

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:

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

В процессе работы генератора величины n и $I_{\text{я}}$ 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 Φ .

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

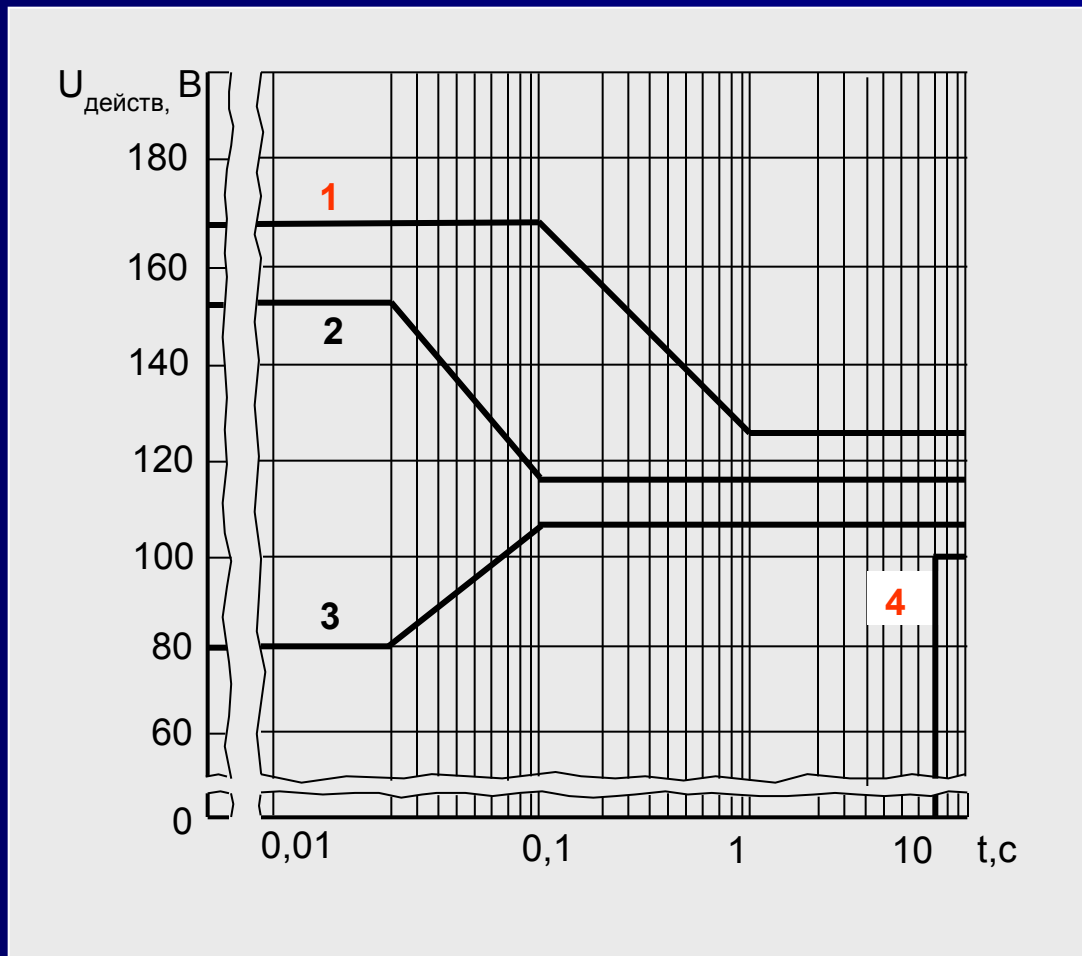
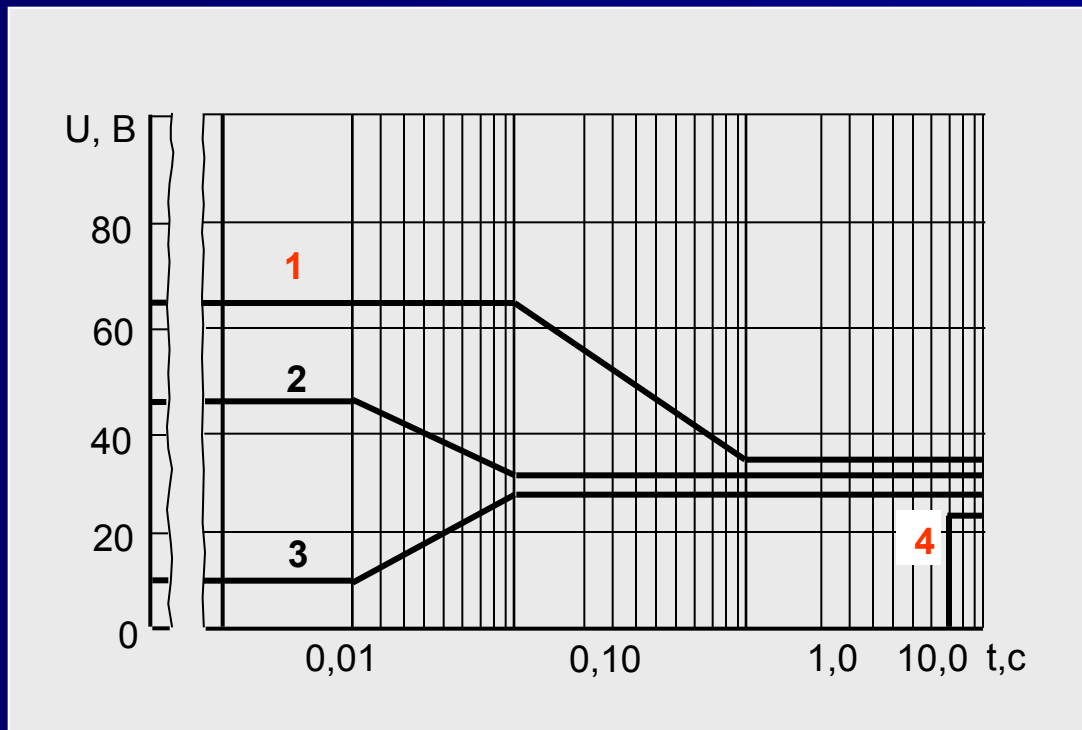


Рис.2.2. Пределы значений приведенных переходных напряжений постоянного тока



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.

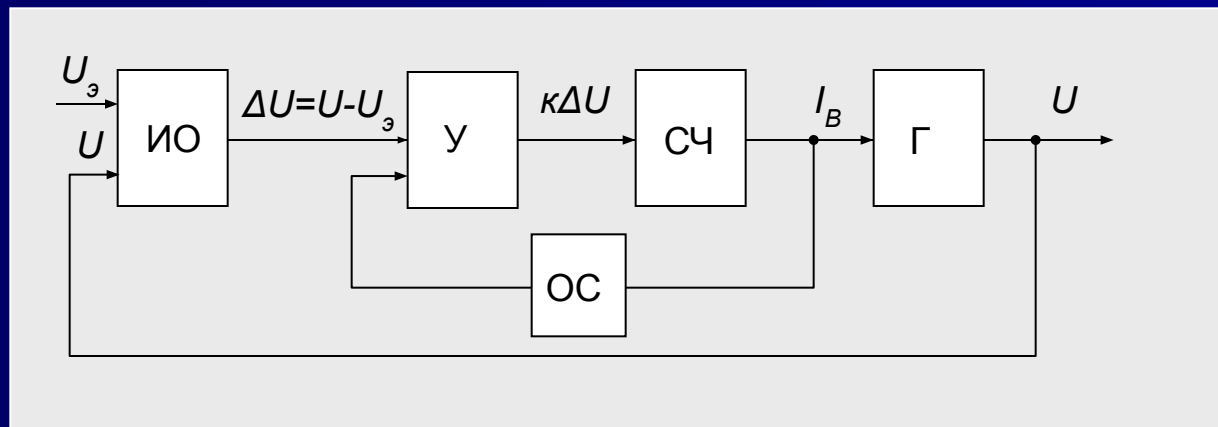
Коэффициент пульсаций напряжения постоянного тока не должен превышать $k_n < 7,4\%$.

2.3. Принципы построения систем регулирования напряжения

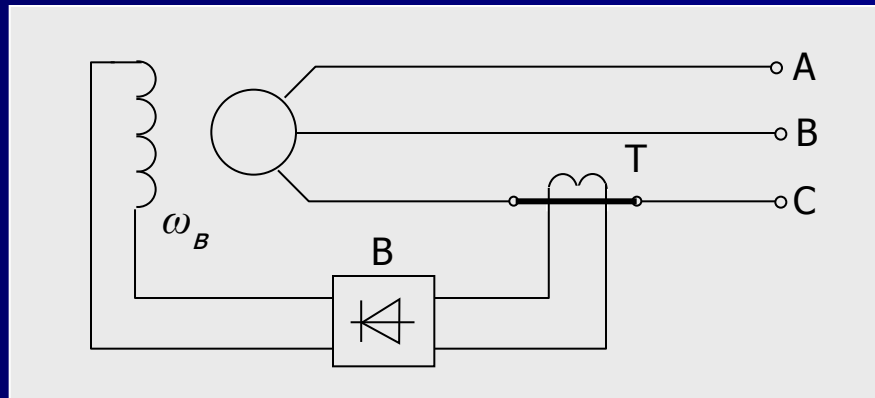
Построение системы регулирования напряжения возможно по следующим принципам:

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

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



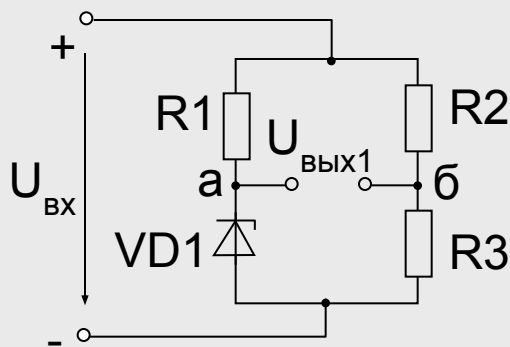
На рисунке представлена структурная схема, поясняющая принцип действия системы регулирования напряжения «**по возмущению**» (токового компаундирования):



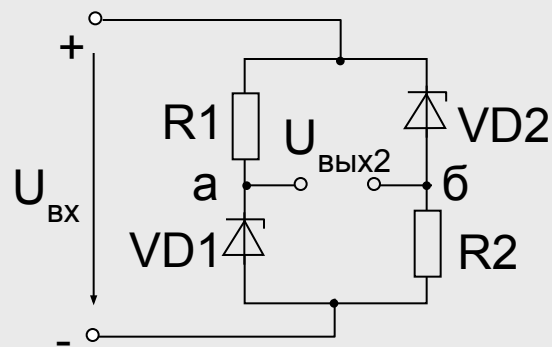
Системы регулирования напряжения, объединяющие оба выше приведенных способа регулирования называются «**комбинированными**».

