

СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Синхронные генераторы трехфазного переменного тока

Различают турбогенераторы (первичный двигатель — паровая или газовая турбина) и гидрогенераторы (первичный двигатель — гидротурбина).

В установившемся режиме работы имеется строгое соответствие между частотой вращения агрегата n , об/мин, и частотой сети f , Гц:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p},$$

где p — число пар полюсов обмотки статора генератора.

По технико-экономическим показаниям паровые и газовые турбины выпускают на большие частоты вращения – 3000 и 1500 об/мин. На тепловых электростанциях частота вращения агрегатов, как правило, составляет 3000 об/мин, а синхронные турбогенераторы имеют два полюса. На АЭС применяют агрегаты с частотой вращения 1500 и 3000 об/мин.

Турбогенераторы выполняются с горизонтальным валом. Ротор изготавливается из цельной поковки хромоникелевой или хромоникельмолибденовой стали, обладающей высокими магнитными и механическими свойствами.

Ротор выполняется неявнополюсным. Диаметр ротора при 3000 об/мин ограничивается 1,1—1,2 м. Длина бочки ротора также имеет предельное значение, равное 6—6,5 м.

Определяется оно из условий допустимого статического прогиба вала и получения приемлемых вибрационных характеристик.

Размеры турбогенераторов мощностью от 30 до 1200 МВт мало отличаются и определяются габаритами железной дороги.

В активной части ротора фрезеруются пазы, заполняемые обмоткой возбуждения. В пазовой части обмотки закрепляются немагнитными клиньями из дюралюминия. Лобовая часть обмотки, не лежащая в пазах, закрепляется с помощью бандажа. Бандажи являются наиболее напряженными в механическом отношении частями ротора и обычно выполняются из немагнитной высокопрочной стали. По обеим сторонам ротора на его валу устанавливаются вентиляторы, обеспечивающие циркуляцию охлаждающего газа в машине. На рис. 1 представлен общий вид турбогенератора, а на рис. 2 его разрез.



Рис. 1. Общий вид турбогенератора

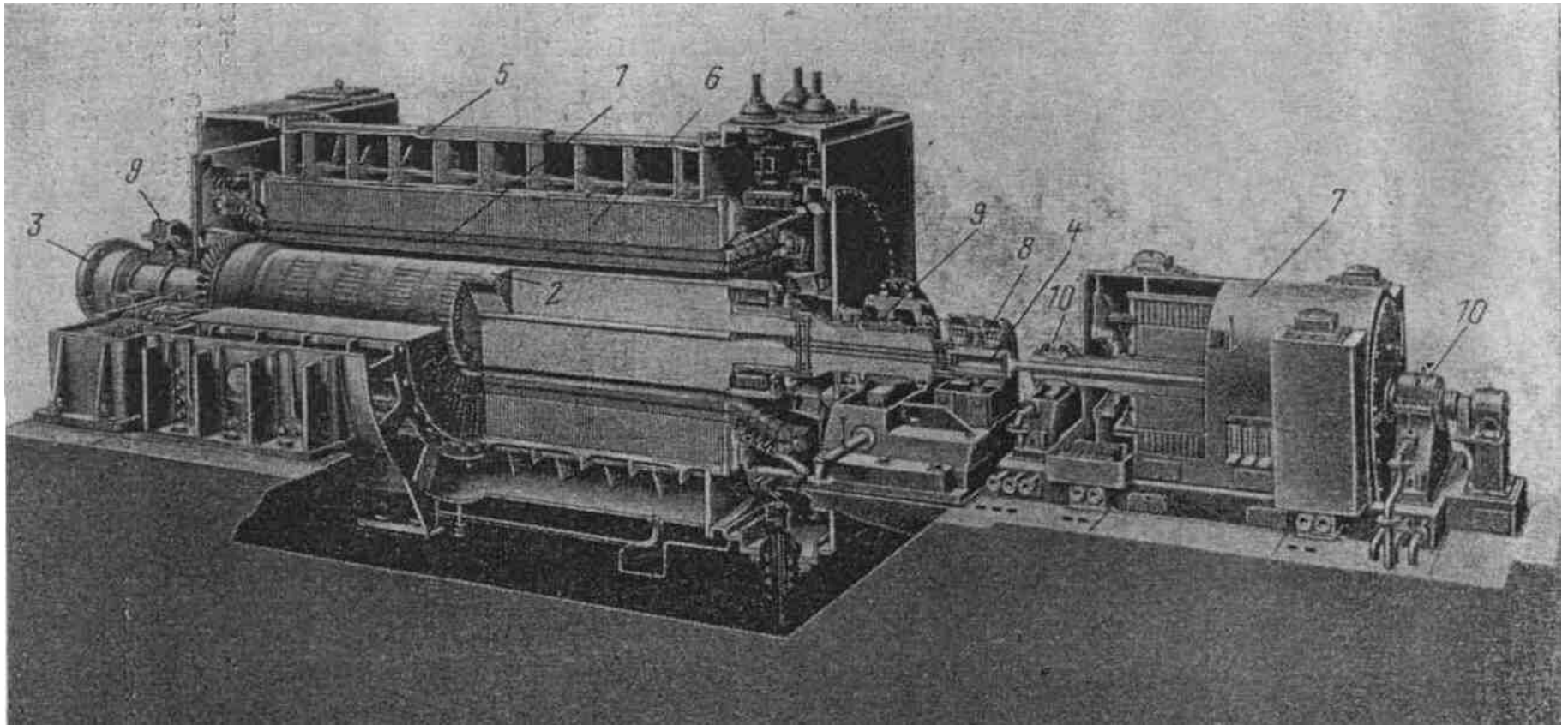


Рис. 2. Общий вид современного турбогенератора.

1 — обмотка статора; *2* — ротор; *3, 4* — соединительные муфты; *5* — корпус статора; *6* — сердечник статора; *7* — возбудитель; *8* — контактные кольца ротора и щетки; *9* — подшипники генератора; *10* — подшипники возбудителя.

Корпус статора изготавливается сварным, с торцов он закрывается щитами с уплотнениями в местах стыка с другими частями. Магнитопровод статора пересекается вращающимся магнитным полем, поэтому набирается из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Листы набирают пакетами, между которыми оставляют вентиляционные каналы. Трехфазная обмотка статора обычно двухслойная.

Гидрогенераторы являются тихоходными (60—600 об/мин), имеют большие размеры (перевозятся по рекам), а также большое число полюсов.

Частота вращения тем меньше, чем меньше напор воды и чем больше мощность турбины. Гидрогенераторы выполняют с явнополюсными роторами и преимущественно с вертикальным расположением вала. Диаметры роторов мощных гидрогенераторов достигают 14—16 м, а диаметры статоров — 20—22 м.

На полюсах ротора помимо обмотки возбуждения размещается еще демпферная обмотка, которая образуется из медных стержней, закладываемых в пазы на полюсных наконечниках и замыкаемых с торцов ротора кольцами. Эта обмотка предназначена для успокоения колебаний ротора агрегата, которые возникают при всяком возмущении, связанном с резким изменением нагрузки генератора.

В турбогенераторах роль успокоительной обмотки выполняют массивная бочка ротора.

Статор гидрогенератора имеет принципиально такую же конструкцию, как и статор турбогенератора, но выполняется разъемным.

На высоконапорных ГЭС применяют капсульные гидрогенераторы, имеющие горизонтальный вал. Такие генераторы заключаются в водонепроницаемую оболочку (капсулу), которая с внешней стороны обтекается потоком воды, проходящим через турбину. Капсульные генераторы изготавливают на мощность несколько десятков мегаватт. Это сравнительно тихоходные генераторы ($n = 60 \div 150$ об/мин) с явнополюсным ротором.

Среди других типов синхронных генераторов, применяемых на электростанциях, надо отметить так называемые дизель-генераторы, соединяемые с дизельным двигателем внутреннего сгорания. Это явнополюсные машины с горизонтальным валом. Дизель как поршневая машина имеет неравномерный крутящий момент, поэтому дизель-генератор снабжается маховиком или его ротор выполняется с повышенным маховым моментом.

