

# **СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ**

На современных электростанциях применяют синхронные генераторы трехфазного переменного тока. Первичными двигателями для них являются паровые турбины или гидротурбины. В первом случае это *турбогенератор*, а во втором – *гидрогенератор*.

Паровые турбины, являющиеся первичными двигателями, наиболее экономичны при высоких скоростях, но здесь конструкторов ограничивает строгая связь для синхронных генераторов:

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

где  $f$  – частота сети,  $p$  – число пар полюсов генератора. При принятой стандартной частоте 50 Гц и наименьшем возможном числе пар полюсов  $p = 1$  наибольшее число оборотов

$$n = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/мин.} :$$

Большинство турбогенераторов быстроходные, т.е. имеют максимальное число оборотов 3000. Если бы наши электроустановки были рассчитаны на частоту 60 Гц, то номинальное число оборотов соответственно увеличилось бы до 3600.

Генераторы небольших мощностей, соединенные с дизелями и другими поршневыми машинами, изготавливаются на 750 – 1500 об/мин. Большие скорости вращения ротора отражаются на его конструкции – это цилиндрическая, цельнокованая поковка из специальной легированной стали. Вдоль поверхности ротора фрезеруют радиальные пазы, в которые укладывается обмотка возбуждения. Пазы закрываются клиньями, а в лобовой части обмотка укрепляется бандажными кольцами. Ротор турбогенератора гладкий, неявнополюсный, диаметром 1,1 – 1,2 м, длиной 6 – 6,5 м.

Сердечник статора шихтуется из листов электротехнической стали в пакеты, между которыми образуются вентиляционные каналы. В пазы статора укладывается обмотка, закрепляемая деревянными или текстолитовыми клиньями, а лобовые части тщательно прикрепляются к конструктивным частям статора. Корпус статора изготавливается сварным и с торцов закрывается щитами с герметическими уплотнениями.

Для АЭС ввиду низких параметров пара целесообразно применять четырехполюсные генераторы с частотой вращения 1500 об/мин.

Гидрогенераторы большой и средней мощности выполняются с вертикальным валом, в верхней части которого располагается генератор, а в нижней – гидротурбина. Мощность гидротурбины и ее скорость определяются величиной напора и расхода воды. Гидрогенераторы при больших мощностях изготавливаются на 60–125 об/мин, при средних и малых – на 125 – 750 об/мин, т.е. они являются тихоходными машинами.

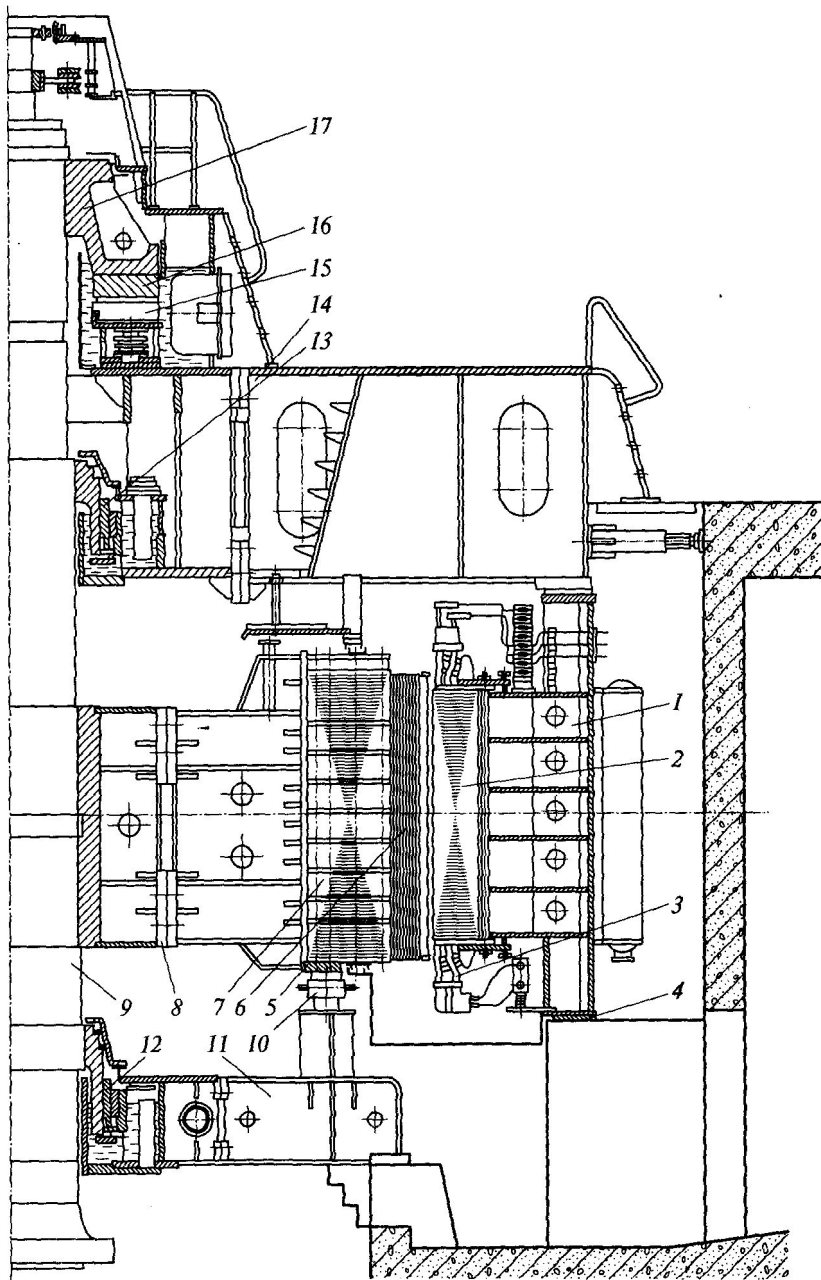


Рис. 2.1. Гидрогенератор подвесного исполнения (353 МВ-А, 200 об/мин):

- 1 – корпус статора; 2 – сердечник статора; 3 – обмотка статора; 4 – фундаментная плита; 5 – кольцо тормозное; 6 – полюс; 7 – обод ротора; 8 – остов ротора; *P* – вал; 10 – тормоз-домкрат; 11 – крестовина нижняя; 12 – нижний направляющий подшипник; 13 – верхний направляющий подшипник; 14 – крестовина верхняя; 15 – сегмент подпятника; 16 – диск подпятника; 17 – втулка подпятника

Вертикальные гидрогенераторы подвесного типа (рис. 2.1) имеют один подпятник 15, 16, 17, расположенный в верхней крестовине, к которой «подвешен» ротор генератора 7, 8 и колесо турбины. Нижний 12 и верхний 13 направляющие подшипники обеспечивают вертикальное положение вала.

В гидрогенераторах зонтичного типа подпятник находится под ротором, в нижней крестовине, что позволяет снизить высоту всего агрегата, а следовательно, и здания ГЭС. Такое исполнение применяется для мощных агрегатов.

Статор гидрогенератора выполняется принципиально так же, как у турбогенератора. Ротор тихоходных гидроагрегатов имеет большое количество полюсов. Так, при 200 об/мин

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{200} = 15 \text{ пар полюсов,}$$

а при  $n=68,2$  об/мин  $p=44$  пары, т.е. на ободу ротора надо разместить 88 полюсов. Это приводит к необходимости увеличить диаметр ротора до 16 – 22 м. Полюсы ротора с обмоткой возбуждения крепятся на ободу ротора 7. Кроме основной обмотки возбуждения, полюсы снабжены успокоительной обмоткой из медных стержней, уложенных в пазах полюса у периферии.

Находят применение капсульные гидрогенераторы с горизонтальным валом, заключенные в водонепроницаемую оболочку, которая обтекается потоком воды, приводящим в движение колесо гидротурбины.



Номинальной мощности генератора соответствует определенная температура охлаждающего воздуха, водорода или воды и длительно допустимая температура нагрева обмоток статора и ротора, а также активной стали магнитопровода.

Допустимый нагрев частей генератора зависит от теплостойкости применяемых изоляционных материалов (табл. 2.1).

Таблица 2.1 **Допустимые температуры нагрева турбогенераторов, °С**

Часть генератора	Класс изоляции		
	B	F	H
Обмотка статора и активная сталь	105	120	140
Обмотка ротора	130	135	160

В настоящее время ОАО «Электросила» внедряет изоляцию «Монолит-2» для обмоток статора с изолировкой стержней обмотки сухими стеклослюдонитовыми лентами с последующей вакуумно-нагнетательной пропиткой и запечкой обмотки, уложенной в пазы статора. Такая изоляция позволяет увеличить единичную мощность турбогенераторов и их технические характеристики.

Изолирующие материалы в процессе эксплуатации подвергаются старению и теряют свои изолирующие свойства, поэтому **систематические перегрузки генераторов недопустимы**. Однако в аварийных условиях допускается кратковременная перегрузка по току статора и ротора [1.13], приведенная в табл. 2.2 и 2.3.