2.4. Измерительные органы регуляторов напряжения

Мостовые схемы измерительных органов на стабилитронах и их выходные характеристики:



а)



б)

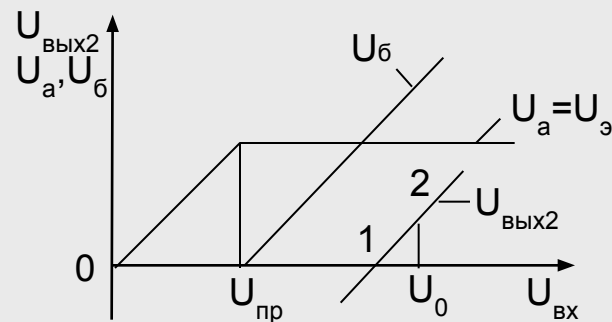
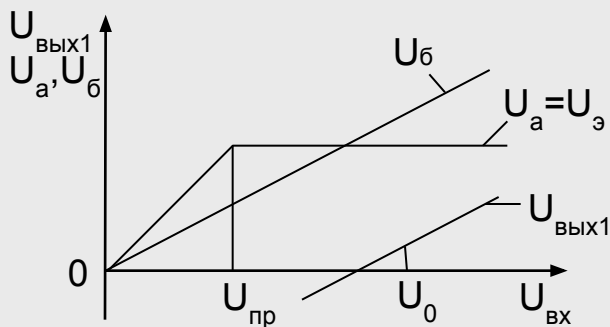
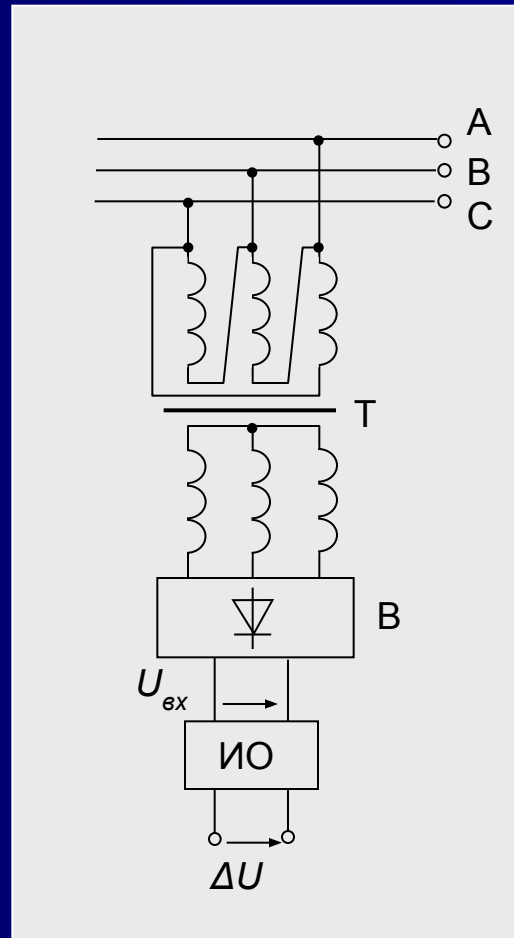


Схема включения измерительного органа на среднее линейное напряжение:



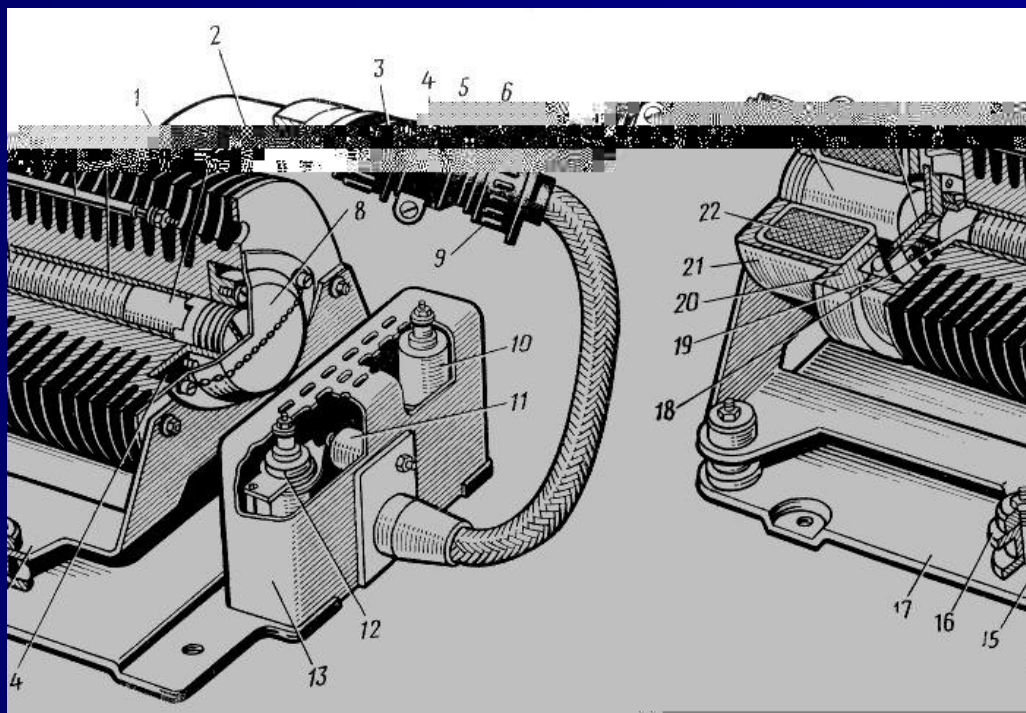
2.5. Регуляторы напряжения: классификация, конструкция и принцип действия

По типу исполнительного органа серийные регуляторы делятся на:

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

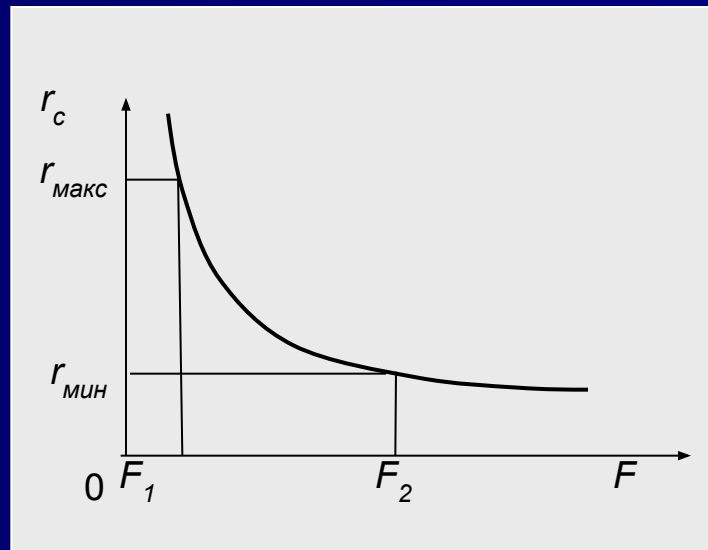
2.5.1 Угольные регуляторы напряжения

На рисунке представлена конструкция угольного регулятора напряжения РН-180:

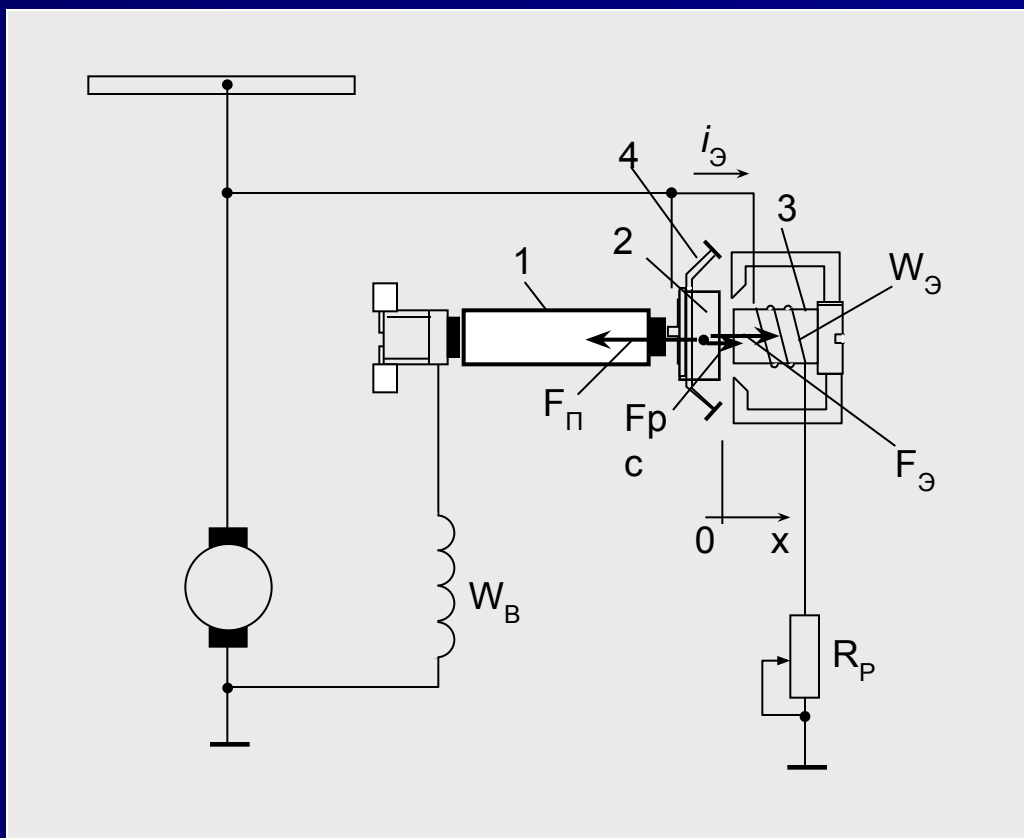


1 - сердечник; 2 - якорь; 3 - угольный столб; 4 - корпус регулятора; 5 - шпилька; 6 - втулка; 7 - контакт; 8 - колпак; 9 - штепсельный разъем; 10 - сопротивление ПЭВ-20-24; 11 - сопротивление ПЭВ-2,5-75-1; 12 - подстроечный реостат РС-25; 13 - кожух; 14 - фланец; 15 - подставка; 16 - амортизатор; 17 - 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.).

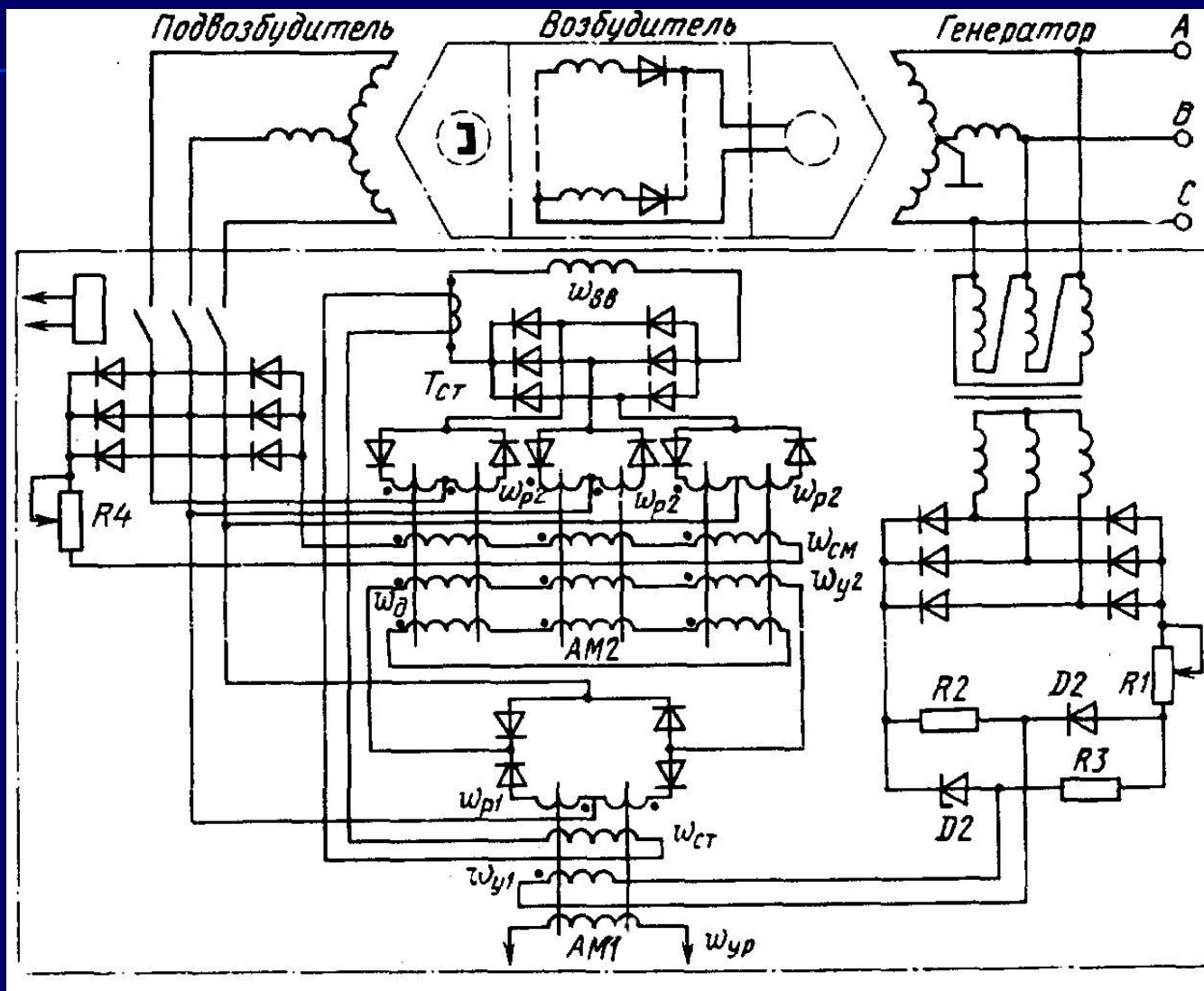


Принципиальная схема включения угольного регулятора напряжения представлена на рисунке:

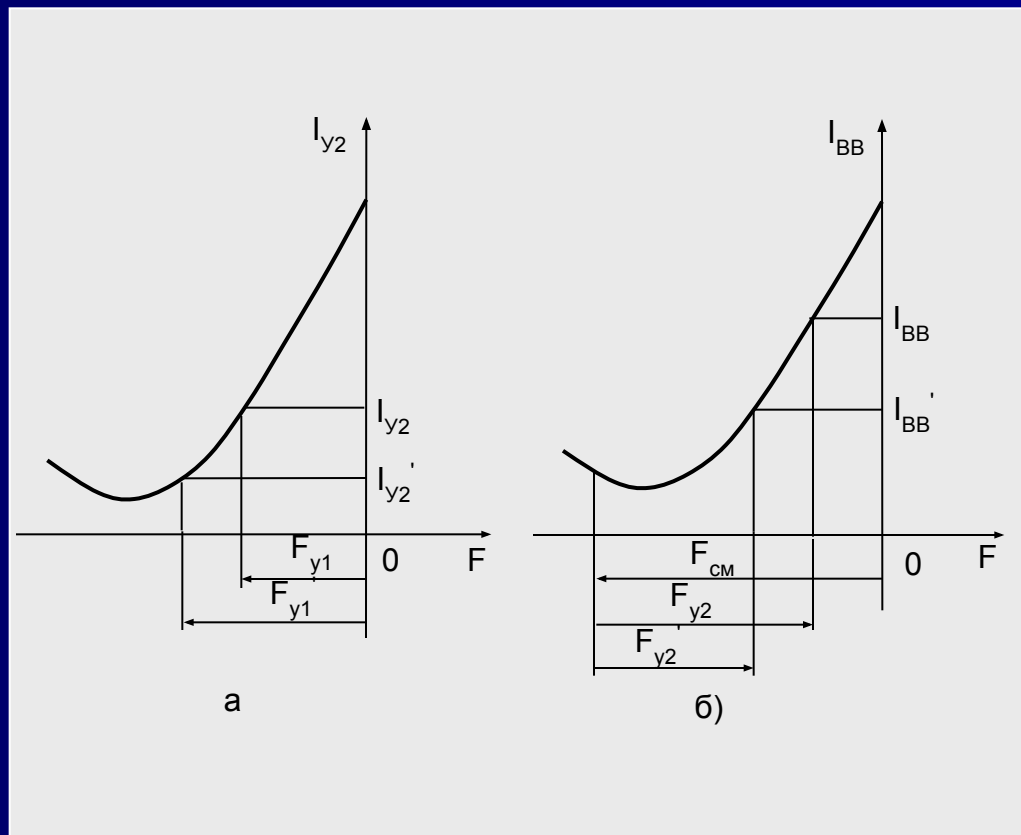


1 – угольный столб; 2 – подвижный якорь; 3 – электромагнит с обмоткой $W_{\text{э}}$; 4 - пружина; $F_{\text{э}}$ – сила электромагнита; $F_{\text{п}}$ – сила пружины; $F_{\text{р}}$ – сила реакции угольного столба; $R_{\text{р}}$ – регулировочное сопротивление.

