

ГЛАВА 4

Регулирование напряжения генератора

4.1. Назначение регулирования напряжения

Необходимость регулирования напряжения в энергосистеме определяется как энергосистемой, так и потребителями. Системные требования к уровню напряжения в сетях высшего напряжения диктуются устойчивостью параллельной работы энергосистем.

Регулирование напряжения у потребителей может быть обеспечено только в том случае, если в контрольных точках энергосистемы напряжение будет меняться по заданному графику в зависимости от режима. В первую очередь это относится к сборным шинам электростанций, генераторы которых оснащаются соответствующими регуляторами.

Регуляторы должны эффективно работать не только в нормальных, но и в аварийных режимах, длительность которых обычно не превышает нескольких секунд и даже долей секунды. Эти задачи способны выполнять только быстродействующие электрические регуляторы непрерывного действия.

Различают регулятор напряжения и регулятор возбуждения. Регулятор напряжения поддерживает напряжения на выводах генератора путем воздействия на его возбуждение.

В случае необходимости регулирования возбуждения для повышения устойчивости параллельной работы энергосистем, повышения четкости действия релейной защиты, обеспечения самозапуска двигателей и т.п., функции, возлагаемые на регулятор, расширяются и его принято называть регулятором возбуждения.

4.2. Функциональная и структурная схемы

Для изменения напряжения на выводах синхронного генератора необходимо воздействовать на его возбуждение: при увеличении возбуждения напряжение повышается, при уменьшении – снижается. Возбуждение можно регулировать вручную или автоматически. В дальнейшем изложении будет рассматриваться только автоматическое регулирование возбуждения, а следовательно, и напряжения генератора.

На рис.4.1, а показана функциональная схема автоматического регулирования напряжения генератора. В состав схемы входит сам объект регулирования – генератор с системой возбуждения и регулятор напряжения. Совместно регулятор и объект составляют систему автоматического регулирования (САР).

В свою очередь регулятор состоит из измерительного (Изм.), усилительного (У) и исполнительного (Исп.) элементов. В общем случае в одном элементе могут быть совмещены несколько функций, например, измерение отклонения и усиление или усиление и исполнение. Может быть и обратное решение, когда одна функция реализуется на двух элементах, например, когда усиления одного усилителя недостаточно и последовательно включается второй усилитель.

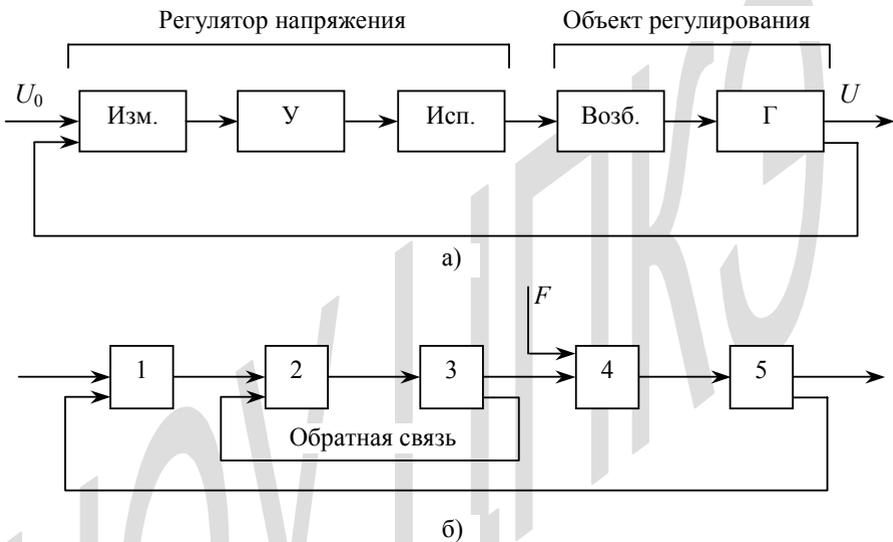


Рис.4.1. Функциональная (а) и структурная (б) схемы регулирования напряжения

На вход измерительного элемента подаются заданное напряжение U_0 , которое должно поддерживаться на генераторе, и фактическое напряжение генератора U (последнее позволяет замкнуть систему регулирования). Фактическое напряжение U действует встречно с заданным напряжением U_0 , вследствие чего в измерительном элементе происходит измерение разности этих напряжений. При отклонении фактического напряжения генератора от заданного измерительный элемент подает воздействие через усилительный и

исполнительные элементы на систему возбуждения. Происходит корректировка возбуждения, и напряжение генератора восстанавливается до заданного значения.

На рис.4.1, б показана структурная схема САР напряжения генератора. На структурной схеме могут быть представлены и другие связи элементов, которые не указаны на функциональной схеме, но являющиеся существенными для анализа и настройки регулятора. К таким связям относятся обратная связь, охватывающая элементы 2 и 3, а также место приложения внешнего возмущения F . На приведенном рисунке указаны номера элементов. В соответствии с этой нумерацией должны быть приведены уравнения элементов или их передаточные функции.

4.3. Системы возбуждения

Система возбуждения синхронного генератора состоит из обмотки ротора генератора и источника постоянного тока. К наиболее часто встречающимся видам систем возбуждения относятся следующие:

- электромашинное возбуждение с генератором постоянного тока;
- электромашинное возбуждение с генератором переменного тока частотой 500 Гц (высокочастотное возбуждение);
- тиристорное возбуждение;
- бесщеточное возбуждение.

Возможны и другие модификации систем возбуждения. Поскольку они не получили широкого распространения, то далее не рассматриваются. Применение различных систем возбуждения обусловлено особенностями турбо- и гидрогенераторов.

Исходя из нормального и аварийного режимов, к системе возбуждения генератора предъявляются определенные требования. В нормальном режиме источник возбуждения должен обеспечить на кольцах ротора номинальное напряжение и номинальный ток возбуждения, при которых генератор выдает номинальную мощность. В аварийных ситуациях к источнику возбуждения предъявляются требования в отношении быстродействия и предела изменения напряжения на кольцах ротора. С этих позиций система возбуждения оценивается двумя величинами: скоростью подъема напряжения

$dU_{возб}/dt$ и кратностью максимального значения напряжения (потолок возбуждения) по отношению к номинальному $U_{возб.макс} / U_{возб.ном}$.

Для современных электромашинных возбудителей скорость подъема напряжения возбуждения должна быть не менее $2U_{возб.ном}$ в секунду. Кратность форсировки составляет не менее $2U_{возб.ном}$. В случае работы гидростанции через линию большой протяженности к системе возбуждения предъявляют более высокие требования. Так, например, тиристорная система возбуждения гидрогенераторов выполняется с кратностью напряжения при форсировке $4U_{возб.ном}$. В отношении быстродействия тиристорная система практически безынерционна.

Электромашинное возбуждение с генератором постоянного тока

Основой системы электромашинного возбуждения является генератор постоянного тока (возбудитель В), который непосредственно соединяется с обмоткой возбуждения (ОВ) синхронного генератора (Г) (рис. 4.2). Обмотка возбуждения возбудителя (ОВВ) питается от самого возбудителя (система самовозбуждения). Воздействие автоматического регулятора напряжения (АРН) на возбудитель может осуществляться двумя способами: путем изменения сопротивления в цепи ОВВ путем перемещения движка резистора R (рис. 4.2, а) или за счет введения в обмотку возбуждения дополнительной подпитки постоянным током (рис. 4.2, б). Такая подпитка может осуществляться либо в основную, либо в дополнительную обмотку возбуждения возбудителя.

Для изменения положения движка реостата регулятор должен иметь в своем составе электромеханическое устройство, преобразующее электрический сигнал в механическое перемещение. Из-за существенных недостатков электромеханические регуляторы не используются на современных крупных генераторах. Более надежным является регулятор (схема на рис. 4.2, б), в котором нет вращающихся и трущихся частей. К тому же такая схема обладает большим быстродействием, благодаря чему получила распространение в электромашинных системах возбуждения.

К достоинству электромашинной системы возбуждения следует отнести ее независимость от коротких замыканий в сети синхронного генератора.

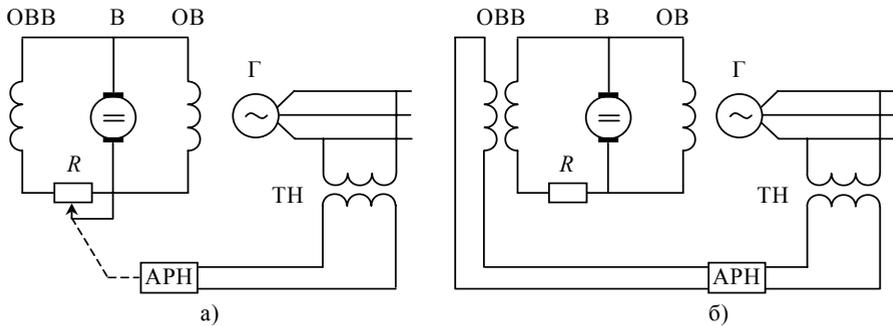


Рис.4.2. Электромашинное возбуждение с генератором постоянного тока

В большинстве случаев возбудитель находится на одном валу с синхронным генератором, чем обеспечивается высокая надежность системы возбуждения. Этот вариант используется на турбогенераторах мощностью до 100 – 160 МВт.

Применение машинного возбудителя постоянного тока для генераторов большей мощности встречает ряд затруднений, обусловленных условиями работы коллектора и механической прочностью возбудителя. Для крупных турбогенераторов мощностью 200 МВт и 300 МВт разработаны и применяются два варианта электромашинной системы возбуждения на основе возбудителя постоянного тока с пониженной частотой вращения. В первом варианте возбудитель приводится во вращение асинхронным двигателем с маховиком. Этот двигатель подключается на сборные шины собственных нужд станции. Во втором варианте возбудитель постоянного тока имеет привод от вала турбогенератора через редуктор. За счет снижения частоты вращения улучшаются условия работы коллектора.

Электромашинное возбуждение с генератором переменного тока (высокочастотное возбуждение)

Принципиальная схема высокочастотной системы возбуждения показана на рис. 4.3.

Основой системы возбуждения также является электрическая машина. Однако, учитывая серьезные недостатки коллектора у машин постоянного тока, здесь в качестве возбудителя используется генератор переменного тока с частотой 500 Гц, а функции выпрямления выполняют полупроводниковые

вентили (ПВ). Выбор повышенной частоты 500 Гц сделан с целью уменьшения пульсации выпрямленного тока, снижения габаритов возбудителя, повышения надежности. Последнее обстоятельство требует пояснения. Дело в том, что на повышенной частоте 500 Гц представляется возможным выполнить генератор индукторного типа, у которого и обмотка возбуждения, и обмотка переменного тока расположены в пазах статора. Вследствие этого возбудитель не имеет контактных колец со щетками, что и повышает надежность его работы.

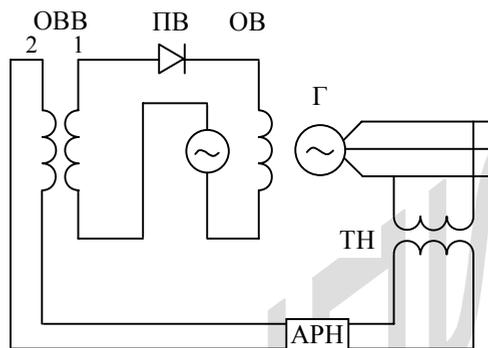


Рис. 4.3. Высокочастотная система возбуждения

Возбудитель переменного тока располагается на одном валу с главным генератором, кроме того, электрически система возбуждения не связана с основной сетью, что также повышает ее надежность.

Основное возбуждение возбудителя обеспечивается последовательной обмоткой OBB_1 . Автоматический регулятор напряжения создает дополнительную подпитку в обмотку OBB_2 . Дополнительных обмоток может быть несколько (как правило, две). Высокочастотная система возбуждения используется для турбогенераторов мощностью 200 – 300 МВт.

Тиристорное возбуждение

Свое название тиристорная система возбуждения получила от тиристоров, используемых в качестве управляемых выпрямителей. В зависимости от типа источника тока различают два варианта тиристорного возбуждения. Первый вариант – система независимого возбуждения с питанием от вспомогательного синхронного генератора (ВСГ), установленного на одном валу с

главным генератором (рис. 4.4, а). Второй вариант – система самовозбуждения с питанием от главного генератора (рис. 4.4, б).

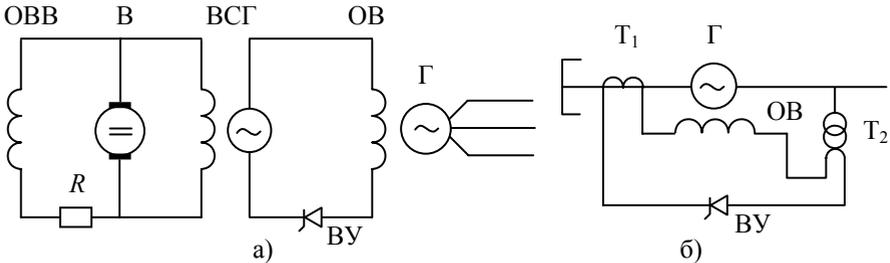


Рис.4.4. Тиристорное возбуждение с независимым источником питания (а) и с самовозбуждением (б).

Недостатком схемы самовозбуждения является зависимость напряжения, подаваемого на выпрямители, от режима работы главного генератора. Частично этот недостаток компенсируется тем, что с помощью трансформатора T_1 в цепь возбуждения подается дополнительная составляющая напряжения, пропорциональная току генератора. В режимах близких коротких замыканий, когда напряжение на выводах генератора значительно уменьшается, подпитка в функции тока через трансформатор T_1 увеличивается. Однако полной компенсации во всех режимах получить не удастся. Недостатком схемы является и то, что при пуске генератора его первоначальное возбуждение должно осуществляться от постороннего источника, поскольку остаточное напряжение генератора недостаточно.

В схеме независимого возбуждения напряжение питания вентилей не зависит от режима работы главного генератора и станции в целом, что является достоинством этой схемы. Однако эта схема дороже и сложнее.

К достоинствам тиристорного возбуждения также относятся высокое быстродействие и высокая кратность форсировки, для чего достаточно иметь напряжение источника питания (ВСГ или T_2) на заданную кратность форсировки. При полном открытии выпрямителей это напряжение практически мгновенно прикладывается к обмотке возбуждения генератора Г. В нормальном режиме выпрямители открыты не полностью, поэтому к обмотке возбуждения подводится номинальное напряжение возбуждения.

Так как турбогенераторы мощностью 200 – 300 МВт и выше останавливаются достаточно редко и, следовательно, переключение возбуждения при пус-

ке на автономный источник не требует частых переключений в цепях возбуждения, для них рекомендуется применять систему самовозбуждения.

На гидрогенераторах также применяется система самовозбуждения, что объясняется экономической целесообразностью. Следует отметить, что системы возбуждения без вспомогательного синхронного генератора, располагаемого на одном валу с главным генератором, снижают высоту агрегата, а следовательно, и высоту здания ГЭС.

Система бесщеточного возбуждения

Коллектор со щетками у генератора постоянного тока является одним из ненадежных элементов электромашинной системы возбуждения. Этот недостаток устранен в высокочастотной системе возбуждения, где выпрямление осуществляется с помощью полупроводниковых вентилей. Однако и в этой системе остаются щетки и контактные кольца для подключения системы возбуждения на ротор. При использовании надежных полупроводниковых вентилей представляется возможным создать систему возбуждения полностью без щеток. Такой вариант получил название бесщеточного возбуждения.

Принципиальная схема бесщеточного возбуждения представлена на рис. 4.5. Источником тока возбуждения служит вспомогательный синхронный генератор повышенной частоты (ВСГ), расположенный на одном валу с главным генератором. Для целей выпрямления тока применяется вращающийся выпрямитель (ВВ), выполненный на основе неуправляемых вентилей, которые монтируются на валу генератора. При такой схеме отпадает необходимость в контактных кольцах и щетках.

Регулирование возбуждения осуществляется путем воздействия на ток возбуждения вспомогательного синхронного генератора. Обмотка возбуждения вспомогательного синхронного генератора (ВСГ) – неподвижна. Регулирование возбуждения посредством воздействия на машинный возбудитель несомненно уступает по быстродействию тиристорной системе возбуждения. Однако применение в качестве возбудителя специального многофазного генератора позволяет получить требуемые показатели системы, а именно, полное возбуждение не менее двукратного и быстродействие не менее $2U_{\text{возб.ном}}$ в секунду.

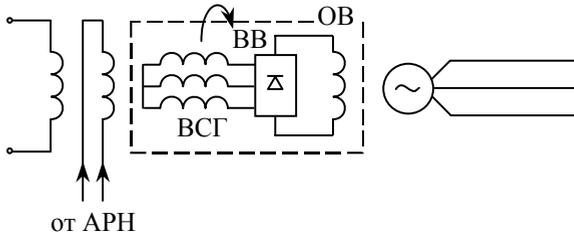


Рис.4.5. Система бесщеточного возбуждения

Бесщеточная система возбуждения является весьма надежной и применяется для турбогенераторов мощностью 300 МВт и выше.

В таблице 4.1 приведены типовые системы возбуждения для турбо- и гидрогенераторов. Полные данные представлены в [6]. В таблице 1 приняты обозначения: ТС – тиристорное с самовозбуждением; ВЧ – высокочастотное возбуждение (электромашинное возбуждение с генератором переменного тока); ТН – тиристорное независимое; БЩ – бесщеточное возбуждение.

Таблица 4.1

Тип	Номинальная мощность, МВт	Система возбуждения
Турбогенератор		
ТВФ– 63– 2УЗ	63	ВЧ
ТВФ– 120 2УЗ	100	ВЧ
ТВФ– 200 2АУЗ	200	ВЧ
ТВВ– 320– 2ЕУЗ	320	ТН
ТГВ– 300– 2УЗ	300	ТС (ТН, БЩ)
ТВВ– 500– 2ЕУЗ	500	ТН
ТГВ– 800– 2УЗ	800	ТН
ТВВ– 1000– 4УЗ	1000	БЩ
Гидрогенератор		
ВГС 525/150– 20	46	электромашинная
ВГСФ 930/233– 30	250	ТН
ВГСВФ 940/235– 30	300	ТС
СВФ– 1690/175– 64	500	ТН
СВФ– 1285/275– 42У4	640	ТС

4.4. Релейная форсировка возбуждения

Релейная форсировка возбуждения предназначена для сохранения устойчивости параллельной работы генератора при коротком замыкании в прилегающей сети. Как известно, активная мощность генератора равна

$$P = \frac{EU}{X} \sin \delta . \quad (4.1)$$

При близких к.з. напряжение на шинах генератора снижается, что снижает предел передаваемой мощности P . Для компенсации снижения множителя U в числителе выражения (4.1) необходимо соответственно увеличить множитель E – э.д.с. генератора, что выполняет форсировка возбуждения.

Релейная форсировка возбуждения осуществляется переводом возбuditеля в режим с потолочным напряжением путем шунтирования его регулирующего сопротивления. При увеличении напряжения возбuditеля ток возбуждения генератора возрастает. Поскольку время срабатывания реле мало, то скорость нарастания возбуждения определяется только постоянными времени цепей возбуждения и генератора. Таким образом, релейная форсировка является быстродействующим средством повышения возбуждения генератора.