Номинальные параметры генераторов. Длительно допустимый режим работы называют *номинальным*. Он характеризуется номинальными параметрами, которые указываются в паспорте машины.

Номинальное напряжение — это линейное напряжение обмотки статора в номинальном режиме.

Номинальным током статора генератора называется значение тока, при котором допускается длительная нормальная работа генератора при нормальных параметрах охлаждения (температура, давление и расход охлаждающего газа и жидкости) и номинальных значениях мощности и напряжения.

Номинальная полная мощность генератора определяется по формуле:

$$S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot \quad (1)$$

Номинальная активная мощность — это наибольшая активная мощность, для длительной работы с которой он предназначен.

Номинальная активная мощность генератора:

$$P_{\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}$$

Номинальные мощности турбогенераторов должны соответствовать ряду мощностей согласно ГОСТ 533-76.

Шкала номинальных мощностей крупных гидрогенераторов не стандартизирована.

Номинальный ток ротора — это наибольший ток возбуждения генератора, при котором обеспечивается номинальная мощность генератора при отклонении напряжения статора в пределах $\pm 5\%$ номинального значения и при номинальном коэффициенте мощности.

Номинальный коэффициент мощности согласно ГОСТ принимается равным 0,8 для генераторов мощностью 125 МВ·А и ниже, 0,85—для турбогенераторов мощностью до 588 МВ·А и гидрогенераторов до 360 МВ·А, 0,9 — для более мощных машин. Для капсульных гидрогенераторов обычно $\cos \varphi_{\text{ном}} \approx 1$.

Каждый генератор характеризуется также КПД при номинальной нагрузке и номинальном коэффициенте мощности. Для современных генераторов номинальный коэффициент полезного действия колеблется в пределах 96,3 — 98,8%.

Системы охлаждения генераторов

Во время работы генератора его обмотки и активная сталь нагреваются.

Допустимые температуры нагрева обмоток статора и ротора зависят от применяемых изоляционных материалов и температуры охлаждающей среды. Для изоляции класса В (на асфальтобитумных лаках) допустимая температура нагрева обмотки статора должна находиться в пределах 105°C , а ротора 130°C . При более теплостойкой изоляции обмоток статора и ротора, например классов F и H, пределы допустимой температуры нагрева увеличиваются.

В процессе эксплуатации изоляция обмоток постепенно стареет. Главной причиной старения изоляции является ее нагрев. Срок службы изоляции класса В при температуре нагрева ее до 120°C составляет около 15 лет, а при нагреве до 140°C сокращается почти до 2 лет. При температуре 105°C срок службы изоляции увеличивается до 30 лет. Поэтому при любых режимах работы генератора нельзя допускать нагрева его обмоток свыше допустимых температур.

Чтобы температура нагрева не превышала допустимых значений, все генераторы выполняют с искусственным охлаждением.

Различают *косвенное* и *непосредственное* охлаждение.

При косвенном охлаждении охлаждающий газ (воздух или водород) подается внутрь генератора и прогоняется через немагнитный зазор и вентиляционные каналы. При этом охлаждающий газ не соприкасается с проводниками обмоток статора и ротора и тепло, выделяемое ими, передается газу изоляцию обмоток.

При непосредственном охлаждении охлаждающее вещество (газ или жидкость) соприкасается непосредственно с проводниками обмоток.

Изготавливают генераторы с воздушным, водородным и жидкостным охлаждением.

Проточную систему охлаждения применяют в турбогенераторах до 2 МВ \cdot А, а в гидрогенераторах до 4 МВ \cdot А. Через генератор прогоняется воздух из машинного зала, который быстро загрязняет изоляцию, что сокращает срок службы генератора.

При *замкнутой системе охлаждения* один и тот же объем воздуха циркулирует по замкнутому контуру. Схематично циркуляция воздуха при таком охлаждении для турбогенератора представлена на [рис. 3](#). Турбогенераторы с замкнутой системой воздушного охлаждения выполняются до 12 МВт включительно.

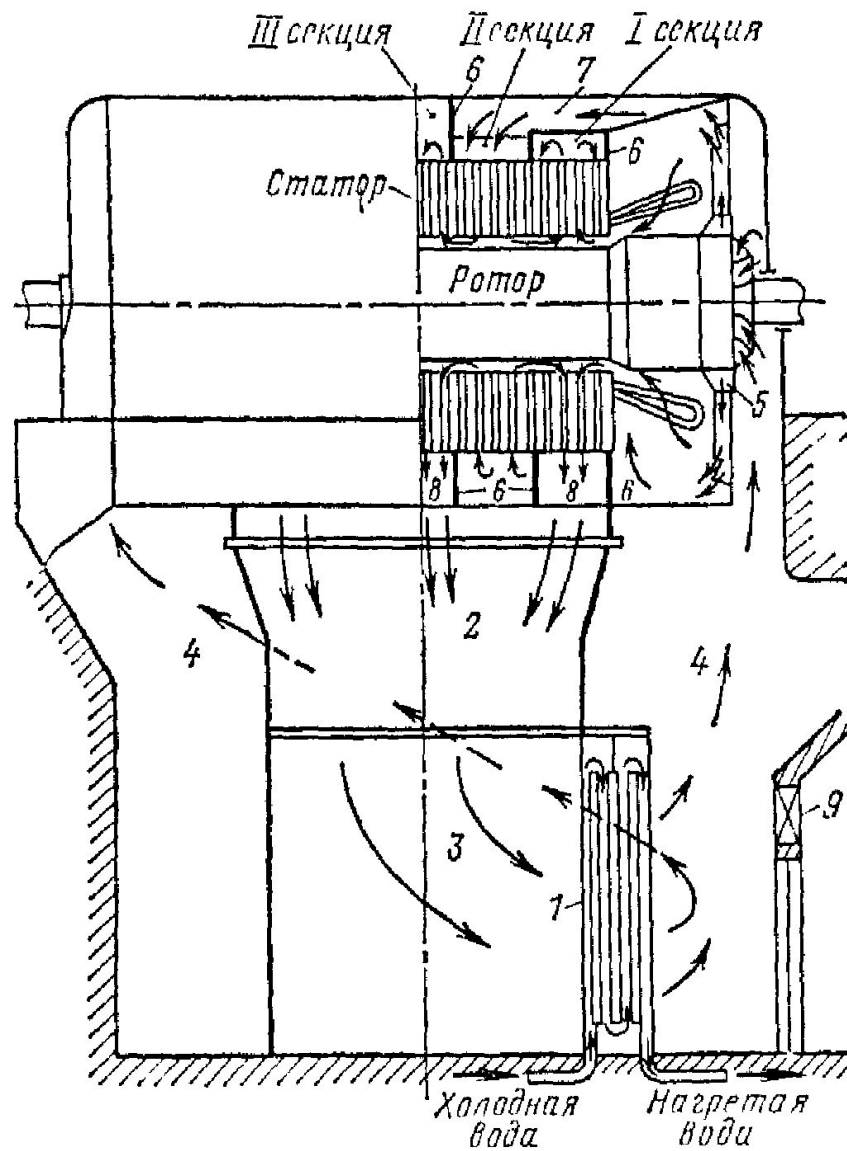


Рис. 3. Замкнутая система воздушного охлаждения турбогенератора.

Косвенное водородное охлаждение турбогенераторов.

Водородное охлаждение эффективнее воздушного, так как водород по сравнению с воздухом имеет в 1,5 раза больший коэффициент теплопередачи и в 7 раз более высокую теплопроводность. Значительно меньшая плотность водорода по сравнению с воздухом позволяет уменьшить вентиляционные потери в 8—10 раз, в результате чего КПД генератора увеличивается на 0,8—1%.