2.5.2 Регуляторы напряжения на магнитных усилителях

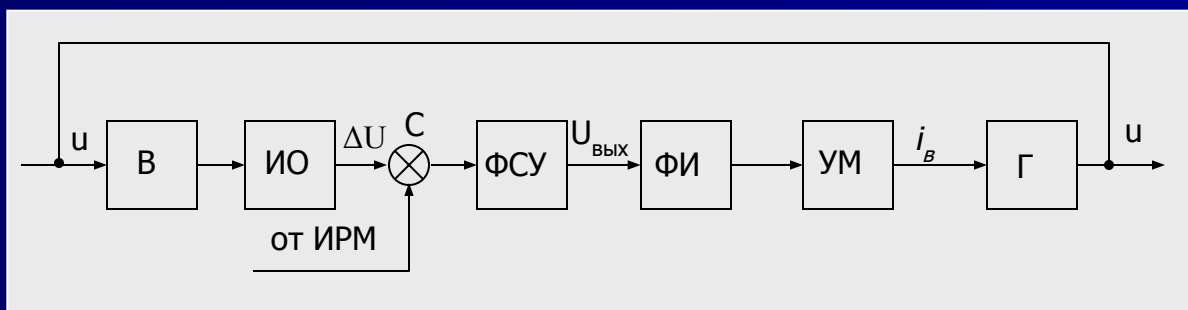


Рабочие характеристики магнитных усилителей:
а) – первого каскада усиления, б) – второго каскада усиления



2.5.3 Тиристорный регулятор напряжения

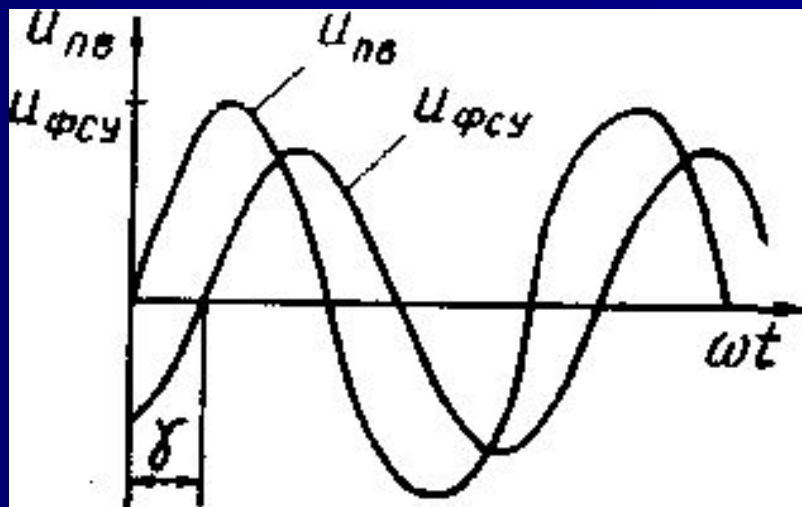
Тиристорные регуляторы напряжения относятся к классу фазоимпульсных и предназначены для использования в системах электроснабжения переменного тока с бесконтактными генераторами серии ГТ:



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

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 γ по отношению фазы напряжения подвозбудителя $U_{\text{пв}}$. Величина угла γ определяется величиной сигнала управления **ФСУ**:



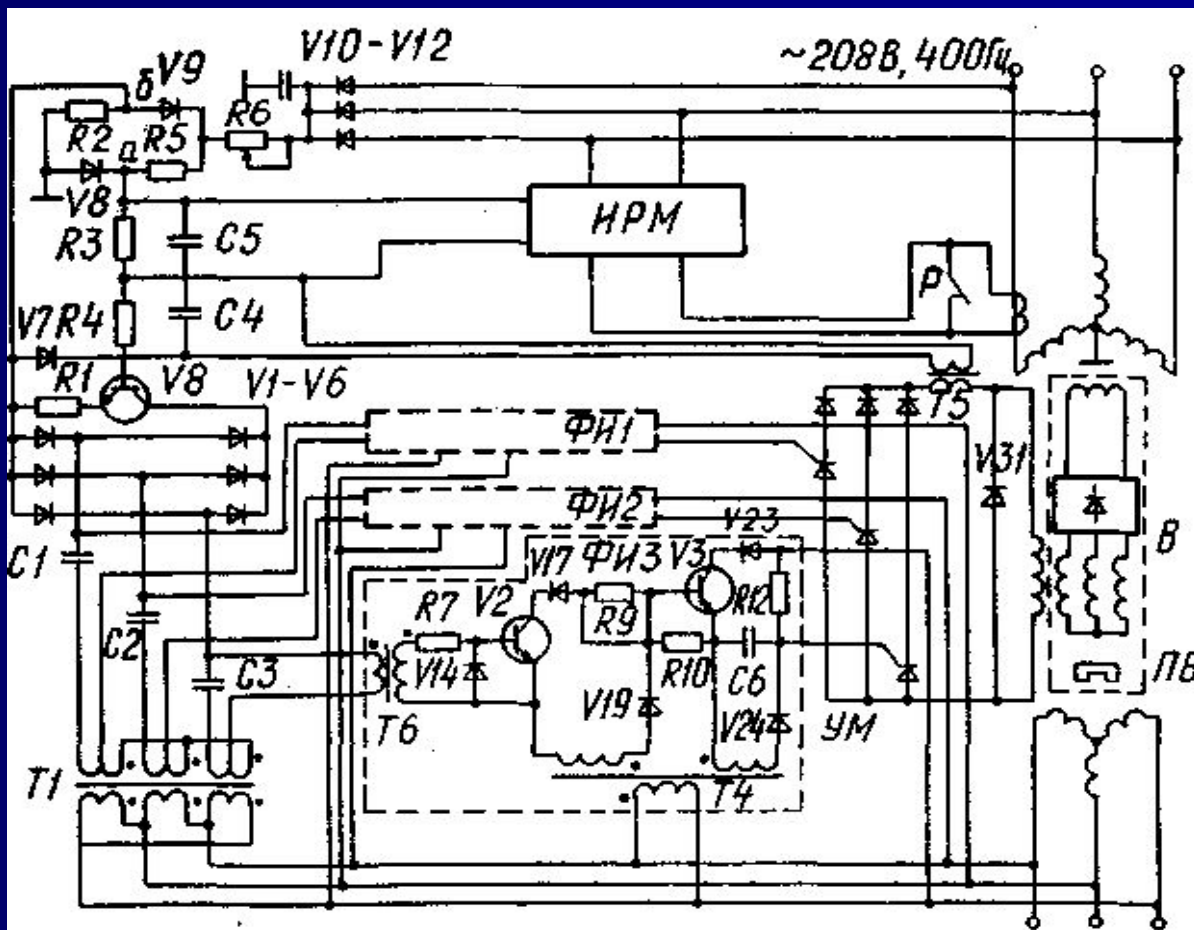
С выхода ФСУ трехфазное синусоидальное напряжение ифсу поступает на вход формирователя импульсов **ФИ**, начало следования которых определяется углом γ . Эти импульсы управляют работой усилителя мощности **УМ**.

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

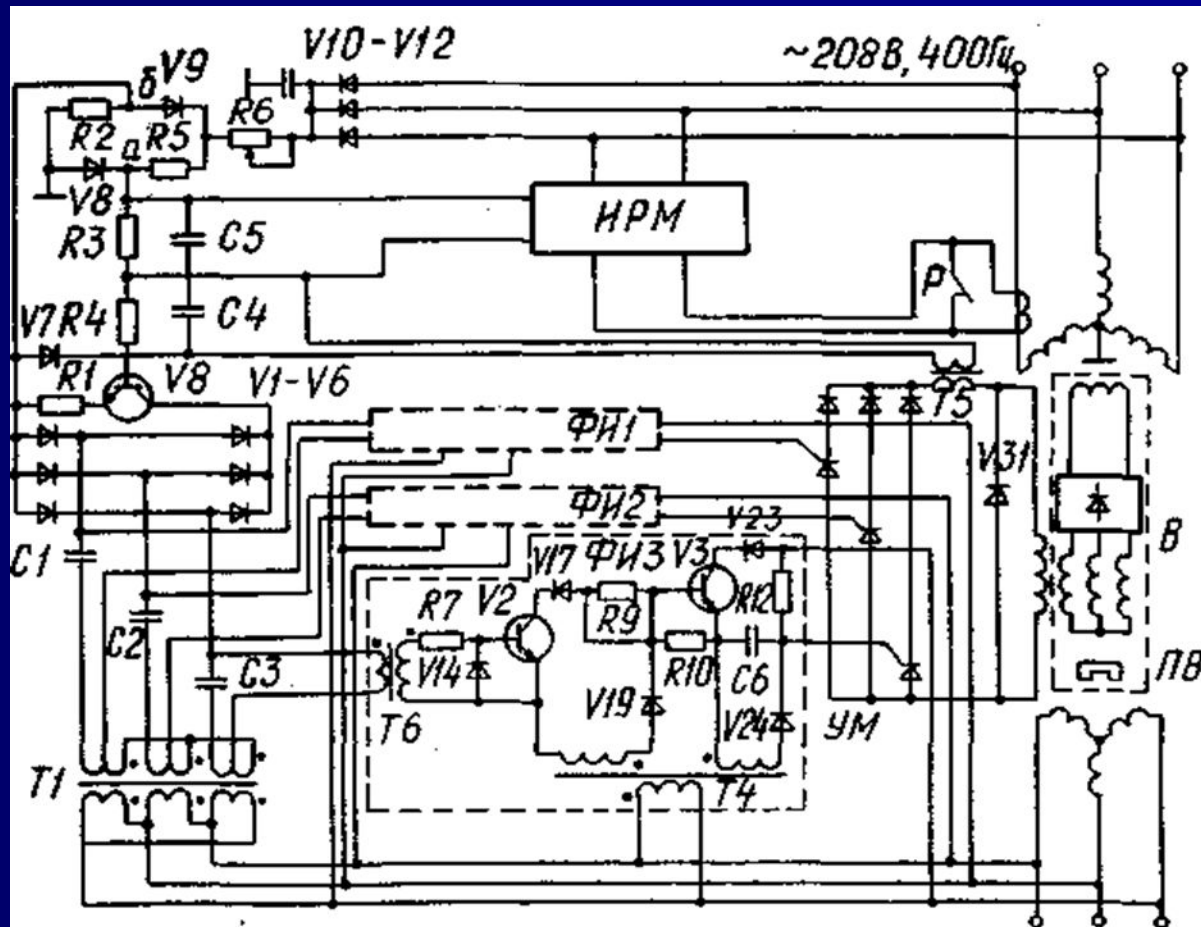
$$U_B = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma}^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \gamma),$$

где **Um** - амплитудная величина напряжения питания;
 γ - угол открытия тиристора.