Принципиальная схема устройства релейной форсировки возбуждения применительно к электромашинной системе возбуждения показана на рис. 4.6.

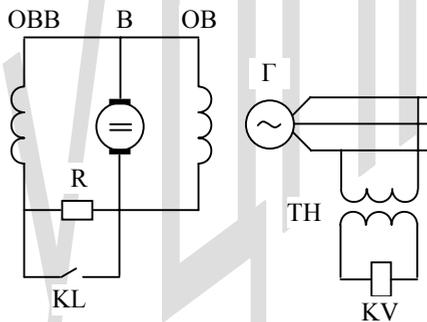


Рис.4.6. Схема релейной форсировки возбуждения

При номинальном напряжении генератора контакты реле напряжения KV разомкнуты. Уставка реле обычно выбирается около $0,85U_{ном}$. При снижении напряжения генератора ниже $0,85U_{ном}$ реле напряжения замыкает контакт и подает напряжение на промежуточное реле KL, при срабатывании которого дополнительное сопротивление в цепи возбуждения возбuditеля замыкается накоротко. За счет этого возбуждение генератора форсируется.

Для устранения ложного действия релейной форсировки при перегорании предохранителя в цепи трансформатора напряжения используется схема с двумя реле напряжения, которые подключаются к разным трансформаторам напряжения. Контакты этих реле должны быть включены последовательно. Для этих же целей рекомендуется подключить реле KV непосредственно к выводам трансформатора напряжения до предохранителей. С одним реле напряжения устройство форсировки работает правильно при трехфазном коротком замыкании и двухфазном коротком замыкании тех фаз, на которых установлено реле. Для правильного действия форсировки при любых двухфазных коротких замыканиях реле напряжения подключается через фильтр напряжения положительной последовательности. Возможно использование схемы с двумя реле, включенными через трансформатор напряжения на разные фазы.

На гидрогенераторах с электромашинной системой возбуждения помимо устройства форсировки возбуждения устанавливаются дополнительно устройства развозбуждения. Необходимость установки устройств развозбуждения на гидрогенераторах вызывается следующими обстоятельствами. При сбросе нагрузки число оборотов гидрогенератора может превысить номинальное значение на 30 – 40 %, вследствие медленного действия его регулятора частоты вращения. За счет увеличения частоты вращения генератора и уменьшения размагничивающего действия тока статора напряжение генератора может значительно увеличиться. Поскольку регулятор напряжения не рассчитан на регулирование напряжения генератора в широких пределах, то его действие при сбросе нагрузки оказывается недостаточным.

Устройство развозбуждения выполняется с помощью одного реле максимального напряжения KV и промежуточного реле KL. Обычно реле KV настраивается на напряжение $1,15U_{ном}$, при этом оно замыкает свой контакт и подает напряжение на промежуточное реле. Последнее в свою очередь замыкает контакт, и тем самым в цепь обмотки возбуждения возбудителя вводится дополнительное сопротивление. Схема развозбуждения настраивается так, чтобы при ее срабатывании напряжение гидрогенератора при полном сбросе нагрузки не поднималось выше $1,3U_{ном}$.

В аварийных режимах форсировка возбуждения весьма эффективна, поэтому она применяется на всех турбо- и гидрогенераторах с любой системой возбуждения. Форсировка возбуждения выполняется либо с помощью реле, либо входит в структуру регулятора возбуждения.

Система возбуждения обеспечивает форсировку напряжения до $2U_{ном}$, следовательно, и ток возбуждения в режиме форсировки будет достигать двукратного значения. Для генераторов с форсированным охлаждением такое повышение тока ротора допускается только на непродолжительное время. Так, для турбогенераторов серии ТВФ двукратное значение тока ротора разрешается в течение 30 с, а для турбогенераторов типа ТВВ и ТГВ двукратная форсировка тока ротора допускается в течение 20 с.

4.5. Статическое и астатическое регулирование

Система автоматического регулирования может иметь астатическую (независимую от нагрузки) или статическую (зависимую от нагрузки) характеристики регулирования. Пример таких характеристик показан на рис. 4.7.

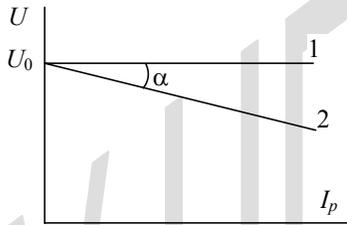


Рис.4.7. Астатическая (1) и статическая (2) характеристики регулирования

Аналитическое выражение статической характеристики, как прямой с некоторым наклоном, записывается в виде

$$U = U_0 - sI_p, \quad (4.2)$$

где U_0 – напряжение, поддерживаемое генератором при холостом ходе (уставка регулятора); s – статизм регулирования; I_p – реактивный ток генератора.

Нагрузкой генератора является полный ток. Однако размагничивается генератор в основном реактивным током. Поэтому в дальнейшем нагрузка генератора будет учитываться только реактивной составляющей тока. Формулу (4.2) можно записать:

$$U_0 - U - sI_p = 0 \quad (4.3)$$

и

$$\Delta U - sI_p = 0.$$

Астатическую характеристику можно рассматривать как частный случай, когда статизм равен нулю. При этом уравнение астатической характеристики

$$\Delta U = 0. \quad (4.4)$$

За счет изменения напряжения генератора на холостом ходу U_0 , т.е. уставки регулятора, имеется возможность получить вместо одной характеристики (статической или астатической) семейство таких характеристик. Способы изменения уставки регулятора будут рассмотрены на примерах конкретных регуляторов.

Статизм регулирования определяется следующим выражением:

$$s = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta U}{\Delta I_p}. \quad (4.5)$$

За положительный статизм регулирования условно принимается статизм, при котором его характеристика наклонена в сторону положительных значений нагрузки. Статизм регулирования удобно выражать в относительных единицах

$$s_* = \frac{\Delta U / U_{\text{ном}}}{\Delta I_p / I_{p.\text{ном}}} = \frac{\Delta U_*}{\Delta I_{p*}} \quad (4.6)$$

При $\Delta I_{p*} = 1,0$ получим

$$s_* = \Delta U_* \quad (4.7)$$

т.е. статизм регулирования равен относительному изменению напряжения генератора при изменении его нагрузки от нуля до номинальной.

Обычно регуляторы напряжения генераторов, работающих непосредственно на сборные шины, настраиваются на статическую характеристику со статизмом 4 – 5 %, т.е. при изменении реактивной нагрузки генератора от нуля до номинальной напряжение уменьшается на 4 – 5 %.

4.6. Распределение реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами

Генераторы включены на сборные шины. Определим распределения приращения реактивной нагрузки между генераторами, работающими непосредственно на сборные шины (рис. 4.8). Так как полученные результаты не зависят от числа параллельно работающих генераторов, будем рассматривать два генератора.

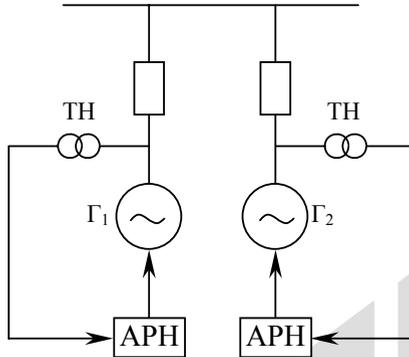


Рис.4.8. Схема работы генераторов на сборные шины

Примем, что на генераторах установлены регуляторы, настроенные на статические характеристики.

При статических характеристиках напряжение на генераторах, а следовательно, и на сборных шинах будет равно:

$$U_1 = U_{01} - s_1 I_{p1}, \quad U_2 = U_{02} - s_2 I_{p2}. \quad (4.8)$$

Коэффициенты статизма регуляторов задаются в относительных единицах. Поскольку мощности генераторов могут быть различными, коэффициенты статизма регулирования необходимо приводить к единым базисным условиям. Будем считать, что такой пересчет выполнен.

Воспользуемся формой записи уравнений в приращениях:

$$s_{*1} = \frac{\Delta U_{*1}}{\Delta I_{*p1}}, \quad s_{*2} = \frac{\Delta U_{*1}}{\Delta I_{*p2}}. \quad (4.9)$$

Поскольку оба генератора имеют статические характеристики, то характеристика всей станции будет также статической:

$$s_{*cm} = \frac{\Delta U_{*cm}}{\Delta I_{*pcm}}, \quad (4.10)$$

где $\Delta I_{*p\text{cm}} = \Delta I_{*p1} + \Delta I_{*p2}$. При параллельной работе генераторов на сборные шины изменения напряжения генераторов равны между собой, т.е.

$$\Delta U_{*1} = \Delta U_{*2} = \Delta U_{*cm} = \Delta U_{*}.$$

В таком случае

$$s_{*cm} = \frac{\Delta U_{*}}{\Delta I_{*p1} + \Delta I_{*p2}} = \frac{1}{1/s_{*1} + 1/s_{*2}}. \quad (4.11)$$

Изменение напряжения при приращении нагрузки $\Delta I_{*p\text{cm}}$ равно $\Delta U_{*} = s_{*cm} \Delta I_{*p\text{cm}}$. Подставляя это значение в формулу (4.10) для статизмов отдельных станций, получим:

$$\Delta I_{*p1} = \frac{s_{*cm}}{s_{*1}} \Delta I_{*p\text{cm}}, \quad \Delta I_{*p2} = \frac{s_{*cm}}{s_{*2}} \Delta I_{*p\text{cm}}, \quad (4.12)$$

т.е. распределение приращения нагрузки происходит обратно пропорционально статизму характеристик регулирования.

Если один из генераторов станции имеет астатическую характеристику, то характеристика всей станции будет также астатической. В этом случае при изменении реактивной нагрузки напряжение на сборных шинах станции не меняется. Агрегаты, имеющие статические характеристики, будут работать с неизменной нагрузкой. Все изменения нагрузки воспримет на себя генератор с астатической характеристикой.

Если бы на станции имелось несколько генераторов с астатическими характеристиками, то характеристика станции была бы также астатической. Однако распределение нагрузки между генераторами с астатическими характеристиками будет неопределенным. Поскольку нельзя допускать неопределенность в распределении нагрузки между генераторами, то при отсутствии каких-либо устройств выравнивания нагрузок регуляторы напряжения всех генераторов должны быть настроены на статические характеристики.

На рис. 4.9. показано распределение дополнительной реактивной нагрузки между двумя генераторами при статических характеристиках регулирования. Исходный режим генераторов определяется точками «а» и «б». В этом режиме реактивная нагрузка станции равна $I_{p\text{cm}}$. Увеличение нагрузки до $I_{p\text{cm}} + \Delta I_{p\text{cm}}$ приводит к снижению напряжения. В соответствии со ста-

тическим законом регулирования каждый генератор принимает на себя определенную долю реактивной нагрузки ΔI_{p1} и ΔI_{p2} . В этом случае режим работы определяется точками «а'» и «б'».

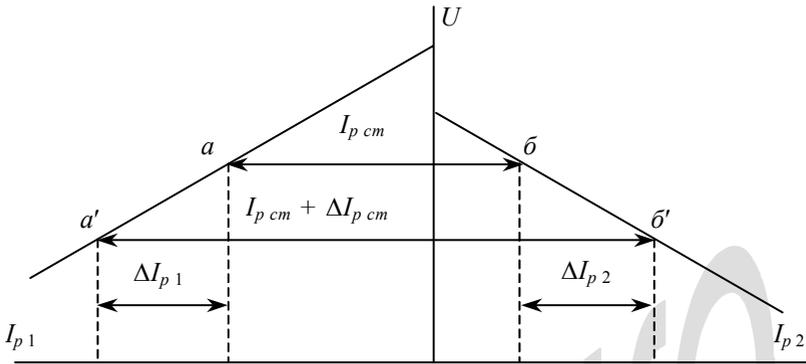


Рис.4.9. Распределение дополнительной нагрузки между генераторами

Генераторы работают в блоке с трансформатором. Рассмотрим схему, в которой два генератора работают в блоке генератор–трансформатор на сборные шины высокого напряжения (рис. 4.10.)

Найдем распределение приращения реактивной нагрузки между этими генераторами. Примем, что на генераторах установлены регуляторы напряжения, настроенные на статические характеристики.

Напряжение на шинах определяется через напряжение первого генератора следующим образом

$$U_{*u} = U_{*1} - x_{*T_1} I_{*p1}, \quad (4.13)$$

где x_{*T_1} – сопротивление трансформатора.

Поскольку при статически настроенном регуляторе имеем

$$U_{*1} = U_{*01} - s_{*1} I_{*p1}, \quad (4.14)$$

то можем получить

$$U_{*u} = U_{*01} - s_{*1} I_{*p1} - x_{*T_1} I_{*p1} \quad (4.15)$$

или

$$U_{*u} = U_{*01} - (s_{*1} + x_{*T_1}) I_{*p1}. \quad (4.16)$$

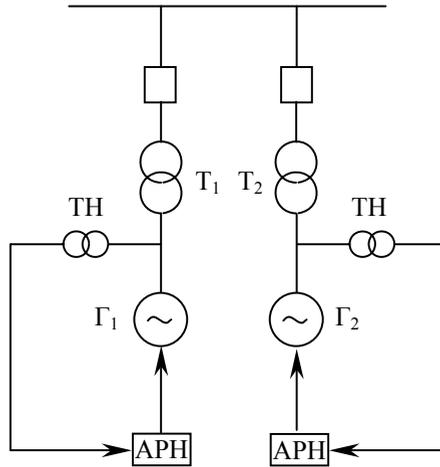


Рис.4.10. Схема работы блоков генератор-трансформатор

Указанный закон регулирования может быть записан в форме приращений

$$s_{*1\Sigma} = \frac{\Delta U_{*1}}{\Delta I_{*p1}}, \quad (4.17)$$

где выражение $s_{*1\Sigma} = s_{*1} + x_{*T1}$ можно представить как суммарный статизм регулирования первого блока. Эта формула аналогична формуле для работы генераторов непосредственно на сборные шины. Различие заключается лишь в том, что в данном случае фигурирует суммарный статизм. Выполнив соответствующие преобразования, получим закономерность распределения приращения реактивной нагрузки между генераторами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_{*p1} &= \frac{S_{*cm\Sigma}}{S_{*1\Sigma}} \Delta I_{*cm} \\ \Delta I_{*p2} &= \frac{S_{*cm\Sigma}}{S_{*2\Sigma}} \Delta I_{*cm} \end{aligned} \right\}. \quad (4.18)$$

Так же, как и ранее, распределение приращения реактивной нагрузки происходит обратно пропорционально статизму характеристики регулирования с одной особенностью. Если регуляторы всех генераторов настроены на астатические характеристики, то суммарный статизм каждого регулятора не будет равен нулю, а оказывается равным сопротивлению трансформатора в относи-

тельных единицах, т.е. $s_{*1\Sigma} = s_{*1} + x_{*T_1}$ при $s_{*1} = 0$ статизм равен $s_{*1\Sigma} = x_{*T_1}$. При этом однозначность в распределении приращения реактивной нагрузки обеспечивается. Распределение происходит обратно пропорционально сопротивлениям трансформаторов. При астатически настроенных регуляторах напряжение будет постоянным только на выводах генераторов. На сборных шинах высокого напряжения вследствие падения напряжения в трансформаторах напряжение будет меняться по статическому закону.

4.7. Некоторые положения теории регулирования

Напомним некоторые положения из теории автоматического регулирования [8], которые объясняют принципы построения системы автоматического регулирования напряжения.

Уравнения и передаточные функции элементов САР

Уравнение элемента системы автоматического регулирования устанавливает соотношение между входным и выходным сигналами этого элемента. В общем случае статическая зависимость выходного сигнала от входного нелинейна. При упрощенном анализе САР, помогающем выяснить основные закономерности статики и динамики, можно пойти на линеаризацию характеристик элементов САР, т.е. описывать их линейными дифференциальными уравнениями.

Линеаризация допустима, если изучается поведение САР только при малых отклонениях от установившегося режима и если погрешность за счет линеаризации не оказывает принципиального значения на результаты анализа.

В теории автоматического регулирования для линеаризованных элементов и систем принята операторная форма записи дифференциальных уравнений. Для системы второго порядка уравнение записывается так:

$$(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)y = (k_1 + k_2 p + k_3 p^2)x, \quad (4.19)$$

где $p \equiv \frac{d}{dt}$ – символ дифференцирования по времени; $x = \frac{\Delta X}{X_0}$, $y = \frac{\Delta Y}{Y_0}$ – при-

ращения переменных; k – коэффициент передачи; T – постоянная времени.

Уравнение (4.19) можно записать в иной форме

$$y = \frac{(k_1 + k_2 p + k_3 p^2)x}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} \quad (4.20)$$

или

$$y = W(p)x, \quad (4.21)$$

где $W(p) = \frac{(k_1 + k_2 p + k_3 p^2)}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}$ – передаточная функция звена или системы.

Использование передаточных функций очень удобно и они широко применяются в теории автоматического регулирования. Для исследования САР ее разбивают обычно на так называемые простейшие, типовые звенья. К типовым звеньям относятся:

инерционное звено первого порядка с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}, \quad (4.22)$$

безынерционное звено

$$W(p) = k, \quad (4.23)$$

колебательное звено второго порядка

$$W(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (4.24)$$

интегрирующее звено

$$W(p) = \frac{k}{p}, \quad (4.25)$$

дифференцирующее звено

$$W(p) = kp. \quad (4.26)$$

В пределах малых отклонений все элементы известных регуляторов напряжения могут быть представлены типовыми звеньями САР. При изолированной работе генератора и постоянной частоте вращения ротора генератор также может быть представлен инерционным звеном первого порядка. Выходным сигналом в этом случае является отклонение напряжения генератора от своего установившегося значения. Входной сигнал – приращение

напряжения на кольцах ротора. Предполагается, что гистерезисом магнитной цепи генератора можно пренебречь.

При изучении переходных процессов, связанных с большими возмущениями, например, при близких коротких замыканиях, а также при исследовании устойчивости параллельной работы генераторов и энергосистем, такое упрощенное представление генератора не может быть использовано. Однако для анализа статики регулирования и выяснения основных закономерностей поведения САР при малых возмущениях принятое упрощенное математическое описание элементов САР и генератора вполне приемлемо и будет использовано ниже.

Передаточная функция элемента, охваченного обратной связью

Рассмотрим элемент с передаточной функцией $W(p)$. Предположим, что на вход элемента направленного действия подается сигнал x_{ex} , тогда выходной сигнал равен $y = x_{ex}W(p)$. Под направленностью понимается прохождение сигнала только в направлении от входа к выходу, т.е. от x_{ex} к y . Тогда выходной сигнал y не оказывает влияния на вход.

В ряде случаев оказывается целесообразным установить дополнительную зависимость входного сигнала от выходного y . Для этой цели вводится так называемая обратная связь – по каналу этой связи выходной сигнал или часть его подается на вход элемента. В канал обратной связи может быть включен элемент со своей передаточной функцией. Определим передаточную функцию элемента, охваченного обратной связью.

При наличии обратной связи на вход подается сумма сигналов $x_{ex} + yW_{o.c}(p)$, поэтому выходной сигнал будет равен

$$[x_{ex} + yW_{o.c}(p)]W(p) = y, \quad (4.27)$$

откуда $x_{ex}W(p) = y[1 - W(p)W_{o.c}(p)]$,

$$\frac{y}{x_{ex}} = W'(p) = \frac{W(p)}{1 - W(p)W_{o.c}(p)}, \quad (4.28)$$

где $W'(p)$ – передаточная функция звена с учетом обратной связи.