**Таблица 2.2 Допустимая кратность перегрузки генераторов и синхронных компенсаторов по току статора**

Продолжительность перегрузки, мин, не более	Косвенное охлаждение обмотки статора	Непосредственное охлаждение обмотки статора	
		водой	водородом
60	1,1	1,1	—
15	1,15	1,15	—
6	1,2	1,2	1,15
4	1,3	1,3	1,2
3	1,4	1,35	1,25
2	1,5	1,4	1,3
1	2,0	1,5	1,5

**Таблица 2.3 Допустимая кратность перегрузки по току ротора**

Продолжительность перегрузки, мин, не более	Турбогенераторы ТГВ, ТВВ (до 500МВт), ТВФ, кроме ТВФ-120		ТВФ-120
	60	1,06	1,06
4	1,2	1,2	1,2
1	1,7	1,5	1,5
0,5	2,0	-	-
0,33	-	2,0	2,0



# Системы охлаждения генераторов

При работе генератора происходят потери энергии, превращающиеся в теплоту, которая нагревает обмотки, сталь статора и ротора. Для удаления этой теплоты необходима система искусственного охлаждения.

Охлаждение можно производить воздухом, водородом, водой, маслом (рис. 2.2). Отвод теплоты может осуществляться непосредственно от проводников обмотки по каналам, расположенным внутри пазов, или косвенно от поверхности ротора и статора. Эти системы охлаждения имеют условное буквенное обозначение, применяемое в паспортных данных генераторов. Например: КВР – косвенное охлаждение водородом; НВ – непосредственное охлаждение водой.

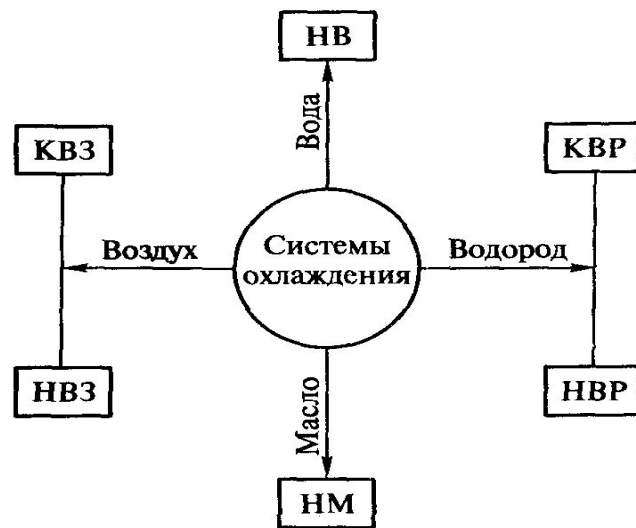


Рис. 2.2. Системы охлаждения генераторов:

КВЗ – косвенное воздухом; НВЗ – непосредственное воздухом; КВР – косвенное водородом; НВР – непосредственное водородом; НВ – непосредственное водой; НМ – непосредственное маслом

**Воздушное охлаждение косвенное** ротора и статора применяется в турбогенераторах мощностью до 25 МВт и в гидрогенераторах до 250 МВт. **Проточная** система охлаждения применяется для генераторов небольшой мощности (до 2 – 4 МВ А). В этой системе воздух забирается из помещения и с помощью вентиляторов, насаженных на вал генератора, прогоняется через зазор между статором и ротором по вентиляционным каналам. При этом изоляция обмоток быстро загрязняется и срок службы генератора уменьшается.

**Замкнутая** система охлаждения предусматривает циркуляцию одного и того же объема воздуха по замкнутому контуру: из камеры холодного воздуха с помощью вентиляторов на валу генератора воздух нагнетается в машину, охлаждает поверхность статора и ротора, попадает в камеру горячего воздуха, проходит через воздухоохладитель и вновь поступает в генератор. Для восполнения потерь воздуха за счет утечек предусматривается забор воздуха через масляные фильтры.

Совершенствование системы воздушного охлаждения, применение многоструйного охлаждения позволили создать серию турбогенераторов ТФ мощностью от 3 до 180 МВт. В этой серии применена терморреактивная изоляция класса F в обмотках статора и ротора, предусматривается наддув воздуха в полость генератора для создания повышенного давления, что препятствует проникновению внешней пыли.

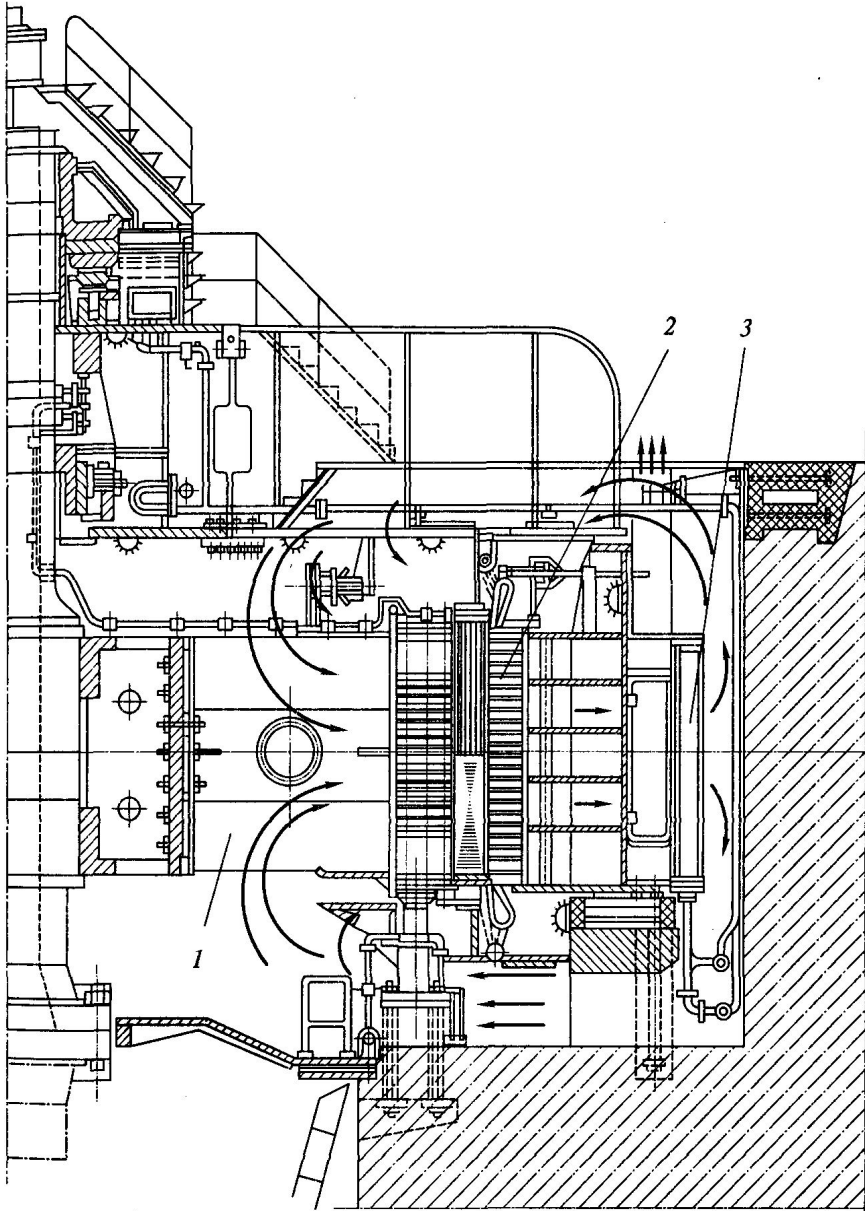
В этих турбогенераторах предусматривается непосредственное охлаждение обмоток ротора воздухом, проходящим в каналах обмотки внутри паза. (В обозначении типа турбогенератора буква Ф обозначает «форсированное» охлаждение.) Эта серия выпускается с 1991 г. ОАО «Электросила» в основном для замены устаревших, выработавших свой срок генераторов ТВФ-63-2, ТВ-60-2 и др. с установкой на тех же фундаментах [2.7].

Турбогенераторы серии ТЗФ имеют улучшенные характеристики по сравнению с ТФ, так как в них разделены потоки воздуха, охлаждающего статор и ротор, применена трехконтурная система, поэтому исключено взаимное отрицательное действие потоков, что позволило снизить нагрев обмоток и конструктивных частей генератора. Охлаждающий воздух циркулирует под действием двух центробежных вентиляторов, установленных на валу ротора, и охлаждается в водовоздушных охладителях. Турбогенераторы этой серии применяются на паротурбинных, газотурбинных и парогазотурбинных установках.

Гидрогенераторы имеют значительно большую поверхность охлаждения, чем турбогенераторы, так как диаметр ротора у них в несколько раз больше. Это позволяет применять воздушное охлаждение для мощных гидрогенераторов.

Рис. 2.3. Воздушное охлаждение гидрогенератора Братской ГЭС мощностью 225 МВт: 1 – ротор; 2 – статор; 3 – воздухоохладитель

На рис. 2.3 показан разрез по гидрогенератору мощностью 225 МВт, имеющему радиальную систему воздушной вентиляции. Воздух поступает сверху и снизу и под действием избыточного давления, созданного вращающимся ротором, проходит через каналы в ободу ротора, промежутки между полюсами, воздушный зазор, каналы магнитопровода статора, выходит в корпус статора и через отверстия в корпусе – в охладители. Пройдя охладители, воздух по каналам в фундаменте и между лапами верхней крестовины вновь поступает в генератор.