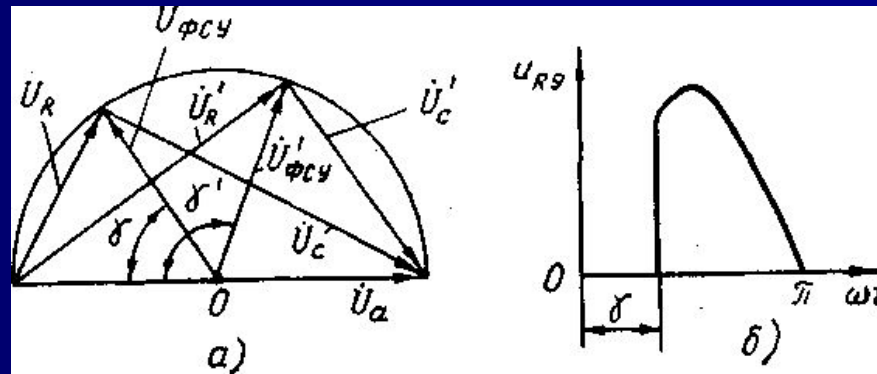
Принципиальная электрическая схема рассматриваемого тиристорного регулятора напряжения приведена на рисунке. Измерительный орган регулятора выполнен по мостовой схеме, плечами которого служат резисторы **R2, R5** и стабилитроны **V8, V9**. Он включен на среднее напряжение фаз генератора через однополупериодный 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.

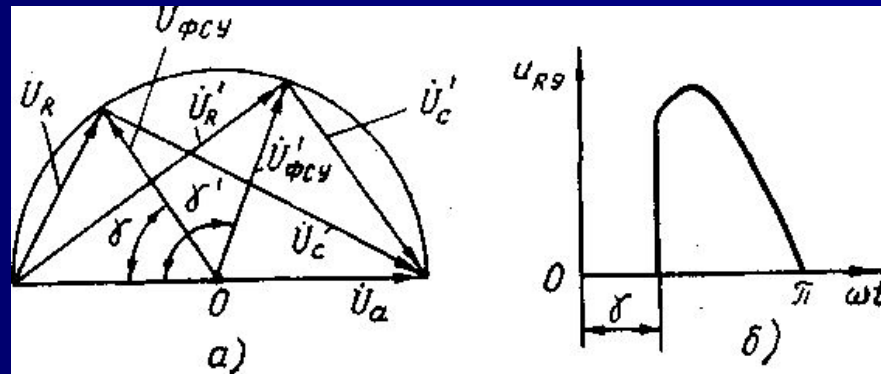


Для пояснения принципа действия **$\Phi\text{СУ}$** на рисунке приведена векторная диаграмма напряжений для одной из его фаз:



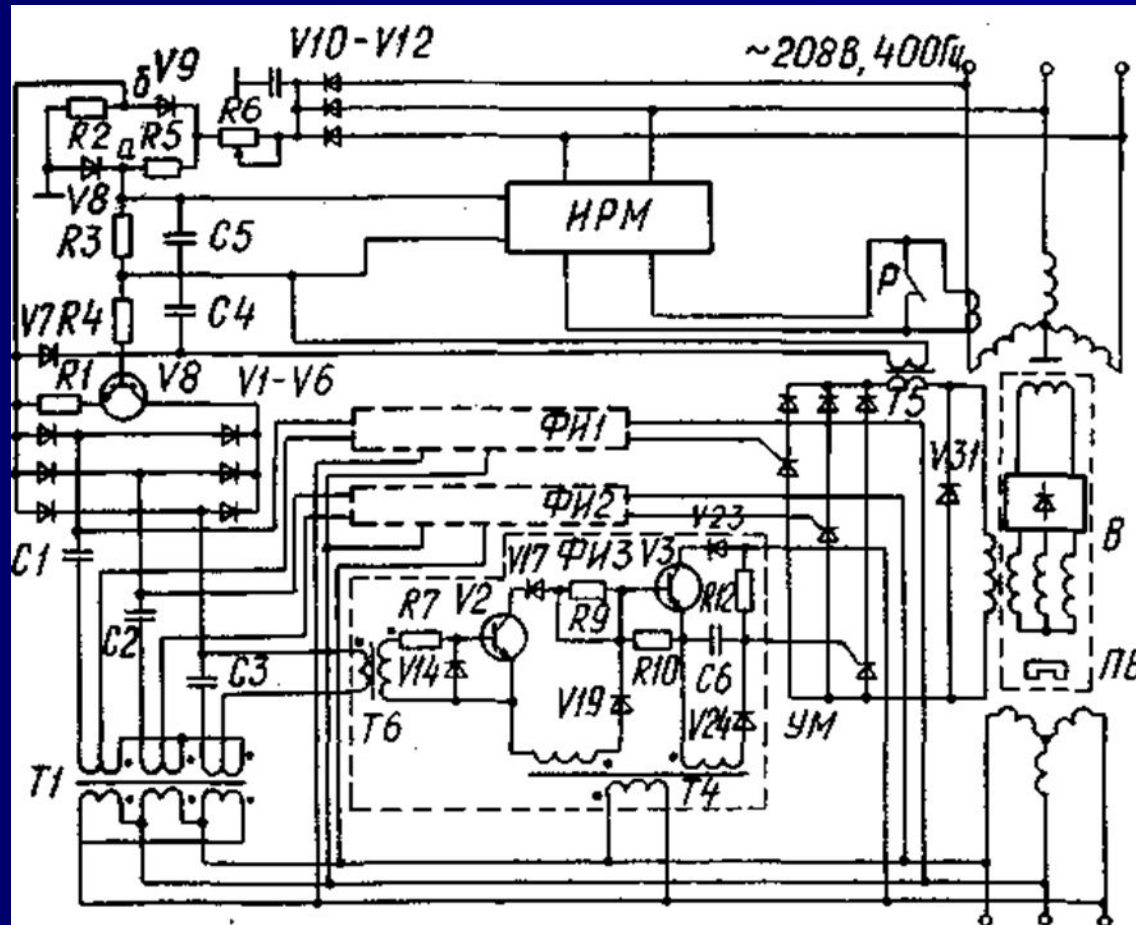
Положение вектора выходного напряжения **$U_{\Phi\text{СУ}}$** относительно вектора напряжения **U_a** подвозбудителя определяется величиной активного сопротивления **$\Phi\text{СУ}$** . В случае, например, повышения напряжения генератора относительно заданного уровня возрастает потенциал точки «б» измерительного органа, а потенциал его точки «а» остается постоянным. Это приводит к увеличению сопротивления транзистора **V_8** , 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**.