В зависимости от передаточной функции $W_{o.c}(p)$ различают жесткую и гибкую обратные связи. Для жесткой обратной связи $W_{o.c}(p) = k_{oc}$, т.е. сигнал

по каналу обратной связи не зависит от времени. В случае гибкой обратной связи $W_{o.c.}(p) = k_{o.c.}Tp$, откуда следует, что по каналу обратной связи подается воздействие, пропорциональное скорости изменения выходной величины элемента. Коэффициент $k_{o.c.}$ определяет величину сигнала, передаваемого по каналу обратной связи. Этот коэффициент лежит в пределе от нуля до единицы. При $k_{o.c.} = 1,0$ весь выходной сигнал подается на вход элемента.

По каналу обратной связи сигнал может приходить того же знака, что и основной входной сигнал x_{ex} , или иметь противоположный знак. В первом случае говорят, что обратная связь положительная. Для этой связи $k_{o.c.} > 0$. Во втором случае обратная связь отрицательная, и соответственно $k_{o.c.} < 0$.

Передаточная функция замкнутой САР. Рассмотрим одноконтурную структурную схему САР (рис. 4.11). В общем случае $W_1(p)$ и $W_2(p)$ могут представлять собой передаточные функции нескольких последовательно включенных элементов.

Входной сигнал x_{ex} представляет собой заданное значение регулируемого параметра, например, напряжения. Выходной сигнал отражает фактическое значение параметра регулирования, которое поддерживается системой регулирования. Возмущение к системе приложено между первым и вторым элементами САР.

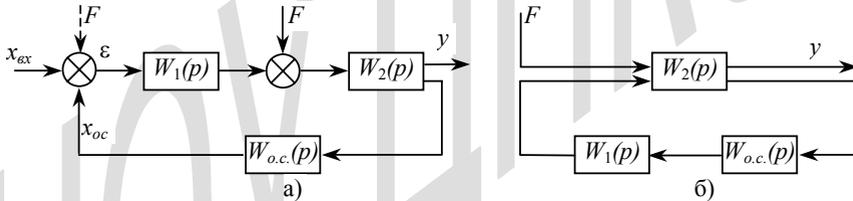


Рис.4.11. Структурная схема замкнутой САР

Рассмотрим прохождение возмущающего сигнала F на выход САР. Для этого необходимо найти передаточную функцию элементов САР от точки приложения возмущения до выхода. На рис.4.11, б показана та же схема САР с некоторыми изменениями.

Сигнал F проходит на выход САР через второй элемент, охваченный обратной связью, в состав которой входят передаточные функции $W_1(p)$ и

$W_{o.c.}(p)$. Для элемента с обратной связью передаточная функция приведена ранее, поэтому по аналогии можем записать

$$W'_{Fy}(p) = \frac{W_{Fy}(p)}{1 - W_{o.c.}(p)W_1(p)W_2(p)}. \quad (4.29)$$

Здесь индексы «Fy» показывают, между какими точками проходит сигнал, а «штрих» означает, что передаточная функция получена для замкнутой системы.

Принцип вывода этой формулы следующий: в числителе указывается передаточная функция элемента между точками F и y, а в знаменателе – разность между единицей и произведением передаточных функций всех элементов, входящих в контур САР.

В замкнутых САР передаточная функция $W_{o.c.}(p) = -1,0$. Это обусловлено самим принципом работы САР – фактическое значение регулируемого параметра сравнивается (вычитается) с заданным. Эта разность и корректирует работу САР. С учетом сказанного, формулу можем записать как:

$$W'_{Fy}(p) = \frac{W_{Fy}(p)}{1 + W(p)}, \quad (4.30)$$

где $W(p) = W_1(p)W_2(p)$ – передаточная функция разомкнутой системы.

Выходной сигнал y зависит от возмущения F следующим образом:

$$y = \frac{F W_{Fy}(p)}{1 + W(p)}. \quad (4.31)$$

Если возмущение приложено на входе регулятора (это соответствует изменению уставки регулятора), то передаточная функция будет иметь вид:

$$W'_{xy} = \frac{W_{xy}(p)}{1 + W(p)} = \frac{W(p)}{1 + W(p)}, \quad (4.32)$$

а выходной сигнал y определится через x_{ex} следующим образом:

$$y = x \frac{W(p)}{1 + W(p)}. \quad (4.33)$$

Положим

$$W_{xy}(p) = \frac{H(p)}{Q(p)}, \quad (4.34)$$

тогда

$$W'_{xy}(p) = \frac{H(p)}{Q(p) + H(p)}, \quad (4.35)$$

на основании чего уравнение замкнутой системы запишем в виде:

$$[Q(p) + H(p)]y = xH(p). \quad (4.36)$$

Характер переходного процесса линейной системы не зависит от величины возмущения, поэтому анализ на устойчивость проводится при $x(t) = 0$ и рассматривается только левая часть уравнения

$$[Q(p) + H(p)]y = 0. \quad (4.37)$$

Точность обработки задания. Напомним, что входной сигнал x_{ex} отражает собой заданное значение регулируемого параметра. Система автоматического регулирования поддерживает фактическое значение регулируемого параметра y . По основному каналу, замыкающему САР, выходная величина подается на вход для сравнения. На рис. 4.11, а это представлено в виде сигнала $x_{o.c.}$. Разность между x_{ex} и $x_{o.c.}$ и составляет погрешность обработки задания. Найдем, от чего зависит погрешность обработки, или, другими словами, точность системы регулирования.

Погрешность регулирования

$$\varepsilon = x_{\text{ex}} - x_{o.c.}$$

В свою очередь $x_{o.c.} = y$. Учитывая формулу (4.31), получим

$$\varepsilon = x_{\text{ex}} - x_{\text{ex}} \frac{W(p)}{1 + W(p)}. \quad (4.38)$$

Погрешность удобно выражать в относительных единицах. Преобразуем формулу для погрешности:

$$\varepsilon_* = \frac{\varepsilon}{x_{\text{ex}}} = \frac{1}{1 + W(p)}. \quad (4.39)$$

4.8. Статика регулирования

Структурная схема регулирования напряжения генератора показана на рис. 4.12.

Входной величиной является отклонение напряжения от установившегося значения. Основным возмущающим фактором для генератора является нагрузка реактивным током. Реактивный ток размагничивает генератор. Это эквивалентно изменению напряжения возбудителя, на который подает свое воздействие АРН. На структурной схеме возмущающее воздействие I_p приложено между исполнительным элементом АРН и генератором.

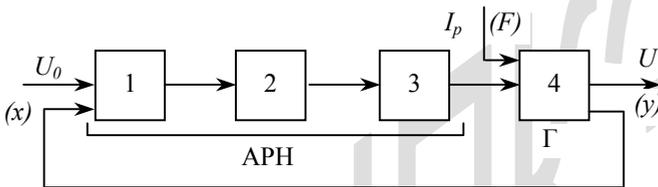


Рис. 4.12. Структурная схема регулирования напряжения генератора

Анализ формул предыдущего параграфа показывает основные характеристики системы регулирования напряжения в статических режимах. Формула (4.31) устанавливает зависимость выходного сигнала y от возмущения F . В установившемся режиме производные переменных равны нулю, поэтому подставляя $p = 0$, для статического режима получим

$$y = \frac{FW_{Fy}(0)}{1 + W(0)}. \quad (4.40)$$

Структурная схема современных регуляторов напряжения не содержит интегрирующих элементов с передаточной функцией $W_i(p) = \frac{k_i}{p}$. Все элементы регулятора и сам генератор имеют передаточные функции вида $W(p) = \frac{k}{Tp + 1}$. Для таких элементов $W(0) = k$. С учетом сказанного для статики формулу (4.31) можно записать так:

$$y = F \frac{k_{Fy}}{1+k}, \quad (4.41)$$

где k_{Fy} – коэффициент передачи через элементы от места приложения возмущения до выходного сигнала; k – коэффициент передачи разомкнутой САР.

Принимая во внимание, что выходным сигналом является отклонение напряжения ΔU_* , а возмущением – отклонением тока ΔI_{*p} , получим

$$\frac{\Delta U_*}{\Delta I_{*p}} = \frac{k_{Fy}}{1+k}. \quad (4.42)$$

Отношение $\Delta U_*/\Delta I_{*p}$ есть не что иное, как статизм регулирования s_* , поэтому окончательно запишем

$$s_* = \frac{k_{Fy}}{1+k}. \quad (4.43)$$

Таким образом, статизм обратно пропорционален коэффициенту передачи разомкнутой системы, т.к. $k \gg 1,0$.

Допустим $k_{Fy} = 0,2$. Это значит, что без регулятора при изменении реактивной нагрузки генератора от нуля до номинальной (отклонение тока $\Delta I_{*p} = 1,0$) напряжение генератора уменьшается на 20 %. По условиям эксплуатации это может оказаться недопустимым. Установив на генераторе АРН с таким коэффициентом передачи, чтобы $k = 100$ (заметим, что в k входит и k_{Fy}), получим также статическое (зависимое от нагрузки) регулирование, однако статизм оказывается почти в 100 раз меньше: $s_* \cong k_{Fy}/k = 0,2/100 = 0,002$. При изменении нагрузки от нуля до номинальной уменьшение напряжения генератора составит всего 0,2 %.

Следует отметить, что если бы структурная схема АРН содержала интегрирующий элемент, то регулирование было бы астатическим. В самом деле, полагая, что передаточная функция $W(p)$ содержит i -й элемент с передаточной функцией $W_i(p) = k_i/p$, можно записать

$$W(p) = \frac{k_i}{p} W_{n-1}(p), \quad (4.44)$$

где $W_{n-1}(p)$ – передаточная функция всех элементов САР, кроме i -го. Для статизма получим

$$s_* = \left. \frac{k_{Fy}}{1 + k_{n-1} k_i / p} \right|_{p=0} = 0. \quad (4.45)$$

Точность поддержания регулируемой величины на заданном уровне в установившемся режиме также зависит от коэффициента передачи системы регулирования k . В установившемся режиме при $p = 0$ получим

$$\varepsilon_* = \left. \frac{1}{1 + W(p)} \right|_{p=0} = \frac{1}{1 + k}, \quad (4.46)$$

откуда следует, что чем выше k , тем меньше погрешность и, следовательно, точнее происходит обработка задания. С позиций точности регулирования желательно увеличивать коэффициент передачи (усиления). Однако увеличение коэффициента передачи k ухудшает устойчивость системы регулирования. Этот факт необходимо учитывать при ее настройке.

4.9. Способы изменения статизма

Современные регуляторы напряжения имеют высокий коэффициент усиления, при этом статизм получается в пределах 0,5 – 1,0 %. Для однозначности распределения реактивной нагрузки между генераторами, работающими на сборные шины, статизм должен быть порядка 4,0 – 5,0 %. В то же время при работе блока генератор–трансформатор суммарный статизм регулирования $s_{*\Sigma} = s_* + x_{*T}$ получается большим. И в том и в другом случае возникает необходимость изменения статизма: в первом – увеличение, а во втором – уменьшение.

Прежде всего статизм можно изменить за счет коэффициента усиления автоматического регулятора. Практически этот способ не используется, так как от величины коэффициента усиления зависят другие характеристики ре-

гулирования. Коэффициент усиления выбирается из условия получения требуемой точности регулирования и устойчивости САР.

Рассмотрим способ изменения статизма, в котором используется сигнал по возмущению. Статизм определяется формулой

$$s_* = \frac{k_{Fy}}{1 + k}. \quad (4.47)$$

Представляется возможным изменить статизм, не затрагивая коэффициент усиления k , воздействуя лишь на числитель этой формулы. Очевидно, что сам коэффициент передачи k_{Fy} также не может быть изменен, так как задан для объекта регулирования. Запишем выражение (4.47) в следующем виде:

$$s_* = \frac{k_{Fy} + k_{Fny}}{1 + k}. \quad (4.48)$$

Наличие дополнительного коэффициента передачи k_{Fny} свидетельствует о том, что сигнал возмущения помимо обычного канала параллельно проходит через другие элементы САР (структурная схема на рис. 4.13).

Индекс у коэффициента k_{Fny} показывает, что сигнал проходит от точки приложения возмущения F через n элементов АРН и далее на выход. Перед коэффициентом k_{Fny} можно иметь положительный или отрицательный знак. При отрицательном знаке происходит уменьшение статизма. В случае $k_{Fy} + (-k_{Fny}) = 0$ статизм отсутствует. Это значит, что возмущение не оказывает влияния на выходной сигнал. В теории автоматического регулирования это называется компенсацией возмущения. При положительном знаке k_{Fny} статизм увеличивается.

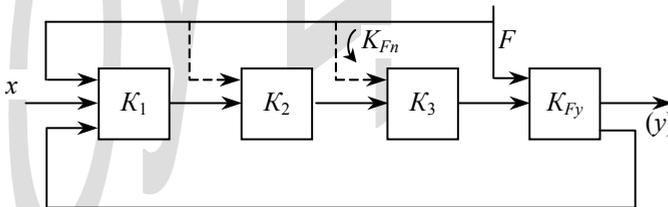


Рис.4.13. Схема компенсации возмущения

Компенсационный сигнал по возмущению можно подавать через один или несколько элементов АРН. Коль скоро речь идет о корректировке характеристик САР в установившемся режиме, на который не оказывает влияния

запаздывание в элементах регулятора, то эффективнее подавать сигнал по возмущению на вход регулятора. На рис. 4.13 этот путь выделен сплошной линией. Фактически это означает, что на вход регулятора помимо сигнала по напряжению должен быть подан сигнал по току. Схемы подключения регулятора с целью изменения статизма регулирования показаны на рис. 4.14.

Различие в схемах заключается лишь в знаке сигнала по току. В схеме рис. 4.14, а $U_{рег} = U_2 + I_p r$, а в схеме рис. 4.14, б $U_{рег} = U_2 - I_p r$ (здесь для простоты коэффициенты трансформации тока и напряжения опущены). При включении генератора по рис. 4.14, а статизм увеличивается. Это делается на генераторах, работающих параллельно на сборные шины. Увеличение статизма способствует однозначности распределения реактивной нагрузки. Поэтому такую схему называют схемой токовой стабилизации.

По схеме (рис. 4.14, б) статизм уменьшается. Данная схема используется на блоках генератор–трансформатор с целью компенсации падения напряжения в трансформаторе, в силу чего схема получила название схемы токовой компенсации.

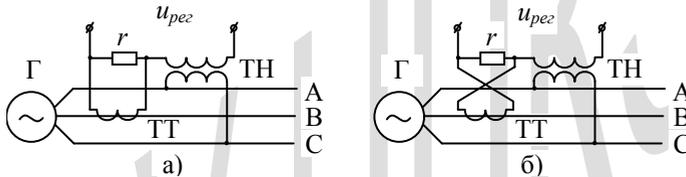


Рис.4.14. Схемы подключения регуляторов

Чтобы напряжение на выводах генератора зависело только от реактивной нагрузки, сочетание подводимых к регулятору фаз напряжения и тока выбирается соответствующим образом. Так, в схемах рис. 4.14 напряжение берется с фаз А – С, а ток – фазы В. Схемы токовой стабилизации и компенсации в трехфазном исполнении рассмотрены на примерах конкретных регуляторов.

4.10. Динамика регулирования

К системе автоматического регулирования предъявляются определенные требования в отношении ее динамических характеристик. Первым является требование устойчивости САР. Под устойчивостью понимается способность

системы возвращаться в исходный или близкий к нему установившийся режим после любого выхода из него в результате какого-либо воздействия.

На рис.4.15 показаны возможные кривые переходного процесса в устойчивой и неустойчивой системах. Устойчивая система после возмущения возвращается к установившемуся режиму. Переходный процесс может быть колебательным (кривая 1) или аperiodическим (кривая 2).

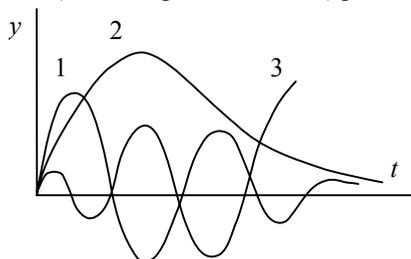


Рис.4.15. График переходного процесса

В неустойчивой системе даже незначительное в начальный момент возмущение выводит систему из равновесия. С течением времени регулируемая величина не принимает установившееся значение (кривая 3).

Вторым требованием в отношении динамических характеристик САР является требование к качеству переходного процесса. Качественными показателями переходного процесса являются его длительность и колебательность. На рис.4.16 показаны характеристики переходного процесса устойчивой системы автоматического регулирования при изменении уставки регулятора, т.е. при таком воздействии, когда регулируемая величина должна прийти к своему новому заданному значению. Кривая 1 иллюстрирует колебательный переходный процесс. По техническим условиям иногда такой процесс может оказаться недопустимым. В таких случаях следует настраивать систему на аperiodический переходный процесс (кривые 2 и 3). В то же время, несмотря на колебательность переходного процесса быстродействие такой системы может быть выше, чем у аperiodически настроенной САР. Быстродействие определяется временем переходного процесса, которое измеряется с начала возмущения и до момента, когда отклонение регулируемой величины от нового установившегося значения станет меньше определенной достаточно малой величины.

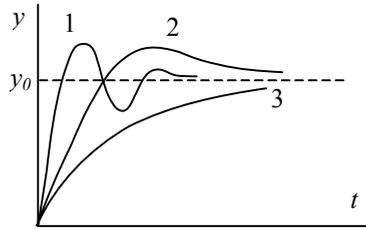


Рис.4.16. Переходный процесс при изменении уставки регулятора

В значительной степени устойчивость и качество переходного процесса зависят от коэффициента усиления САР. Для иллюстрации этого положения обратимся к частотным характеристикам системы регулирования. Разомкнутая система автоматического регулирования, включающая регулятор и объект регулирования, имеет передаточную функцию $W(p) = W_1(p) \dots W_i(p) \dots W_n(p)$, где $W_i(p)$ – передаточная функция i -го звена системы; n – число элементов САР. Имея передаточную функцию системы, можно построить ее амплитудно-фазовую характеристику. Для этого, как известно, необходимо в выражении $W(p)$ заменить p на $j\omega$ и произвести построение годографа $W(j\omega)$ при изменении частоты от 0 до ∞ . По виду амплитудно-фазовой характеристики можно судить о динамических свойствах системы регулирования. Как уже отмечалось ранее, схемы современных регуляторов напряжения (возбуждения) не содержат интегрирующих элементов. При наличии только инерционных элементов с передаточными функциями вида $W_i(p) = k_i / (T_i p + 1)$, амплитудно-фазовая частотная характеристика имеет вид, показанный на рис. 4.17.

Для устойчивой в разомкнутом состоянии системы критерий устойчивости формулируется следующим образом: замкнутая система будет устойчива, если амплитудно-фазовая частотная характеристика не охватывает точку $(-1, 0; j0)$.

Частотную функцию можно записать так:

$$W(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad (4.49)$$

где $A(\omega)$ – модуль; φ – аргумент. При нулевой частоте $A(0) = k$. С увеличением коэффициента передачи вероятность охвата амплитудно-фазовой характеристики точки $(-1, 0; j0)$ увеличивается. При некотором критическом

коэффициенте $k = k_{кр}$, когда характеристика проходит через точку $(-1, 0; j0)$, система находится на грани устойчивости. При $k > k_{кр}$ система неустойчива. Амплитудно-фазовые частотные характеристики для устойчивой (кривая 1) и неустойчивой (кривая 2) систем показаны на рис. 4.17.

