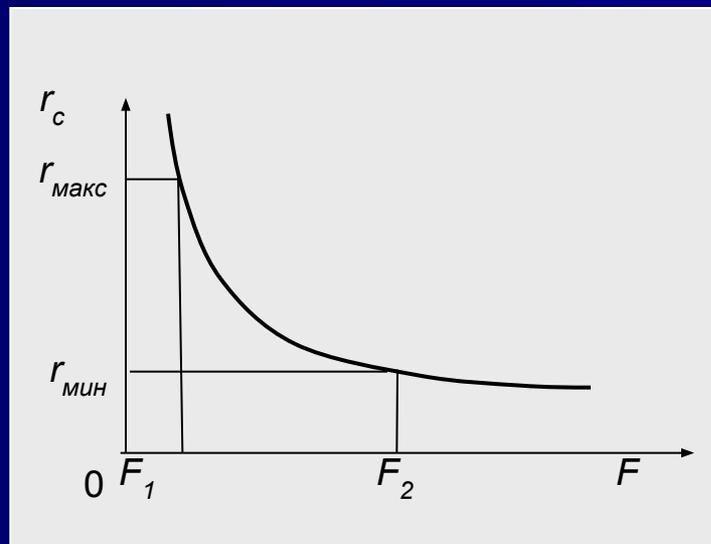
## 2.5.1 Угольные регуляторы напряжения

На рисунке представлена конструкция угольного регулятора напряжения РН-180:

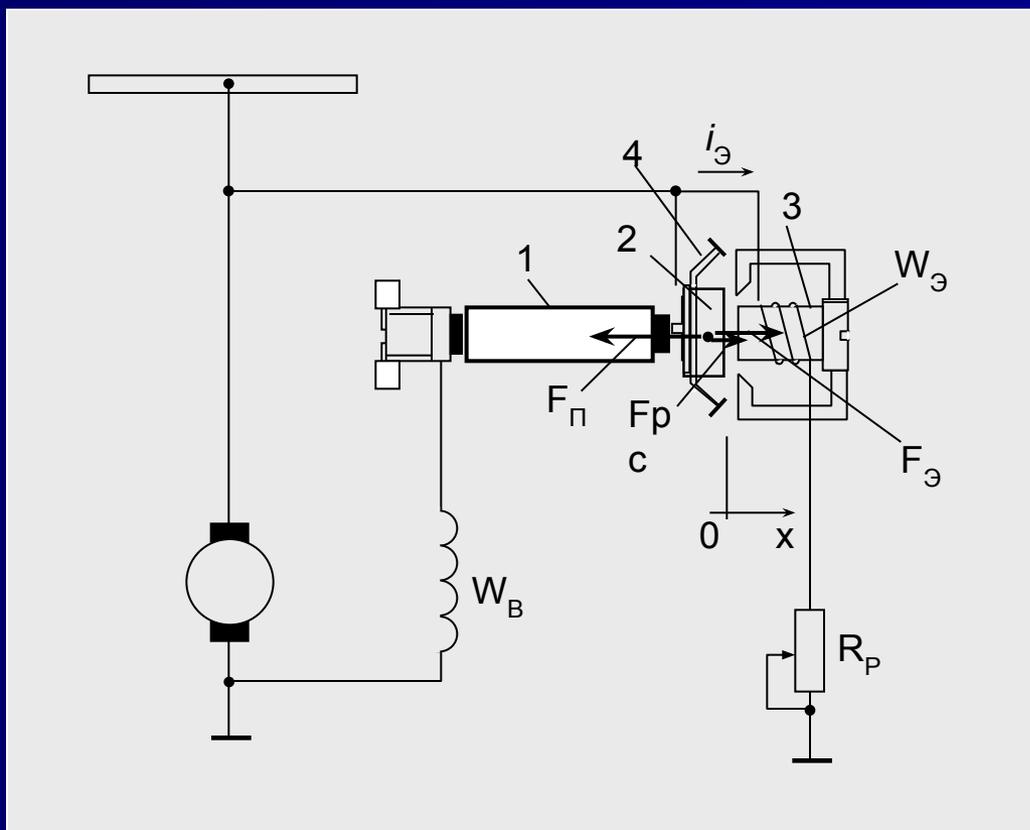


**1 - сердечник; 2 - якорь; 3 - угольный столб; 4 - корпус регулятора; 5 - шпилька; 6 - втулка; 7 - контакт; 8 - колпак; 9 - штепсельный разъем; 10 - сопротивление ПЭВ-20-24; 11 - сопротивление ПЭВ-2,5-75-1; 12 - подстроечный реостат РС-25; 13 - кожух; 14 - фланец; 15 - подставка; 16 - амортизатор; 17 - основание; 18 - шайба; 19 - теплоизолирующий экран; 20 - фасонное кольцо; 21 - корпус электромагнита; 22 - катушка**

Принцип действия угольных регуляторов напряжения основан на изменении сопротивления  $r_c$  угольного столба, набранного из тонких угольных шайб, при изменении силы его сжатия (см. рис.).



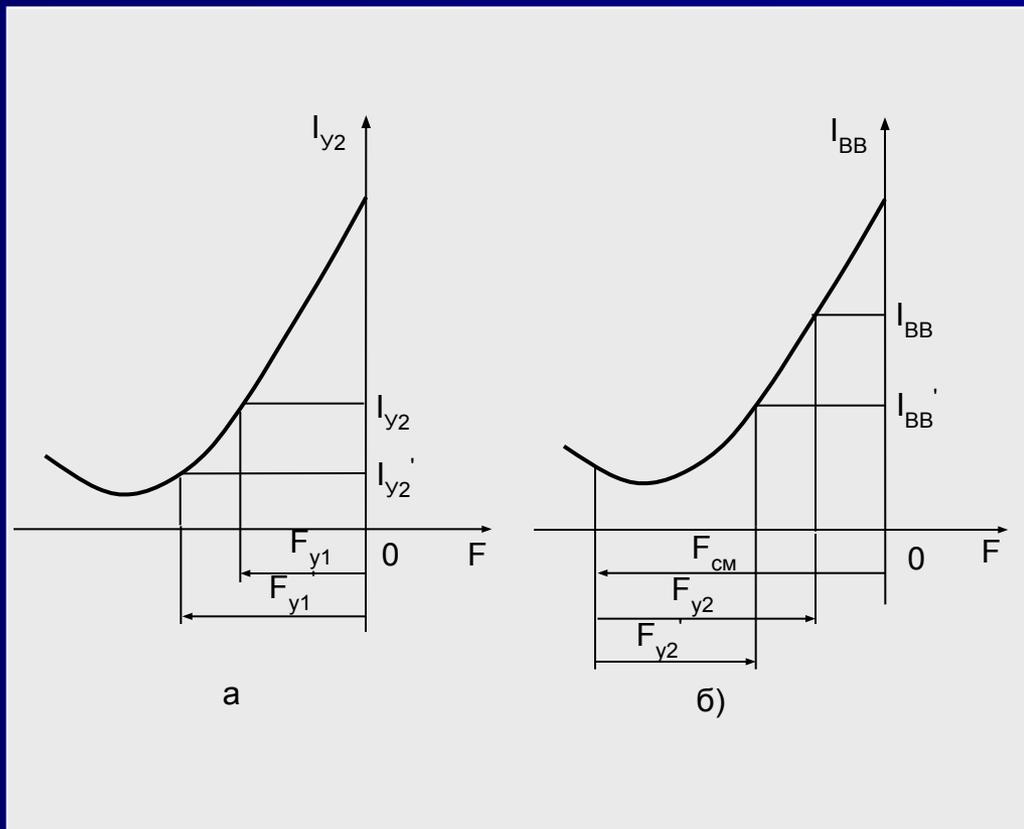
Принципиальная схема включения угольного регулятора напряжения представлена на рисунке:



**1 – угольный столб; 2 – подвижный якорь; 3 – электромагнит с обмоткой  $W_э$ ; 4 - пружина;  $F_э$  – сила электромагнита;  $F_п$  – сила пружины;  $F_р$  – сила реакции угольного столба;  $R_p$  – регулировочное сопротивление.**

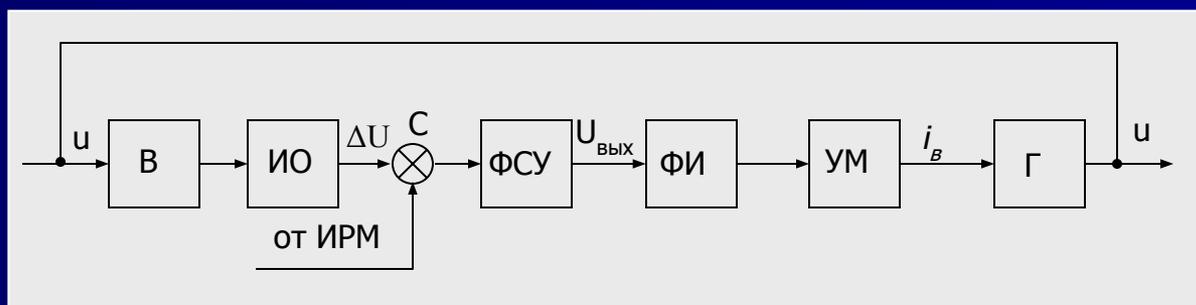


Рабочие характеристики магнитных усилителей:  
а) – первого каскада усиления, б) – второго каскада усиления



## 2.5.3 Тиристорный регулятор напряжения

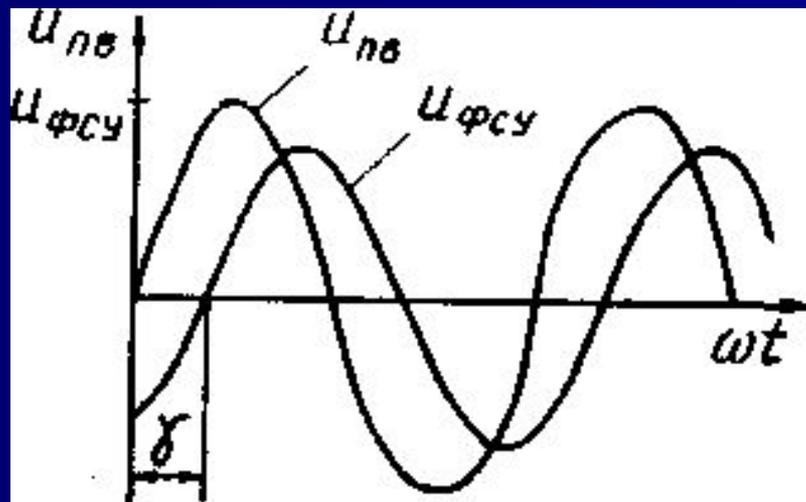
Тиристорные регуляторы напряжения относятся к классу фазоимпульсных и предназначены для использования в системах электроснабжения переменного тока с бесконтактными генераторами серии ГТ:



Регулируемое напряжение  $u$ , выпрямленное выпрямителем  $B$ , поступает на вход измерительного органа  $ИО$ , на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный разности регулируемого и эталонного напряжения:  $\Delta U = u - u_{\text{э}}$ .

В случае параллельной работы каналов на сумматоре **C** происходит сложение сигналов, поступающих от измерительного органа и блока измерения реактивной мощности **ИРМ**. При одиночной работе канала сигнал от блока ИРМ равен нулю.

Результирующий сигнал управления поступает на вход фазосдвигающего устройства **ФСУ**, осуществляющего сдвиг фазы его выходного напряжения  $U_{\text{фсу}}$  на угол  $\gamma$  по отношению фазы напряжения подвозбудителя  $U_{\text{пв}}$ . Величина угла  $\gamma$  определяется величиной сигнала управления **ФСУ**:



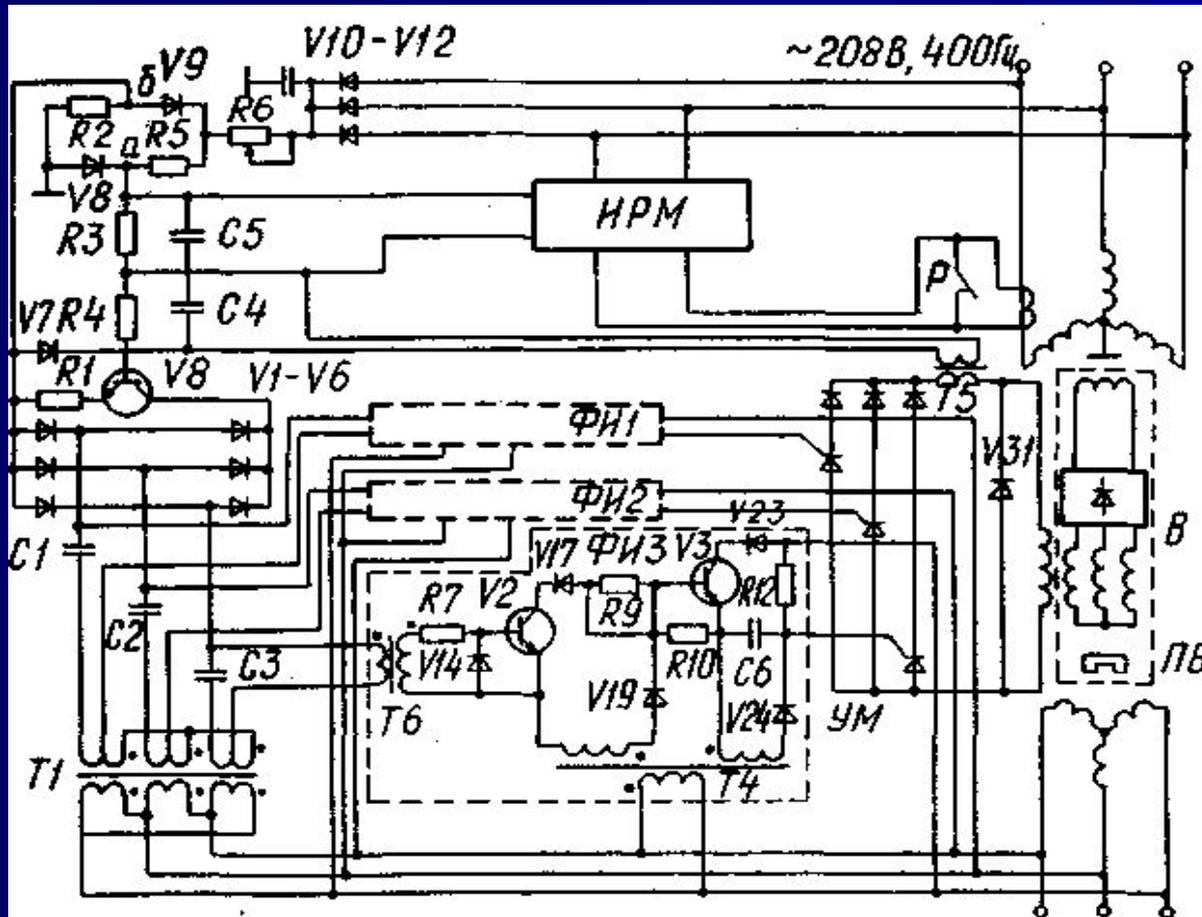
С выхода ФСУ трехфазное синусоидальное напряжение ифсу поступает на вход формирователя импульсов **ФИ**, начало следования которых определяется углом  $\gamma$ . Эти импульсы управляют работой усилителя мощности **УМ**.