же схеме, как и воздушное.

На рис. 2.4 показана схема многоструйного водородного охлаждения. Преимуществами применения водорода являются: в 7 раз большая теплопроводность, в 14 раз меньшая плотность, в 1,44 раза больший коэффициент теплоотдачи с поверхности. Более эффективное охлаждение позволяет при тех же размерах увеличить мощность турбогенераторов на 15 – 20 %, а синхронных компенсаторов – на 30%.

Благодаря меньшей плотности водорода уменьшаются вентиляционные потери, в результате чего возрастает КПД на 0,8 – 1 %. Изоляция в среде водорода не окисляется, поэтому повышается срок службы изоляции обмоток.

Однако применение водорода для охлаждения связано с опасностью взрыва смеси водорода с воздухом (от **4,1 до 74%** H<sub>2</sub>).

Машины с водородным охлаждением должны иметь газоплотный корпус, масляные уплотнения вала, уплотнения токопроводов к обмоткам ротора и статора, уплотнения крышек газоохладителей, лючков и съемных торцевых щитов. Суточная утечка водорода из корпуса должна быть не более 5% [1.13].

В процессе эксплуатации должны поддерживаться чистота водорода в корпусах генераторов с косвенным охлаждением – 97%, с непосредственным охлаждением – 98% и некоторое избыточное давление водорода 0,3 – 0,6 МПа, чтобы не происходил подсос воздуха в корпус.

Таким образом, использование достоинств водородного охлаждения связано с усложнением конструкции и эксплуатации генераторов.

Непосредственное водородное охлаждение турбогенераторов применяется для машин мощностью 60 МВт и более. В генераторах серии ТВФ статор имеет косвенное водородное охлаждение, а ротор – непосредственное водородное, когда водород подается внутрь полых проводников со стороны торцевой части ротора (разрез В–В на рис. 2.6).

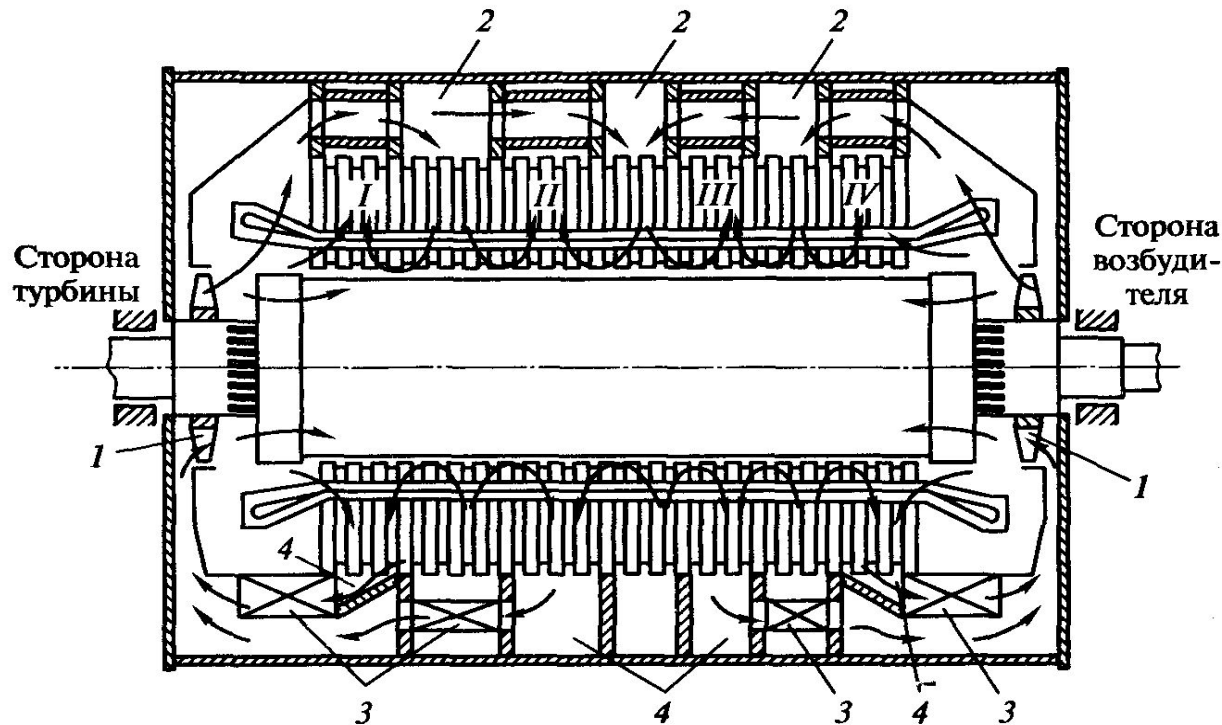


Рис. 2.4. Многоструйная система водородного охлаждения турбогенератора:  
1 – вентилятор; 2 – камера холодного газа; 3 – газоохладители; 4 – камера горячего газа

Принципиальная схема газового хозяйства системы водородного охлаждения показана на рис. 2.5 .

При заполнении корпуса генератора водородом воздух сначала вытесняется углекислым газом во избежание образования гремучей смеси. Затем углекислый газ под давлением подается из баллонов 10 в нижний коллектор 9, воздух вытесняется через верхний коллектор 6 и выпускается наружу. Когда весь объем корпуса генератора будет заполнен углекислотой с концентрацией около 90%, закрывается вентиль «Выпуск газа» и в верхний коллектор подается из баллонов 1 водород, который вытесняет углекислоту через нижний коллектор и открываемый вентиль «Выпуск углекислоты». Как только чистота водорода достигнет заданного уровня, закрывается вентиль «Выпуск углекислоты», и давление водорода доводится до нормального. При останове генератора для ревизии или ремонта сначала из корпуса вытесняется водород с помощью углекислоты, которая затем вытесняется воздухом. Во время работы осуществляется автоматический контроль чистоты водорода газоанализатором 4; давление в корпусе до вентилятора А и за вентилятором Б – манометром 3 и реле давления 5. Постоянно контролируется давление масла в уплотнениях подшипников.

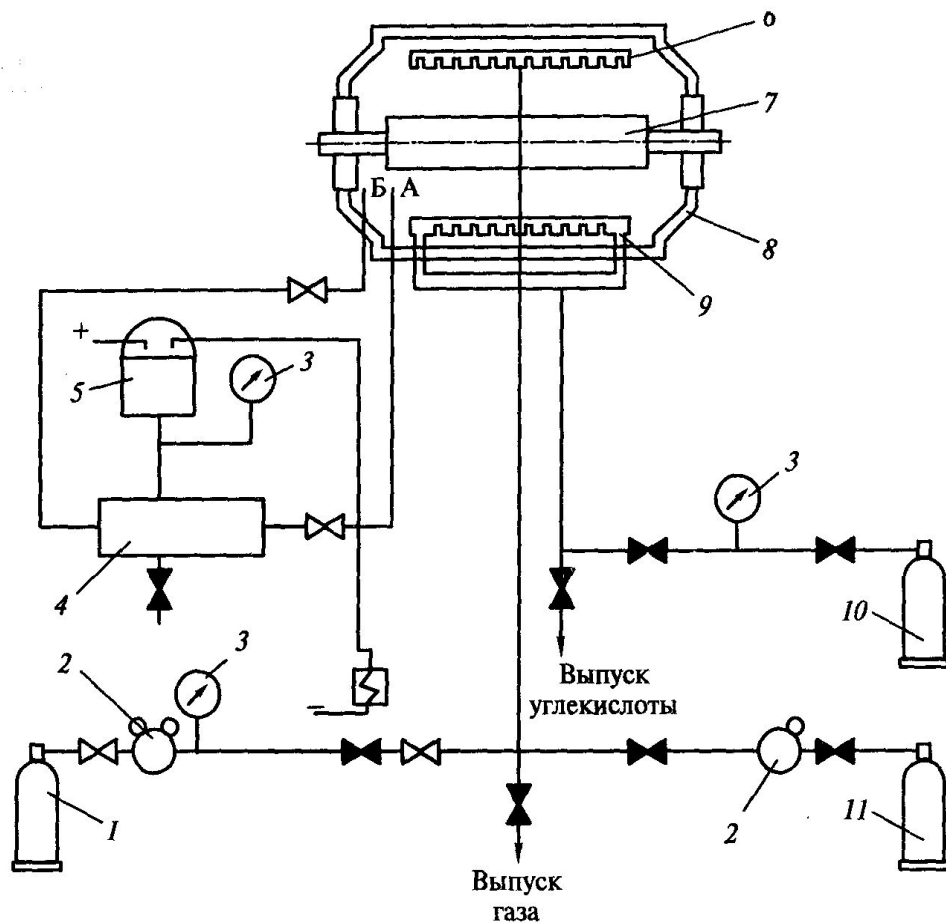


Рис. 2.5. Принципиальная схема газового хозяйства системы водородного охлаждения:

- 1 – баллоны с водородом; 2 – редуктор; 3 – манометр; 4 – газоанализатор; 5 – реле давления; 6, 9 – верхний и нижний коллекторы; 7 – ротор; 8 – корпус генератора; 10 – баллоны с углекислым газом; 11 – баллоны сжатого воздуха; А – трубопровод в области за вентилятором; Б – трубопровод в области до вентилятора