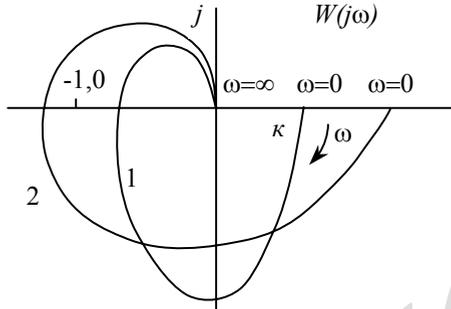


Рис.4.17. Амплитудно-фазовые характеристики САР

Как отмечалось ранее, для улучшения показателей САР в установившихся режимах следует стремиться к увеличению коэффициента усиления САР. Однако это приводит к неустойчивости системы. Обычно по условиям динамики выбирают $k = 0,5k_{кр}$. Это значение коэффициента обеспечивает достаточный запас по устойчивости и удовлетворительное качество переходного процесса.

Рассмотрим вопрос о быстродействии САР. Пояснение приведем на примере простой схемы, включающей два элемента – инерционный с передаточной функцией $W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}$ и безинерционный с передаточной функцией $W_2(p) = k_2$ (рис. 4.18).

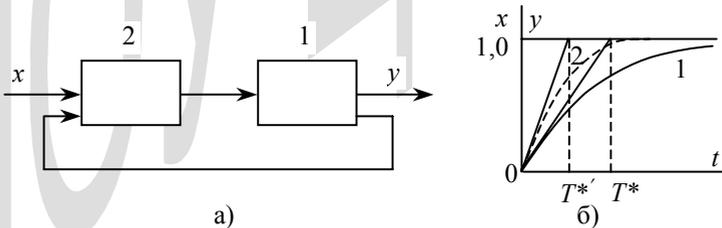


Рис.4.18. Структурная схема (а) и переходная характеристика САР (б).

Для разомкнутой САР передаточная функция

$$W(p) = W_1(p) W_2(p) = \frac{k_1 k_2}{T_1 p + 1}. \quad (4.50)$$

В замкнутом состоянии передаточная функция имеет вид

$$W^* = \frac{k^*}{T^*(p) + 1}, \quad (4.51)$$

где $k^* = \frac{k_1 k_2}{1 + k_1 k_2}$ и $T^* = \frac{T_1}{1 + k_1 k_2}$.

Поскольку $k_1 k_2 \gg 1$, то $k^* \approx 1$ и $T^* \approx \frac{T_1}{k_1 k_2}$. Переходная характеристика замкнутой системы показана на рис. 4.18, б.

При $x(t) = 1(t)$ выходной сигнал $y(t)$ нарастает по экспоненциальному закону с постоянной времени T^* и в установившемся режиме равен $k^* \approx 1$ (кривая 1).

Рассмотрим влияние коэффициента усиления разомкнутой системы на длительность переходного процесса в замкнутом состоянии. Для этого увеличим k_2 , приняв $k_2' = n k_2$, где $n > 1$. Теперь k'^* также стремится к единице, а постоянная времени уменьшается в n раз, т.е. $T'^* \approx \frac{T_1}{n k_1 k_2}$. Переходный процесс при единичном воздействии на входе будет проходить по кривой 2. Отсюда следует, что увеличение коэффициента усиления разомкнутой системы повышает быстродействие САР. Вот почему все быстродействующие регуляторы делают с высоким коэффициентом усиления, а стабилизацию процесса регулирования получают за счет корректирующих цепей.

4.11. Коррекция динамических свойств САР

Динамические свойства САР, имеющей высокий коэффициент усиления по условию статики, могут быть улучшены за счет введения местных обратных связей вокруг элементов САР и дополнительного воздействия по производным регулируемого параметра, а также за счет коррекции САР по возмущающему воздействию.

Введение обратных связей. Рассмотрим САР, в которой один или несколько элементов охватываются обратной связью с передаточной функцией $W_{o.c.}(p)$. С учетом действия обратной связи передаточная функция элемента принимает вид

$$W' = \frac{W(p)}{1 - W(p)W_{o.c.}(p)}. \quad (4.52)$$

Из этой формулы понятен смысл введения обратной связи: она изменяет передаточную функцию элемента. Необходимо стремиться к такому изменению, при котором бы улучшились динамические свойства САР.

Действие жесткой обратной связи в САР не зависит от времени и осуществляется как в установившемся, так и в переходном режимах. Для корректировки динамических свойств САР применяется гибкая обратная связь с передаточной функцией $W_{o.c.}(p) = k_{o.c.}T_{o.c.}p$. Проиллюстрируем действие гибкой обратной связи на примере инерционного и интегрирующего элементов.

Инерционный элемент имеет передаточную функцию $W(p) = \frac{k}{Tp+1}$. За счет гибкой обратной связи передаточная функция этого элемента принимает вид

$$W'(p) = \frac{k}{(T \mp k k_{o.c.}T)p+1}. \quad (4.53)$$

Здесь знак «минус» соответствует положительной обратной связи, а «плюс» – отрицательной. Гибкая обратная связь изменяет только постоянную времени инерционного элемента, коэффициент усиления при этом остается неизменным. Корректировка инерционных свойств элемента (постоянной времени) может благоприятно сказаться на динамических свойствах всей САР.

При интегрирующем элементе получим

$$W'(p) = \frac{1}{(T \mp k_{o.c.}T_{o.c.})p}, \quad (4.54)$$

т.е. в данном случае также изменяется постоянная времени.

Интегрирующий элемент, охваченный отрицательной жесткой обратной связью, теряет свойства интегрирования. Действительно, при $W_{o.c.}(p) = -k_{o.c.}$ имеем

$$W'(p) = \frac{1}{\left(\frac{T}{k_{o.c.}} p + 1\right)} = \frac{k'}{T'p + 1}, \quad (4.55)$$

т.е. интегрирующий элемент превращается в инерционный. Такое изменение существенно влияет на свойства САР. При этом корректируются не только динамические, но и его статические свойства.

Введение воздействия по производной. Элемент, реагирующий на скорость изменения регулируемой величины (рис. 4.19, а), включается параллельно измерительному элементу, выявляющему отклонение регулируемого параметра.

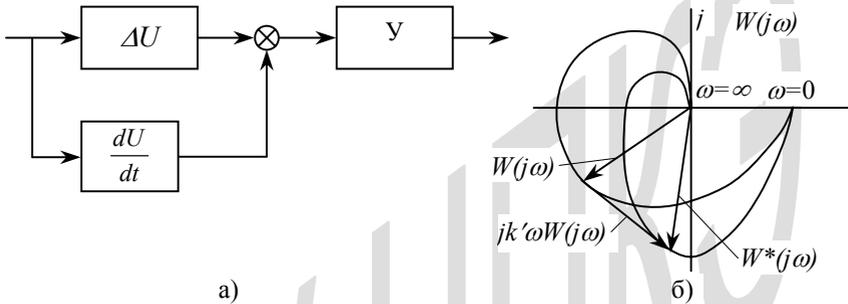


Рис.4.19. Схема воздействия по производной (а) и коррекция частотной характеристики (б)

Рассмотрим влияние воздействия по производной на примере системы с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k_{узм} k_n}{\prod_{i=1}^{i=n} (T_i p + 1)}, \quad (4.56)$$

где k_n – коэффициент усиления всех элементов САР, кроме измерительного. Для простоты примем, что измерительный и дифференцирующий элементы имеют передаточные функции $W_{узм}(p) = k_{узм}$ и $W_{диф}(p) = k_{диф} p$ т.е. не имеют запаздывания. Передаточная функция двух параллельно включенных элементов равна сумме передаточных функций этих элементов. С учетом сказанного при введении дополнительного воздействия по производной передаточная функция системы примет вид

$$W(p) = \frac{(k_{узм} + k_{диф} p) k_n}{\prod_{i=1}^{i=n} (T_i p + 1)}. \quad (4.57)$$

Это выражение можно представить так:

$$W^*(p) = \frac{k_{узм} k_n \left(1 + \frac{k_{диф}}{k_{узм}} p \right)}{\prod_{i=1}^{i=n} (T_i p + 1)} = W(p)(1 + k'p), \quad (4.58)$$

откуда

$$W^*(j\omega) = W(j\omega)(1 + jk'\omega), \quad (4.59)$$

т.е. амплитудно–фазовая характеристика при введении производной может быть получена сложением комплексных величин:

$$W^*(j\omega) = W(j\omega) + jk'\omega W(j\omega). \quad (4.60)$$

На рис.4.19, б представлены амплитудно–фазовая характеристика разомкнутой САР и характеристика этой же системы с дополнительным воздействием по производной. Построение произведено для одного значения частоты ω , при этом к $W(j\omega)$ добавляется вектор $jk'\omega W(j\omega)$, благодаря чему вектор $W^*(j\omega)$ оказывается повернутым на некоторый угол против часовой стрелки. За счет введения дополнительного воздействия по производной амплитудно–фазовая характеристика может быть получена такой, чтобы она не охватывала точку $(-1,0;j0)$. Введение сигнала по производной повышает устойчивость системы и делает ее менее колебательной.

Коррекция по возмущению. Рассмотрим систему из трех элементов, к которой приложено возмущение F (рис. 4.20).

В общем случае возмущающее воздействие может быть приложено между любыми элементами САР, в результате чего появляется отклонение регулируемой величины. Наибольший интерес представляет зависимость регулируемой величины y от полезной нагрузки, которую можно рассматривать как возмущение, прикладываемое к объекту регулирования. Примем, что возмущение F приложено между вторым и третьим элементами. При разомкнутой системе возмущение F проходит на выход схемы с передаточной функцией $W_3(p)$, т.е. $y = F W_3(p)$. Для замкнутой системы передаточная функция от F до y может быть записана так:

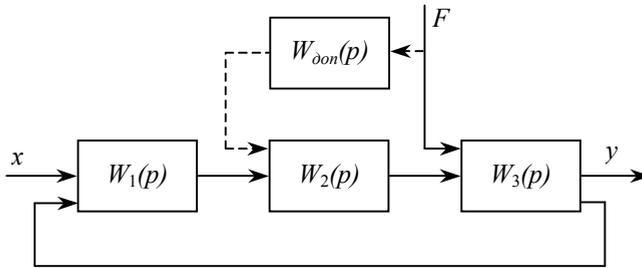


Рис.4.20. Коррекция САР по возмущению

$$W_{Fy}(p) = \frac{W_3(p)}{1 + W(p)}, \quad (4.61)$$

где $W(p) = W_1(p) W_2(p) W_3(p)$, а зависимость выходного сигнала от возмущения равна

$$y = F \frac{W_3(p)}{1 + W(p)}. \quad (4.62)$$

Смысл коррекции САР по возмущению заключается в создании дополнительного пути для прохождения сигнала возмущения с таким расчетом, чтобы результирующее влияние возмущения на выходную величину было равно нулю. Напомним, что такой способ уже был использован для компенсации отклонения регулируемой величины в статическом режиме.

В динамическом режиме компенсация должна быть такой, чтобы возмущающее воздействие не вызывало даже небольшого отклонения регулируемой величины как в статическом, так и в переходном режимах.

Дополнительный путь коррекции показан на рис. 4.20 пунктиром. С учетом этого пути зависимость выходного сигнала от возмущения может быть записана так:

$$y_{кор} = F \frac{W_3(p) + W_{oon}(p) W_2(p) W_3(p)}{1 + W(p)}. \quad (4.63)$$

Выходная величина не будет зависеть от возмущения при условии

$$W_3(p) + W_{oon}(p) W_2(p) W_3(p) = 0, \quad (4.64)$$

откуда

$$W_{oon}(p) = \frac{-1}{W_2(p)}. \quad (4.65)$$

Если

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, \quad (4.66)$$

то

$$W_{\text{дон}}(p) = -\frac{T_2 p + 1}{k_2} = -(k + k_{\text{оуф}} p), \quad (4.67)$$

т.е. элемент дополнительного канала должен формировать воздействие по возмущению и его первой производной.

Практически трудно создать дополнительный путь для прохождения сигнала по нагрузке, чтобы регулируемая величина полностью не зависела от нее. Однако значительное улучшение динамических свойств САР достигается, если уравнение (4.67) соблюдается не абсолютно точно. Если коррекцию по возмущению вводить на вход первого элемента, то при $W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}$ и

$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}$ для передаточной функции канала коррекции $W_{\text{дон}}(p)$

получим

$$W_{\text{дон}}(p) = -\frac{1}{W_1(p)W_2(p)} = -(k + k_{\text{оуф}1} p + k_{\text{оуф}2} p^2), \quad (4.68)$$

т.е. дополнительный элемент должен формировать воздействие по возмущению и двум его производным.

Получение производных в системах САР представляет определенные трудности, вследствие чего коррекцию по возмущению желательно выполнять через меньшее число элементов. Эффективность коррекции через большее число элементов существенно снижается. В то же время коррекция через небольшое число элементов, т.е. как можно ближе к самому объекту регулирования, требует значительной мощности от дополнительного элемента.

Отметим отличительные особенности коррекции САР посредством введения воздействия по возмущению. Так как контур коррекции не входит в основной замкнутый контур САУ, то тем самым он не влияет на устойчивость системы, и ее устойчивость определяется однородным дифференциальным уравнением

$$[Q(p) + H(p)]y = 0. \quad (4.69)$$

Коррекция по возмущению влияет на качество переходного процесса, вызванного только тем воздействием, по которому она осуществлена. Качество переходных процессов от других воздействий остается без изменений и определяется только структурой и параметрами основного замкнутого контура САР.

4.12. Структурная схема регулирования напряжения

Схема регулирования напряжения генератора показана на рис. 4.21. В ее состав входят генератор и регулятор с измерительным, усилительным и исполнительным элементами. На вход регулятора подается заданное значение напряжения U_0 , которое должно поддерживаться генератором. Фактическое значение напряжения генератора также подается на вход измерительного элемента, в котором выявляется разность этих напряжений $U - U_0$, в ее функции и регулируется возбуждение генератора.

Элементы регулятора могут быть выполнены на разной основе. Более подробное описание их будет дано при изучении схем конкретных регуляторов. По своим динамическим характеристикам измерительный и усилительный элементы представляют собой инерционные элементы первого порядка.

Напряжение генератора равно $\dot{U}_z = \dot{E}_0 + \dot{E}_a$, где \dot{E}_a – э.д.с. реакции якоря (статора) [14]. Поскольку $E_a = -jI x_a$ и учитывая, что размагничивание генератора в основном определяется реактивным током статора, получим $U_z = E_0 - I_p x_a$. Пренебрегая рассеянием обмотки статора для неявнополусного генератора, можно считать $x_a \cong x_d$, так что напряжение генератора равно $U_z = E_0 - I_p x_d$.

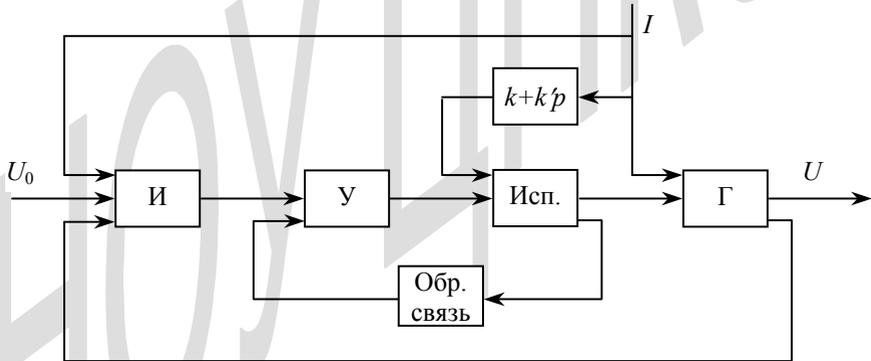


Рис.4.21. Структурная схема регулирования напряжения генератора

Рассматривая обмотку возбуждения как элемент системы регулирования, будем иметь

$$W_{o.г.}(p) = \frac{I_{г,*}}{U_{г,*}} = \frac{1}{T_o p + 1}, \quad (4.70)$$

где ток и напряжение выражены в относительных единицах; T_o – постоянная времени обмотки возбуждения.

Поскольку

$$I_{г} \equiv \Phi_{0*} \equiv E_{0*},$$

то

$$W_{o.г.}(p) = \frac{E_{0*}}{U_{г,*}} = \frac{1}{T_o p + 1}. \quad (4.71)$$

Размагничивающее действие тока статора учтем введением отрицательной обратной связи с коэффициентом передачи $\beta = x_d$, при этом передаточную функцию генератора получим в виде

$$W_{г}' = \frac{k'}{T'p + 1}, \quad (4.72)$$

где $k' = \frac{1}{1 + x_d}$, $T' = \frac{T_o}{1 + x_d}$.

Таким образом, генератор также может быть представлен инерционным элементом первого порядка. Безусловно, это упрощенное описание синхронного генератора, но вполне приемлемое для анализа основных показателей системы регулирования. Строгая математическая модель генератора описывается уравнениями Парка–Горева.

Отметим особенность режима генератора под нагрузкой в сравнении с холостым ходом. Под нагрузкой коэффициент усиления и постоянная времени генератора меньше, чем на холостом ходу. Это благоприятно сказывается на устойчивости САР. Однако, и на холостом ходу обеспечить устойчивость рассматриваемой системы, состоящей из четырех инерционных элементов, не представляет больших затруднений. К тому же, к автоматическому регулированию напряжения не предъявляется высоких требований по быстродействию, а следовательно, коэффициент усиления разомкнутой системы может быть невысоким.

Рассмотрим САР, в котором усилительный и исполнительный элементы регулятора охвачены обратной связью. Эта связь используется для изменения

параметров (коэффициента усиления, постоянной времени) элементов. Связь может быть жесткой и гибкой. Динамические свойства САР корректируются гибкой обратной связью. На статические показатели эта связь не оказывает влияния. Жесткая обратная связь изменяет параметры элементов независимо от времени, поэтому ее действие проявляется и в динамике, и в статике.

На схеме предусмотрена коррекция САР по нагрузке генератора. Под действием нагрузки напряжение генератора уменьшается. В статике это отклонение компенсируется действием регулятора. Выявив отклонение напряжения генератора от заданного, регулятор подает воздействие на возбуждение с целью уменьшения отклонения. Сигнал регулятора проходит через несколько элементов, которые имеют запаздывание. Именно поэтому невозможно мгновенно устранить отклонение регулируемого параметра действием элементов основного контура САР. Следствием запаздывания в элементах регулятора является колебательность переходного процесса.

Корректирующий сигнал по току нагрузки подается на вход исполнительного элемента регулятора. Если бы этот элемент был безинерционным, то любое изменение нагрузки компенсировалось бы мгновенно. При запаздывании необходимо формировать корректирующий сигнал с дополнительным воздействием по производной, что и должно быть сделано в корректирующем элементе. Кроме коррекции динамических свойств САР сигнал по нагрузке подается на вход регулятора. В 4.10 было показано, что это делается для изменения статизма регулирования.