Таким образом, величина напряжения на обмотке возбуждения генератора (возбудителя) при фазоимпульсном регулировании будет определяться выражением:

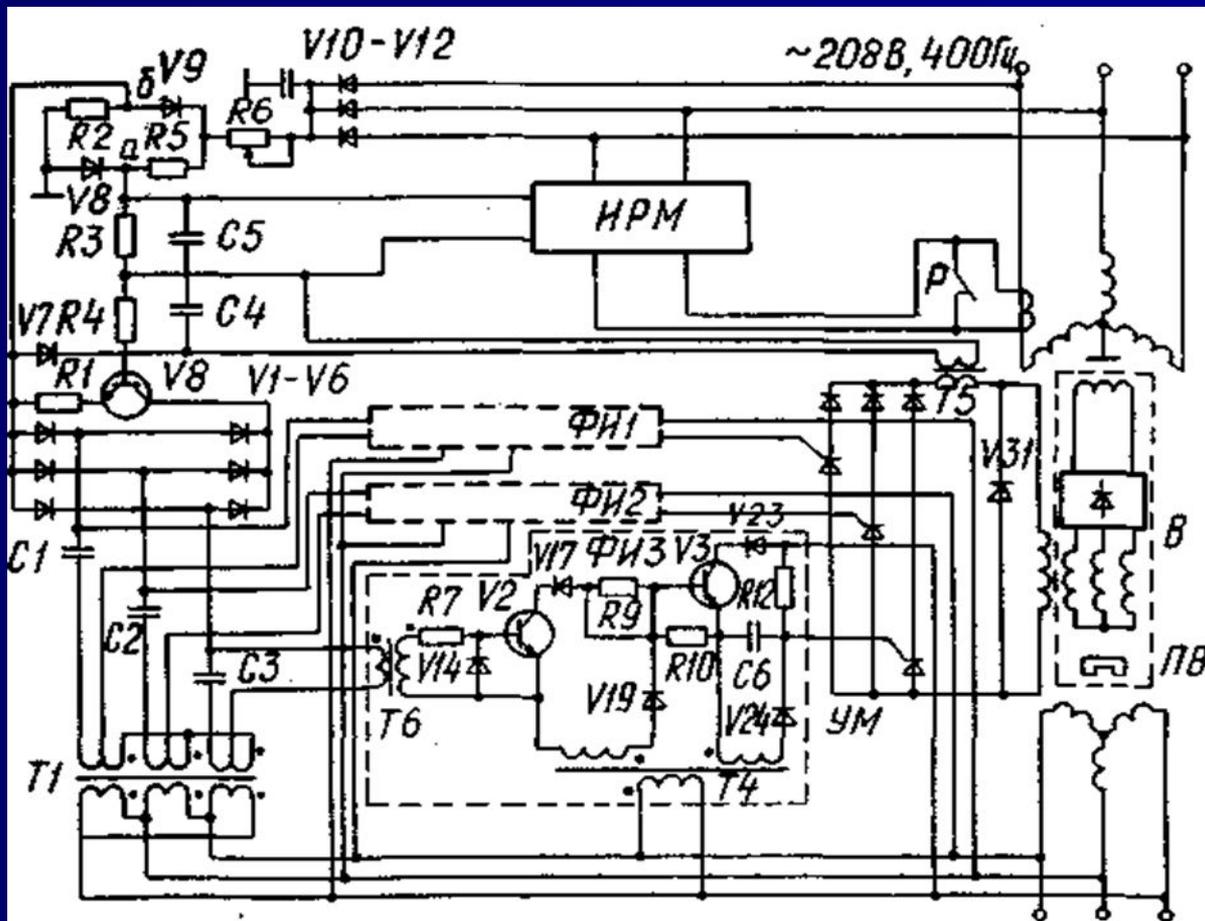
$$U_B = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma}^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \gamma),$$

где **Um** - амплитудная величина напряжения питания;  
 **$\gamma$**  - угол открытия тиристора.

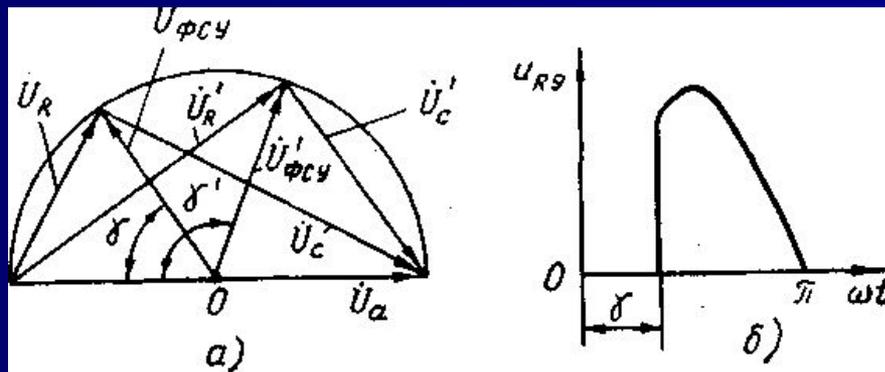
Принципиальная электрическая схема рассматриваемого тиристорного регулятора напряжения приведена на рисунке. Измерительный орган регулятора выполнен по мостовой схеме, плечами которого служат резисторы **R2, R5** и стабилитроны **V8, V9**. Он включен на среднее напряжение фаз генератора через однополупериодный выпрямитель, собранный на диодах **V10...V12**. На резисторах **R3, R4** измерительного органа происходит суммирование сигналов от **ИРМ** и гибкой обратной связи по току возбуждения возбудителя (трансформатор **T5**).