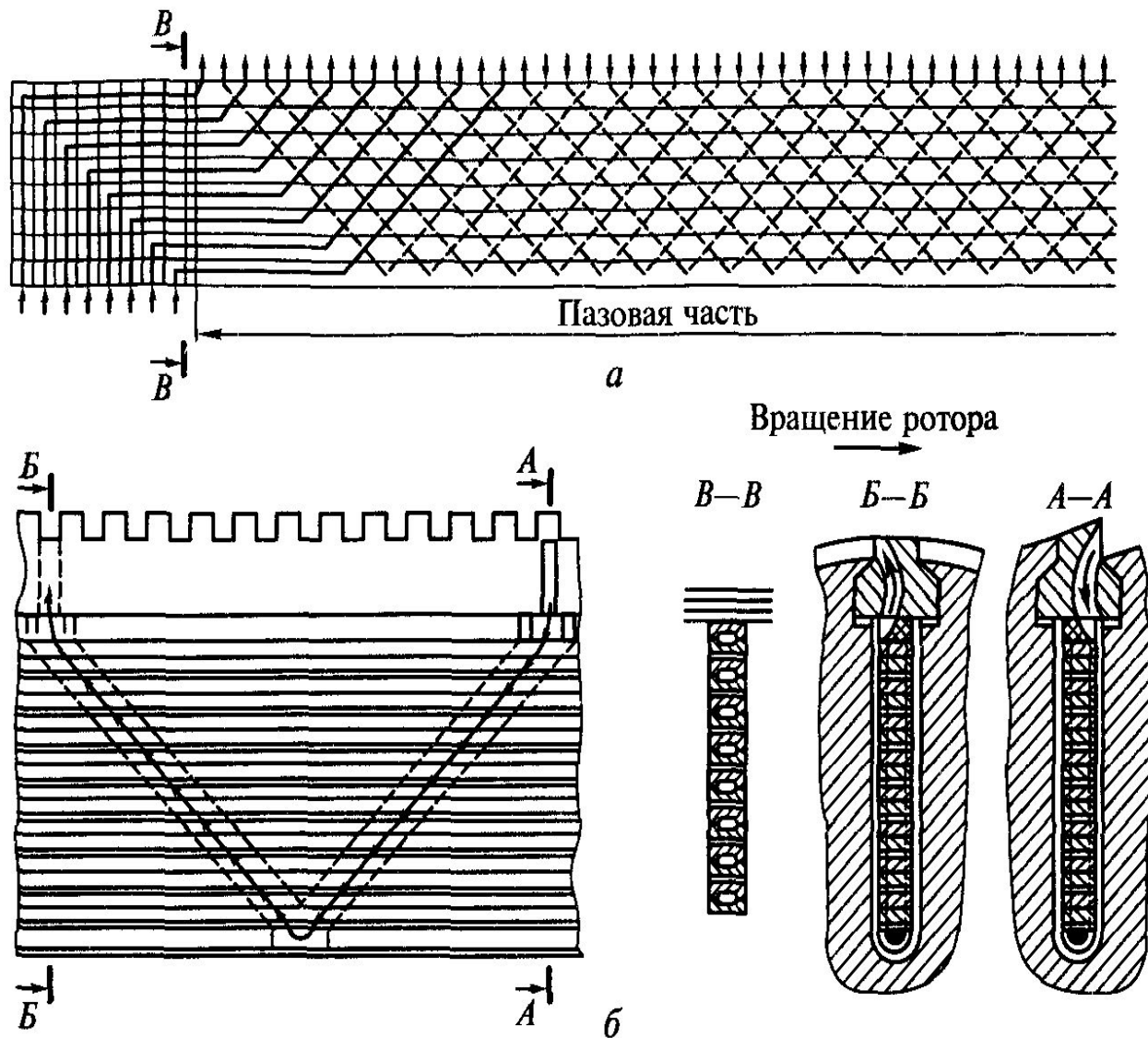


Рис. 2.6. Схема охлаждения роторов турбогенераторов серий ТВФ и ТВВ:  
 а – общая схема охлаждения; б – элементарный путь охлаждающего газа; А-А, Б-Б – разрезы пазов ротора; В-В – разрез по пазу ротора в торцевой части

Проводники обмотки ротора в пазовой части сплошные, прямоугольного сечения, на боковых частях которых фрезеруются косые каналы, идущие диагонально поверхности ротора к дну паза и обратно. Схема выполнена многоходовой, и охлаждением охвачены все проводники. Пазовые клинья снабжены дефлекторами такого профиля, благодаря которому при вращении ротора на входе водорода создается напор (сечение А–А), а на выходе – разрежение (Б–Б), это обеспечивает самовентиляцию водородом. Давление водорода в корпусе составляет 0,2 – 0,4 МПа, циркуляция водорода обеспечивается вентиляторами, насаженными на вал машины с обеих сторон.

Турбогенераторы ТГВ-300 имеют непосредственное водородное охлаждение обмоток статора и ротора. Циркуляция водорода создается компрессором, установленным на валу генератора со стороны контактных колец. Стержень обмотки статора состоит из двух рядов элементарных проводников прямоугольного сечения, между которыми уложены стальные трубки, в которых циркулирует водород. Обмотки ротора имеют также непосредственное охлаждение проводников. охладителями 9, встроенными в корпус.

Газоохладители встраиваются в корпус со стороны турбины или выносятся в специальную камеру в нижней части.

Во внешней системе горячая вода попадает в охладители, а затем насосами подается к патрубкам А и В.

Магнитопровод и конструктивные части статора охлаждаются водородом по замкнутому циклу с водогазовыми охладителями 9, встроенными в корпус.

**Непосредственное охлаждение водой** обмоток статора турбогенераторов позволяет увеличить единичную мощность при тех же габаритах, так как теплоотводящая способность воды в 12,5 раз больше, чем у водорода. Дистиллированная вода, применяемая для охлаждения, подается в полые медные проводники, заложенные в пазы статора с помощью гибких фторопластовых шлангов. Охлаждение обмоток ротора и активной стали производится водородом так же, как у турбогенераторов серии ТГВ. Водородно-водяное охлаждение имеют турбогенераторы ТВВ-500, ТВВ-800, ТВВ-1000 и ТВВ-1200. Водяное охлаждение обмотки статора применяется в мощных гидрогенераторах типа СВФ. Обмотка ротора и активная сталь имеют непосредственное охлаждение воздухом. Водородное охлаждение в гидрогенераторах не применяется ввиду больших размеров ротора и трудностей герметизации корпуса генератора.

С целью дальнейшего улучшения системы охлаждения и сокращения размеров турбогенераторов разработано водяное охлаждение статора и ротора (рис. 2.7). Охлаждающая вода подается в полые стержни статорной обмотки от напорного коллектора 12, а горячая вода отводится через сливной коллектор 13. В ротор холодная вода поступает по патрубку В через скользящее уплотняющее соединение в торце вала 17 и через центральное отверстие в бочке ротора попадает в каналы 4 проводников ротора и охлаждает проводники. Нагретая вода через сливные каналы 14, 15 попадает в радиальные отверстия вала ротора 16 и сливается во внешнюю систему через патрубок Г.