Отсутствие окисления изоляции в среде водорода повышает надежность работы генератора и увеличивает срок службы изоляции обмоток. Водород не поддерживает горения, поэтому в генераторах с водородным охлаждением можно отказаться от устройства пожаротушения.

*Непосредственное водородное охлаждение
турбогенераторов.*

Еще больший эффект дает непосредственное (внутреннее) охлаждение, когда водород подается внутрь полых проводников обмотки.

В генераторах серии ТВФ применяется косвенное охлаждение обмоток статора водородом и непосредственное (форсированное) охлаждение обмотки ротора.

Давление водорода в корпусе поддерживается 0,2—0,4 МПа.

Непосредственное жидкостное охлаждение генераторов.

При выполнении непосредственного жидкостного охлаждения генераторов в качестве охлаждающей жидкости применяют дистиллированную воду или масло, которые обладают более высокой теплоотводящей способностью по сравнению с водородом и, следовательно, позволяют еще больше увеличить единичные мощности генераторов при сохранении их размеров.

Дистиллированная вода как охлаждающее вещество по сравнению с маслом имеет значительно больше достоинств: более высокие теплоотводящие свойства, пожаробезопасность. Поэтому в большинстве случаев мощные генераторы выполняют с водяным охлаждением.

Возбуждение синхронных генераторов

Обмотки роторов синхронных генераторов получают питание от возбудителей. Мощность возбудителей составляет 0,3—1 % мощности генератора, а напряжение — от 100 до 600—650 В. Чем мощнее генератор, больше напряжение возбуждения.

Совокупность возбудителя, вспомогательных и регулирующих устройств называется *системой возбуждения*.

Соединение возбудителя с обмоткой ротора выполняется при помощи контактных колец и щеток. Созданы и применяются бесщеточные системы возбуждения.

Системы возбуждения должны быть надежными и экономичными, допускать регулирование тока возбуждения в необходимых пределах, быть быстродействующими и обеспечивать потолочное возбуждение при аварии в сети.

Регулируя ток возбуждения, изменяют напряжение синхронного генератора и генерируемую реактивную мощность. Регулирование возбуждения генератора позволяет повысить устойчивость параллельной работы.

При глубоких снижениях напряжения, например, при КЗ, применяют форсировку возбуждения, что способствует повышению устойчивости параллельной работы генераторов. Регулирование и форсировка возбуждения повышают надежность работы релейной защиты и облегчают условия самозапуска электродвигателей собственных нужд электростанций.

Важнейшими характеристиками систем возбуждения являются: быстродействие, определяемое скоростью нарастания напряжения на обмотке ротора при форсировке

$$V = \frac{(1 - e^{-1}) \cdot (U_{f, \text{nom}} - U_{f, \text{н}})}{U_{f, \text{н}} \cdot t_1}$$

и отношение потолочного напряжения к номинальному напряжению возбуждения $U_{f, \text{nom}} / U_{f, \text{н}} = k_{\phi}$ — так называемая кратность форсировки, t_1 — постоянная времени обмотки возбуждения

Согласно ГОСТ турбогенераторы должны иметь $k_{\phi} > 2$, а скорость нарастания возбуждения не менее 2 о.е./с. Кратность форсировки для гидрогенераторов с коллекторными возбудителями, соединенными с валом генератора, должна быть не менее 1,8, и не менее 2 для других систем возбуждения.

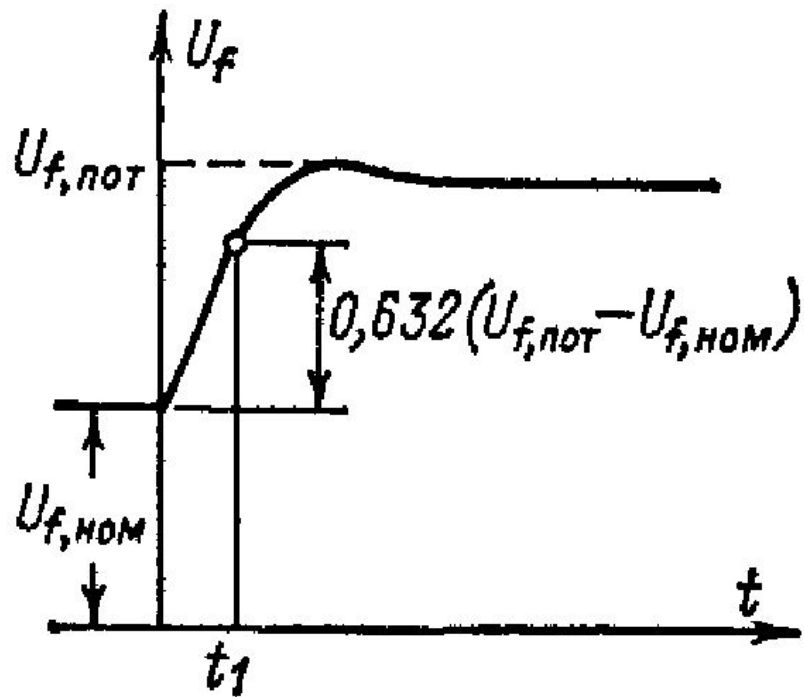


Рис. 3. Изменение напряжения возбуждения при форсировке.

Независимое возбуждение генераторов получило наибольшее распространение. Основное достоинство этого способа состоит в том, что возбуждение синхронного генератора не зависит от режима электрической сети и поэтому является наиболее надежным. На генераторах мощностью до 100 МВт включительно применяют, как правило, в качестве возбудителя генератор постоянного тока, соединенный с валом синхронного генератора ([рис. 4](#)).

Возбуждение самого возбудителя выполнено по схеме самовозбуждения (обмотка возбуждения возбудителя *ОВВ* питается от якоря самого возбудителя). Установка номинального напряжения осуществляется вручную шунтовым реостатом *ШР*, установленным в цепи *ОВВ*, и поддерживается автоматическим регулятором возбуждения *АРВ*.

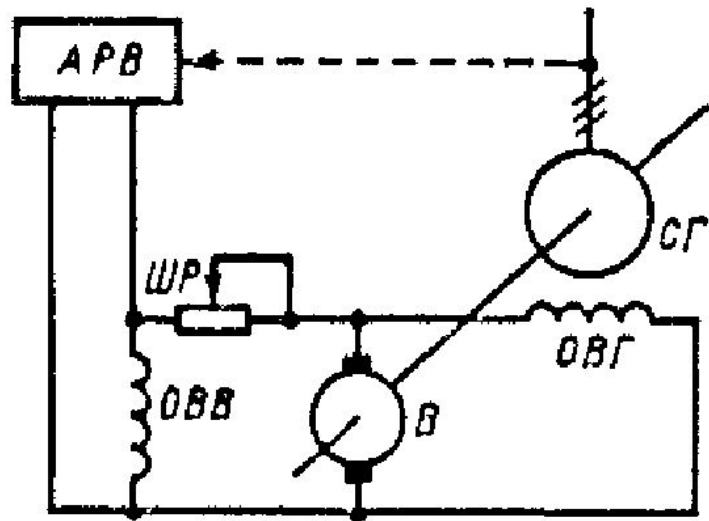


Рис. 4. Принципиальная схема независимого электромашиного возбуждения генератора.

Недостатки системы возбуждения с генератором постоянного тока определяются недостатками самого возбудителя:

- невысокая скорость нарастания возбуждения, особенно у возбудителей гидротурбин, которые имеют низкую частоту вращения ($V = 1 \div 2$ о.е./с);
- вибрация и тяжелые условия работы щеток и коллектора (условий коммутации);
- для турбогенераторов мощностью выше 165 МВт мощность возбуждения становится настолько значительной, что выполнить надежно работающий генератор постоянного тока на частоту вращения 3000 об/мин по условиям коммутации становится затруднительным.

Для возбуждения крупных генераторов применяются системы высокочастотного возбуждения.

С валом генератора сочленен вспомогательный генератор, напряжение которого выпрямляется и подводится к обмотке ротора генератора ([рис. 5](#)).