Фазосдвигающее устройство включено через понижающий трансформатор **T1** на напряжение подвозбудителя. Оно включает в свой состав конденсаторы **C1**, **C2** и **C3**, двухполупериодный трехфазный выпрямитель на диодах **V1...V6**, транзистор **V8** и резистор **R1**. Транзистор **V8** работает в режиме управляемого резистора, сопротивление которого определяется разностью потенциалов точек «а» и «б» схемы измерительного органа.

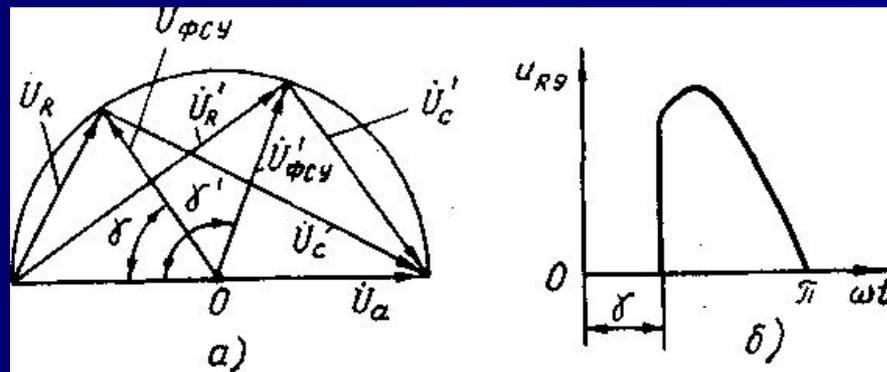


Для пояснения принципа действия **ФСУ** на рисунке приведена векторная диаграмма напряжений для одной из его фаз:



Положение вектора выходного напряжения  **$U_{\phi\text{су}}$**  относительно вектора напряжения  **$U_a$**  подвозбудителя определяется величиной активного сопротивления **ФСУ**. В случае, например, повышения напряжения генератора относительно заданного уровня возрастает потенциал точки «б» измерительного органа, а потенциал его точки «а» остается постоянным. Это приводит к увеличению сопротивления транзистора  **$V\delta$** , росту падения напряжения на активном сопротивлении ( **$U_R' > U_R$** ) и повороту вектора  **$U_{\phi\text{су}}$**  по часовой стрелке ( **$\gamma' > \gamma$** ).

Формирователь импульсов *ФИ* представляет собой фазочувствительный импульсный усилитель на транзисторах **V2** и **V3**.

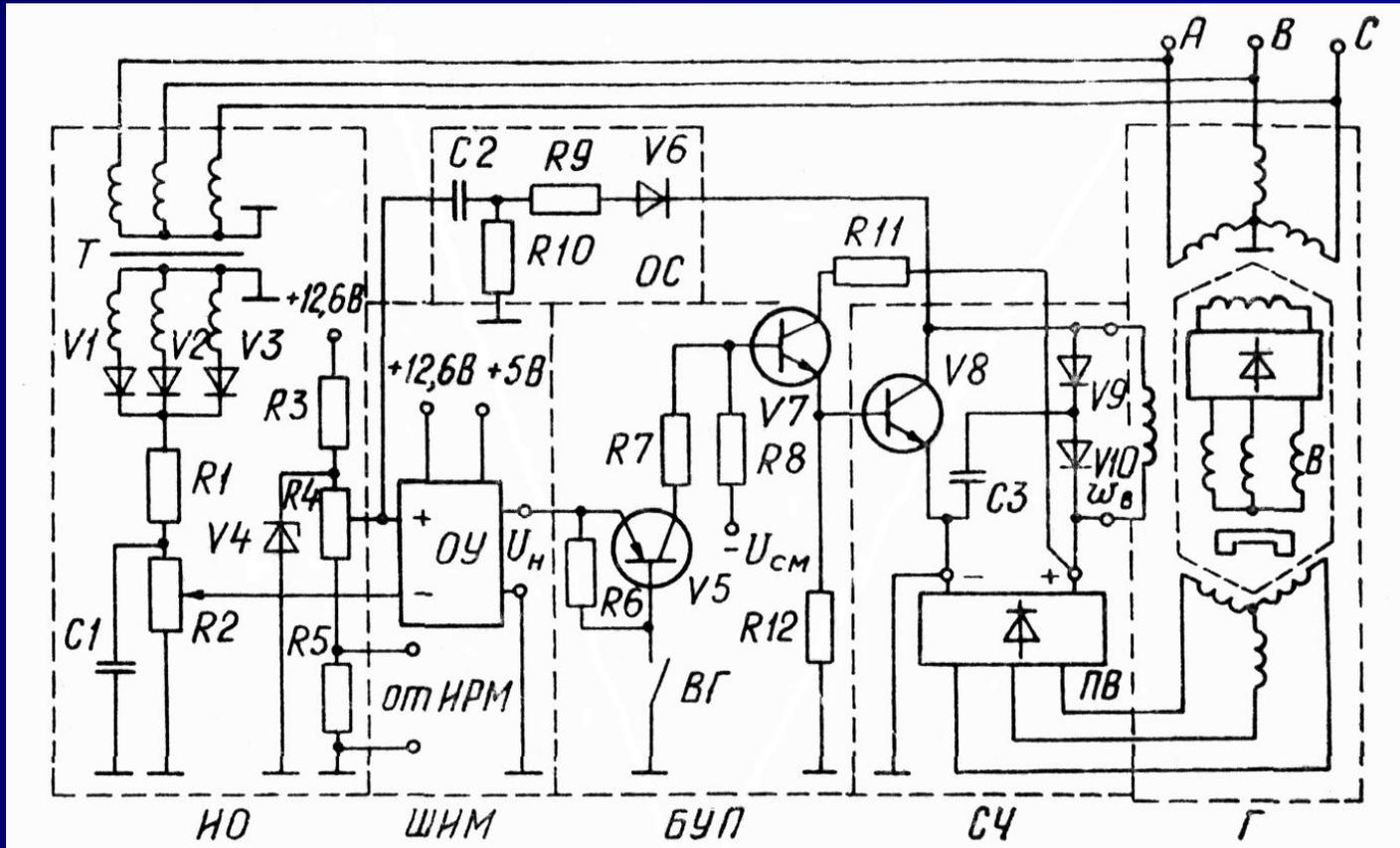


Так как напряжение на входе *ФИ* сдвинуто на угол  $\gamma$  по отношению к напряжению соответствующей фазы подвозбудителя, то транзистор *V2* открывается в момент времени, равный  $\omega t = \gamma$ . Характер кривой падения напряжения на резисторе *R9* при открытии транзистора *V2* показан на рис. 4.28,б. Это напряжение используется для управления транзистором *V3*, формирующим импульсы напряжения для открытия соответствующего тиристора усилителя мощности *УМ*.