4.13. Структурная схема регулятора возбуждения сильного действия

На крупных электростанциях, работающих через длинные линии электропередачи, остро стоит вопрос о сохранении устойчивости параллельной работы с энергосистемой. Рассмотрим условия параллельной работы генератора с системой. В нормальном режиме сохраняется баланс мощностей турбины P_m и генератора $P_{эл}$ в точке «а» (рис.4.22, а). При к.з. на линии передаваемая мощность снижается и может стремиться к нулю. Под действием избыточного момента турбины ротор ускоряется и угол δ растет. После лик-

видации к.з. и восстановления передачи ротор начнет тормозиться. Изменение угла δ в послеаварийном режиме представлено на рис.4.22, б.

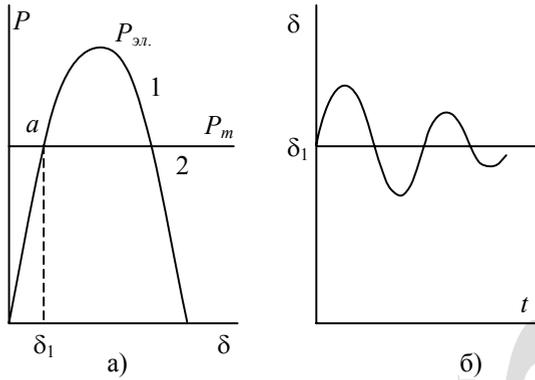


Рис.4.22. Характеристики генератора

Колебательный процесс $\delta(t)$ может быть затухающим или расходящимся. В последнем случае произойдет нарушение устойчивости. Для сохранения устойчивости и ускорения затухания $\delta(t)$ необходимо воздействовать на возбуждение генератора. Очевидно, когда $\delta(t) > \delta_1$, следует увеличивать возбуждение и, следовательно, э.д.с. генератора. Передаваемая мощность $P = \frac{E_0 U}{x_d} \sin \delta$ при этом будет повышаться, что будет способствовать торможению генератора. При $\delta(t) < \delta_1$ следует развозбуждать генератор.

Таким образом, возбуждение генератора необходимо регулировать в соответствии с колебаниями угла δ . Практически период колебаний ротора может равняться 0,5 – 1 с. С таким же периодом или частотой 1 – 2 Гц следует изменять возбуждение генератора. Это задача регулирования возбуждения с целью сохранения устойчивости. Регулятор, осуществляющий такое воздействие, называют регулятором возбуждения, хотя одновременно он регулирует и напряжение генератора.

Регулирование возбуждения должно быть быстродействующим и изменять ток возбуждения в заметных пределах с указанной выше частотой, несмотря на значительную инерционность обмотки возбуждения. Отметим требования к системе регулирования возбуждения:

наличие высокого коэффициента усиления САР в разомкнутом состоянии (в пределах до $k_u = 50$ ед.возб./ед.ст.напр.);

регулирование возбуждения не только в функции напряжения генератора, но и в функции угла δ или других параметров, адекватных углу;

использование при высоком коэффициенте усиления всех средств стабилизации, включая обратные связи, дополнительное воздействие по производной регулируемых величин и коррекцию по возмущению.

Подобный регулятор принято называть автоматическим регулятором возбуждения сильного действия (АРВ – СД). Он широко используется в системах возбуждения крупных гидро– и турбогенераторов как многоканальное устройство, обеспечивающее поддержание требуемого уровня напряжения в заданной точке энергосистемы, форсирование возбуждения в аварийных режимах, демпфирование колебаний при возмущениях, ограничение минимального и максимального тока ротора, а также выполнение ряда других функций.

Структурная схема регулятора АРВ–СД показана на рис. 4.23. Регулятор используется на генераторах, имеющих тиристорную систему возбуждения. На схеме она отмечена элементом ТВ с системой управления тиристорами (СУТ). В закон регулирования введено несколько параметров. Во-первых, это регулирование по отклонению напряжения ΔU . Для улучшения динамических показателей системы управления введено дополнительное воздействие по производной $\frac{du}{dt}$.

Выше отмечалась эффективность регулирования возбуждения в функции угла δ . Реализовать такое регулирование весьма сложно – для измерения угла δ необходимо иметь каналы связи для передачи вектора напряжения с приемного конца линии электропередачи на станцию. Это приводит к снижению надежности системы регулирования. Вместо угла δ вводится сигнал по частоте, исходя из соотношения $f = \frac{d\delta}{dt}$ и $\frac{df}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2}$. Кроме того, вводятся канал ограничения минимального тока возбуждения $\Delta I_{\text{возб}}$ и канал по току статора для изменения статизма регулирования.

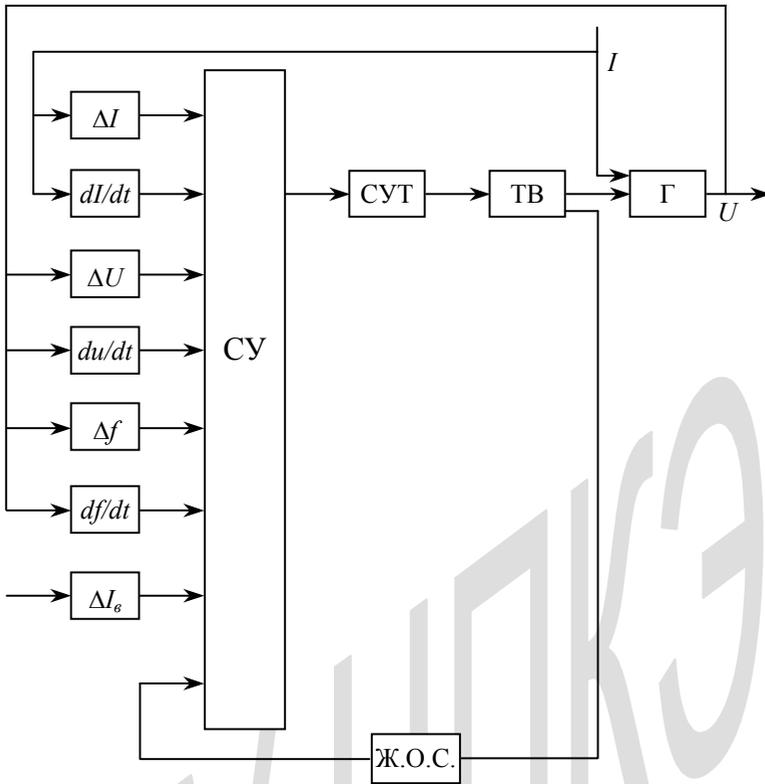


Рис.4.23. Структурная схема регулятора возбуждения СД

В регуляторе возбуждения имеется контур коррекции по току генератора. Ранее было показано, что канал коррекции должен осуществляться через возможно меньшее число элементов, например, сразу на вход возбудителя. В этом случае корректирующий сигнал должен формироваться по отклонению и первой производной тока нагрузки. Введение коррекции через большее число элементов регулятора приводит к необходимости воздействия по второй и высшим производным.

В случае тиристорной системы возбуждения, являющейся практически безынерционной, и элементов регулятора возбуждения на основе электронных усилителей корректирующий сигнал по току нагрузки может быть подан на вход регулятора возбуждения. Учитывая малое запаздывание в элементах регу-

лятора и практически безынерционность тиристорного возбуждения, корректирующее воздействие формируется по току и его первой производной.

Для наглядности на структурной схеме элементы по производной показаны независимо (параллельно) по отношению к измерительным элементам регулируемого параметра. В действительности, сначала реализуется измерительный элемент по отклонению, выходное напряжение которого пропорционально отклонению регулируемого параметра от значения уставки, а затем этот сигнал дифференцируется посредством цепочки *RC*.

Все перечисленные каналы воздействуют на суммирующий усилитель СУ, который в свою очередь через СУТ управляет тиристорами. Элементы СУ, СУТ и ТВ охвачены жесткой обратной связью. Система регулирования является замкнутой, напряжение генератора подается на вход измерительных элементов по напряжению и частоте.

4.14. Компаундирование синхронного генератора

Сущность компаундирования заключается в том, что регулирование возбуждения синхронного генератора производится в функции тока статора [14]. Такое регулирование для коррекции динамических свойств САР можно осуществлять на синхронных генераторах с различными системами возбуждения. Однако термин «компаундирование» используется только применительно к электромашинной системе возбуждения. Принципиальная схема компаундирования синхронного генератора показана на рис. 4.24.

В схемах компаундирования применяются два варианта подпитки возбуждения. Если возбудитель генератора имеет дополнительную обмотку возбуждения (ДОВВ), то подпитка током статора производится в эту обмотку. Если же возбудитель не имеет дополнительной обмотки, то подпитка выполняется в основную обмотку возбуждения возбудителя (ОВВ). На рис. 4.24, а показана схема компаундирования в дополнительную обмотку возбудителя. Пунктиром показана подпитка статора в основную обмотку возбудителя в функции тока.

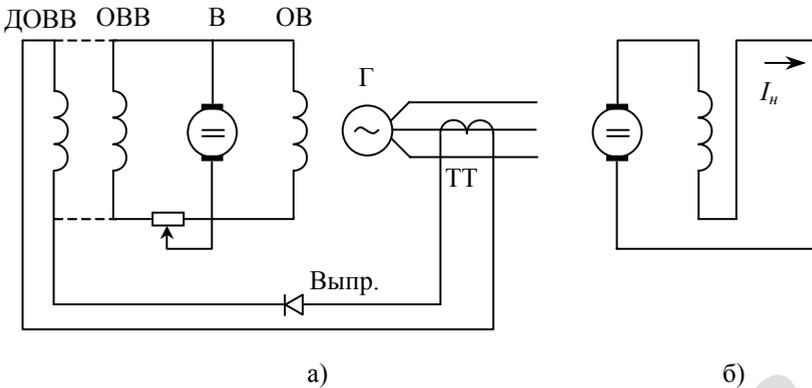


Рис.4.24. Схемы компаундирования синхронного генератора (а) и генератора постоянного тока (б)

Идея компаундирования синхронного генератора заимствована из области машин постоянного тока. При перенесении этой идеи на синхронные генераторы необходимо в цепь компаундирования включить трансформатор тока (ТТ) и выпрямитель (Выпр.). Мощность, которую можно передать со стороны статора через трансформатор тока, сравнительно мала и недостаточна для того, чтобы непосредственно воздействовать на возбуждение синхронного генератора. Поэтому такое воздействие подается через возбудитель, т.е. осуществляется регулирование возбуждения возбудителя в функции тока статора. Возбудитель используется как усилительный элемент в канале регулирования возбуждения синхронного генератора в функции тока статора. Этот элемент имеет запаздывание.

У компаундированного генератора постоянного тока запаздывания нет. При изменении тока якоря одновременно изменяется и ток в серийной обмотке возбуждения (рис.4.24, б).

Регулирование возбуждения в конечном итоге приводит к регулированию напряжения синхронного генератора. По ряду причин компаундирование в чистом виде не может обеспечить поддержание напряжения на постоянном уровне. Для поддержания напряжения на синхронном генераторе приходится ставить регулятор напряжения. При компаундировании регулятор напряжения должен корректировать те отклонения напряжения, с которыми не справляется система компаундирования. По этой причине такой регулятор называют корректором. Сочетание компаундирования с коррекцией напряжения широко применяется на синхронных генераторах с машинной системой возбуждения.

На систему компаундирования с корректором напряжения можно посмотреть иначе. Если на первый план в названии поставить корректор напряжения, представляющий собой регулятор напряжения синхронного генератора, то само компаундирование есть не что иное, как коррекция системы регулирования напряжения по нагрузке, которая выполняется для коррекции динамических свойств САР. Такой подход соответствует изложенному выше рассмотрению структурной схемы регулирования с позиций теории автоматического регулирования.

Учитывая, однако, сложившуюся терминологию – компаундирование генератора с коррекцией по напряжению, далее используется принятая терминология. При изучении же динамических характеристик этой системы регулирования следует помнить, что она представляет собой систему регулирования напряжения, динамические характеристики которой скорректированы за счет воздействия по возмущению.

Поскольку в канале коррекции по возмущению имеется запаздывание, то для полной коррекции отклонения напряжения в переходном режиме в канале коррекции следовало бы формировать воздействие по току и его производной. Практически это осуществить затруднительно, поэтому коррекция вводится только по отклонению тока.

Так как нагрузкой генератора является полный ток, а размагничивание генератора происходит в основном реактивной составляющей тока, то коррекцию динамических свойств системы регулирования напряжения предпочтительнее делать в функции реактивной составляющей тока статора или, что то же самое, в функции тока с учетом его фазы. Такая система используется на синхронных генераторах с машинной системой возбуждения и называется системой фазового компаундирования.

Сочетание компаундирования с корректором напряжения обеспечивает эффективное регулирование возбуждения генератора в нормальном и аварийном режимах. Корректор выполняется на основе электромагнитных элементов, вследствие чего он и называется электромагнитным. Компаундирование с электромагнитным корректором представляет собой весьма надежную систему регулирования. Благодаря высоким показателям регулирования как в статике, так и в динамике, а также в силу высокой надежности и простоты обслуживания компаундирование с электромагнитным корректором

получило широкое распространение на гидро– и турбогенераторах с электромашинной системой возбуждения.

Из недостатков компаундирования с электромагнитным корректором необходимо отметить следующие. При близких коротких замыканиях, сопровождающихся значительными посадками напряжения, компаундирование не обеспечивает достаточной форсировки возбуждения. Это определяется тем, что при больших значениях тока короткого замыкания трансформаторы тока насыщаются, и увеличение тока статора не дает пропорционального увеличения подпитки возбуждения. С другой стороны, при посадках напряжения корректор не сможет выдавать свою номинальную мощность, так как подпитка возбуждения снижается и по этому каналу. Для устранения указанного недостатка генераторы, имеющие компаундирование с электромагнитным корректором, оснащаются устройством релейной форсировки.

Недостатком электромагнитного корректора является значительное замедление процесса регулирования в виду большого запаздывания в магнитных усилителях.

4.15. Принцип действия электромагнитного корректора напряжения

Корректор представляет собой регулятор напряжения. Обычно регулятор содержит измерительный, усилительный и исполнительный элементы. В электромагнитном корректоре напряжения усилительный и исполнительный элементы совмещены в одном электромагнитном усилителе. Таким образом, основными элементами такого корректора являются измерительный и усилительный элементы.

По своим динамическим свойствам элементы корректора инерционные. В структурной схеме корректора нет интегрирующего элемента, поэтому он является статическим регулятором. Благодаря высокому коэффициенту усиления элементов статизм регулирования невелик. Большой коэффициент усиления обеспечивает также высокую чувствительность. Практически можно считать, что электромагнитный корректор не имеет зоны нечувствительности.

Измерительный орган корректора преобразует отклонение напряжения генератора от заданного значения в пропорциональный сигнал постоянного тока. Упрощенная принципиальная схема измерителя представлена на

рис.4.25, а. Измеритель состоит из двух элементов: линейного R и нелинейного X . Ток в линейном элементе пропорционален приложенному напряжению, в нелинейном – зависимость тока от приложенного напряжения нелинейна. Характеристики этих элементов показаны на рис.4.25, б.

Усилительным элементом корректора является магнитный усилитель, имеющий две обмотки управления W_1 и W_2 . Одна из обмоток включена последовательно в цепь линейного элемента, другая – в цепь нелинейного. Обмотки включены встречно, так что их намагничивающие силы вычитаются. Рассмотрим магнитный усилитель с одинаковым числом витков в обмотках. Результирующее действие этих обмоток при $U = U_0$ равно нулю. Действительно, при $U = U_0$ (рис. 4.25, б) токи линейного и нелинейного элементов равны между собой и намагничивающие силы управляющих обмоток взаимно компенсируются.

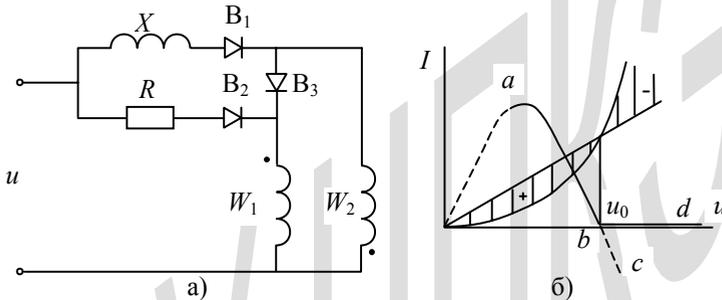


Рис. 4.25. Схема измерительного элемента корректора (а) и его характеристики (б)

При увеличении напряжения $U > U_0$ ток нелинейного элемента становится больше тока линейного элемента. В этом случае преобладает действие обмотки W_2 . Условно примем это действие за отрицательный сигнал измерителя. При $U < U_0$ ток нелинейного элемента становится меньше тока линейного, вследствие чего преобладающим является действие обмотки W_1 , которое следует принять за положительный сигнал. Результирующая характеристика показана кривой abc рис. 4.25, б.

Обычно для турбогенераторов применяется так называемый односистемный корректор, который выполняется на базе однотактного магнитного усилителя. Характеристика такого усилителя показана на рис. 4.26 (кривая 1). Входным сигналом $I_{вх}$ является разность токов обмоток управления, а ток $I_{вых}$ является выходным сигналом магнитного усилителя.

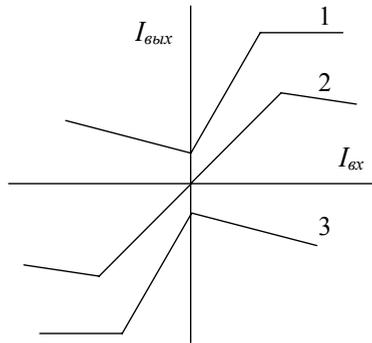


Рис.4.26. Характеристики магнитного усилителя

Однотактный магнитный усилитель не полярен, т.е. он не реагирует на знак сигнала. Как при положительном, так и при отрицательном входном сигнале ток выхода растет. Без принятия специальных мер это может привести к тому, что как при уменьшении, так и увеличении напряжения генератора от значения U_0 корректор будет оказывать действие в одном направлении, например, на увеличение напряжения генератора. Для устранения указанного недостатка односистемного корректора в измерительный орган включается вентиль B_3 , благодаря которому отрицательные сигналы измерительного органа шунтируются. Действительно, при отрицательном сигнале ток нелинейного элемента становится больше тока линейного элемента. При этом падение напряжения на обмотке W_2 могло бы оказаться выше падения напряжения на обмотке W_1 . При наличии вентиля B_3 при самых небольших превышениях напряжения U_{W_2} над U_{W_1} вентиль начинает проводить, и эти напряжения выравниваются. Следовательно, токи в управляющих обмотках также будут выравниваться, и результирующий входной сигнал магнитного усилителя станет равным нулю. Вместо характеристики abc (см. рис. 4.25, б) получается характеристика abd . Когда сигнал положителен, вентиль не проводит и характеристика измерительного органа остается неизменной, такой же, как и при отсутствии вентиля.

Таким образом, односистемный корректор создает дополнительную подпитку возбуждения при снижении напряжения ниже U_0 . При повышении напряжения корректор бездействует, что в какой-то степени является недостатком. Однако на турбогенераторе повышение напряжения выше напряже-

ния холостого хода маловероятно, так что действия односистемного корректора вполне достаточно.