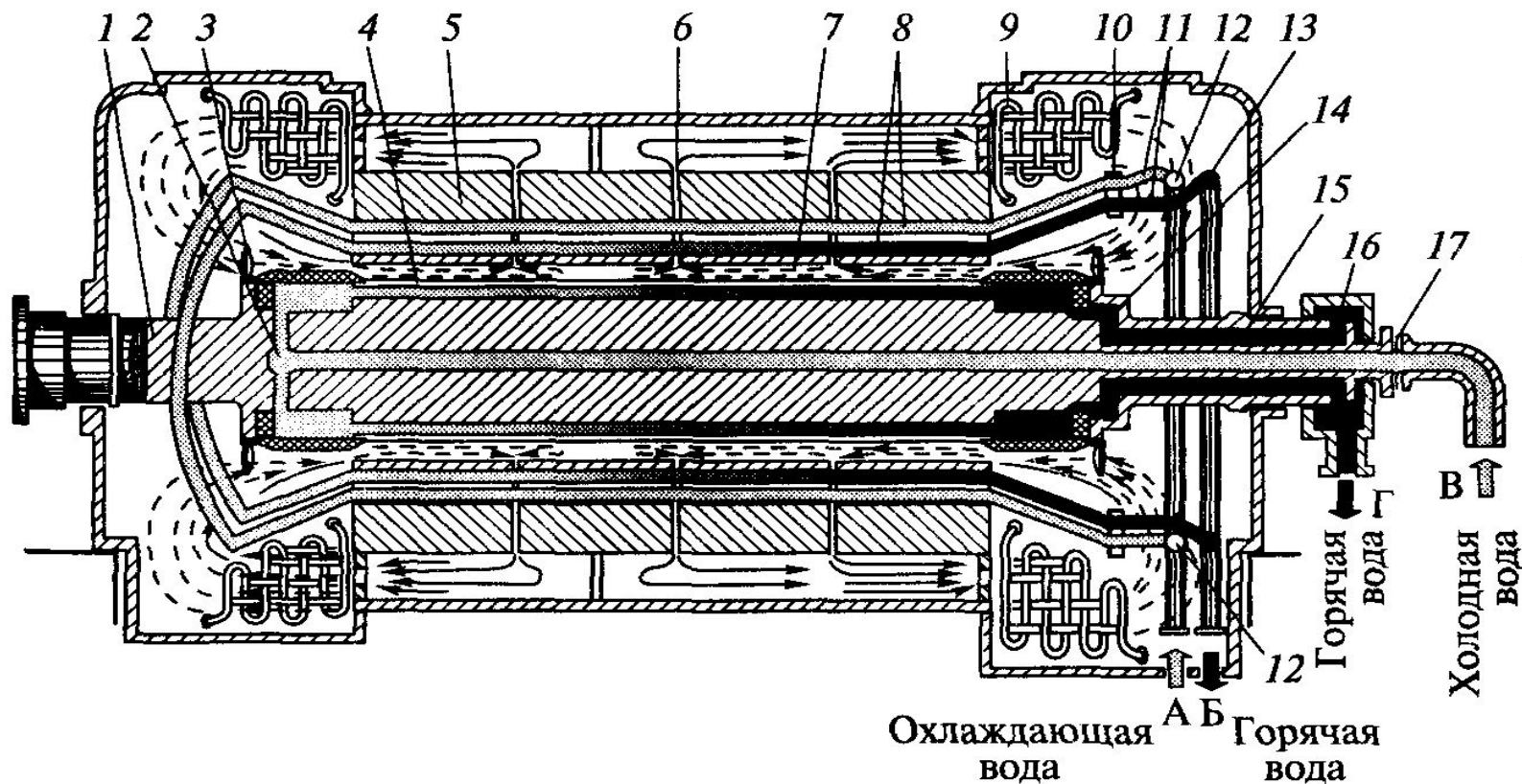


Рис. 2.7. Схема охлаждения турбогенератора ГВ-300. 1 – ротор, 2 – полости, высверленные в бочке ротора; 3 – вентилятор; 4 – охлаждающие каналы вдоль пазов ротора; 5 – магнитопровод статора; 6 – радиальные каналы магнитопровода; 7 – зазор между ротором и статором; 8 – пустотелые стержни в обмотке статора; 9 – водогазовые охладители; 10 – головки стержней; 11 – изолирующие шланги; 12 – напорный коллектор холодной воды; 13 – сливной коллектор; 14, 15 – сливные каналы; 16 – радиальные отверстия вала ротора; 17 – скользящее уплотняющее соединение в торце вала

Во внешней системе горячая вода попадает в охладители, а затем насосами подается к патрубкам А и В.

Магнитопровод и конструктивные части статора охлаждаются водородом по замкнутому циклу с водогазовыми охладителями 9, встроенными в корпус.

Генератор ТТВ-500 благодаря водяному охлаждению обмоток статора и ротора имеет массу и габариты несколько меньшие, чем ТТВ-300.

Наличие водорода в системе охлаждения не избавляет от основного недостатка – взрывоопасность, поэтому дальнейшее совершенствование систем охлаждения турбогенераторов привело к системе, которую условно называют «три воды». В этой системе обмотки статора, ротора, магнитопровод и конструктивные части охлаждаются водой.

Серия турбогенераторов ТЗВ с полным водяным охлаждением взрыво- и пожаробезопасна, так как не содержит масла и водорода. Внутренний объем генератора заполнен под небольшим избыточным давлением воздухом, циркулирующим через осушительную установку. Для охлаждения и смазки подшипника может применяться негорючее масло ОМТИ. Основной особенностью этой серии является «самонапорная» система охлаждения ротора, которая позволяет существенно снизить давление циркулирующей в роторе воды. Это исключает разгерметизацию ротора, а следовательно, повышает надежность работы. Генераторы ТЗВ изготавливаются ОАО «Электросила» мощностью от 63 до 800 МВт [2.7].

Обмотка статора этих генераторов (рис. 2.8) стержневая, двухслойная из полых и сплошных проводников. По полым проводникам протекает охлаждающий дистиллят. Для подвода и слива дистиллята имеются кольцевые коллекторы с обеих сторон статора, которые соединяются с полыми стержнями обмотки фторопластовыми трубками.

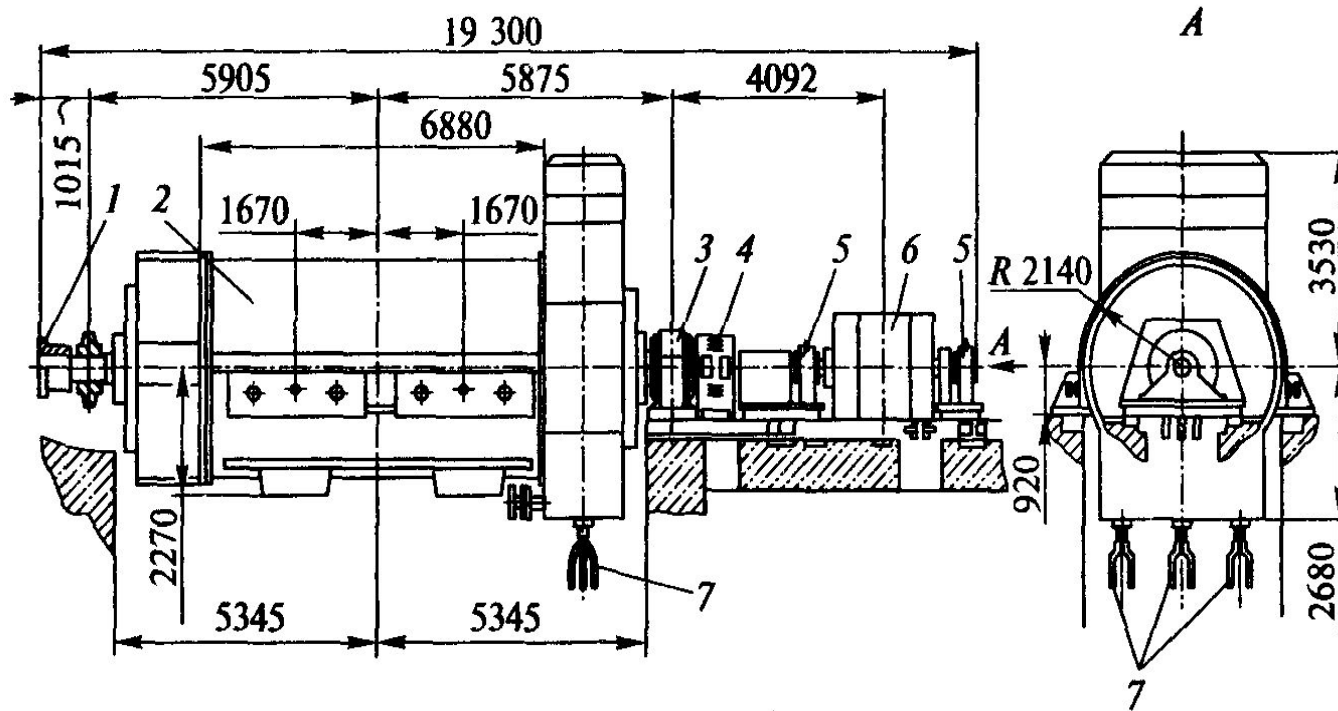


Рис. 2.8. Турбогенератор ТЗВ-800-2УЗ и возбудитель ВТ-6000-2УЗ:  
 1 – муфта соединительная; 2 – корпус статора; 3 – подшипник генератора;  
 4 – контактные кольца ротора и щетки; 5 – подшипники возбудителя;  
 6 – возбудитель; 7 – выводы генератора

Обмотки ротора выполнены из медных полых проводов прямоугольной формы с круглым каналом внутри. В торце ротора закреплены напорное и сливное кольцо, к которым присоединены все трубки входных и выходных концов катушек. Охлаждение обмоток ротора осуществляется дистиллятом, поступающим под давлением в напорное кольцо.

В качестве возбудителя турбогенератора ТЗВ-800 используется синхронный трехфазный генератор ВТ-6000 с воздушным охлаждением закрытого исполнения.

Серия ТЗВ находит широкое применение для замены устаревших турбогенераторов, а также на вновь строящихся ТЭС.

На базе серии турбогенераторов ТЗВ разработаны и выпускаются асинхронизированные турбогенераторы ТЗВА. На роторе такого генератора имеются две обмотки возбуждения, питаемые от отдельных каналов системы статического реверсивного тиристорного возбуждения и управляемые общим автоматическим регулятором возбуждения. Такие турбогенераторы позволяют компенсировать реактивную мощность в энергосистеме и предотвращать возможность повышения напряжения в сетях до уровней, допустимых для изоляции электрооборудования.

Более высокая стоимость асинхронизированных турбогенераторов окупается отказом от установки шунтирующих реакторов, предназначенных для улучшения режима синхронных генераторов по реактивной мощности и нормализации напряжения в примыкающих к электростанциям электрических сетях.