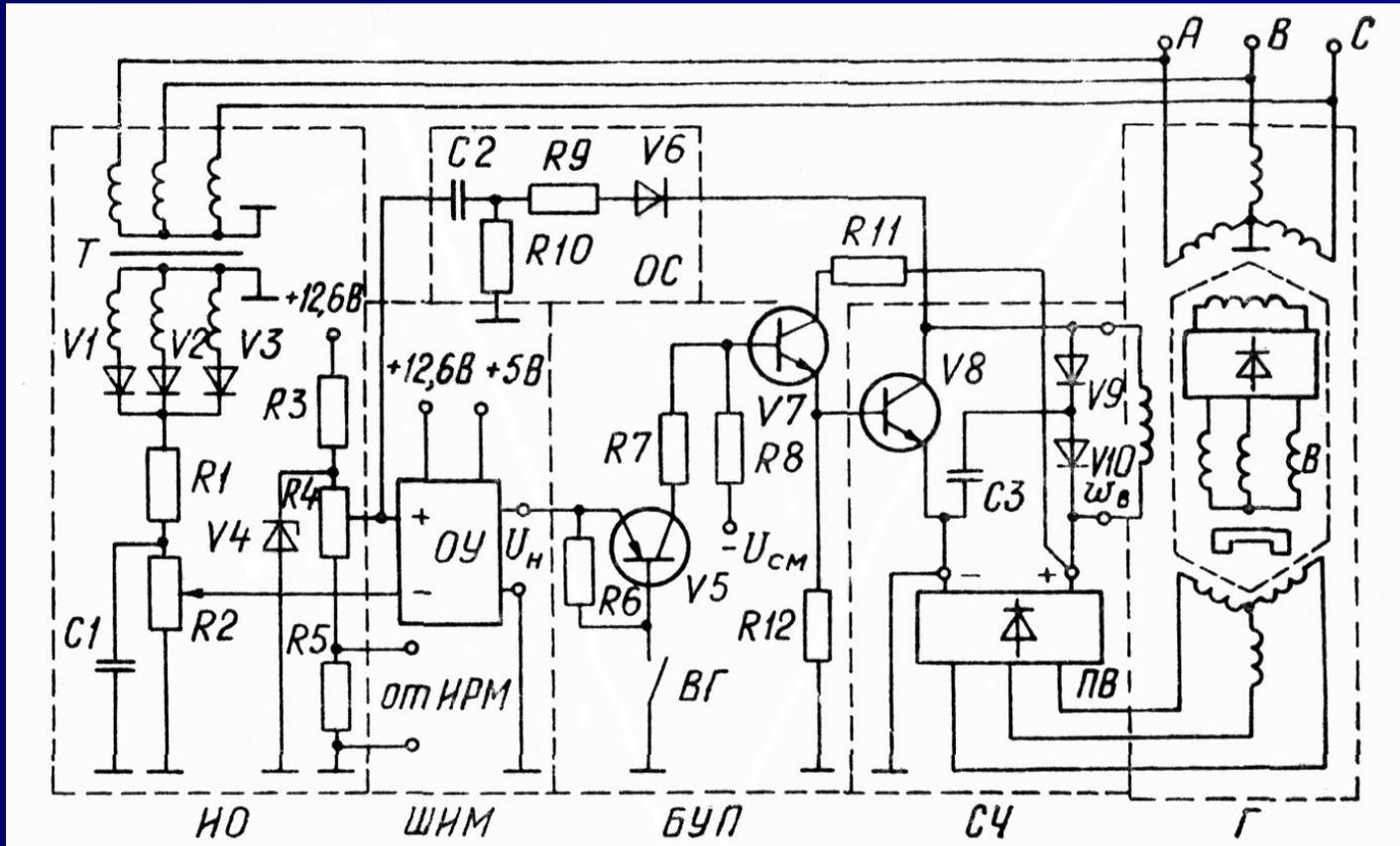
## 2.5.4 Транзисторный регулятор напряжения

Принципиальная электрическая схема транзисторного регулятора напряжения, предназначенного для работы с бесконтактными генераторами переменного тока типа Г, приведена на рисунке. Основными его элементами являются: измерительный орган ИО, широтно-импульсный модулятор ШИМ, блок предварительного усиления БУП и силовая часть СЧ:



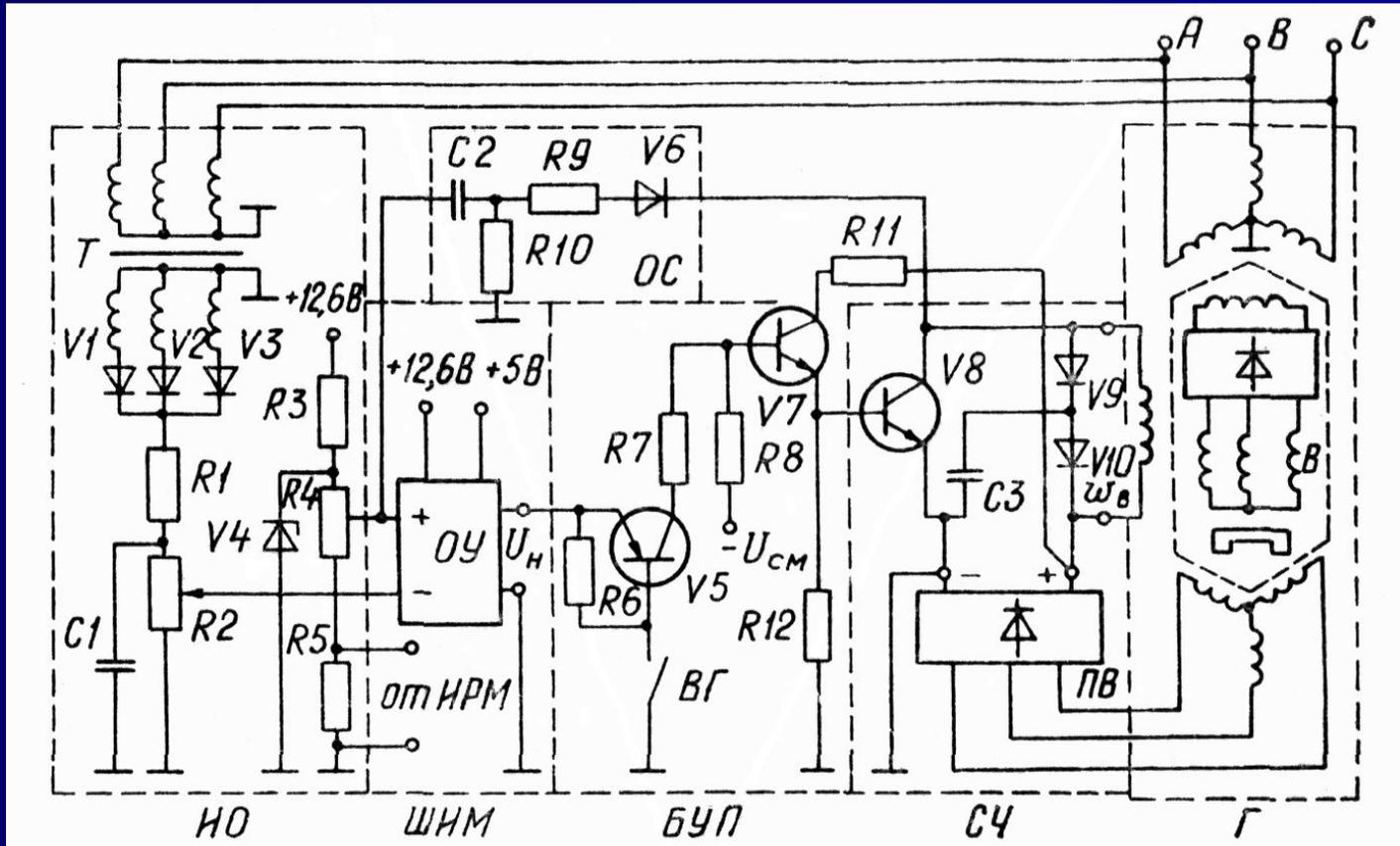
Измерительный орган регулятора включен на линейное напряжение генератора через понижающий трансформатор Т и трехфазный однополупериодный выпрямитель на диодах V1...V3.