Для гидрогенераторов действия односистемного корректора недостаточно. Отключение гидрогенератора, сопровождающееся сбросом нагрузки, приводит к значительному увеличению напряжения. Это объясняется, с одной стороны, переходом с нагрузочной характеристики генератора на характеристику холостого хода и, с другой стороны, увеличением скорости гидроагрегата. Так, при сбросе нагрузки с гидрогенератора вследствие инерционности системы регулирования скорость гидроагрегата может превысить номинальную на 30 – 40 %. Учитывая это обстоятельство, на гидрогенераторах рекомендуется устанавливать так называемый двухсистемный корректор напряжения, в котором усилительный элемент выполняется на основе двухтактного магнитного усилителя. Такой магнитный усилитель реагирует на знак входного сигнала, так как его характеристика симметрична относительно оси ординат (кривая 2 на рис. 4.26).

Двухтактный усилитель выполняется на основе двух одноктактных, каждый из которых работает на отдельную обмотку возбуждения возбудителя. Один из них создает дополнительную подпитку (кривая 1) согласно с основным током возбуждения, другой создает развозбуждение (кривая 3). Результирующее воздействие определяется характеристикой 2. Таким образом, двухсистемный корректор можно представить как одновременное включение двух односистемных, согласованного и противовключенного, корректоров.

4.16. Магнитные усилители

Действие любого усилителя заключается в том, что возможно управление мощным выходным сигналом с помощью небольшого сигнала. В магнитном усилителе управление базируется на принципе изменения магнитной проницаемости ферромагнитных материалов. Принцип действия магнитного усилителя можно пояснить на примере стального сердечника с двумя обмотками, одна из которых обмотка переменного тока, другая – постоянного. Обмотка постоянного тока является управляющей, обмотка переменного тока – рабочей (рис. 4.27).

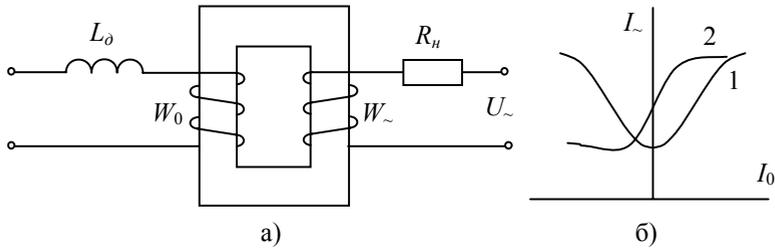


Рис.4.27. Простейший усилитель (а) и его характеристика (б)

Все величины, относящиеся к обмотке переменного тока, будем отмечать знаком « \sim », а к обмотке постоянного тока – знаком «0».

В цепь рабочей обмотки включается нагрузка, ток в которой определяется выражением

$$I_{\sim} = \frac{U_{\sim}}{\sqrt{R_n^2 + (\omega L)^2}}, \quad (4.73)$$

где R_n – сопротивление нагрузки; ωL – индуктивное сопротивление рабочей обмотки. Для простоты предполагается, что активное сопротивление рабочей обмотки мало и им можно пренебречь.

Индуктивность рабочей обмотки равна

$$L = \frac{0,4\pi W_{\sim}^2 \Omega \mu_{\sim}}{\ell \cdot 10^8} \quad (4.74)$$

где W_{\sim} – число витков рабочей обмотки; Ω – сечение сердечника; μ_{\sim} – магнитная проницаемость материала сердечника для переменной составляющей магнитного поля; ℓ – длина магнитопровода.

При заданных и нерегулируемых геометрических размерах изменять индуктивность рабочей обмотки можно за счет магнитной проницаемости μ_{\sim} . Это изменение получается намагничиванием с помощью управляющей обмотки.

Изменение магнитной проницаемости μ_{\sim} приводит к изменению индуктивности L , что в свою очередь изменяет ток в рабочей обмотке. Характеристика магнитного усилителя, представляющая зависимость тока в рабочей обмотке от управляющего тока I_0 , показана на рис.4.27, б (кривая 1).

Усилитель с такой характеристикой является неполярным, т.е. не реагирует на знак управляющего сигнала. Как при положительных, так и при отрицательных значениях управляющего тока в рабочей обмотке ток растет однозначно. Другим недостатком этого усилителя является индуктирование переменной э.д.с. в обмотке управления под действием переменной составляющей магнитного потока. Если магнитный усилитель выполняется по схеме рис. 4.27, то для уменьшения переменной составляющей тока последовательно с управляющей обмоткой включается дополнительная индуктивность L_D . Применяются магнитные усилители на двух сердечниках, рабочие обмотки которых соединяют последовательно или параллельно, а обмотки управления соединяют таким образом, чтобы индуктируемые в этих обмотках э.д.с. взаимно компенсировались. При этом переменный ток в управляющей обмотке будет отсутствовать.

На рис. 4.28, а представлена схема усилителя с последовательным соединением рабочих обмоток. Часто оба сердечника заменяют одним с Ш-образным магнитопроводом (рис. 4.28, б).

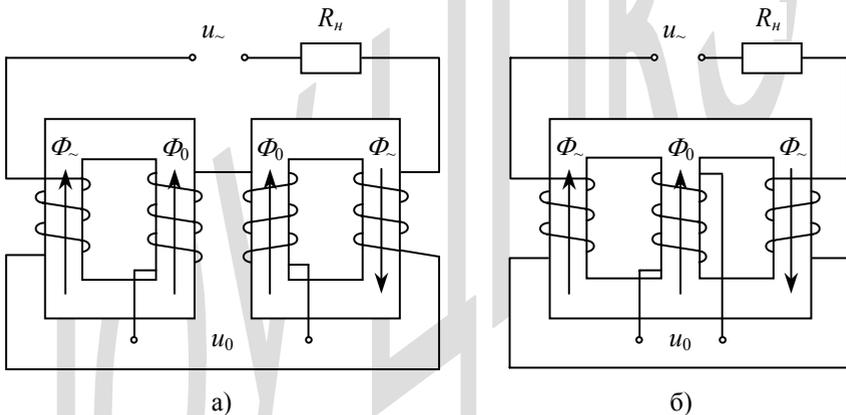


Рис.4.28. Схема одноконтактного магнитного усилителя

В этом случае обмотку управления размещают на среднем сердечнике магнитопровода, а рабочие обмотки – на крайних. При этом переменный магнитный поток основной частоты и нечетных гармоник в среднем сердечнике будет отсутствовать. Однако, такой усилитель остается неполярным, и его характеристика нелинейна. В силу неполярности характеристики эти усилители называются одноктактными или нереверсивными.

С помощью дополнительной обмотки смещения, располагаемой на среднем сердечнике магнитопровода, можно перемещать рабочую точку усилителя по кривой $I_{\sim} = f(I_0)$. Так, если по обмотке смещения пропустить ток в положительном направлении, то рабочая точка сместится и займет некоторое положение на правой ветви характеристики. Усилитель станет полярным, так как положительный управляющий ток будет увеличивать ток в рабочей обмотке, а отрицательный – уменьшать. Однако при смещении рабочей точки усилителя в рабочей обмотке протекает значительный ток холостого хода, что иногда нежелательно. Коэффициент усиления такого усилителя невелик. Однотактные усилители без обратной связи применяются в основном для больших мощностей (около 20 Вт и выше).

Для увеличения коэффициента усиления в магнитном усилителе выполняется обратная связь. Для этой цели на средний сердечник магнитопровода наматывается специальная обмотка обратной связи. Питание в эту обмотку подается через выпрямитель из цепи рабочей обмотки (рис. 4.29).

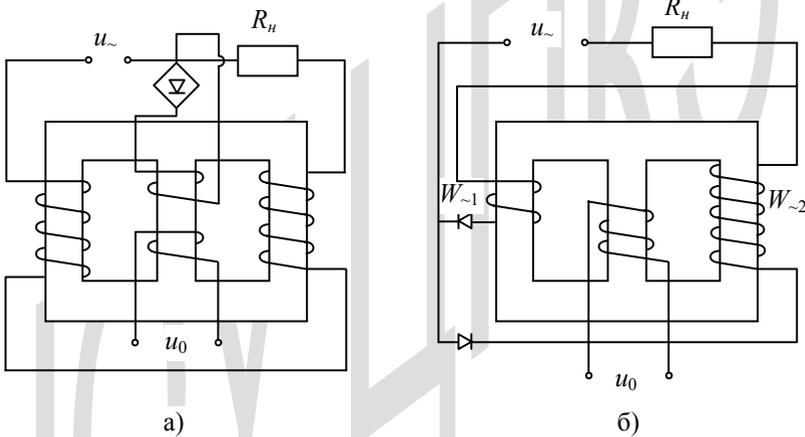


Рис.4.29. Магнитный усилитель с обратной связью

Проследим за изменением характеристик магнитного усилителя при наличии обратной связи. Поскольку питание в обмотку обратной связи подается через выпрямитель, направление в ней будет неизменным при любом направлении тока в управляющей обмотке. Следовательно, если условится, что при положительном токе управления обратная связь будет положительной, то при отрицательном направлении тока в обмотке управления эта же

связь будет отрицательной. В самом деле, при изменении знака тока в управляющей обмотке намагничивающая сила этой обмотки также изменится. Но так как направление тока в обмотке обратной связи не меняется, то в этом случае намагничивающие силы этих полей будут действовать встречно.

Введение обратной связи меняет коэффициент усиления усилителя. Положительная обратная связь увеличивает коэффициент усиления, отрицательная – уменьшает. Поскольку при смене знака управляющего тока знак обратной связи также меняется, то влияние обратной связи на левую и правую ветви характеристики $I_{\sim} = f(I_0)$ будет различным. Повышение коэффициента усиления при управляющем токе $I_0 > 0$ приведет к увеличению крутизны характеристики, понижение коэффициента усиления при управляющем токе $I_0 < 0$ уменьшит крутизну характеристики. На рис.4.27, б (кривая 2) представлен характер трансформации характеристики магнитного усилителя за счет введения обратной связи. При отсутствии обратной связи ток в рабочей обмотке I_{\sim} имеет минимум при $I_0 = 0$ и характеристика симметрична относительно оси ординат. При наличии обратной связи минимум смещается в сторону отрицательного значения управляющего тока. В точке минимума характеристики усилителя с обратной связью намагничивающие силы управляющей обмотки и обмотки обратной связи компенсируются.

Обратную связь можно выполнить иначе (рис 4.29, б). Здесь в каждую полуобмотку W_{-1} и W_{-2} включен вентиль таким образом, что по полуобмотке W_{-1} протекает одна полуволна тока, а по полуобмотке W_{-2} – другая. По нагрузке течет переменный ток. За счет выпрямления тока в обмотках W_{-1} и W_{-2} создается дополнительное подмагничивание сердечника, эквивалентное подмагничиванию со стороны обмотки обратной связи. Такой магнитный усилитель называется магнитным усилителем с внутренней обратной связью.

Для получения полярного магнитного усилителя, реагирующего на знак управляющего тока, обычно собирается так называемая двухтактная схема. При этом два однотактных усилителя включаются дифференциально так, чтобы ток в нагрузке равнялся разности токов этих усилителей.

Магнитные усилители широко применяются в устройствах автоматического управления и регулирования. К преимуществам магнитных усилителей следует отнести: отсутствие подвижных частей, надежность, высокий к.п.д., большой коэффициент усиления, возможность суммирования многих

сигналов, немедленная готовность к работе после включения питания и большой срок службы. Одним из существенных недостатков магнитных усилителей является высокая инерционность.

4.17. Схемы компаундирования с электромагнитным корректором напряжения

Структурная схема рассматриваемой системы регулирования напряжения синхронного генератора показана на рис.4.30. Основной контур САР напряжения включает объект регулирования – синхронный генератор и регулятор – электромагнитный корректор напряжения. Возбудитель следует рассматривать как исполнительный элемент регулятора. На вход регулятора напряжения подаются заданное значение напряжения U_0 и фактическое напряжение U . В регуляторе имеются две обратные связи. Жесткая обратная связь охватывает магнитный усилитель, что сделано для улучшения характеристики самого магнитного усилителя. По каналу гибкой обратной связи сигнал подается с выхода возбудителя на вход магнитного усилителя. Гибкая обратная связь улучшает динамику регулирования.

В системе регулирования используется воздействие по току генератора. Сигнал по току подается на вход измерительного элемента регулятора напряжения и на вход возбудителя. В первом случае сигнал по току используется для изменения статизма регулирования. Воздействие по току на входе возбудителя предназначено для улучшения динамики регулирования.

Как мы уже отмечали, на первый план выделяется контур регулирования возбуждения в функции тока – компаундирование. Контур регулирования напряжения выполняет вторичные функции коррекции отклонений, с которыми не справляется канал регулирования по току. Несомненно, что акцентирование внимания на том или ином контуре системы регулирования не меняет сущности дела, которая заключается в том, что для улучшения статистики и динамики управления регулирование осуществляется в функции и напряжения, и тока генератора.

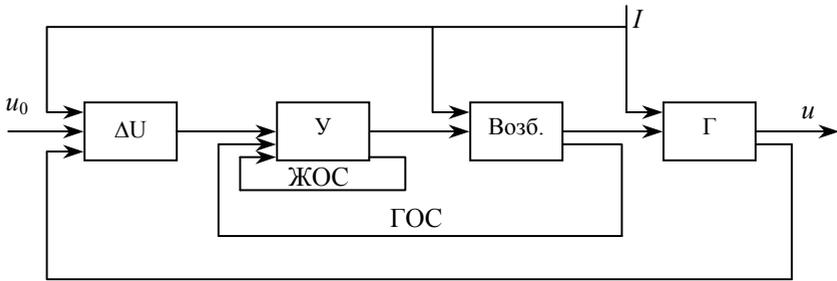


Рис.4.30. Структурная схема компаундирования с коррекцией по напряжению

Компаундирование с односистемным корректором. На рис. 4.31 показана принципиальная схема компаундирования с односистемным корректором.

Корректор называется односистемным в связи с тем, что в нем используется одноконтурный магнитный усилитель.

Непосредственно компаундирование включает следующие элементы: трансформатор тока ТТ, сопротивление R_y , трансформатор T_1 и выпрямитель B_1 . С помощью этих элементов осуществляется регулирование возбуждения в функции тока статора. Сопротивление R_y выполняет две функции. Во-первых, с помощью этого сопротивления обеспечивается нормальный режим работы трансформаторов тока ТТ. Во-вторых, с сопротивления R_y снимается часть напряжения и подается в схему корректора, за счет чего изменяется статизм регулирования. Трансформатор T_1 является разделительным трансформатором и служит для согласования параметров компаундирования и цепи возбуждения.

Остальные элементы схемы составляют корректор напряжения. Измерительный орган корректора подключается к генератору через трансформатор напряжения ТН и установочный автотрансформатор АТ. Линейный элемент корректора ЛЭ состоит из ненасыщенного трехфазного или трех однофазных реакторов с воздушным зазором и выпрямителя B_2 . Ток в цепи линейного элемента пропорционален приложенному напряжению. Нагрузкой линейного элемента является одна из обмоток управления магнитного усилителя.

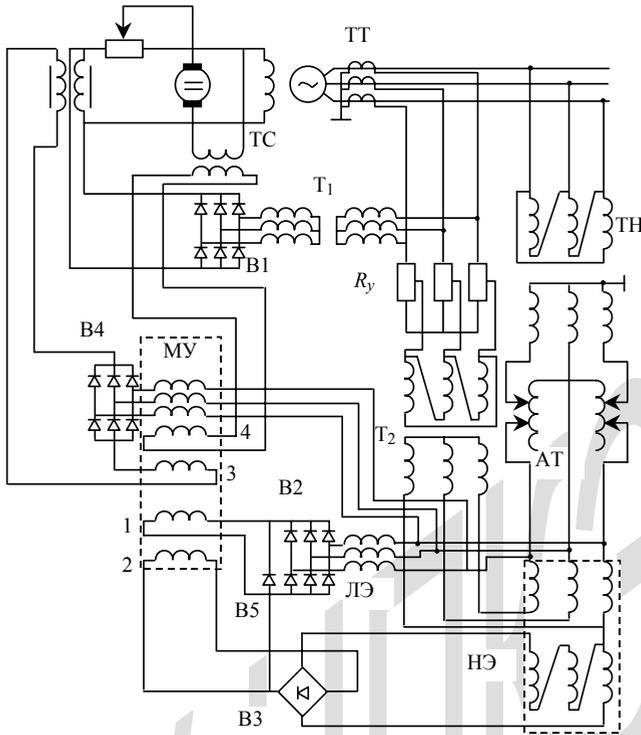


Рис. 4.31. Принципиальная схема компаундирования с односистемным корректором

Нелинейный элемент НЭ состоит из трехфазного пятистержневого насыщающегося трансформатора. Вторичная обмотка этого трансформатора соединена разомкнутым треугольником, в рассечку которого включен однофазный выпрямитель В₃. Выпрямленный ток нелинейного элемента подается во вторую управляющую обмотку магнитного усилителя. До тех пор пока сердечник трансформатора нелинейного элемента не насыщен, суммарное напряжение трех фаз равно нулю и ток во вторичной обмотке отсутствует. С увеличением напряжения генератора сердечник трансформатора насыщается. Во вторичной обмотке появляются третья и кратные ей гармоники, под действием которых во второй обмотке управления магнитного усилителя будет протекать ток. Разность намагничивающих сил, обусловленных токами линейного и нелинейного элементов, является входным сигналом магнитного усилителя. Вентиль В₅, включенный между управляющими обмотками уси-

лителя, выравливает токи в этих обмотках при повышении напряжения генератора выше напряжения холостого хода. При этом входной сигнал магнитного усилителя становится равным нулю, и последующее увеличение подпитки тока возбуждения, являющееся следствием неполярности усилителя, прекращается. Кроме двух обмоток управления магнитный усилитель имеет еще две обмотки обратной связи. С помощью обмотки 3 выходной сигнал усилителя подается на его вход, т.е. эта связь охватывает всего лишь один магнитный усилитель. С помощью такой обратной связи изменяется характеристика самого усилителя. Обмотка обратной связи 4 включается через трансформатор стабилизации ТС на выводы возбудителя. Эта связь охватывает магнитный усилитель и возбудитель и служит средством стабилизации процесса регулирования.

В установившемся режиме напряжение возбудителя постоянно. В этом случае напряжение на вторичной обмотке трансформатора ТС равно нулю, и ток в обмотке 4 отсутствует. Следовательно, в установившемся режиме эта связь не действует. В переходном режиме на вторичной обмотке ТС появляется э.д.с., пропорциональная скорости изменения напряжения возбуждения, и по обмотке 4 течет ток. Таким образом, обратная связь, осуществляемая с помощью трансформатора ТС, является гибкой, действующей только в переходном режиме. Назначение гибкой обратной связи – стабилизация процесса регулирования.

Структурная схема корректора не содержит интегрирующего элемента, поэтому корректор осуществляет регулирование по статическому закону. Однако статизм характеристики регулирования корректора невелик и для однозначности распределения реактивных нагрузок между параллельно работающими генераторами его необходимо увеличить. Это достигается за счет включения корректора по схеме токовой стабилизации. Для осуществления схемы токовой стабилизации на измерительный орган необходимо подавать дополнительное напряжение, пропорциональное нагрузке генератора. В схеме корректора это производится с помощью установочного сопротивления R_3 и разделительного трансформатора T_2 . Изменяя фазу напряжения на вторичной стороне трансформатора T_2 , можно получить схему токовой компенсации, т.е. создавать отрицательный статизм регулирования. Уставка корректора регулируется с помощью автотрансформатора АТ.