В качестве вспомогательного генератора применяется высокочастотный генератор индукторного типа. Такой генератор не имеет обмотки на вращающемся роторе, что повышает его надежность в эксплуатации. Обмотка возбуждения находится на статоре. Ротор выполнен с пазами по поверхности, тем самым при вращении периодически изменяется взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и трехфазной статорной и соответственно создается синусоидальный магнитный поток, пересекающий трехфазную статорную обмотку. Повышенная частота (500 Гц) позволяет уменьшить габариты и повысить быстродействие системы возбуждения.

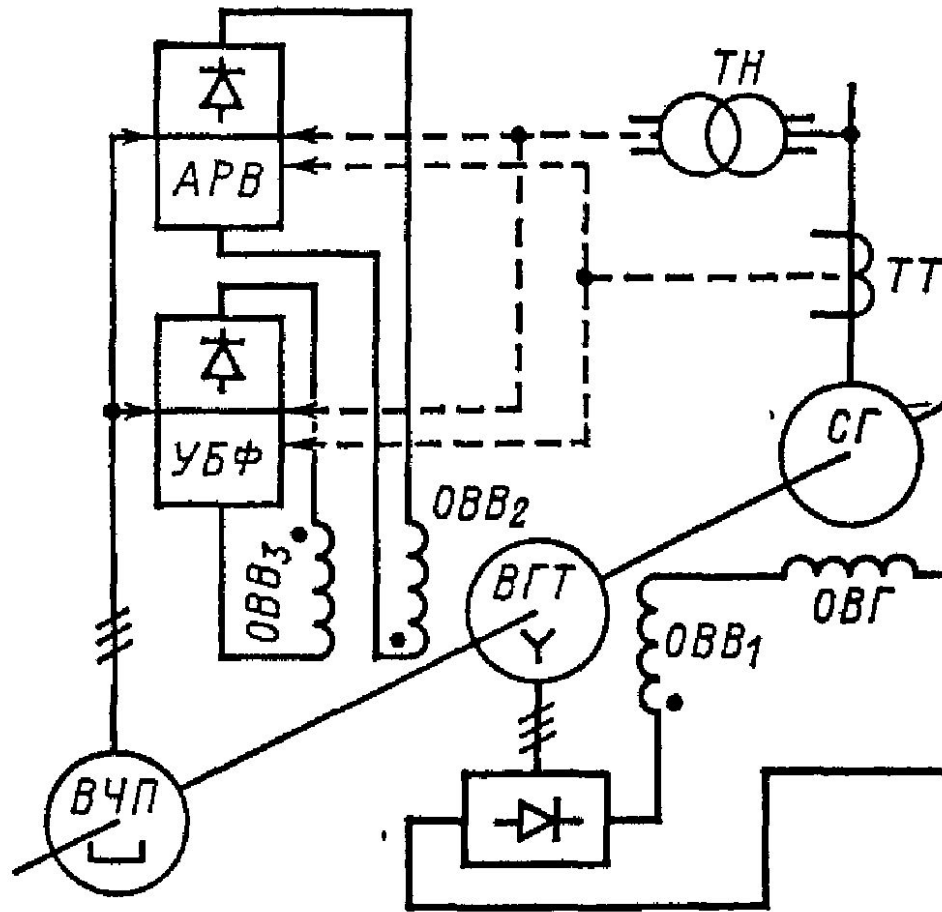


Рис. 5. Принципиальная схема высокочастотного возбуждения турбогенераторов.

Индукторный высокочастотный генератор-возбудитель *ВГТ* имеет три обмотки возбуждения, расположенные вместе с трехфазной обмоткой переменного тока на неподвижном статоре. Первая из них *ОВВ1* включается последовательно с обмоткой ротора основного генератора *ОВГ* и обеспечивает основное возбуждение *ВГТ*. Благодаря включению *ОВВ1* последовательно с обмоткой ротора основного генератора обеспечивается резкое увеличение возбуждения *ВГТ* при коротких замыканиях в энергосистеме вследствие броска тока в роторе. Обмотки *ОВВ2* и *ОВВ3* получают питание от высокочастотного подвозбудителя *ВЧП* через выпрямители. Подвозбудитель (высокочастотная машина 400 Гц с постоянными магнитами), как и вспомогательный генератор *ВГТ*, соединен с валом турбогенератора.

Регулирование тока в *ОВВ2* и в *ОВВ3* осуществляется с помощью регуляторов электромагнитного типа *АРВ* (автоматический регулятор возбуждения) и *УБФ* (устройство бесконтактной форсировки возбуждения).

Устройство *АРВ* обеспечивает поддержание напряжения генератора в нормальном режиме работы изменением тока в обмотке *ОВВ2*. Устройство *УБФ* обеспечивает начальное возбуждение генератора и его форсировку при снижении напряжения более чем на 5%.

Высокочастотная система возбуждения обеспечивает $k_{\phi} = 2$ и скорость нарастания напряжения возбуждения не менее 2 о.е./с.

Принципиальная схема системы независимого тиристорного возбуждения с АРВ сильного действия представлена на [рис. 6](#). На одном валу с генератором $СГ$ располагается синхронный вспомогательный генератор $ВГ$, который имеет на статоре трехфазную обмотку с отпайками. Имеются две группы тиристоров: рабочая $T1$, включенная на половину напряжения генератора $ВГ$, и форсировочная $T2$, включенная на полное напряжение. На стороне постоянного тока обмотки включены параллельно. Возбуждение генератора в нормальном режиме обеспечивает рабочая группа тиристоров $T1$.

Форсировочная группа при этом закрыта. В режиме форсировки возбуждения тиристоры $T2$, питающиеся от полного напряжения вспомогательного генератора, открываются полностью и дают весь ток форсировки. Рабочая группа при этом запирается более высоким напряжением форсировочной группы.