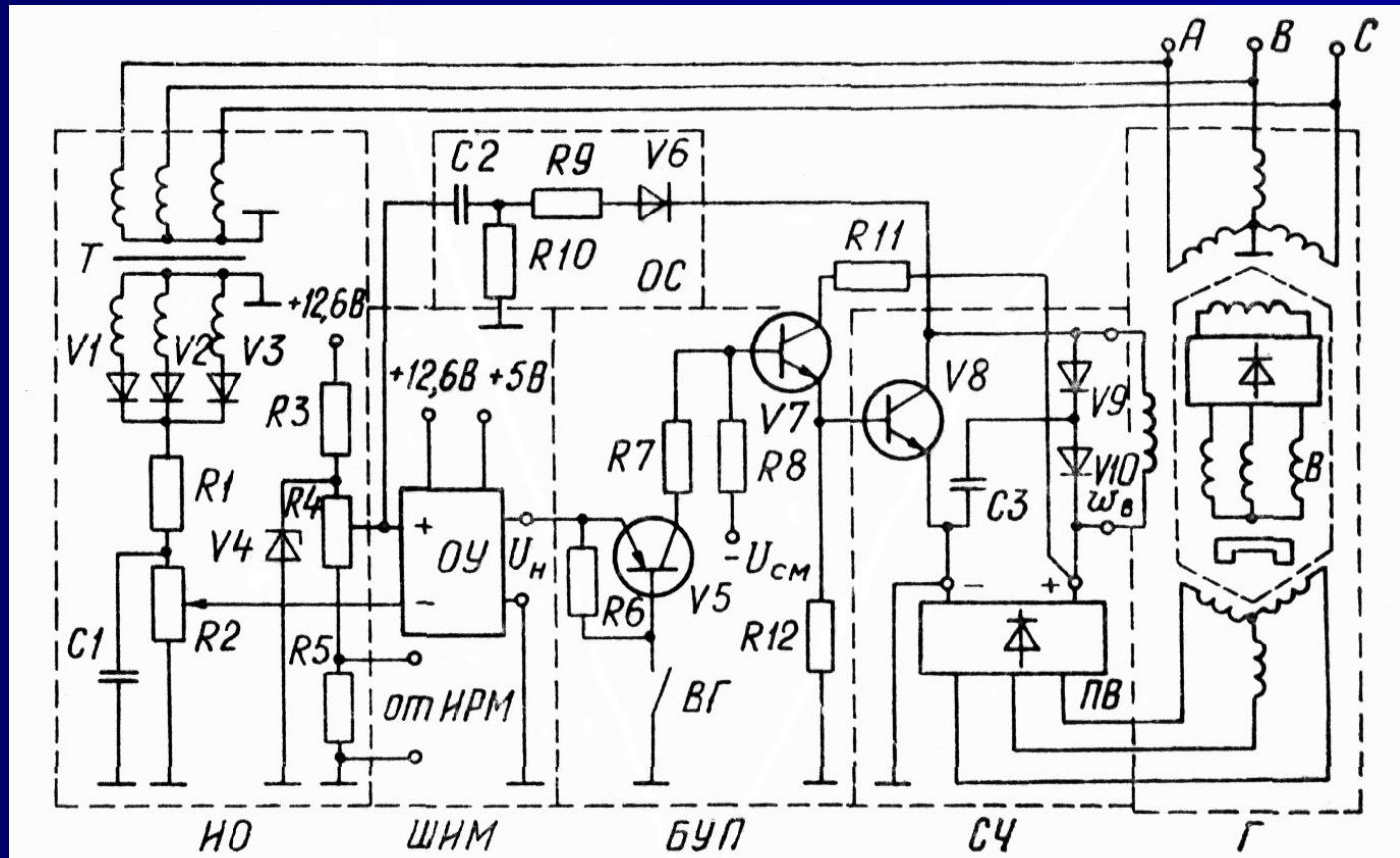
Так как напряжение на входе ФИ сдвинуто на угол γ по отношению к напряжению соответствующей фазы подвозбудителя, то транзистор V2 открывается в момент времени, равный $\omega t = \gamma$. Характер кривой падения напряжения на резисторе R9 при открытии транзистора V2 показан на рис. 4.28,б. Это напряжение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

Напряжение питания транзистора **V3** сдвинуто на 180° по отношению к напряжению питания транзистора **V2**. Поэтому в один из полупериодов заряжается конденсатор **C6**. Через момент времени, определяемый углом γ , открывается транзистор **V3** и конденсатор **C6** разряжается через резистор **R12** и диод **V23**. Импульсы напряжения на резисторе **R12** включают соответствующий тиристор **УМ**, что в итоге приводит к необходимому изменению тока возбуждения возбудителя и, за счет этого, поддержанию напряжения генератора на требуемом уровне.



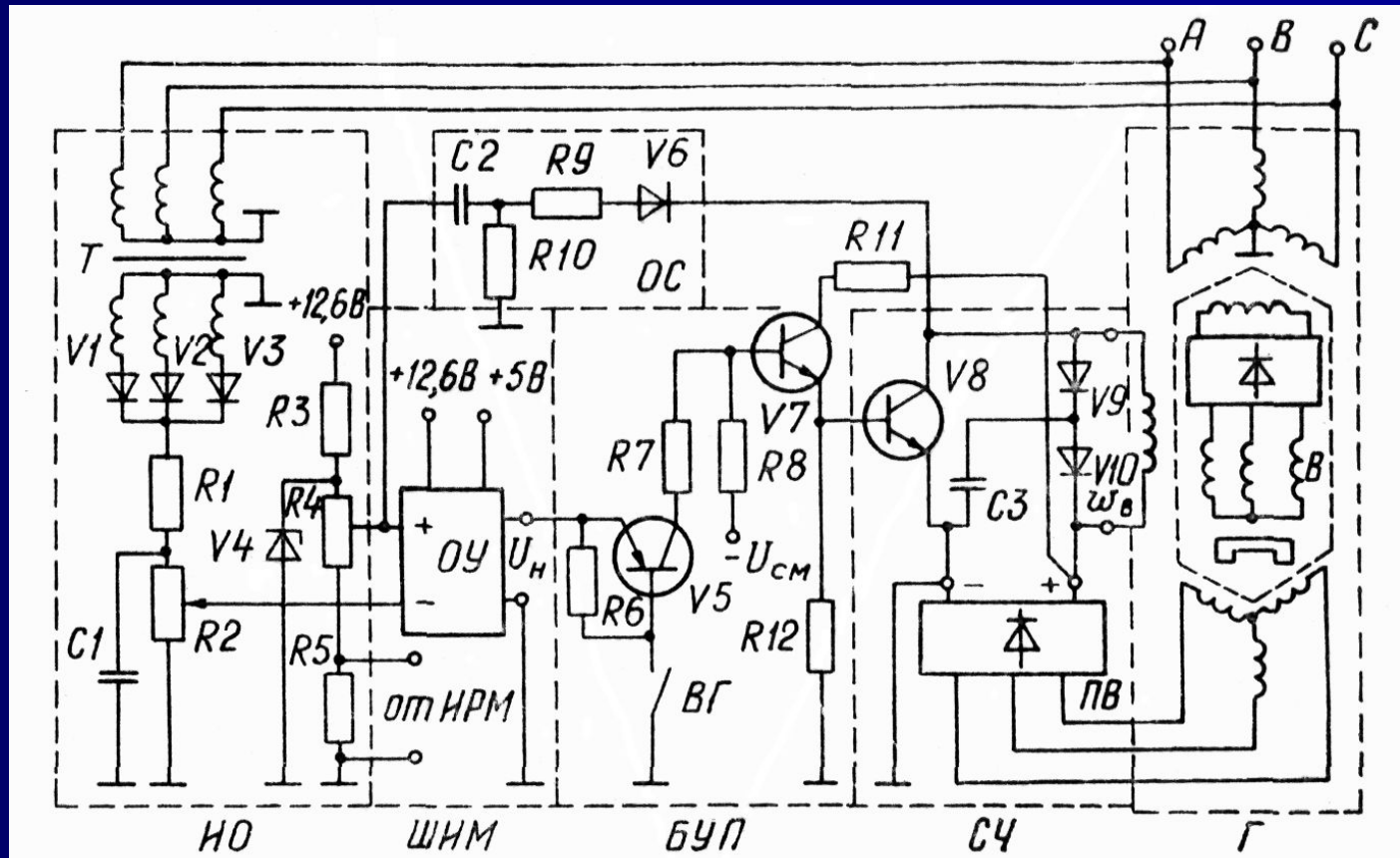
2.5.4 Транзисторный регулятор напряжения

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



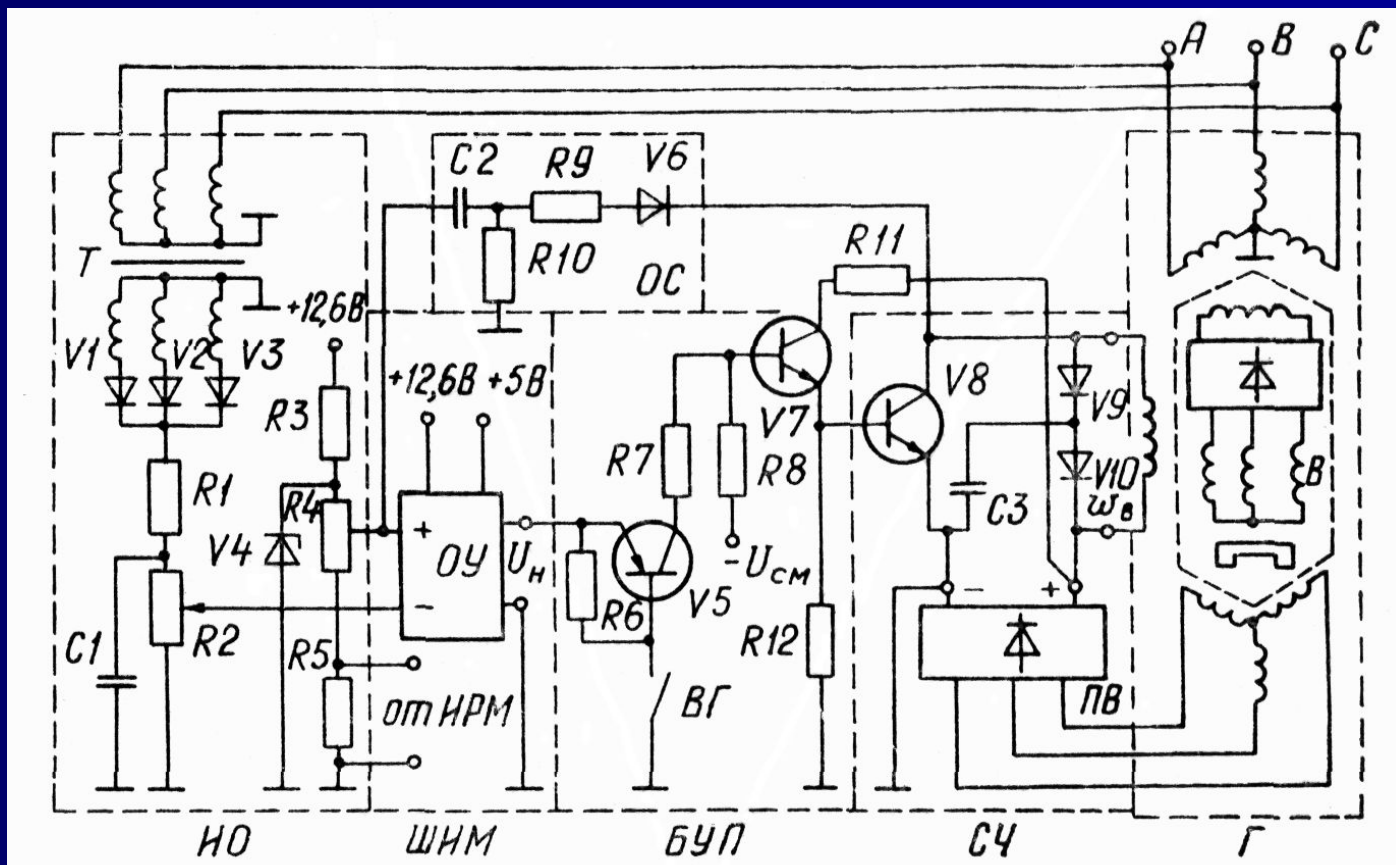
Измерительный орган регулятора включен на линейное напряжение генератора через понижающий трансформатор Т и трехфазный однополупериодный выпрямитель на диодах V1...V3.