Замена выработавших свой ресурс синхронных турбогенераторов новой

**Непосредственное охлаждение обмотки статора маслом** применено в турбогенераторе ТВМ. Охлаждение огнестойкой диэлектрической жидкостью позволяет применить для изоляции обмоток статора сравнительно дешевую бумажно-масляную изоляцию. Расходы на изоляцию обмоток генератора ТВМ-300 в 4 раза меньше, чем в генераторах ТВВ и ТГВ такой же мощности.

Бумажно-масляная изоляция статорной обмотки позволяет повысить напряжение до 35 – 110 кВ, т. е. включать генератор в сеть без повышающих трансформаторов. В этой системе охлаждения не только обмотка статора, но и магнитопровод охлаждаются маслом, поэтому статор отделяется от ротора изоляционным газонепроницаемым цилиндром, рассчитанным на высокое давление и расположенным в зазоре между ротором и статором.

Для ротора применено непосредственное водородное или водяное охлаждение.

Дальнейшим направлением развития систем охлаждения ТГ является применение криогенной системы – охлаждение обмотки ротора жидким гелием.

В Китае созданы гидрогенераторы мощностью до 400 МВт с испарительной системой охлаждения. Для охлаждения используется хладагент с температурой кипения 47,6 °С при давлении 1 кгс/см<sup>2</sup>.

В Японии активно работают над созданием турбогенераторов с использованием явления сверхпроводимости в обмотках ротора.



# Возбуждение синхронных генераторов

Обмотка ротора синхронного генератора питается постоянным током, который создает магнитный поток возбуждения. Обмотка ротора, источник постоянного тока, устройства регулирования и коммутации составляют систему *возбуждения генератора*.

Системы возбуждения должны:

- обеспечивать надежное питание обмотки ротора в нормальных и аварийных режимах;
- допускать регулирование напряжения возбуждения в достаточных пределах;
- обеспечивать быстрое регулирование возбуждения с высокими кратностями форсирования в аварийных режимах;
- осуществлять быстрое развозбуждение и в случае необходимости производить гашение поля в аварийных режимах.

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

$$V=0,632(U_{f\text{пот}} - U_{f\text{ном}})/U_{f\text{ном}} t_1$$

и отношение потолочного напряжения к номинальному напряжению возбуждения

$$U_{f\text{пот}}/U_{f\text{ном}} = k_{\text{ф}}$$

так называемая кратность форсировки.

Согласно ГОСТ турбогенераторы должны иметь  $k_{\phi} > 2$ , а скорость нарастания возбуждения – не менее  $2 \text{ с}^{-1}$ . Кратность форсировки для гидрогенераторов должна быть не менее 1,8 для коллекторных возбуждателей, соединенных с валом генератора, и не менее 2 для других систем возбуждения. Скорость нарастания напряжения возбуждения должна быть не менее  $1,3 \text{ с}^{-1}$  для гидрогенераторов мощностью до 4 МВА включительно и не менее  $1,5 \text{ с}^{-1}$  для гидрогенераторов больших мощностей [2.3].

Для мощных гидрогенераторов, работающих на дальние электропередачи, к системам возбуждения предъявляются более высокие требования:  $k_{\phi} = 3 - 4$ , скорость нарастания возбуждения до  $10 U_{f \text{ ном}}$  в секунду.

Обмотка ротора и системы возбуждения генераторов с косвенным охлаждением должны выдерживать двукратный по отношению к номинальному ток в течение 50 с. Для генераторов с непосредственным охлаждением обмоток ротора это время сокращается до 20 с, для генераторов мощностью 800–1000 МВт принято время 15 с, 1200 МВт - 10 с (ГОСТ 533-85Е).

В зависимости от источника питания системы возбуждения разделяются на системы независимого возбуждения и само возбуждения.

В системе независимого возбуждения на одном валу с генератором находится возбуждатель – генератор постоянного или переменного тока. В системе самовозбуждения питание обмотки возбуждения осуществляется от выводов самого генератора через специальные понижающие трансформаторы и выпрямительные устройства.

Для генераторов мощностью до 100 МВт в качестве возбудителя применяется генератор постоянного тока  $GE$ , соединенный с валом генератора (рис. 2.9,а). Обмотка возбуждения возбудителя  $LGE$  питается от якоря возбудителя, ток в ней регулируется реостатом  $RR$  или автоматическим регулятором возбуждения  $APB$ . Ток, подаваемый в обмотку возбуждения  $LG$  синхронного генератора  $G$ , определяется величиной напряжения на возбудителе. Недостатком такой системы возбуждения является невысокая надежность работы генератора постоянного тока  $GE$  из-за вибрации и тяжелых условий коммутации при высокой частоте вращения 3000 об/мин. Другим недостатком является невысокая скорость нарастания возбуждения, особенно у гидрогенераторов ( $V= 1-2 \text{ с}^{-1}$ ).

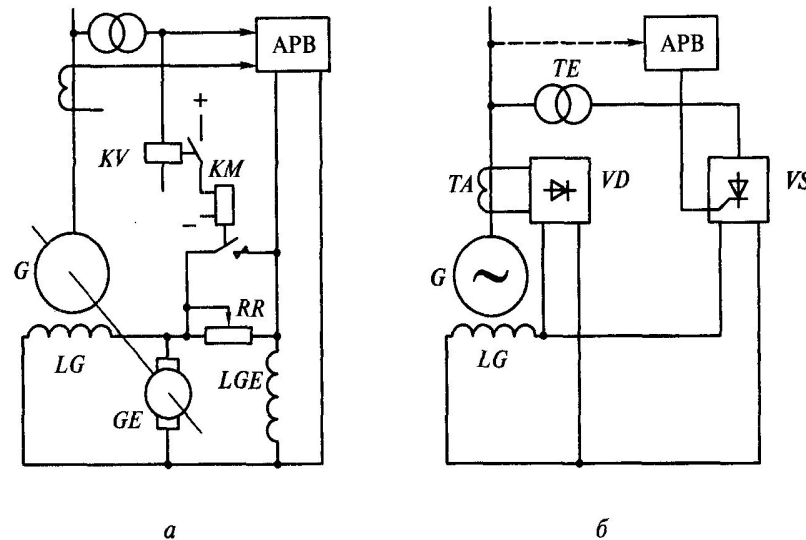


Рис. 2.9. Принципиальные схемы возбуждения генераторов:  
 а – независимое электромашинное возбуждение; б – полупроводниковое самовозбуждение

В системе самовозбуждения (рис. 2.9,б) обмотка возбуждения генератора  $L_G$  получает питание от трансформатора  $TE$ , присоединенного к выводам генератора, через управляемые от АРВ вентили  $VS$  и от трансформаторов тока  $TA$  через неуправляемые вентили  $VD$ . Ток вентилей  $VD$  пропорционален току статора, поэтому они обеспечивают форсировку возбуждения и работу генератора при нагрузке. Управляемые вентили  $VS$  подают ток, пропорциональный напряжению генератора, и обеспечивают регулирование напряжения в нормальном режиме. Такая система применяется для мощных синхронных машин.

Широкое распространение получила система возбуждения с машинным возбудителем 50 Гц и статическими выпрямителями (статическая тиристорная система независимого возбуждения – рис. 2.10). На одном валу с генератором  $G$  находится вспомогательный синхронный генератор  $GE$ , который имеет на статоре трехфазную обмотку с отпайками, к которым присоединены две группы тиристоров: рабочая группа  $VD1$  – на низкое напряжение возбудителя и форсировочная группа  $VD2$  – на полное напряжение. Применение двух групп тиристоров обеспечивает потолок возбуждения до  $4U_{f\text{ ном}}$  и высокое быстродействие ( $V=50\text{ с}^{-1}$ ). Обе группы соединяются параллельно по трехфазной мостовой схеме. На рис. 2.10 для упрощения чтения схемы показаны тиристоры только в одной фазе.

Система управления тиристорами  $AVD2$  и  $AVD1$  питается от трансформатора  $TA1$  и связана с АРВ (автоматическое регулирование возбуждения). Возбудитель  $GE$  имеет обмотку возбуждения  $L_{GE}$ , получающую питание от трансформатора  $TA2$  через вентили  $VD$ . В рассмотренной схеме также показаны элементы схемы автоматического гашения магнитного поля (АГП): автомат АГП, резистор  $R$ , разрядник  $FV$  и контактор  $KM$ .

К недостаткам схемы следует отнести наличие возбудителя переменного тока, который усложняет эксплуатацию, а также наличие скользящих контактов между неподвижными щетками, к которым присоединена система неподвижных тиристоров, и подвижными контактными кольцами КК, вращающимися на валу ротора.