Компаундирование с двухсистемным корректором. Схема непосредственно компаундирования не отличается от ранее рассмотренного варианта компаундирования с односистемным корректором. Измерительный элемент корректора также состоит из линейного и нелинейного элементов. Отличие заключается в исполнении усилителя электромагнитного корректора. В схеме компаундирования с двухсистемным корректором усилительный элемент создан на основе двухтактного магнитного усилителя, который реагирует на знак входного сигнала, поскольку его характеристика симметрична относительно оси ординат (см. рис.4.26).

Двухсистемный корректор используется на гидрогенераторах, на которых кроме форсировки возбуждения необходимо производить и расфорсировку, что вызвано возможным повышением напряжения гидрогенератора при сбросе нагрузки. Более подробно со схемой компаундирования с двухсистемным корректором можно познакомиться в [5].

4.18. Фазовое компаундирование

Недостатком обычного компаундирования является невозможность поддержания напряжения на генераторе при разных значениях $\cos \varphi$. Это обстоятельство приводит к необходимости дополнительного регулирования возбуждения генератора в функции напряжения. На регулятор напряжения при этом возлагается функция коррекции характеристики компаундирования. При обычном компаундировании корректор должен быть рассчитан на большую выходную мощность. Увеличение мощности приводит к увеличению размеров элементов корректора и большим запаздываниям, особенно в магнитном усилителе.

Более совершенным является фазовое компаундирование, сущность которого заключается в том, что подпитка возбуждения генератора осуществляется не в функции полного тока генератора, а в основном в функции реактивной составляющей тока, т.е. подпитка дополнительно зависит от фазы тока. Результатом этого является меньшая зависимость характеристики компаундирования от $\cos \varphi$, и следовательно, функции корректора напряжения еще больше ограничиваются. В этом случае становится возможным уменьшить габаритные размеры элементов корректора и, что особенно важно, уменьшить

запаздывание в элементах. При этом, естественно, повышается быстродействие регулирования.

Принцип действия фазового компаундирования поясняется на рис. 4.32, где представлены упрощенная схема компаундирования (рис. 4.32, а) и векторная диаграмма напряжения и тока для разных значений $\cos \varphi$ (рис. 4.32, б, в).

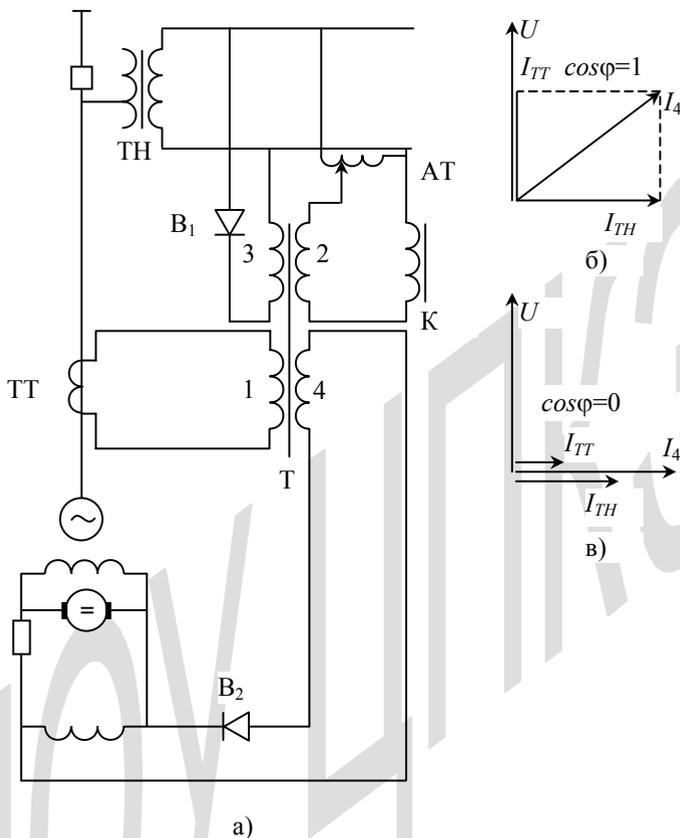


Рис.4.32. Схема фазового компаундирования

Основным элементом фазового компаундирования является промежуточный трансформатор с подмагничиванием Т. Этот трансформатор имеет три первичные обмотки. Обмотка 1 подключается к трансформатору тока генератора. В обмотку 2 подается питание от трансформатора напряжения. Последовательно с этой обмоткой включена реактивная катушка (К) со стальным сердечником, обладающая большим индуктивным сопротивлени-

ем, благодаря чему ток в этой обмотке отстает от приложенного напряжения примерно на 90° . С помощью автотрансформатора АТ осуществляется регулировка тока во второй обмотке. Третья обмотка является подмагничивающей. Она подключена через выпрямитель к трансформатору напряжения ТН.

Трансформатор имеет одну вторичную обмотку 4, ток которой идет на подмагничивание возбuditеля. Ток этой обмотки пропорционален геометрической сумме токов первичных обмоток 1 и 2: $\dot{I}_4 = k_1 \dot{I}_1 + k_2 \dot{I}_2$, или $\dot{I}_4 = k_1 \dot{I}_{ТТ} + k_2 \dot{I}_{ТН}$.

Рассмотрим два режима работы генератора – режим активной и режим реактивной нагрузки. Если генератор имеет чисто активную нагрузку, то ток $\dot{I}_{ТТ}$ обмотки 1 трансформатора сдвинут относительно тока $\dot{I}_{ТН}$ обмотки 2 на угол 90° . При этом ток вторичной обмотки 4 определится вектором \dot{I}_4 (рис. 4.32, б). При чисто реактивной нагрузке генератора вектор $\dot{I}_{ТТ}$ будет совпадать по фазе с вектором тока $\dot{I}_{ТН}$. В этом случае ток вторичной обмотки определится вектором \dot{I}_4 (рис.4.32, в). Нетрудно видеть, что при чисто реактивной нагрузке вектор тока \dot{I}_4 больше этого вектора в активном режиме генератора.

Подпитка возбуждения генератора определяется величиной тока \dot{I}_4 . Отсюда следует, что реактивная составляющая тока генератора создает большую подпитку возбуждения, чем активная составляющая, т.е. подпитка зависит от фазы тока генератора.

Наличие подмагничивающей обмотки 3 обеспечивает зависимость тока возбуждения от напряжения генератора. Так, при понижении напряжения генератора подмагничивание уменьшается, благодаря чему коэффициент трансформации Т по току становится большим, и подпитка возбуждения резко увеличивается.

На рис. 4.33 приведена структурная схема фазового компаундирования с корректором напряжения.

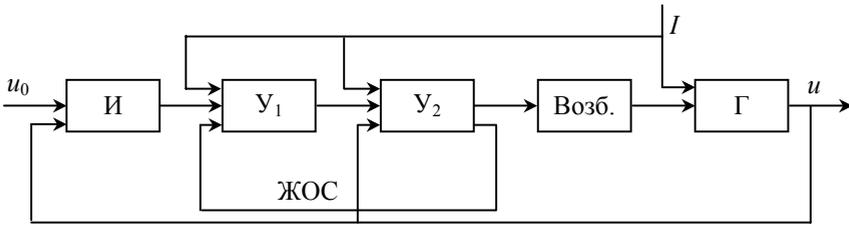


Рис.4.33. Структурная схема фазового компаундирования

Основной контур регулирования напряжения включает генератор и корректор напряжения. В свою очередь корректор напряжения состоит из измерительного элемента и двух усилителей U_1 и U_2 . Принципиально возбудитель следует рассматривать, как исполнительный элемент регулятора (корректора). Для увеличения коэффициента усиления усилители охвачены жесткой обратной связью.

Контур компаундирования представляет собой контур коррекции САР по нагрузке. Для этой цели сигнал по току подается на вход второго усилителя. Этот усилитель дополнительно реагирует на фазу тока, для чего в него подается напряжение генератора, относительно которого и выявляется фаза тока. Таким образом, коррекция динамических свойств САР осуществляется в функции реактивной составляющей тока генератора, что является достоинством схемы.

Попутно напомним, что коррекция по нагрузке эффективна в том случае, когда сигнал по току в системах САР подается как можно ближе к точке приложения самого возмущения. В схеме обычного компаундирования корректирующий сигнал по току вводится на вход возбудителя. Поскольку возбудитель имеет запаздывание, то правильнее было бы делать коррекцию по току и его производной. В случае фазового компаундирования корректирующий сигнал подается через два элемента САР относительно точки приложения самого возмущения. Здесь необходимо было бы, если считать возбудитель и усилитель U_2 инерционными элементами первого порядка, коррекцию вводить по току и двум производным. Выявление производных сигнала представляет определенные трудности, и в данной схеме они не используются. Таким образом, усилитель U_2 , с одной стороны, выявляет фазу тока и тем самым улучшает характеристику компаундирования. С другой стороны, он привносит запаздывание, вследствие чего эффективность коррекции динамических свойств САР по возмущению снижается.

Сигнал по току подается и на вход усилителя $У_1$. Это сделано для компенсации статической ошибки регулятора (схема токовой компенсации или стабилизации). Поскольку речь идет о корректировке характеристики регулятора в статике, то запаздывание элементов регулятора не играет роли, и сигнал можно подавать через любое число элементов. В рассмотренных ранее схемах такой сигнал подавался на вход измерительного элемента.

4.19. Автоматический регулятор напряжения генератора с высокочастотным возбуждением

Принципиальная схема высокочастотного возбуждения приведена на рис. 4.3. Источником тока в схеме является вспомогательный генератор повышенной частоты, расположенный на одном валу с главным генератором. Выпрямление тока осуществляется полупроводниковыми выпрямителями.

На рис. 4.34 приведена структурная схема регулятора напряжения синхронного генератора, имеющего высокочастотную систему возбуждения. Схема регулятора проста и состоит из контура регулирования по напряжению и контура компенсации статической ошибки по нагрузке (схема токовой компенсации и стабилизации).

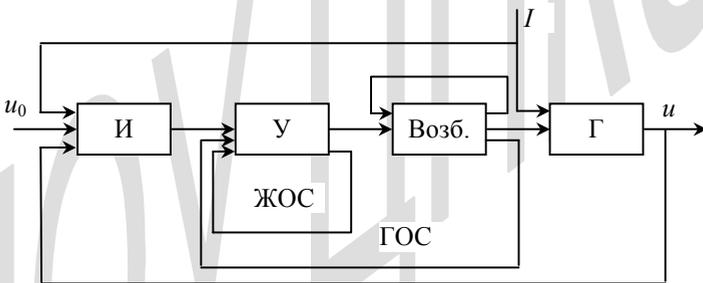


Рис.4.34. Структурная схема регулятора напряжения генератора с высокочастотной системой возбуждения

Усилитель регулятора охватывается жесткой обратной связью. Для стабилизации процесса регулирования в динамике применяется гибкая обратная связь с выхода исполнительного элемента (возбудителя) на вход усилителя. Сам регулятор напряжения, включающий измерительный и усилительный элементы, имеет много общего с регулятором напряжения системы

компаундирования. Элементы регулятора комплектуются заводом-изготовителем на одной панели типа ЭПА–325Б.

Обратим внимание на то, что регулятор напряжения не содержит канала компаундирования. Сигнал по току подается только на вход регулятора, что сделано для изменения статизма регулирования.

Магнитные усилители регулятора собраны по двухтактной схеме. Каждый из однотактных усилителей работает на отдельную обмотку возбуждения высокочастотного возбудителя. Ток в одной обмотке создает подмагничивающее действие. Другая обмотка размагничивает возбудитель. В возбудителе имеется третья обмотка возбуждения, которая включена через выпрямитель последовательно в цепь ротора генератора. Эта обмотка создает основное намагничивание возбудителя.

4.20. Тиристорная система возбуждения генератора

В 4.3 были рассмотрены два принципа исполнения тиристорной системы возбуждения: с независимым источником питания и по схеме самовозбуждения. Ниже будет рассмотрен более подробно режим работы системы возбуждения на примере системы с независимым источником питания. Схема возбуждения показана на рис. 4.35.

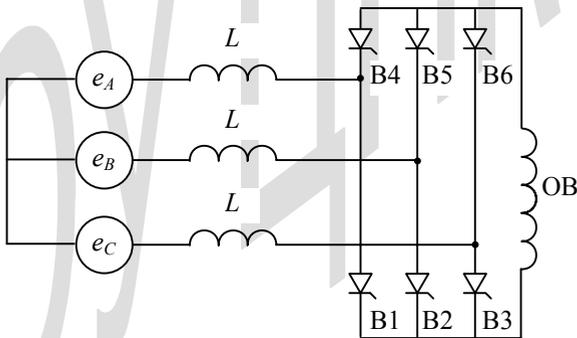


Рис.4.35. Схема тиристорного возбуждения

Имеем

$$e_A = E \sin \omega t; \quad e_B = E \sin(\omega t - 2\pi/3); \quad e_C = E \sin(\omega t + 2\pi/3)$$

– симметричную трехфазную систему э.д.с. вспомогательного синхронного генератора (ВСГ), включенную через индуктивность источника питания на тиристоры, ОВ – обмотка возбуждения синхронного генератора. Поскольку индуктивное сопротивление обмотки возбуждения значительно больше ее активного сопротивления, то выпрямленный ток I_g можно считать идеально сглаженным.

Рассмотрим процесс коммутации тока между тиристорами 1–6. Прежде всего рассмотрим коммутацию тока при отсутствии управления. В этом случае пропускать ток будет тот вентиль, напряжение которого выше. На рис. 4.36 показана диаграмма э.д.с. e_A , e_B и e_C , приложенных через индуктивность L к вентилям В1, В2 и В3 (рис. 4.35).

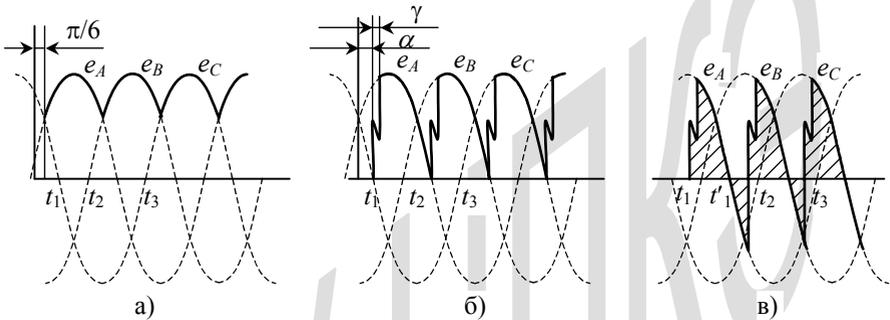


Рис.4.36 Диаграмма работы управляемых вентиляв

При $\omega t = \pi/6$ в момент t_1 начинает работать вентиль В1, так как напряжение на нем больше напряжений вентиляв 2 и 3. Из группы вентиляв В4, В5 и В6 в этот момент работает вентиль В5. Принцип коммутации вентиляв верхней и нижней групп аналогичен, поэтому в дальнейшем рассмотрим этот процесс только для одной группы, например для вентиляв В1, В2 и В3. В момент времени t_2 произойдет коммутация тока с вентиля В1 на вентиль В2. В момент времени t_3 начнет работать вентиль В3, после чего цикл повторится. Заметим, что каждый вентиль работает в пределах угла 120° , что естественно для симметричной трехфазной системы.

При наличии управления начало работы тиристоров можно задержать. Это показано на рис. 4.36, б. Здесь первый тиристор начинает работать при угле $\omega t = \pi/6 + \alpha$ (α – угол управления). Принимая, что угол управления α одинаков для всех фаз, получим равную задержку начала работы тиристоров.

На рис. 4.36, б отмечена еще одна существенная деталь процесса коммутации. Переход тока с одного вентиля на другой происходит не мгновенно, а с задержкой во времени. На протяжении некоторого времени работают два вентиля: один заканчивает работу, другой начинает. Так, для вентиля В1, начавшего работать при угле $\omega t = \pi/6 + \alpha$, полный переход тока с предыдущего вентиля закончится, когда угол достигнет значения $\omega t = \pi/6 + \alpha + \gamma$ (γ – угол коммутации). Величина этого угла зависит от индуктивности цепи коммутации и тока нагрузки.

При угле $\alpha = 0$ по обмотке ОВ протекает максимально возможный ток возбуждения. Действительно, в этом случае каждая фаза включается в работу, когда ее э.д.с. превышает э.д.с. других фаз. Когда угол не равен нулю $\alpha \neq 0$, ток в обмотке возбуждения будет меньше, так как в конце периода работы вентиля э.д.с. питающей фазы меньше э.д.с. следующей фазы, готовой к работе, но задержанной вследствие управления.

На рис. 4.36, в показан график работы вентиля при угле $\alpha > 30^\circ$. В этом случае вентиль продолжает работать, когда э.д.с. питающей фазы становится отрицательной. На протяжении времени $t_1 - t'_1$ фаза создает подпитку в обмотку возбуждения, а затем с момента времени t'_1 до момента времени t_2 стремится уменьшить ток возбуждения. Среднее значение действия фазы определяется разностью площадей заштрихованных фигур. При дальнейшем увеличении угла α , начиная с угла $\alpha = 90^\circ$, отрицательное действие превалирует и происходит развозбуждение генератора.

Работа вентиля при отрицательной э.д.с. питающей фазы объясняется тем, что выпрямитель работает на индуктивную нагрузку. Обмотка возбуждения имеет большую индуктивность, вследствие чего в течение одного полупериода ток в ней остается почти неизменным. Таким образом, несмотря на отрицательное напряжение работающей фазы, ток продолжает протекать в прежнем направлении.

Путем регулировки угла α можно увеличить или уменьшить ток возбуждения генератора. На рис. 4.37 показаны внешние характеристики тиристорной системы возбуждения для различных углов α .

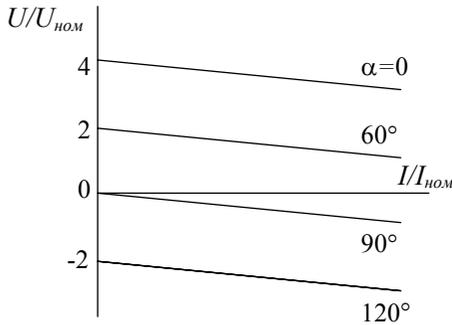


Рис.4.37. Характеристики тиристорной системы возбуждения

В нормальном режиме угол $\alpha = (70..80)^\circ$, при этом система обеспечивает номинальный ток возбуждения. В аварийных режимах, когда необходимо форсировать возбуждение генератора, угол α следует уменьшать до нуля. За счет этого обеспечивается максимальное напряжение на кольцах ротора и происходит рост тока возбуждения, вплоть до максимального допустимого тока обмотки. Если необходимо быстро погасить магнитное поле возбуждения, то следует установить угол $\alpha = (120...150)^\circ$, вследствие чего в работу включаются значительные отрицательные участки синусоид фазных э.д.с. Такой режим работы вентиля называется инверторным. В инверторном режиме ток возбуждения быстро уменьшается.

Рассмотрим вопрос о напряжении, которое прикладывается к тиристор. Это напряжение определяется разностью э.д.с. фазы источника питания (на рис. 4.36 изображены пунктиром) и напряжением обмотки возбуждения (выделено жирной линией). Если тиристор проводит ток, то падение напряжения на нем практически равно нулю. После начала работы следующего вентиля на предыдущем появляется так называемое обратное напряжение.