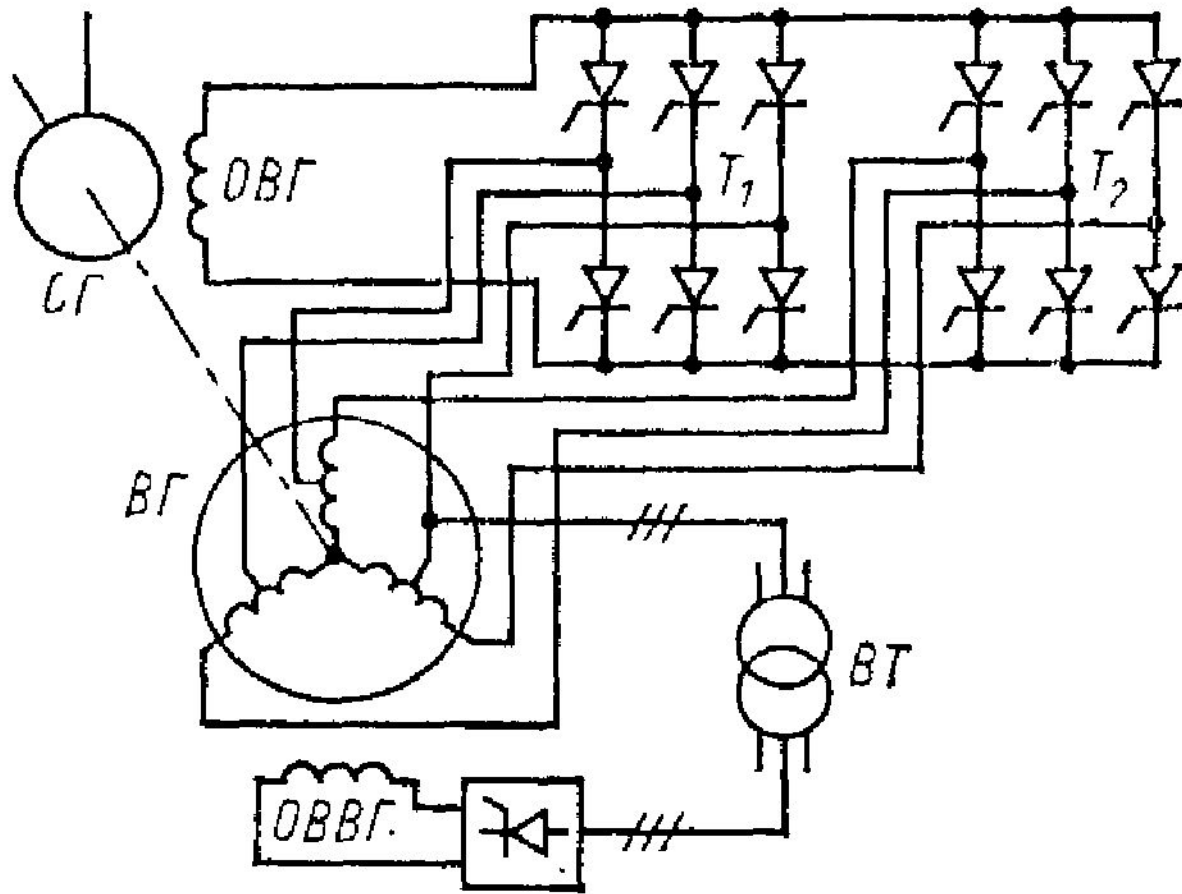


Рис. 6. Принципиальная схема независимого тиристорного возбуждения генераторов.

Система имеет наибольшее быстродействие по сравнению с другими системами и позволяет получить $k_{\phi} > 2$.

Ток к обмотке возбуждения подводится с помощью щеток через контактные кольца на валу ротора. Такая система недостаточно надежна. Этот недостаток особенно проявляется при токах возбуждения 3000 А и более (генераторы мощностью 300 МВт и больше).

Перспективной, особенно для турбогенераторов большой мощности, является система бесщеточного возбуждения, не обладающая указанными недостатками. В этой системе возбуждения, сущность которой поясняет [рис. 7](#), нет подвижных контактных соединений.

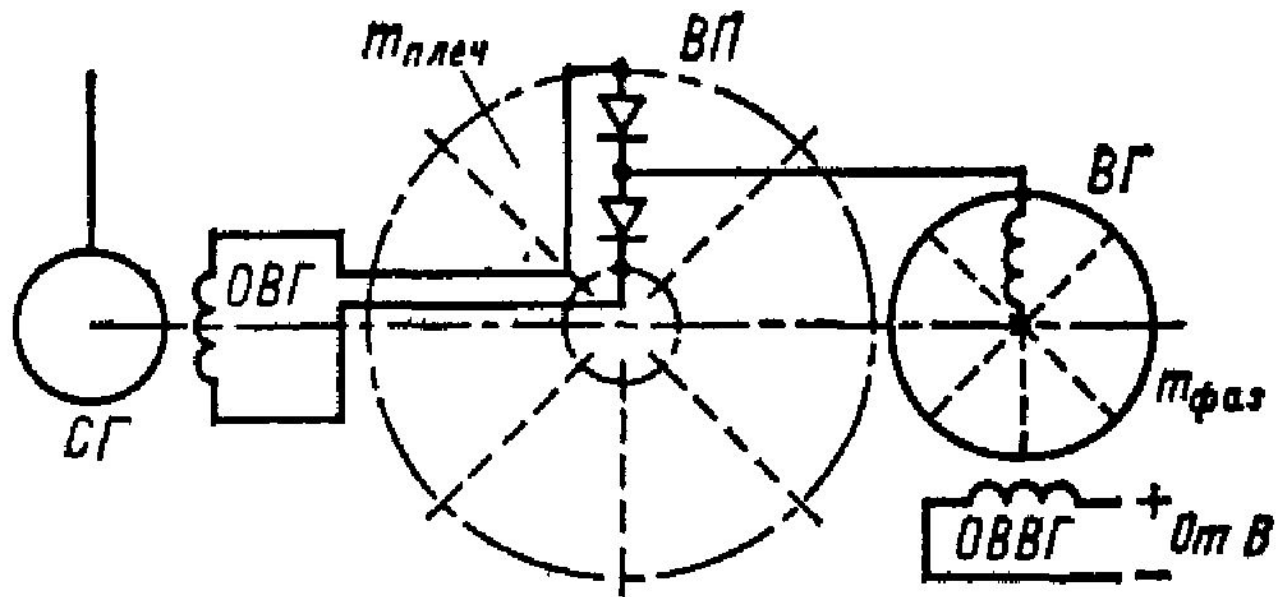


Рис. 7. Принципиальная схема бесщеточного возбуждения генератора.

Вспомогательный синхронный генератор $BГ$ через проводники, закрепленные на валу, и полупроводниковые выпрямители питает обмотку ротора $OBГ$. Он выполнен как обратимый, т. е. обмотка переменного тока расположена на вращающейся части, а обмотка возбуждения неподвижна. Возбуждение генератора $BГ$ осуществляется от возбудителя B .

Регулирование тока возбуждения в обмотке ротора $OBГ$ производится изменением тока в обмотке возбуждения вспомогательного генератора $OBВГ$.

Система бесщеточного возбуждения интенсивно совершенствуется и является перспективной для генераторов всех типов, особенно для турбогенераторов большой мощности (300—1200 МВт).

Автоматическое гашение поля генераторов

Гашением поля называется процесс быстрого уменьшения магнитного потока возбуждения генератора до величины, близкой к нулю. Соответственно уменьшается ЭДС генератора.

Короткие замыкания внутри генератора обычно происходят через электрическую дугу, что приводит к повреждению обмоток статора и стали. Поэтому быстрое гашение поля генератора необходимо, чтобы ограничить размеры повреждений.

Для гашения поля необходимо отключить обмотку ротора генератора от возбудителя. Однако при этом на зажимах обмотки ротора могут возникнуть большие перенапряжения. Поэтому одновременно с отключением возбудителя предусматривают быстрое поглощение энергии магнитного поля обмотки ротора, чтобы перенапряжения не превышали допустимого значения.

В зависимости от мощности генератора и особенностей его системы возбуждения используются три способа гашения магнитного поля: замыкание обмотки ротора на гасительное (активное) сопротивление; включение в цепь обмотки ротора дугогасительной решетки быстродействующего автомата; противовключение возбудителя.

В первых двух способах предусматривается осуществление необходимых переключений в цепях возбуждения с помощью специальных коммутационных аппаратов, которые называют *автоматами гашения поля* (АГП).

В настоящее время наибольшее распространение получил способ гашения магнитного поля генератора при помощи АГП с дугогасительной решеткой ([рис. 8](#)).