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



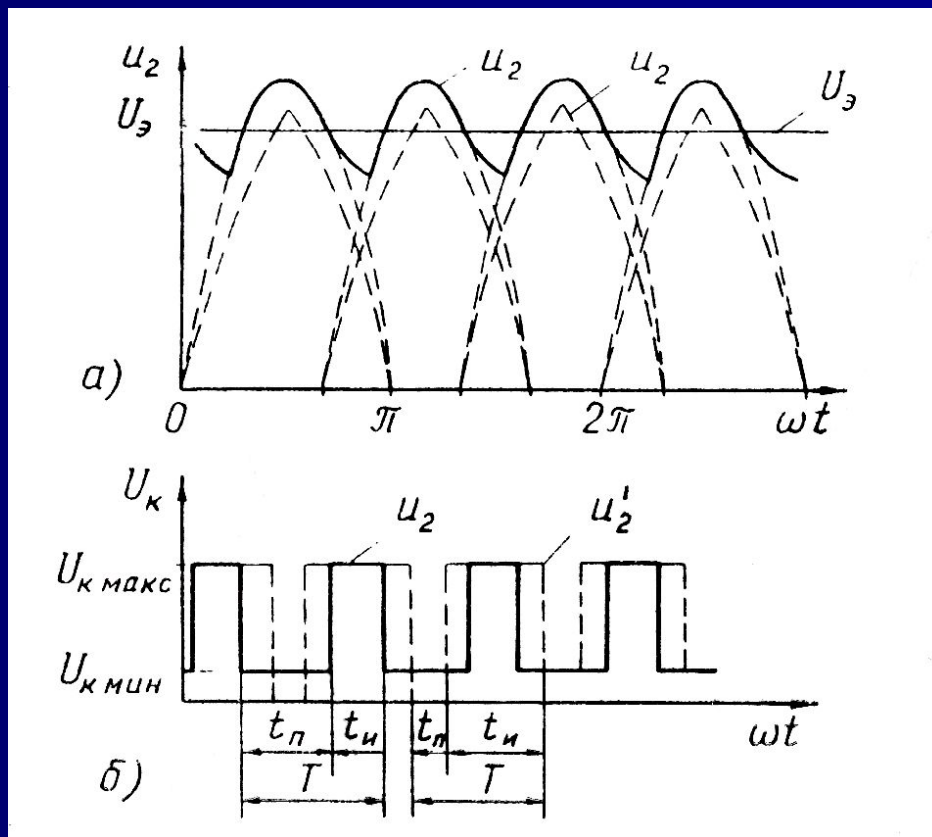
Для сглаживания выпрямленного напряжения u_2 генератора параллельно резистору R_2 включен конденсатор C_1 .

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



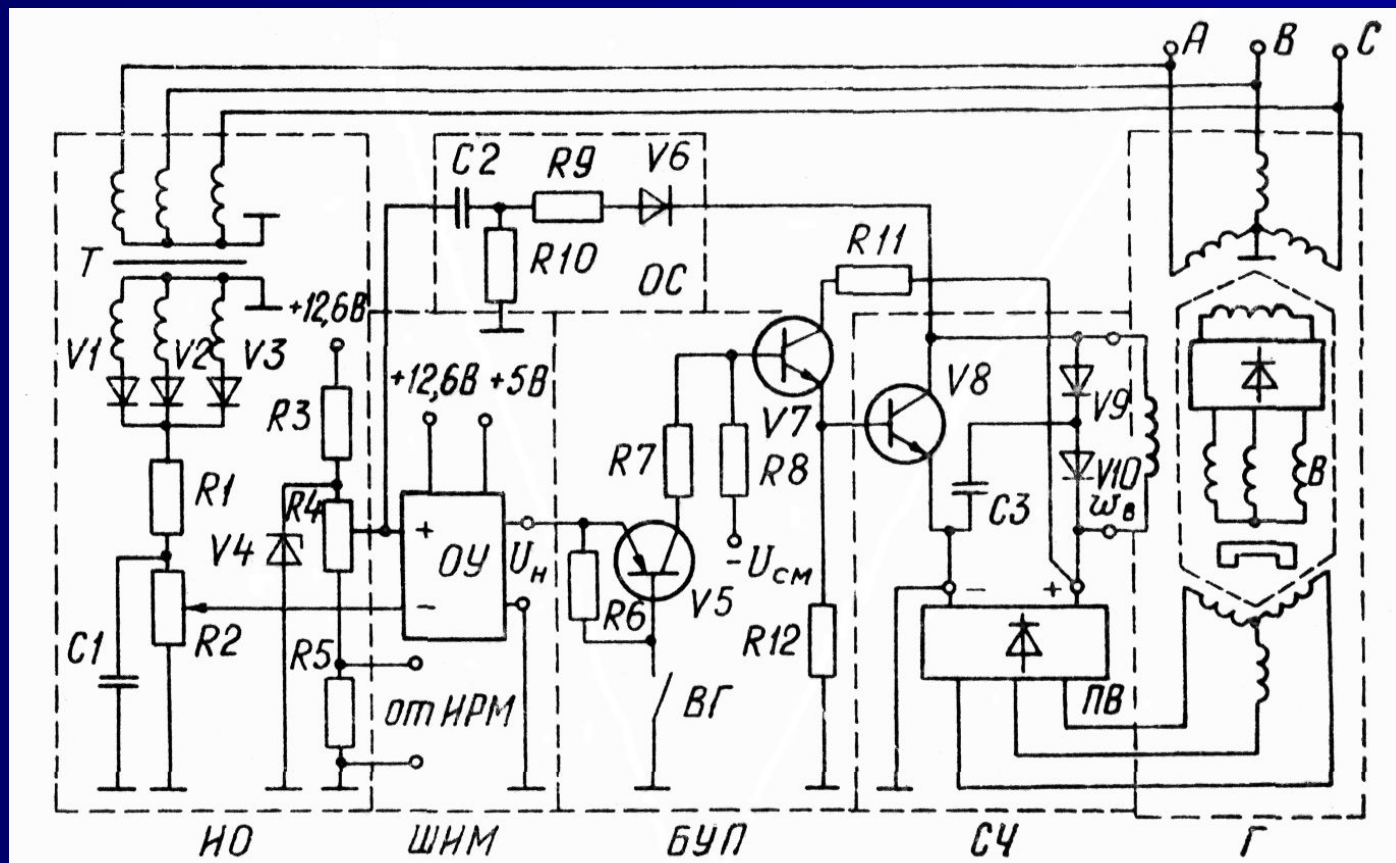
Компаратор осуществляет переключение уровня выходного напряжения U_k , когда непрерывно изменяющийся во времени входной сигнал u_2 становится выше или ниже эталонного $U_э$ (рисунок *а*). В случае, если $u_2 > U_э$, то выходной сигнал компаратора равен U_k мин, а если $u_2 < U_э$, то U_k макс (рисунок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

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



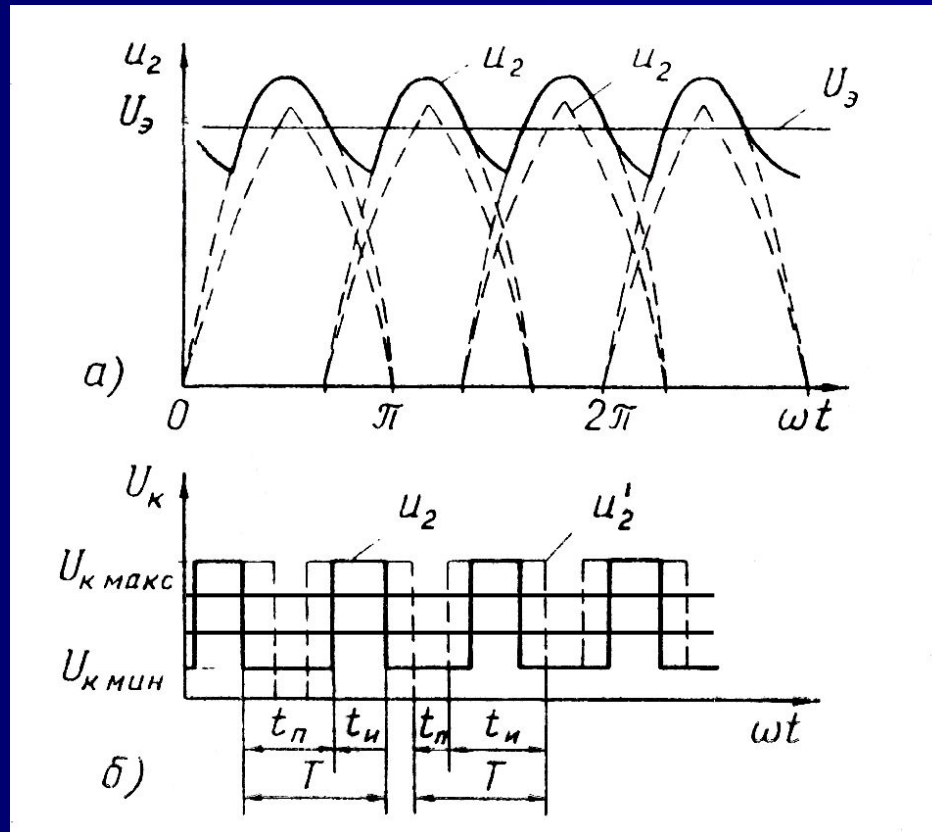
Управляющие импульсы компаратора при включенном выключателе ВГ цепи возбуждения генератора открывают вспомогательные транзисторы V5 и V7 блока БУП. Для надежного запираания транзистора V7 в интервалах времени между окончанием одного и началом следующего импульсов на его базу через резистор R8 подано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