Весьма опасным режимом является обратная проводимость вентиля, при которой поврежденный вентиль проводит ток в обоих направлениях. Имеется ряд причин, приводящих к обратной проводимости. В первую очередь следует указать на величину обратного напряжения. Этот фактор учитывается при выборе типа вентилях: возможное обратное напряжение должно быть меньше допустимого.

Существенное влияние на процесс обратной проводимости оказывает характер изменения обратного напряжения. При резком скачкообразном из-

менении обратного напряжения вероятность обратной проводимости вентиля возрастает. С этих позиций режим работы с углом $\alpha=0$ наиболее благоприятен, так как обратное напряжение нарастает постепенно. При угле $\alpha \neq 0$ обратное напряжение нарастает скачком, причем при углах $\alpha \cong 60^\circ$ скачок имеет максимальное значение, поэтому при прочих равных условиях вероятность обратной проводимости наибольшая.

Рассмотренная схема называется схемой с одной группой вентиляей. Она применялась в начале внедрения тиристорного возбуждения на крупных гидрогенераторах. Эта схема имеет следующие недостатки:

неблагоприятные значения углов с точки зрения обратной проводимости $\alpha=(70\dots 80)$.

для гидрогенераторов, работающих через протяженные ЛЭП, необходимо осуществлять 3 – 4 – кратную форсировку возбуждения в аварийном режиме. Такая форсировка получается при полном открытии вентиляей, т.е. при угле $\alpha=0$. Исходя из этого, в нормальном режиме напряжение должно быть в 3 – 4 раза меньше форсировочного, что достигается при углах $\alpha=(70\dots 80)^\circ$;

большие пульсации выпрямленного напряжения относительно среднего значения при работе в нормальном режиме с углами $\alpha=(70\dots 80)^\circ$, что утяжеляет условия работы изоляции обмотки возбуждения;

большая мощность вспомогательного синхронного генератора, равная мощности возбуждения в нормальном режиме, умноженная на кратность форсировки;

низкий коэффициентом мощности возбудительной установки.

Из-за существенных недостатков этой схемы в настоящее время применяют более совершенную схему с двумя группами параллельно включенных вентиляей, в которой возбуждение нормального режима обеспечивает одна группа вентиляей, вторая группа является форсировочной. Вентили этих групп подключаются на разные напряжения. Для этого обмотка вспомогательного генератора имеет выводы на два напряжения: номинальное, которое подается на рабочие вентили, и повышенное, которое подается на форсировочную группу вентиляей.

Работу каждой группы вентиляей можно рассматривать независимо от другой группы. Это обусловлено тем, что в установившемся режиме генера-

тора форсировочная группа тиристоров загружена незначительно и на режим работы рабочей группы оказывает малое влияние. В режимах форсирования возбуждения, наоборот, можно пренебречь влиянием рабочей группы.

Схема возбуждения с двумя группами вентиляй с питанием от вспомогательного генератора показана на рис. 4.38. Для упрощения схемы выпрямительные группы представлены для одной фазы с выпрямителями ВР и ВФ.

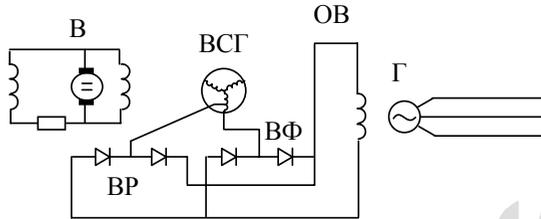


Рис.4.38. Схема тиристорного возбуждения с двумя группами вентиляй

Обычно принимаются следующие значения углов регулирования: для вентиляй рабочей группы $\alpha_{раб} = 40^\circ$, для форсировочной $\alpha_{ф} = 120^\circ$. В таком режиме ток возбуждения практически определяется рабочей группой вентиляй.

В режиме форсировки вентили ВФ могут быть открыты полностью с углом $\alpha_{ф} = 0^\circ$, при этом вентили рабочей группы оказываются запертыми действием э.д.с. форсировочных обмоток вспомогательного генератора.

Режим развозбуждения генератора, в том числе полное гашение поля генератора в аварийных ситуациях, также осуществляется только за счет форсировочной группы вентиляй, обеспечивающей значительную отрицательную величину напряжения возбуждения в инверторном режиме. Для предотвращения включения вентиляй рабочей группы в таком режиме в системе автоматического управления предусмотрено отключение управляющих импульсов этих вентиляй.

Схема с двумя группами вентиляй сложнее, но в то же время обладает существенными преимуществами, а именно: снижает скачки обратного напряжения и обеспечивает лучшее использование вспомогательного генератора. Так, в сравнении со схемой возбуждения с одной группой вентиляй скачки обратного напряжения снижаются в три раза. Поскольку режим форсировки является кратковременным, то форсировочная часть обмотки вспомогательного генератора может быть с малым сечением меди. При этом уменьшаются габариты вспомогательного генератора.

Для лучшего использования предельной способности вентилях по току разработаны более совершенные варианты возбуждения по шестифазной схеме с уравнительными реакторами. Детальное изучение этих схем выходит за пределы книги.

4.21. Регулятор возбуждения сильного действия

Структурная схема регулятора возбуждения сильного действия была показана на рис. 4.23. Далее будут рассмотрены несколько подробнее элементы регулятора и их реализации. Напомним, что в общем случае в закон регулирования возбуждения вводятся такие параметры, как отклонение напряжения от заданного значения, ток статора, отклонение частоты и их производные. Дополнительно вводится регулирование тока ротора с целью ограничения его максимального и минимального значений. В соответствии с этим в схеме регулятора должны быть измерительные элементы по напряжению, току статора и ротора, частоте. Как правило, измерительные элементы преобразуют измеряемый параметр в напряжение постоянного тока. В таком случае дифференцирование сигнала осуществляется посредством цепочки RC .

Исполнение элементов может быть осуществлено на основе аналоговой, так и цифровой вычислительной техники. Не обсуждая преимущества и недостатки способов реализации, рассмотрим традиционное исполнение элементов регулятора возбуждения.

Измерительный элемент по напряжению и току. На измерительный нелинейный мост, в плечи которого включены стабилитроны и резисторы, подается выпрямленное, отфильтрованное трехфазное напряжение генератора. Параметры элементов моста выбираются таким образом, чтобы при номинальном напряжении генератора выходное напряжение было равно нулю. При отклонении напряжения генератора на выходе моста появляется сигнал, пропорциональный этому отклонению.

Сигнал по току статора вводится на вход элемента по напряжению. Фазировки цепей тока и напряжения выбираются в соответствии со схемой рис. 4.14, при этом суммарное напряжение элемента зависит от реактивной составляющей тока $\Delta U = k_u U_2 + k_I I_p$. Посредством цепочки RC напряжение

ΔU дифференцируется. Сигналы по отклонению напряжения ΔU и его производной $\frac{du}{dt}$ подаются на суммирующий магнитный усилитель СУ.

Введение сигнала по току выполняется для изменения статизма регулирования. Производная $\frac{k_I dI_p}{dt}$ осуществляет коррекцию по возмущению. По каналу напряжения устанавливаются коэффициенты усиления [10].

$$k_{\Delta u} = 25 \text{ или } 50 \text{ ед.возб./ед.напр.};$$

$$k'_u = 0 \dots 7,5 \text{ ед.возб./ед.напр./с.}$$

Измерительный элемент по частоте. Измерительная схема выполняется на основе двух резонансных контуров, настроенных соответственно на частоту 45 Гц и 55 Гц. Токи этих контуров выпрямляются и подаются в управляющие обмотки магнитного усилителя, на выходе которого появляется напряжение, пропорциональное отклонению частоты от номинального значения. Этот сигнал, в свою очередь, подается на вход суммирующего магнитного усилителя регулятора. Сигнал по производной получается с помощью дифференцирующей цепочки RC. Коэффициенты усиления по этому каналу равны

$$k_{\Delta f} = 0 \dots 12 \text{ ед.возб./Гц};$$

$$k'_f = 0 \dots 5 \text{ ед.возб./Гц/с.}$$

В регуляторе применяется обратная связь (жесткая или гибкая) с обмотки возбуждения на вход суммирующего усилителя, а также имеется канал ограничения тока ротора. Для этой цели ток ротора измеряется с помощью трансформатора постоянного тока ТПТ, его измеренное значение подается на вход усилителя. При достижении верхнего или нижнего предела тока ротора подается соответствующий сигнал. Коэффициент усиления по каналу ограничения выбирается большим, благодаря чему ток ротора не выходит за установленные пределы.

Суммирующий двухкаскадный магнитный усилитель осуществляет суммирование и усиление сигналов, поступающих по входным каналам. Оба каскада выполняются по дифференциальной схеме. Вторые каскады уси-

лителя включаются на системы управления рабочей и форсировочной групп тиристоров.

Система управления тиристорами содержит два основных функциональных устройства: узел фазосмещения, изменяющий фазу управляющего напряжения по отношению к напряжению питания вентилей в зависимости от величины сигнала управления, и устройства формирования, позволяющего получить на выходе импульс необходимой формы и с определенными параметрами.

Регулирование уставки по напряжению выполняется с помощью дистанционного привода и может изменяться в пределах $\pm 10\%$. Обычно автоматические синхронизаторы не подгоняют напряжение генератора к напряжению сети, а разрешают включение при разности напряжений в 10% . В комплекте регулятора сильного действия предусматривается устройство подгонки напряжения генератора к напряжению сети. Это обусловлено тем, что при большом коэффициенте усиления по каналу напряжения в регуляторе сильного действия отклонение напряжения генератора в момент синхронизации в $2 - 3\%$ может дать либо полную форсировку, либо полное развозбуждение генератора. В этом случае восстановление нормальной параллельной работы генератора воздействием на привод уставки регулятора требует значительного времени ($1,5...2,0$ мин), что опасно для генератора. Устройство осуществляет подгонку напряжения генератора к напряжению сети с погрешностью порядка $0,5\%$.

4.22. Групповое управление возбуждением генераторов

Групповое управление возбуждением генераторов предназначается для одновременного регулирования напряжения несколькими генераторами станции с заданным распределением реактивной нагрузки между ними. Такое управление в первую очередь может быть использовано на электрических станциях с однотипными агрегатами, например на ГЭС. В этом случае суммарная реактивная нагрузка станции распределяется поровну между всеми генераторами. Принципиально нагрузка может распределяться в любой пропорции.

Возможны два варианта управления: с разомкнутой и замкнутой системами регулирования по току. Прежде всего рассмотрим разомкнутую сис-

тему управления. Ее структурная схема регулирования напряжения генератора показана на рис. 4.39.

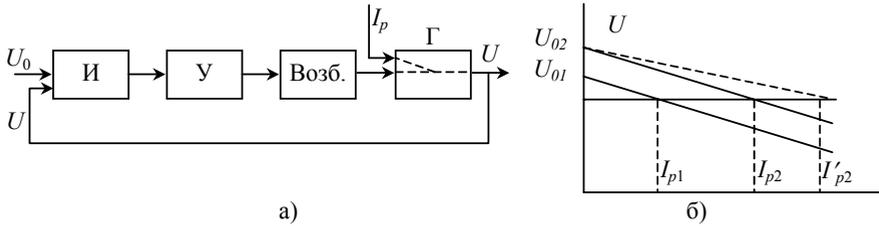


Рис. 4.39. Структурная схема (а) и характеристики (б) группового управления возбуждением генераторов по разомкнутой схеме

В отношении напряжения эта система замкнута – выходной сигнал по напряжению подается на вход измерительного элемента, вследствие чего генератор поддерживает заданное значение напряжения. Погрешность отработки задания зависит от коэффициента усиления разомкнутой системы k и определяется формулой

$$\varepsilon_* = \frac{U_0 - U}{U_0} = \frac{1}{1 + k}. \quad (4.75)$$

При высоких коэффициентах усиления современных регуляторов погрешность отработки заданного значения получается незначительной и фактически выполняется условие $U = U_0$.

Реактивная нагрузка генератора (или реактивный ток) непосредственно регулятором не контролируется. В то же время существует косвенная связь между напряжением генератора и его реактивной нагрузкой: $U = U_0 - sI_p$. Изменение уставки напряжения U_0 , а следовательно, и фактического значения напряжения генератора U , меняет реактивную нагрузку генератора при его параллельной работе в энергосистеме. Регулирование тока при этом осуществляется по разомкнутой схеме. На рис. 4.39, б показано изменение нагрузки генератора за счет изменения уставки регулятора напряжения.

Групповое регулирование возбуждения генераторов по разомкнутой схеме выполняется путем одновременного и согласованного изменения уста-

вок напряжения U_0 всех генераторов станции. Поскольку реактивная нагрузка связана с уставкой регулятора напряжения, то и нагрузка будет меняться одновременно на всех генераторах.

Недостатком этой схемы является невысокая точность выравнивания нагрузки между отдельными генераторами. Это связано с тем, что коэффициенты усиления $k_{I,u}$ и k не остаются постоянными. Любое изменение этих коэффициентов приводит к изменению статизма s , а это, в свою очередь, приводит к изменению реактивной нагрузки. Это положение поясняется на рис. 4.39, б. При неизменных коэффициентах усиления статизм остается постоянным, и характеристика смещается параллельно самой себе. Так, если изменить уставку напряжения с U_{01} до U_{02} , то нагрузка изменится с I_{p1} до I_{p2} . Нестабильность коэффициентов усиления, а следовательно, и статизма приводит к другой нагрузке I'_{p2} (характеристика показана пунктиром).

Схему регулирования реактивного тока можно сделать замкнутой (рис. 4.40).

Здесь фактическое значение реактивного тока генератора сравнивается с заданным значением I_{zd} . Сигнал по отклонению тока $\Delta I = I_p - I_{zd}$ подается на вход регулятора. Этот сигнал можно рассматривать как изменение уставки регулятора, которое осуществляется до тех пор, пока отклонение тока ΔI не будет стремиться к нулю.

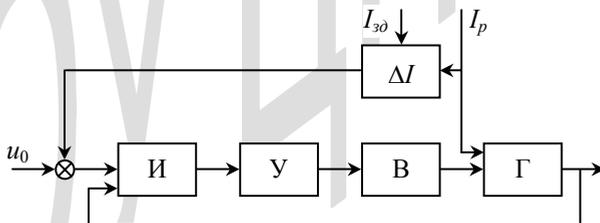


Рис. 4.40. Групповое регулирование по замкнутой схеме

Элементы выравнивания реактивной нагрузки генератора не входят в основной замкнутый контур регулирования напряжения, следовательно, не оказывают влияния на устойчивость регулирования.

Введение сигнала нагрузки I_p на вход регулятора напряжения приводит к изменению статизма регулирования. На схеме рис. 4.40 показано вве-

дение сигнала по отклонению тока ΔI . Как только генератор примет на себя заданное значение нагрузки, сигнал отклонения тока стремится к нулю $\Delta I \rightarrow 0$ и коррекция статизма исчезнет. Такие схемы называют схемами с проходящим (мнимым) статизмом.

Заданным значением тока I_{30} может служить среднее значение реактивного тока участвующих в групповом регулировании генераторов

$$I_{30} = \frac{\sum I_{p,i}}{n}. \quad (4.76)$$

На рис. 4.41 представлена схема группового регулирования возбуждения генераторов по первому варианту (разомкнутая схема) с одновременным изменением уставок регуляторов.

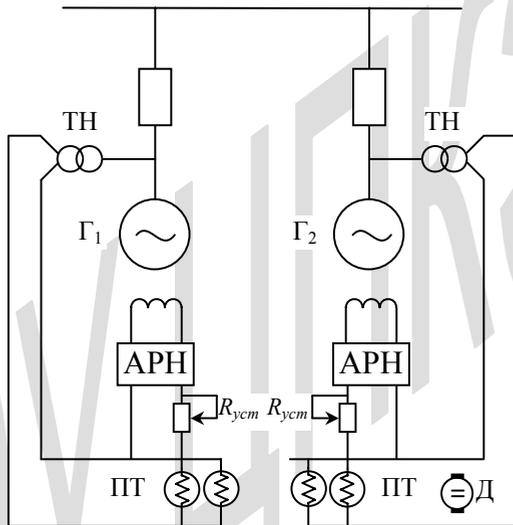


Рис.4.41. Схема группового регулирования возбуждения

В этой схеме дополнительное напряжение ΔU , подаваемое на вход регулятора, получается с помощью поворотных трансформаторов (ПТ). Первичные обмотки их питаются от трансформаторов напряжения ТН соответствующих генераторов. Напряжение вторичной обмотки ПТ суммируется с напряжением трансформатора (ТН) и подается на вход регулятора. Величина этого напряжения зависит от положения ротора относительно статора. Роторы всех поворотных трансформаторов механически связаны между собой, и их поло-

жение определяется углом поворота двигателя (Д). При повороте двигателя одновременно поворачиваются на один и тот же угол роторы всех ПТ, тем самым обеспечиваются одновременность и одинаковая степень изменения дополнительного напряжения ΔU , подаваемого на входы всех регуляторов. За счет этого выполняется одинаковое изменение уставок регуляторов. Ручная подстройка уставки производится с помощью установочного реостата $R_{уст}$.

При большом числе агрегатов выполнение механической связи между установочными устройствами представляет определенные трудности. В таких случаях применяется схема с вольтодобавочными трансформаторами. Принципиального различия в этих схемах нет, кроме того, что дополнительное напряжение ΔU создается с помощью вольтодобавочных трансформаторов, на первичные обмотки которых подается напряжение от центрального установочного трансформатора.

Точность распределения реактивной нагрузки в этих схемах зависит от характеристик регуляторов и возбудителей различных генераторов. Если бы характеристики всех регуляторов и возбудителей были идентичны, то при одинаковом изменении уставок всех регуляторов реактивную нагрузку генераторы изменяли бы в равной степени. В силу неидентичности характеристик элементов, входящих в схему регулирования (различные коэффициенты усиления, наличие зоны нечувствительности, неоднотипность генераторов и возбудителей, наличие нелинейной и нестабильной характеристик и т.д.), распределение реактивной нагрузки происходит с определенной погрешностью. При прочих равных условиях эта погрешность тем больше, чем меньше статизм регулирования. Однако при тщательной настройке элементов системы регулирования и статизме порядка 4 % удается получить удовлетворительное распределение реактивной нагрузки между отдельными генераторами с расхождением по мощности не более $\pm 5\%$, что вполне допустимо.

На электростанциях с большим числом агрегатов применение рассмотренного варианта регулирования напряжения генератора встречает определенные затруднения. При большом числе генераторов разброс характеристик становится столь значительным, что выполнить систему автоматического распределения реактивных нагрузок на основе этой схемы с небольшими погрешностями не представляется возможным. В случае многоагрегатных станций применяется замкнутая система регулирования. Схема с од-

новременным изменением уставок всех регуляторов от единого задатчика снабжается дополнительно следящей схемой выравнивания нагрузок.

Преимущество данного варианта заключается в том, что точность выравнивания реактивной нагрузки между генераторами не зависит от идентичности характеристик генераторов, возбудителей и других элементов следящей системы. Однако эта схема значительно сложнее предыдущих. Включение в ее состав инерционных магнитных усилителей и двигателя, являющегося интегрирующим элементом структурной схемы, уменьшает устойчивость процесса регулирования напряжения и распределения реактивной нагрузки.