Нагрузкой выпрямителя являются последовательно включенные резисторы R1 и R2, причем величину сопротивления резистора R2 выбирают существенно больше сопротивления резистора R1:



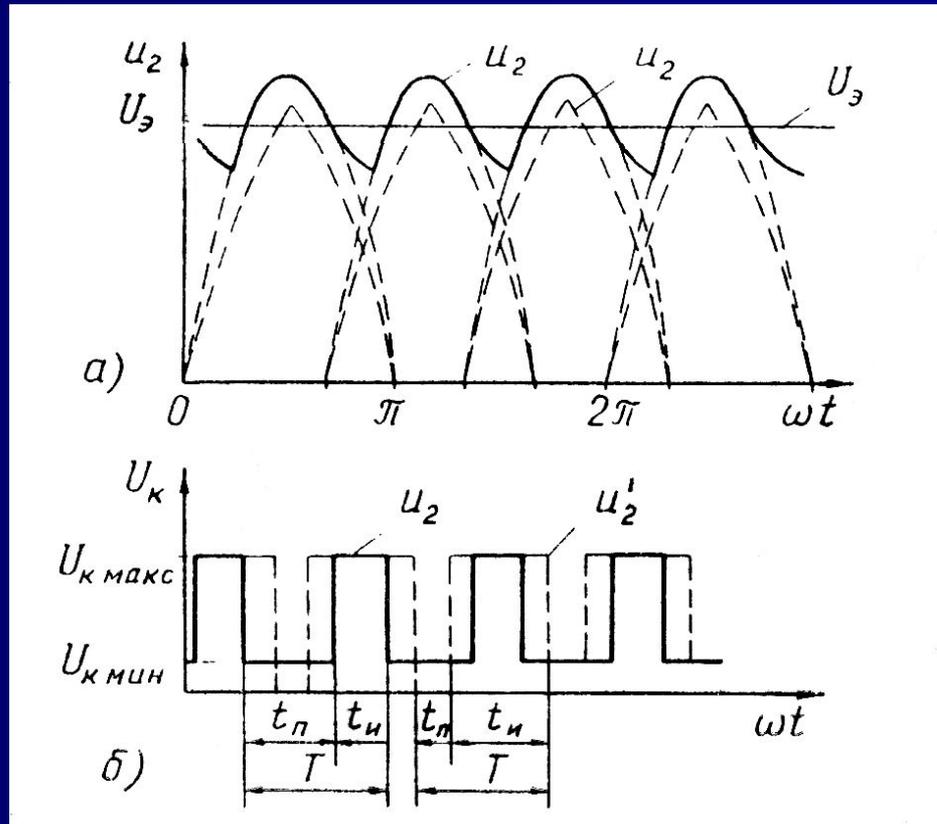
Для сглаживания выпрямленного напряжения  $u_2$  генератора параллельно резистору  $R_2$  включен конденсатор  $C_1$ .

Выпрямленное напряжение  $u_2$ , имеющее пульсирующую форму, и эталонное напряжение  $U_э$  стабилитрона  $V_4$ , снимаемое с потенциометра  $R_4$ , поступают на входные зажимы широтно-импульсного модулятора ШИМ. В качестве ШИМ используется операционный усилитель  $OY$ , работающий в режиме компаратора:



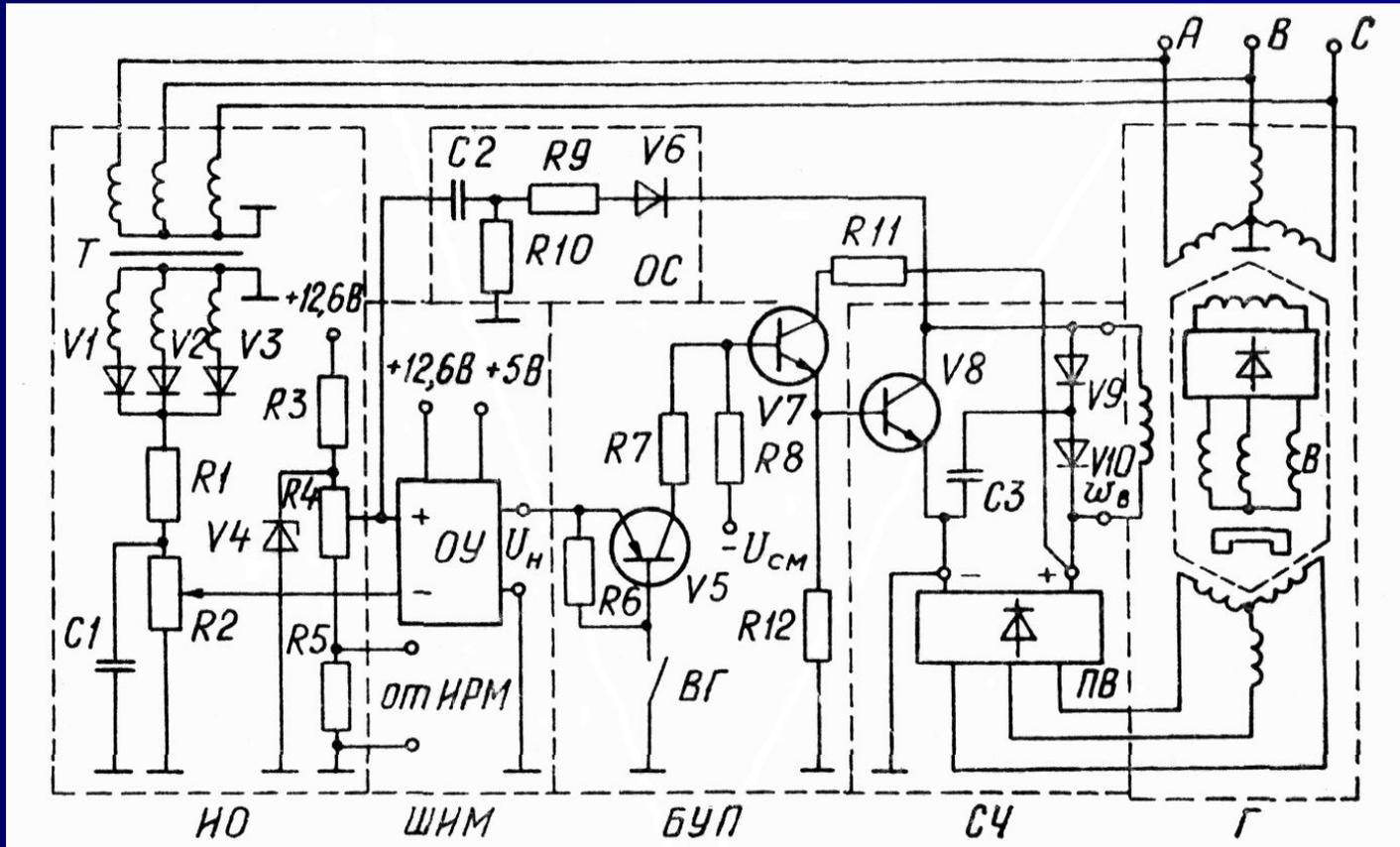
Компаратор осуществляет переключение уровня выходного напряжения  $U_k$ , когда непрерывно изменяющийся во времени входной сигнал  $u_2$  становится выше или ниже эталонного  $U_3$  (рисунок **а**). В случае, если  $u_2 > U_3$ , то выходной сигнал компаратора равен  $U_k$  мин, а если  $u_2 < U_3$ , то  $U_k$  макс (рисунок **б**).