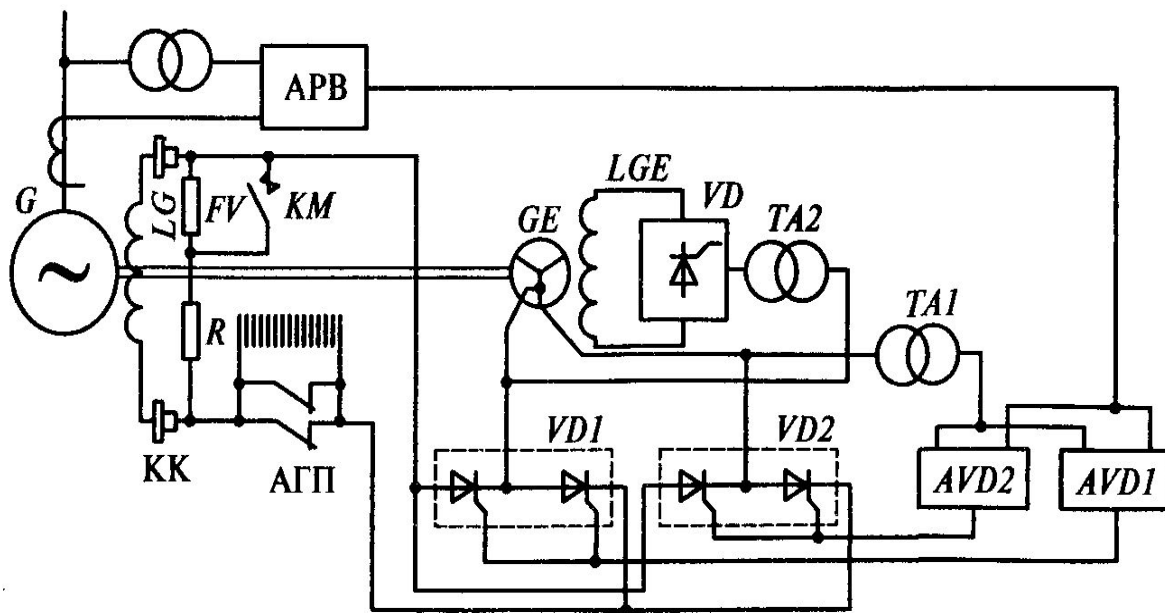


Рис. 2.10. Статическая тиристорная система независимого возбуждения

Последний недостаток привел к разработке бесщеточной системы возбуждения (рис. 2.11). В качестве возбудителя  $GE$  в этой системе используется синхронный генератор 50 Гц, обмотка возбуждения которого  $LE$  расположена на неподвижном статоре, а трехфазная обмотка – на вращающемся роторе. Обмотка  $LE$  получает питание от подвозбудителя  $GEA$  через выпрямитель  $VDE$ .

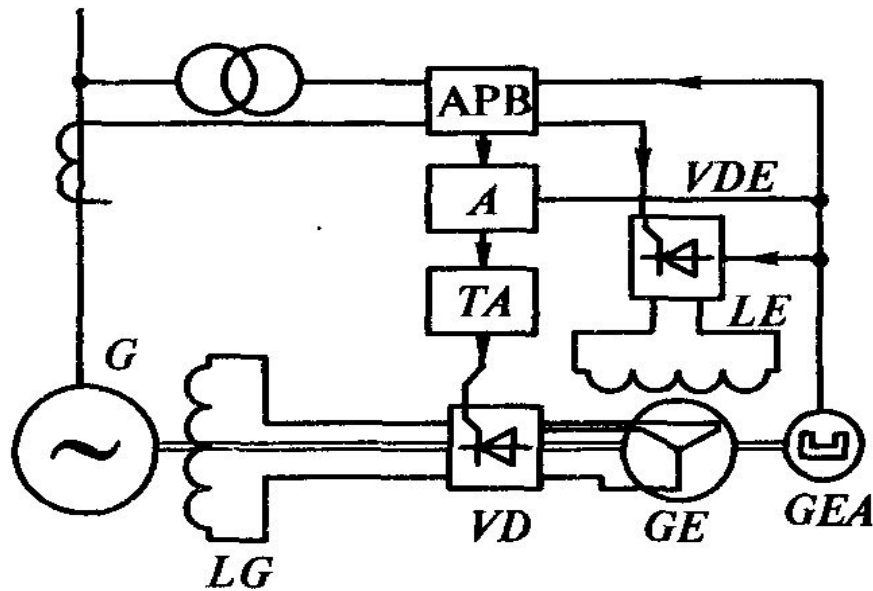


Рис. 2.11. Бесщеточная система возбуждения

На одном валу с возбудителем на специальных дисках укреплены тиристоры *VD*, которые выпрямляют переменный ток возбудителя и подают его в ротор генератора по жестким шинам без колец и щеток, так как ротор генератора, тиристоры *VD* и ротор возбудителя вращаются на одном валу с одинаковой скоростью.

Регулирование тока возбуждения осуществляется от *APB* путем воздействия на тиристоры через импульсное устройство *Л* и вращающийся трансформатор *ТА*.

Достоинством этой системы является отсутствие контактных колец и щеток, недостатком – необходимость останова генератора для переключения на резервное возбуждение или для замены тиристоров.

Бесщеточная система применяется для синхронных компенсаторов

# Автоматическое гашение магнитного поля синхронных генераторов и компенсаторов

При внезапном отключении генератора или компенсатора необходимо быстро уменьшить магнитный поток, что приведет к уменьшению ЭДС генератора. Чем быстрее будет погашено магнитное поле, тем меньше последствия короткого замыкания в генераторе. Для гашения магнитного поля применяют три метода:

- 1) замыкание обмотки ротора на гасительное сопротивление;
- 2) включение в цепь обмотки ротора дугогасительной решетки автомата;
- 3) противовключение возбuditеля.

В первом методе обмотка ротора замыкается на активное сопротивление, а затем отключается от источника питания. Электромагнитная энергия, заключенная в обмотке возбуждения, выделяется в разрядном резисторе, вызывая постепенное затухание магнитного поля. Время гашения составляет несколько секунд. В мощных генераторах такая длительность гашения поля может привести к значительным повреждениям в обмотках генератора, поэтому более широкое распространение получили автоматы с дугогасительной решеткой (подробнее о них позднее). АГП включается в цепь обмотки ротора.

На рис. 2.12 показана схема электрических цепей при гашении поля генератора автоматическим выключателем с дугогасительной решеткой.





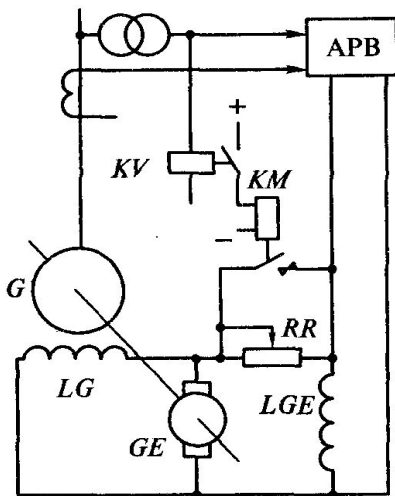
При гашении небольшого тока дуга в промежутках между пластинами горит неустойчиво и может погаснуть в одном из промежутков, вызывая разрыв цепи и перенапряжение в обмотке возбуждения. Для того чтобы подход тока к нулевому значению был плавным, решетка автоматического выключателя шунтируется специальным набором сопротивлений 5 (см. рис. 2.12).

Для генераторов с тиристорным возбуждением (см. рис. 2.10) возможно гашение поля путем перевода тиристоров в инверторный режим. В этом случае энергия магнитного поля обмотки возбуждения  $LG$  отдается возбудителю  $GE$ . Обычно используется форсировочная группа тиристоров  $VD2$ , так как более высокое напряжение этой группы позволяет быстрее погасить магнитное поле.

В цепях возбуждения генераторов мощностью более 100 МВт применяется двухполюсная схема автоматического гашения магнитного поля, при которой в каждый полюс цепи возбуждения включается отдельный АГП.

## **Автоматическое регулирование возбуждения (АРВ). Форсировка возбуждения**

Простейшим устройством регулирования напряжения является схема форсировки возбуждения, которая широко применялась в свое время на генераторах, имеющих электромашинное возбуждение.



a

Элементы этого устройства (см. рис. 2.9, а): реле минимального напряжения *KV*, контактор *KM* и регулировочный реостат в цепи обмотки возбуждения возбудителя *GE*. При резкой посадке напряжения, что происходит при удаленном КЗ, срабатывает реле *KV*, замыкает цепь питания катушки контактора *KM*, который, замыкая свой контакт, шунтирует сопротивление *RR*. Ток в цепи возбудителя *GE* возрастает до максимального значения, напряжение на выводах *GE* также возрастает до максимального значения, увеличивая ток возбуждения в обмотке ротора *LG*, следовательно, увеличивается ЭДС генератора и напряжение на выводах генератора. Поддержание напряжения на выводах генератора позволяет сохранить в работе потребителей. После отключения поврежденного участка релейной защитой восстанавливается нормальный режим работы: отключается контакт *KV*, обесточивая катушку контактора, который размыкает свой контакт, и регулировочный реостат *RR* снова выполняет свою функцию.

Автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) устанавливается на всех генераторах мощностью 3 МВт и более. В схемах возбуждения, рассмотренных ранее, условно показано устройство АРВ. На рис. 2.9, б видно, что АРВ воздействует на вентильную группу  $VS$ , которая выпрямляет переменный ток и подает постоянный ток в обмотку возбуждения генератора. Величина этого тока зависит от напряжения на выводах генератора, что анализируется в схеме АРВ. В системе тиристорного возбуждения (см. рис. 2.10) устройство АРВ контролирует не только напряжение, но и ток генератора, а также посылает импульсы для управления тиристорами рабочей и форсировочной группы. На рис. 2.13 показана

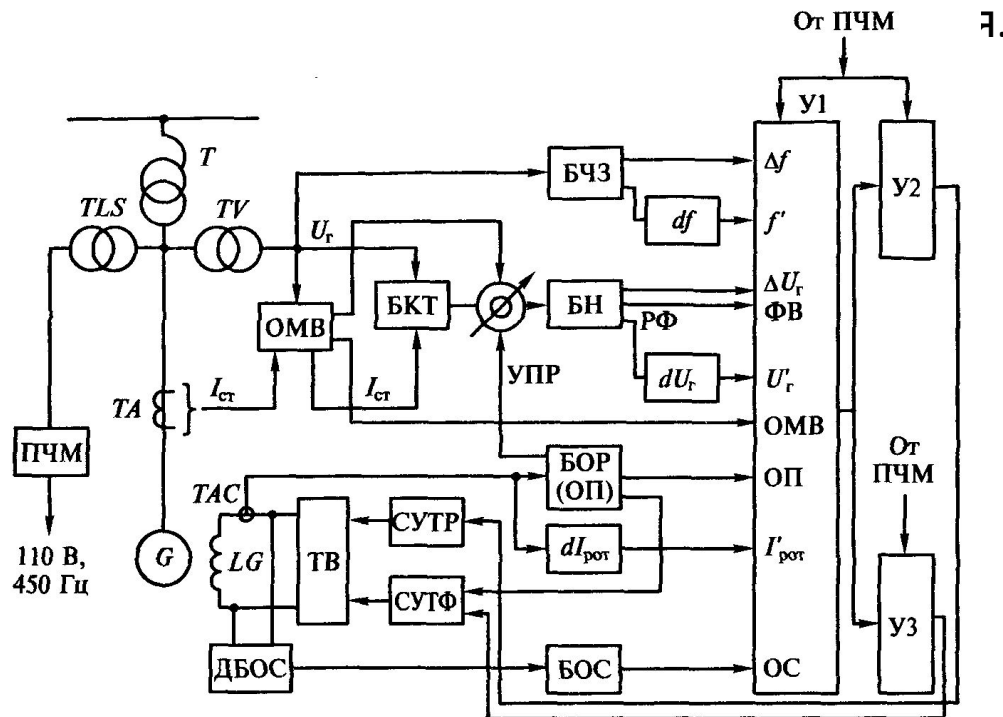


Рис. 2.13. Структурная схема АРВ сильного действия

Напряжение статора генератора  $U_{\Gamma}$  подводится от трансформатора  $TV$  к блоку питания БН через блок компаундирования БКТ, который необходим для распределения реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами. К блоку БКТ подводится также ток статора генератора от трансформаторов тока  $TA$ .

От блока БН передаются сигналы изменения величины напряжения  $\Delta U_{\Gamma}$ , скорость изменения напряжения  $U_{\Gamma}'$  и форсировки напряжения ФВ в суммирующий магнитный усилитель  $У1$ .

От блока частоты БЧЗ в усилитель  $У1$  передаются сигналы  $\Delta f$  и  $f'$ .

Для ограничения тока ротора генератора при форсировке в схеме предусмотрен блок БОР, который анализирует ток ротора и передает сигнал «Ограничение перегрузки» (ОП) в усилитель  $У1$ .

Ограничитель минимального возбуждения (ОМВ) обеспечивает устойчивую работу генератора в режиме недовозбуждения.

Выбор каналов и коэффициентов усиления по каждому из них является сложной задачей.

Для стабилизации процесса регулирования возбуждения генератора в схеме АРВ сильного действия применяется обратная связь по скорости изменения напряжения ротора генератора. Напряжение ротора подводится к блоку обратной связи (БОС), который воздействует на усилитель  $У1$ .

Суммирующий магнитный усилитель  $У1$  суммирует и усиливает все поступившие сигналы и передает суммарный сигнал на операционные усилители  $У2$  и  $У3$ , которые воздействуют на системы управления рабочей СУТР и форсировочной СУТФ группы тиристоров [2.6].

Следующим этапом развития АРВ является применение микропроцессорных регуляторов возбуждения, схемы которых здесь не приведены, так как изучение их выходит за рамки дисциплины.

## Режимы работы генераторов

### Параллельная работа генераторов

Как правило, генераторы включаются в сеть способом точной синхронизации при введенной блокировке от несинхронного включения.

При ликвидации аварий в энергосистеме турбогенераторы мощностью до 220 МВт включительно и все гидрогенераторы разрешается включать на параллельную работу способом самосинхронизации. Генераторы большей мощности разрешается включать этим способом, если  $I_{\text{по}}/I_{\text{ном}} < 3,0$ , где  $I_{\text{по}}$  – периодическая составляющая тока при включении, формулу (2.3) смотри ниже.

При точной синхронизации соблюдаются условия:

напряжение на выводах генератора должно быть равно напряжению сети  $U_{\Gamma} = U_{\text{с}}$ ;

частота включаемого генератора должна быть равна частоте сети  $f_{\Gamma} = f_{\text{с}}$

включение должно произойти в момент совпадения фаз генератора и сети.

Для соблюдения этих условий на регуляторы напряжения и скорости генераторов воздействуют вручную или автоматически.

Недостатком этого метода является сложность процесса включения и его длительность.

При самосинхронизации синхронный генератор разворачивают до частоты вращения, близкой к синхронной, и невозбужденным включают в сеть. При этом обмотка возбуждения замыкается на разрядный резистор  $R$  (см. рис. 2.10), используемый для гашения поля, либо на специально предусмотренный для этой цели резистор. После включения генератора в сеть подается импульс на включение АГП, и генератор возбуждается.

При включении генератора в нем возникает ток

$$I_{\text{п0}} = \frac{U_c}{x'_d + x_{\text{сис}}}, \quad (2.3)$$

где  $U_c$  – напряжение сети;  $x'_d$  – переходное сопротивление генератора;  $x_{\text{сис}}$  – сопротивление системы.

Этот ток меньше тока КЗ на выводах генератора, тем не менее, возникающие электродинамические силы воздействуют на обмотки генератора и его конструктивные части. Возникающий асинхронный момент воздействует на ротор, и машина втягивается в синхронизм за 2 – 3 с.

Преимущества метода самосинхронизации:

значительное упрощение операции включения;

быстрое включение генератора в сеть, что очень важно при аварии в системе;

возможность включения во время снижения напряжения и частоты сети;

отсутствие опасности повреждения машины.

Недостатком метода самосинхронизации является значительная посадка напряжения на шинах генераторного напряжения в момент включения, поэтому этот способ синхронизации не рекомендуется для электростанций с общими сборными шинами генераторного напряжения.

Номинальный режим работы генератора характеризуется номинальными параметрами: активной нагрузкой  $P_{mm}$ , напряжением  $U_{unr}$ , коэффициентом мощности  $\cos\phi_{ном}$ , частотой  $f_{ном}$ , температурой охлаждающей среды на входе  $u_0$ . Работа с номинальными параметрами может продолжаться как угодно длительно.

В реальных условиях нагрузка генератора меняется, а это влечет за собой изменение частоты, напряжения и других параметров. Если эти отклонения не превышают допустимых требований по Правилам технической эксплуатации (ПТЭ), то режим считается нормальным.

Перегрузка генераторов по току статора допускается кратковременно (см. табл. 2.2) при авариях в энергосистеме. Величина допустимой перегрузки зависит от длительности и типа охлаждения статора [1.13].

Допустимая перегрузка по току возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов с косвенным охлаждением обмоток определяется допустимой перегрузкой статора. Для турбогенераторов с непосредственным водородным или водяным охлаждением обмотки ротора допустимая перегрузка по току возбуждения определяется по табл. 2.3.

Асинхронный режим может возникнуть при несинхронном вращении одного или нескольких генераторов, появляющемся при потере возбуждения или нарушении устойчивости работы генераторов.

При потере возбуждения генератор переходит из синхронного в устойчивый асинхронный режим с постоянным скольжением и отдачей некоторой активной мощности в систему. При этом возбуждение осуществляется за счет потребления реактивной мощности из системы. В этом случае необходимо восстановить возбуждение генератора или перейти на резервное возбуждение. Согласно ПТЭ допускается такой режим для турбогенераторов с косвенным охлаждением в течение 30 мин со сниженной до 60% нагрузкой. Для других типов турбогенераторов допустимая длительность работы без возбуждения определяется заводскими инструкциями.

Для гидрогенераторов работа в асинхронном режиме без возбуждения запрещается.

Во втором случае при нарушении устойчивости параллельной работы одного или нескольких генераторов возбуждение сохраняется, но нарушается синхронизм работы, возникает переменное скольжение, машины работают то в двигательном, то в генераторном режиме. Это является тяжелой аварией и может привести к полному распаду системы. Такой режим согласно требованиям ПТЭ запрещается.

Несимметричные режимы работы генераторов могут быть вызваны обрывом или отключением одной фазы, однофазной нагрузкой (электротяга, плавильные печи и др.). При несимметричной нагрузке возникают токи обратной последовательности, которые создают дополнительный нагрев обмоток и вибрацию машин. Такой режим допускается длительно, если несимметричные нагрузки по фазам не превышают 15 – 20 % для гидрогенераторов с косвенным охлаждением, 10% для гидрогенераторов с непосредственной системой