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



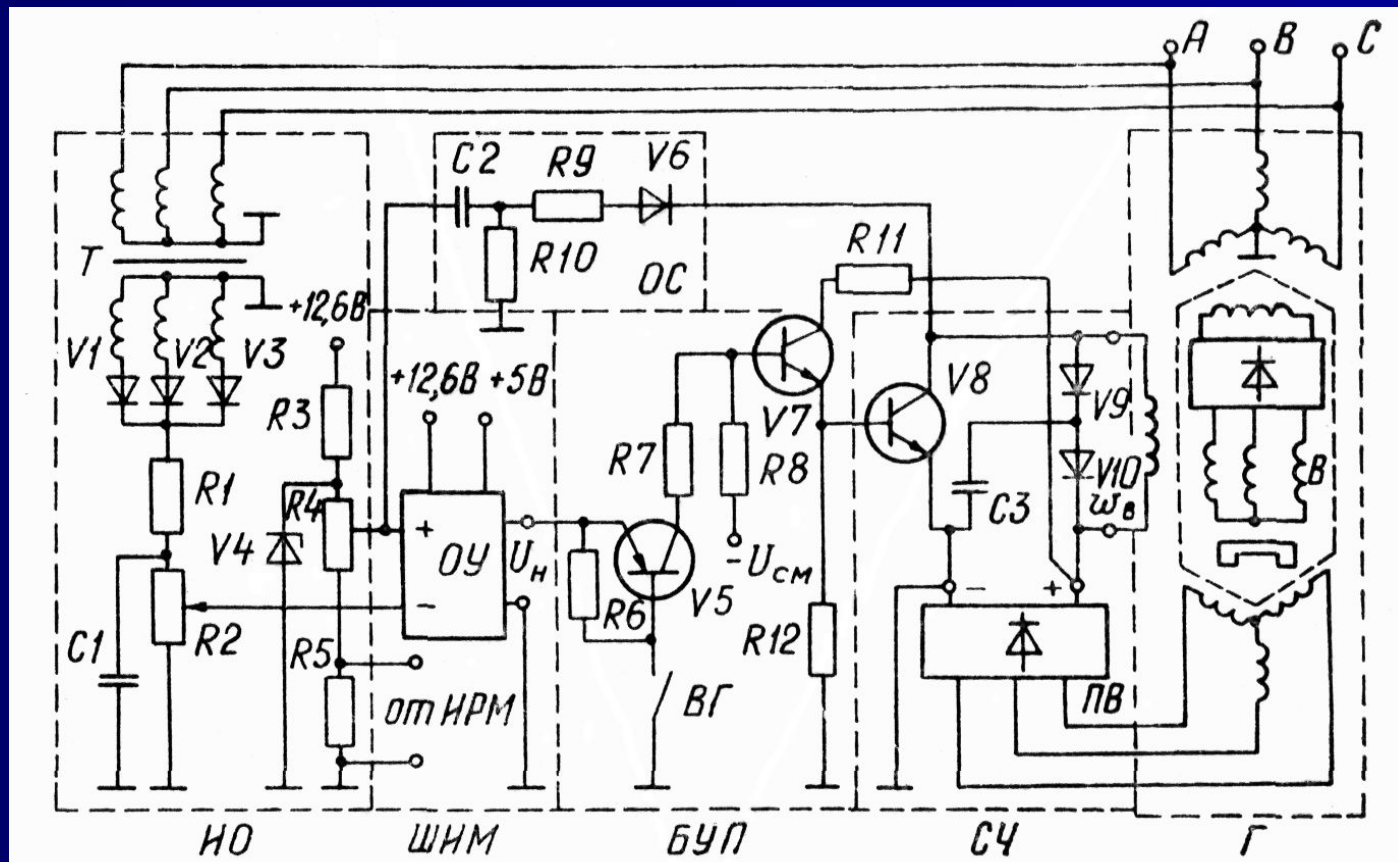
Например, в случае уменьшения напряжения генератора увеличивается длительность импульсов ти компаратора и, следовательно, увеличивается время открытого состояния транзистора V8, что в итоге приводит к возрастанию величины регулируемого напряжения:

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

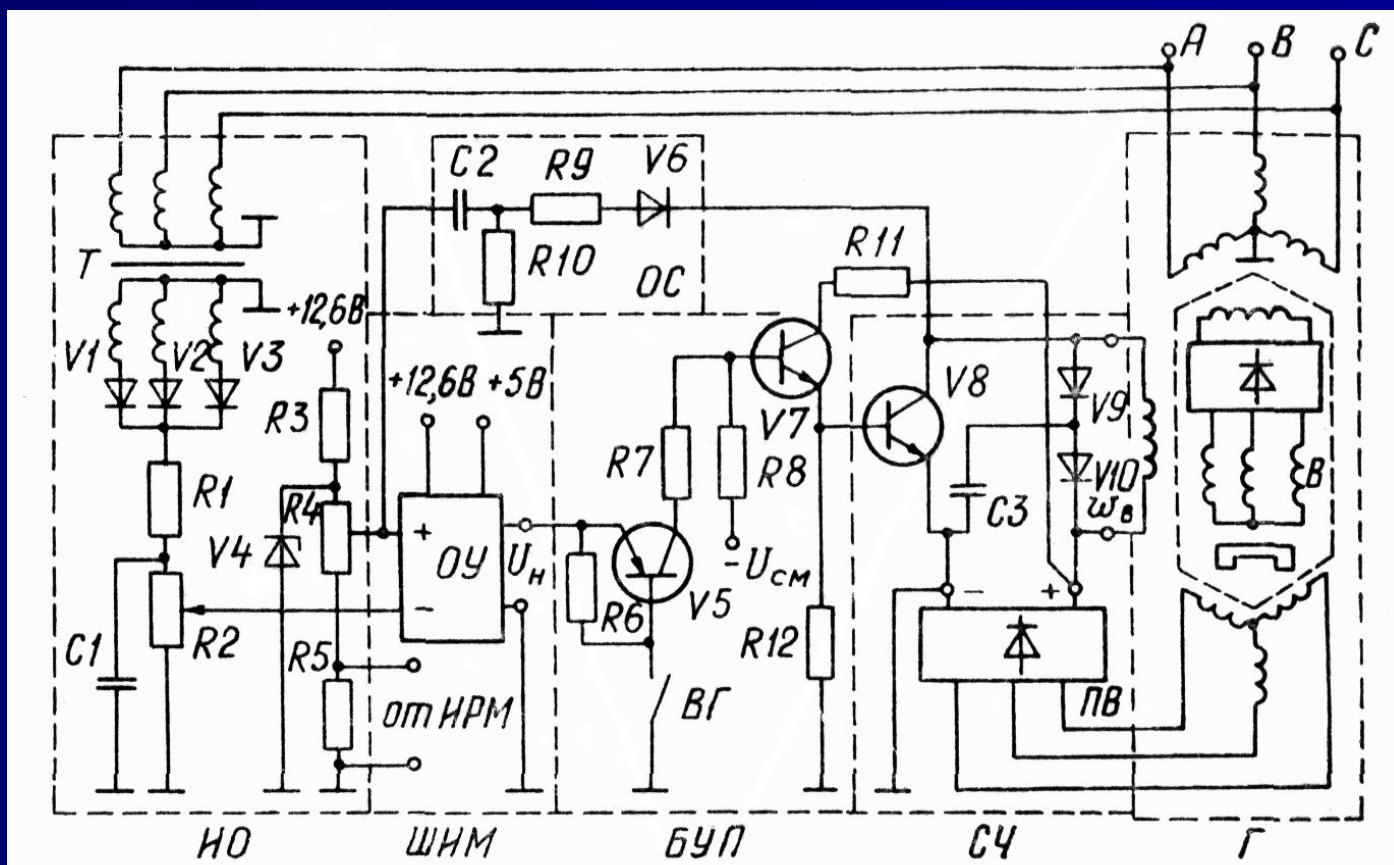


Для обеспечения непрерывности протекания тока в обмотке возбуждения $\omega_{\text{ВВ}}$ генератора, когда силовой транзистор V8 закрыт, параллельно этой обмотке включены диоды V9 и V10.

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

$$u_B = -k_p r$$

где k_p - коэффициент усиления регулятора.