При понижении измеряемого напряжения длительность импульсов  $t_i$ , формируемых компаратором, увеличивается (рисунок **б**).



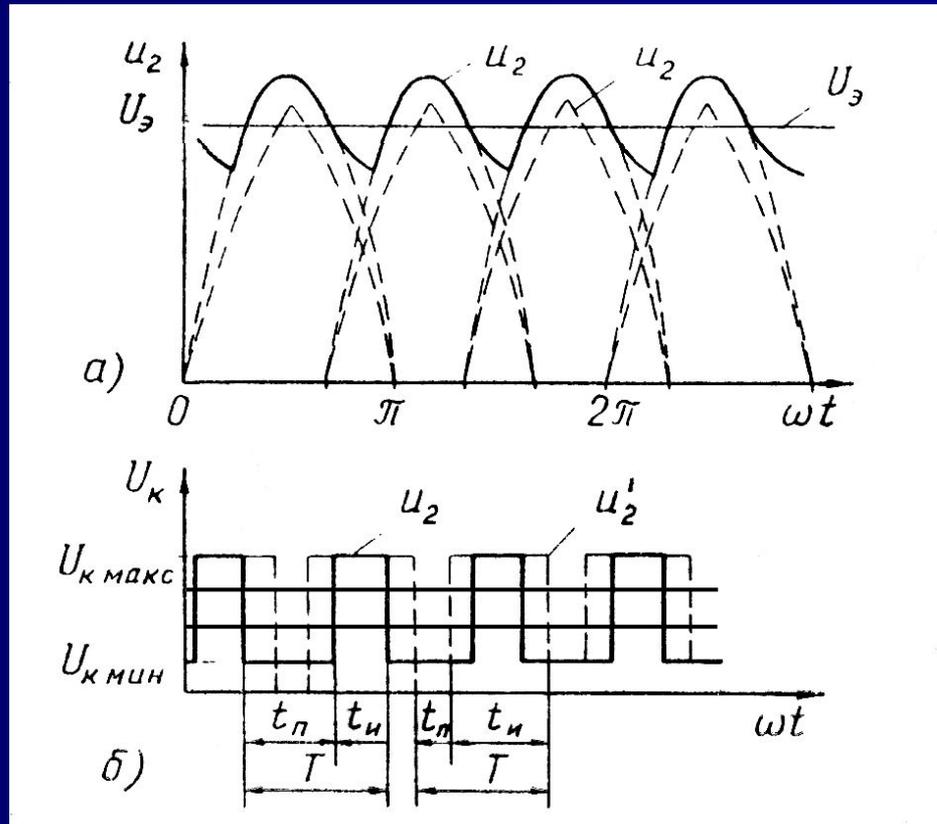
Управляющие импульсы компаратора при включенном выключателе ВГ цепи возбуждения генератора открывают вспомогательные транзисторы V5 и V7 блока БУП. Для надежного запираания транзистора V7 в интервалах времени между окончанием одного и началом следующего импульсов на его базу через резистор R8 подано отрицательное напряжение смещения  $U_{см}$ .

Открытие транзистора V7 приводит к открытию силового транзистора V8 исполнительного устройства СЧ регулятора:



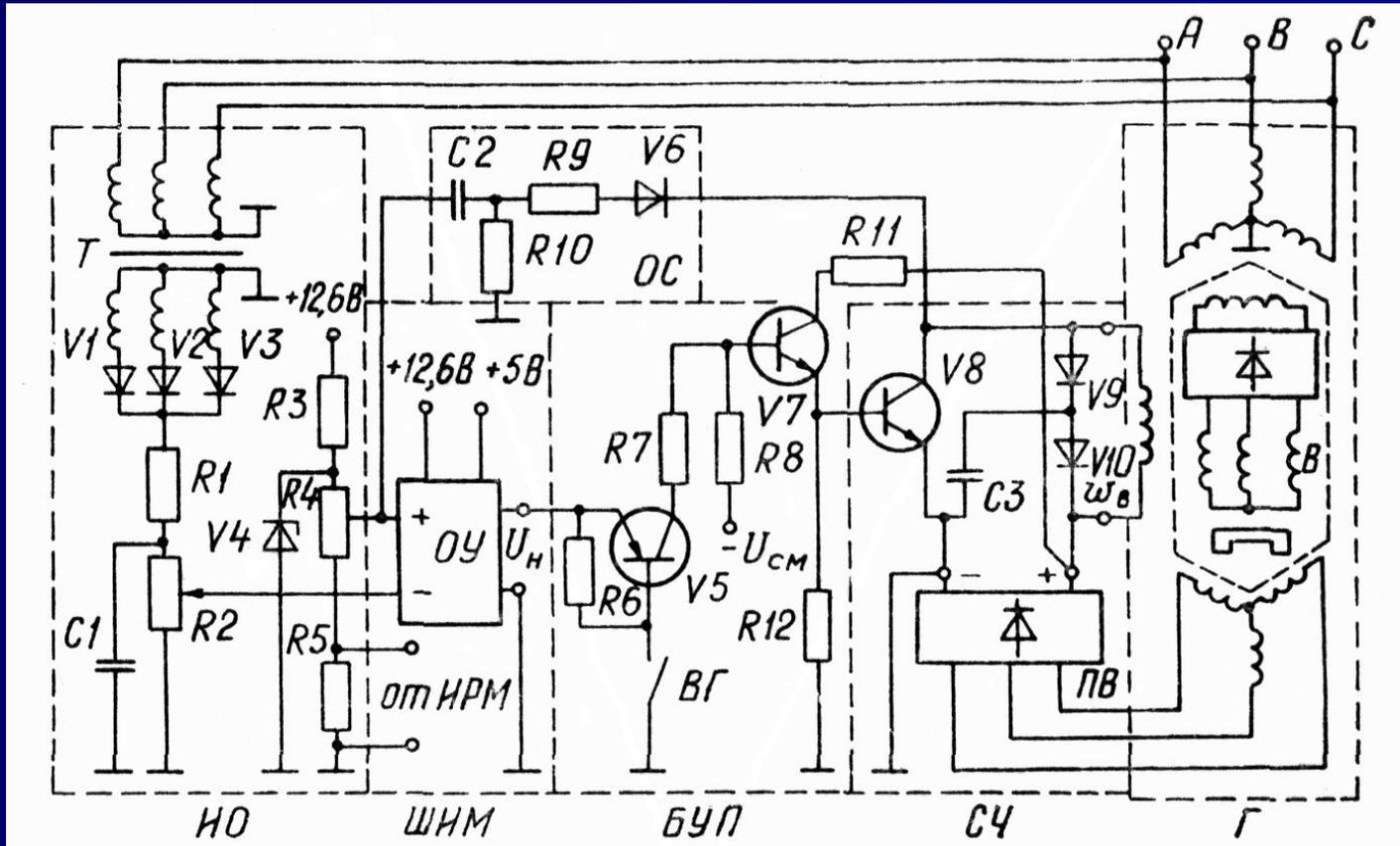
Например, в случае уменьшения напряжения генератора увеличивается длительность импульсов ти компаратора и, следовательно, увеличивается время открытого состояния транзистора V8, что в итоге приводит к возрастанию величины регулируемого напряжения:

$$U_B = \frac{1}{T} \int_0^t U dt = \frac{t_u}{T} U$$

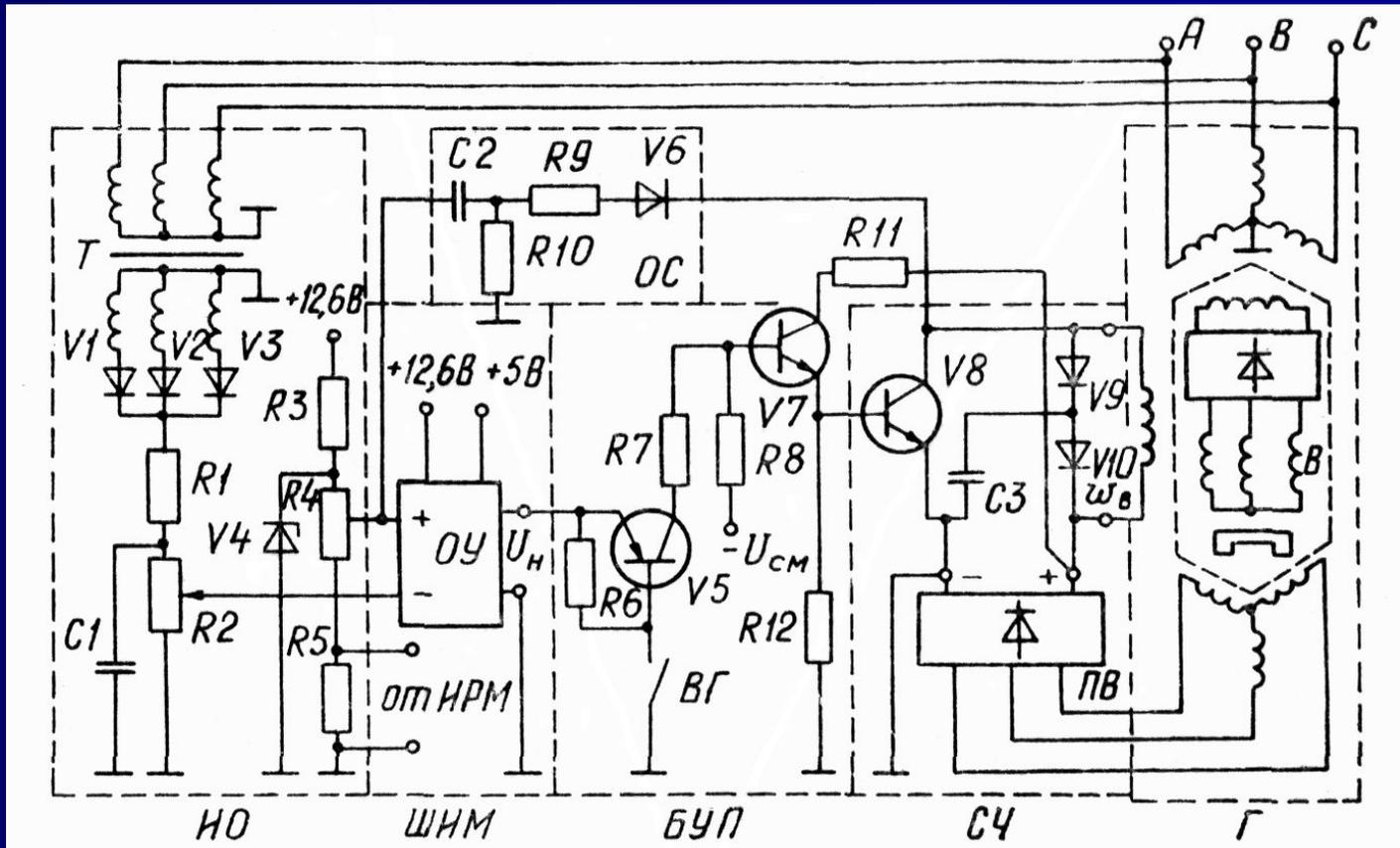


Для обеспечения непрерывности протекания тока в обмотке возбуждения  $\omega_{\text{ВВ}}$  возбудителя генератора, когда силовой транзистор V8 закрыт, параллельно этой обмотке включены диоды V9 и V10.

Улучшение динамических характеристик регулятора достигается путем применения отрицательной обратной связи ОС, элементами которой служат конденсатор C2, резисторы R9, R10 и диод V6. При открытии силового транзистора V8 конденсатор C2 начинает разряжаться, понижая потенциал одного из входов компаратора. В итоге это приводит к изменению длительности  $t_{\text{и}}$  его импульсов.



В случае, если регуляторы используются в СЭС с параллельно работающими каналами, сигнал от измерителя реактивной мощности ИРМ, пропорциональный отклонению реактивной составляющей тока данного генератора от среднего значения реактивных составляющих токов, приходящегося на один генератор, суммируется с сигналом ИО на резисторе R5.



Транзисторные регуляторы как элементы систем регулирования напряжения обладают существенно меньшим запаздыванием по сравнению с инерционностью генераторов и по своим динамическим свойствам могут быть отнесены к усилительным звеньям. В связи с этим уравнение транзисторного регулятора напряжения обычно Представляют в виде

$$u_v = -k_{p_i} \cdot k_{p_r} \cdot u_{in}$$

где  $k_{p_r}$  - коэффициент усиления регулятора.