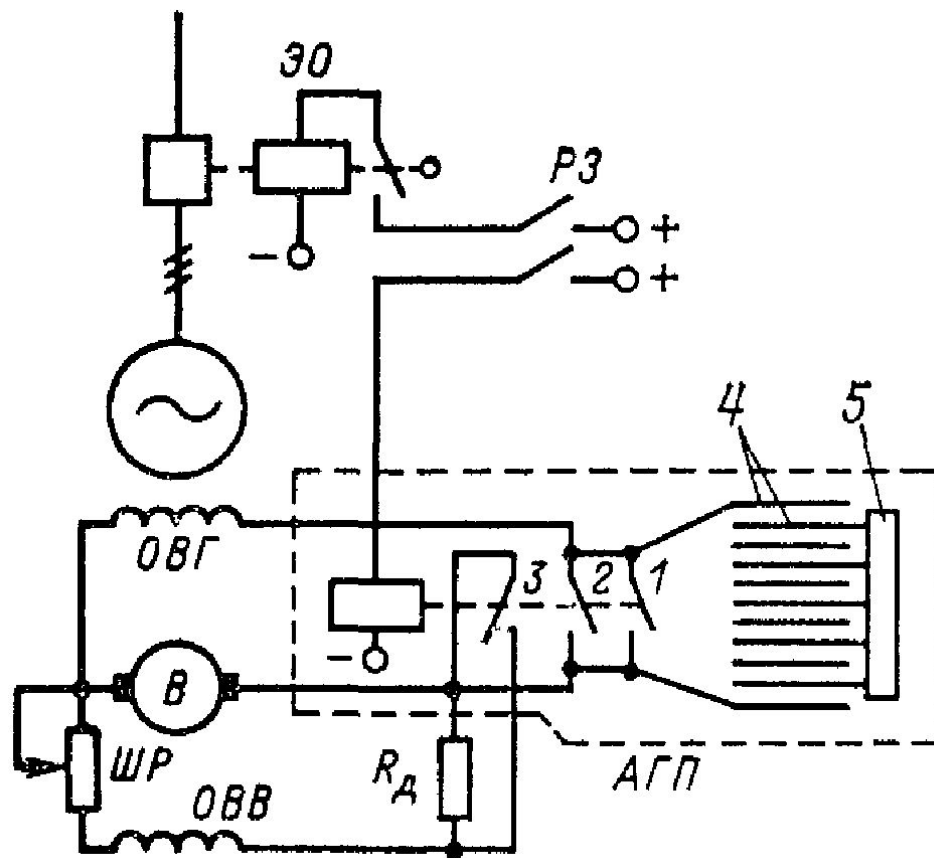


Рис. 8. Схема электрических цепей при гашении поля генератора автоматом с дугогасящей решеткой

Автомат имеет рабочие контакты 2 и дугогасительные 1. Контакты 3 вводят при отключении автомата добавочное сопротивление R_d в цепь возбуждения возбудителя, снижая ток возбуждения последнего. АГП снабжен решеткой из медных пластин 4 при расстоянии между ними 1,5—3 мм.

При отключении автомата сначала размыкаются рабочие контакты, а затем дугогасительные, причем дуга, возникающая на них, затягивается с помощью магнитного дутья в дугогасительную решетку и разбивается на ряд последовательных коротких дуг.

Общее падение напряжения на дуге равно:

$$U_{\text{д}} = n \cdot U_{\text{к}},$$

где $U_{\text{к}}$ — напряжение на короткой дуге; n — число дуговых промежутков в решетке.

При вхождении дуги в решетку напряжение на ней возрастает до $U_{\text{д}}$ и остается неизменным до погасания дуги.

Число пластин в решетке выбирается так, чтобы $U_{\text{к}}$ превосходило $U_{f,\text{пот}}$. Дуга существует, пока имеется запас энергии магнитного поля обмотки возбуждения генератора.

Уравнение переходного процесса примет вид:

$$L \frac{di_f}{dt} + U_{\text{д}} = U_f.$$

ЭДС самоиндукции обмотки возбуждения равна $L di_f/dt$. По условию электрической прочности изоляции обмотки ротора эта ЭДС не должна превышать U_m . Так как в процессе гашения U_d имеет практически постоянное значение, то предыдущее уравнение при условии максимальной скорости гашения поля во все время переходного процесса будет иметь вид:

$$U_m + U_d = U_f.$$

Следует иметь в виду, что в течение периода гашения поля U_f практически не изменяется.

Следовательно, в процессе гашения поля напряжение на обмотке ротора будет иметь постоянное значение, в пределе равное U_m . Ток в обмотке ротора I_f , будет изменяться с постоянной скоростью, так как

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{U_m}{L} = \text{const.}$$

Время гашения поля с использованием описанной схемы составляет 0,5—1 с. Процесс изменения тока в обмотке ротора и напряжения на ее зажимах представлен на [рис. 9](#). В данном случае условия гашения поля близки к оптимальным.

В настоящее время отечественные заводы изготавливают АГП данной конструкции на номинальные токи 300—6000 А.

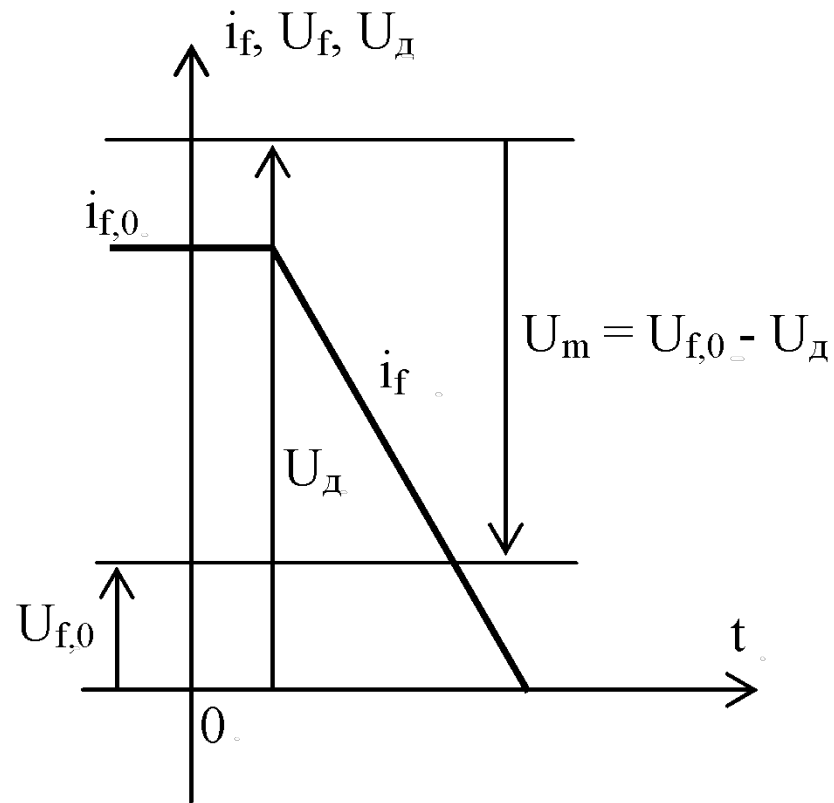


Рис. 9. Процесс изменения тока и напряжения в обмотке ротора при гашении магнитного поля.

Гашение поля противовключением возбудителя применяется для генераторов с тиристорным возбуждением. При этом вентили переводятся в инверторный режим. Напряжение на них меняет свой знак, что вызывает быстрый спад тока в обмотке ротора до нуля.

Автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) генераторов

Согласно ПТЭ все генераторы должны иметь устройство релейной форсировки возбуждения, а генераторы 3 МВт и выше еще автоматические регуляторы возбуждения (АРВ).

Простейшим автоматическим устройством для быстрого увеличения возбуждения генератора является релейная форсировка (реле минимального напряжения $U <$ и контактор $K\Phi$ на рис. 10).

При значительном снижении напряжения на зажимах генератора (обычно ниже 85% номинального) реле минимального напряжения $U <$ замыкает свои контакты и приводит в действие контактор форсировки $K\Phi$, который, закорачивает сопротивление шунтового реостата в цепи возбудителя $ШР$. В результате ток возбуждения возбудителя становится максимальным.

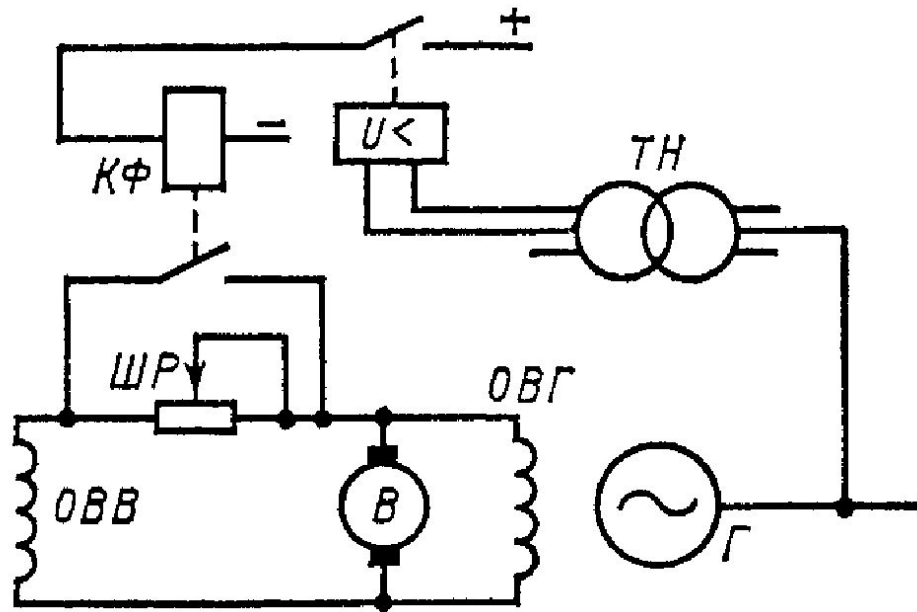
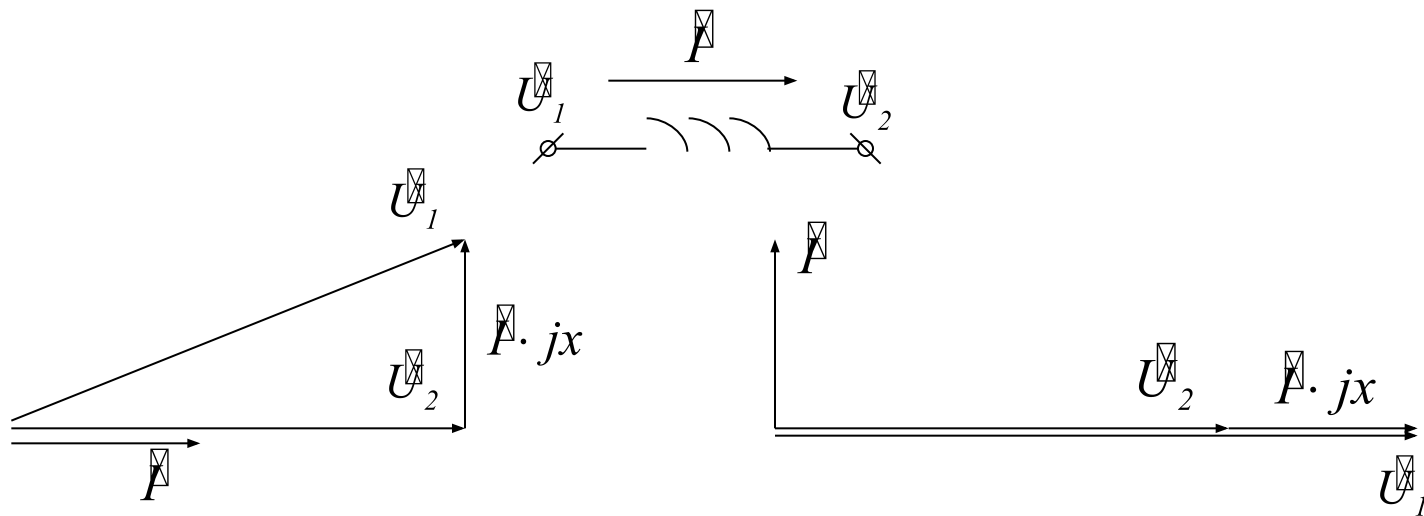


Рис. 10. Схема релейной форсировки возбуждения генератора

Широко распространенными АРВ являются устройства компаундирования в сочетании с корректором напряжения ([рис. 11](#)).

Термин «компаундирование» обозначает автоматическое регулирование тока возбуждения машины в зависимости от тока статора. В случае увеличения тока статора устройство компаундирования увеличивает ток возбуждения возбудителя, а следовательно, и ток ротора генератора, благодаря чему напряжение статора генератора увеличивается.

Различают амплитудное и амплитудно-фазовое компаундирование. Первое реагирует на амплитуду действующего значения тока, второе еще на его фазу. Дело в том, что при одинаковой амплитуде тока, но разной его фазы относительно напряжения потери напряжения существенно отличаются, что иллюстрируется примером. При одинаковом напряжении на нагрузке U_2 и токе I напряжение U_1 существенно больше при реактивном характере тока.



Амплитудно-фазовое компаундирование осуществляют суммированием линейного напряжения двух фаз с величиной напряжения, пропорционального току третьей фазы.

Справедливость такого решения предлагается доказать самим.

Структурная схема АРВ пропорционального типа приведена на рис. 11.

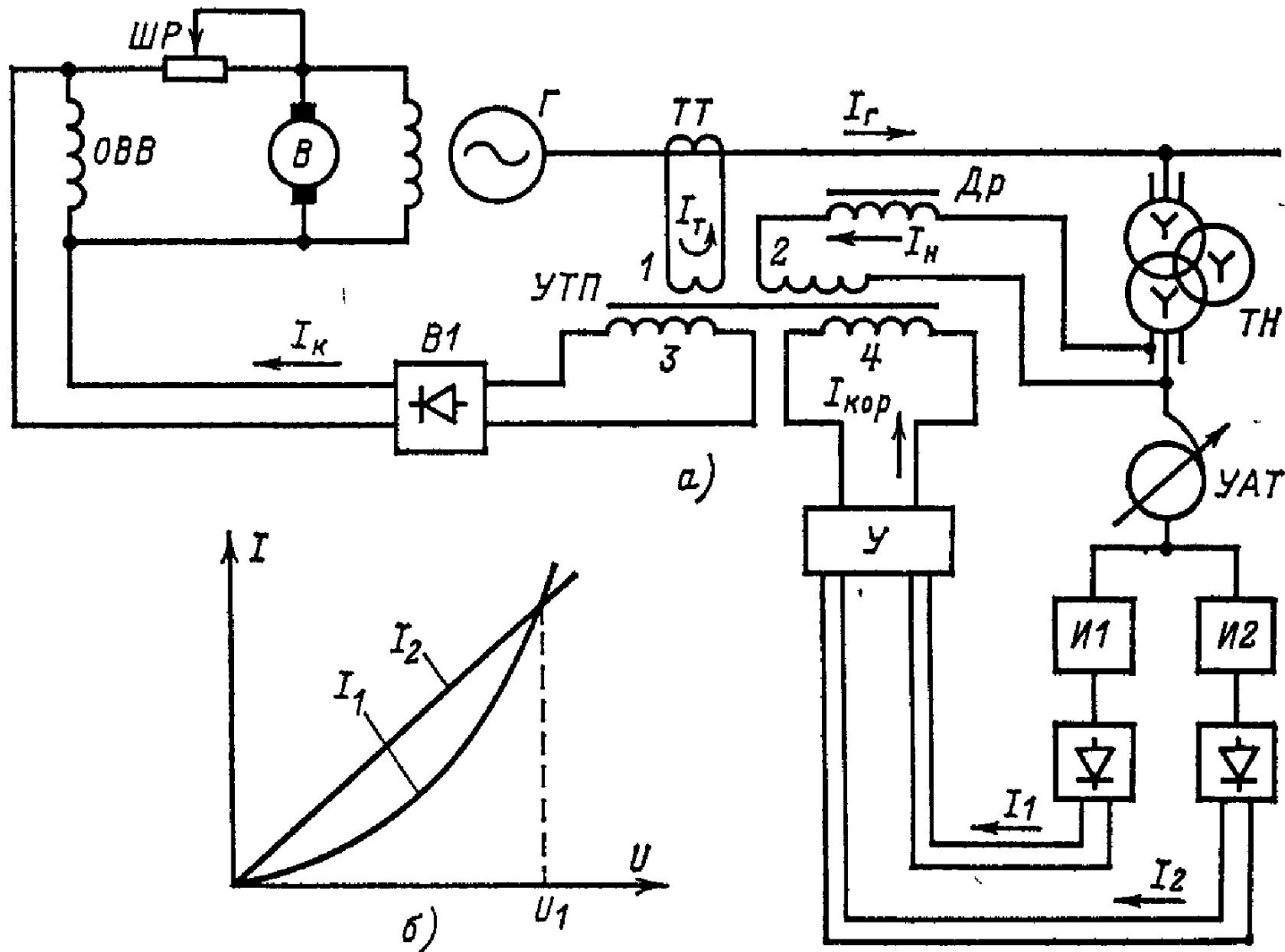


Рис. 11. Схема АРВ генератора пропорционального типа.

В схему компаундирования входят трансформаторы тока $ТТ$, вторичная обмотка которых включена на промежуточный трансформатор $УТП$, выпрямитель $В1$, выпрямляющий ток компаундирования в обмотке возбуждения возбудителя $ОВВ$. Ток компаундирования I_k пропорционален I_r .

Компаундирование не может обеспечить точное поддержание напряжения генератора. Поэтому с регулированием возбуждения по току статора применяется еще регулирование по напряжению статора. Для введения регулирующего импульса по напряжению трансформатор $УТП$ (универсальный трансформатор с подмагничиванием) оснащается еще двумя обмотками 2 и 4.

Ток в обмотке 2 пропорционален линейному напряжению U_{Γ} . Обмотка 1 подключена к трансформатору тока фазы, которой нет в линейном напряжении U_{Γ} . При чисто активной нагрузке МДС обмоток 1 и 2 взаимно сдвинуты на 90° , а при чисто реактивной нагрузке генератора они совпадают по фазе. Вследствие этого ток компаундирования при неизменных величинах I_{Γ} и U_{Γ} получается тем больше, чем ниже $\cos \varphi$ — так обеспечивается амплитудно-фазовое компаундирование, более точно поддерживающее напряжения, так как ток компаундирования зависит не только от абсолютного значения тока генератора, но и от $\cos \varphi$.

Через обмотку подмагничивания 4 УТП производится окончательная коррекция тока компаундирования относительно заданного значения U_{Γ} при помощи корректора напряжения.

В состав корректора напряжения входят два измерительных элемента $И1$ и $И2$, включаемых в цепь трансформатора напряжения $ТН$ через установочный автотрансформатор $УАТ$.

Принцип действия измерительного органа корректора поясняется [рис. 11, б](#). Выпрямленный ток I_1 на выходе измерительного элемента $И1$ пропорционален входному напряжению. Этот элемент является линейным.

Выпрямленный ток I_2 на выходе нелинейного элемента $И2$ имеет нелинейную зависимость от входного напряжения ([рис. 11, б](#)). Оба тока I_1 и I_2 поступают в усилитель $У$, который реагирует на их разность и усиливает ее. Ток выхода корректора поступает в данном случае в обмотку 4 подмагничивания $УТП$.

При снижении напряжения на входе измерительных элементов менее U_1 под действием разности токов ($I_1 - I_2$) ток выхода корректора увеличивается. Корректор поддерживает то напряжение генератора, которое соответствует напряжению U_1 на входе измерительных элементов.

Рассмотренная схема АРВ является *регулятором пропорционального действия*, реагирующим на отклонение тока статора и напряжения статора генератора.

Регуляторы *сильного действия* реагируют на скорость изменения параметров регулирования и даже на их ускорение. Устройство АРВ *сильного действия* в сочетании с быстродействующими системами возбуждения обеспечивает значительное повышение устойчивости параллельной работы генератора.

Структурная схема АРВ сильного действия приведена на [рис. 12](#). Автоматическое регулирование возбуждения состоит из двух основных звеньев: измерительного звена и усилителя-сумматора.

В измерительное звено входят: блок измерения напряжения (БИН) и блок измерения частоты (БИЧ). Блок БИН содержит *БКТ*. После *БКТ* сигнал поступает на измерительные элементы ΔU (отклонение напряжения) и U' (производная напряжения). Блок БИЧ имеет измерительные элементы, выход которых пропорционален Δf и f' .

Усилитель-сумматор представляет собой двухкаскадный магнитный усилитель, выходной сигнал которого направляется на управление рабочей и форсировочной группами тиристоров быстродействующей системы возбуждения.

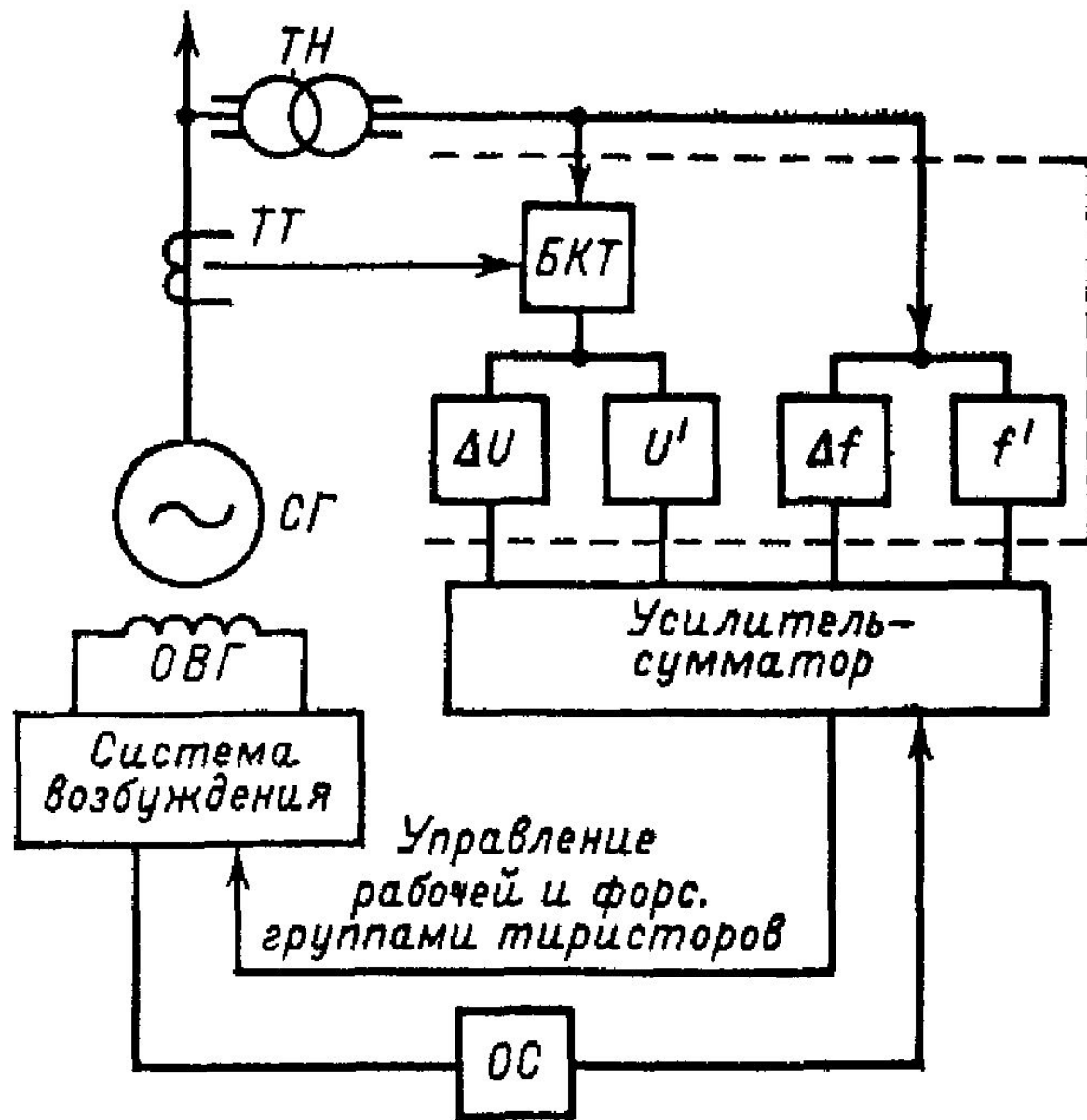


Рис. 2-24. Структурная схема АРВ сильного действия.