

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов электроэнергетических специальностей высших учебных заведений.



МОСКВА • «ЭНЕРГИЯ» • 1977

6П2.11

А 22

УДК 621.311-52(075.8)

Александр Дмитриевич Дроздов
Александр Сергеевич Засыпкин
Алексей Анатольевич Аллилуев
Михаил Михайлович Савин

Автоматизация энергетических систем

Редактор *В. А. Семенов*

Редактор издательства *Э. К. Биленко*

Переплет художника *В. И. Карпова*

Технический редактор *О. Д. Кузнецова*

Корректор *В. С. Антипова*

ИБ № 1979

Сдано в набор 25/I 1977 г.

Подписано к печати 19/V 1977 г.

Т-08450

Формат 84×108¹/₃₂

Бумага типографская № 2

Усл. печ. л. 23,1

Уч.-изд. л. 24,34

Тираж 23 000 экз.

Зак. 28

Цена 1 руб.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Автоматизация энергетических систем. Учеб. по-
А 22 **сobie для студентов электроэнергетических специ-**
альностей вузов. М., «Энергия», 1977.

440 с. с ил.

На обороте тит. листа авторы: А. Д. Дроздов, А. С. Засыпкин, А. А. Аллилуев, М. М. Савин.

В книге рассмотрены принципы выполнения и схемы автоматических устройств, предназначенных для регулирования режима энергетической системы по напряжению, частоте, активной и реактивной мощности и для управления оперативными переключениями.

Книга предназначена для студентов вузов электроэнергетических специальностей.

А 30311-340
051(01)-77 43-77

6П2.11

© Издательство «Энергия», 1977

ПРЕДИСЛОВИЕ

XXV съезд КПСС наметил основные направления развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 гг. Среди них важное место занимает повышение эффективности производства, ускорение научно-технического прогресса, рост производительности труда, ускорение темпов механизации и автоматизации производственных процессов. В частности, намечается увеличить в 1,6—1,7 раза выпуск приборов и средств автоматизации. Большие задачи поставлены XXV съездом КПСС перед энергетиками. К концу десятой пятилетки в 1980 г. намечается выработать 1340—1380 млрд. кВт·ч электроэнергии, при этом особое значение придается автоматизации ее производства и распределения.

Настоящая книга посвящена вопросам автоматизации энергосистем, которые осуществляют производство, передачу, распределение, преобразование и потребление электрической и тепловой энергии. Поэтому наряду с автоматизацией электрической части энергосистемы определенное внимание уделено автоматике тепловой части электростанций.

Энергосистема как объект автоматизации имеет следующие основные особенности:

- одновременность производства и потребления электроэнергии;

- взаимосвязанность элементов энергосистемы, расположенных на огромной территории;

- быстрота изменения процессов в нормальных и аварийных режимах и сложность происходящих явлений.

Целевой функцией управления энергосистемой является снабжение народного хозяйства и населения электрической и тепловой энергией заданного качества с установленным уровнем надежности при минимальных затратах.

Автоматизация энергосистемы все в большей степени строится на кибернетических принципах с выработкой

законов оптимального управления в центрах, получающих информацию о работе основных элементов. Внедрение центральных управляющих машин и пунктов в Единую энергетическую систему СССР, образующих высший уровень управления, будет идти по пути координации их работы с действием многочисленных автоматических устройств, установленных на станциях и подстанциях.

Автоматизация энергосистем разделяется на следующие основные области:

- релейная защита электрооборудования от коротких замыканий и ненормальных режимов, рассматриваемая в отдельном курсе;

- телемеханика, обеспечивающая передачу информации на большие расстояния, выделившаяся в отдельную отрасль науки;

- автоматическое регулирование режима по частоте, напряжению, активной и реактивной мощности;

- автоматика тепломеханического оборудования ТЭС и гидромеханического ГЭС (технологическая автоматика);

- автоматическое управление оперативными переключениями;

- противоаварийная режимная автоматика, предотвращающая развитие аварии при возникновении отдельных нарушений режима.

Настоящее учебное пособие посвящено рассмотрению последних четырех областей автоматизации, которые изучаются в соответствующем курсе специальностей вузов: 0650 — Автоматизация производства и распределения электроэнергии; 0301 — Электрические станции; 0302 — Электрические системы и сети; 0303 — Электрообеспечение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства; 0304 — Кибернетика электрических систем.

Теоретической основой разд. I является теория автоматического регулирования, элементы которой изложены в приложении 1. Анализ и наглядное описание работы релейных устройств, применяемых для автоматического управления оперативными переключениями и противоаварийной автоматики (разд. II), можно выполнять, используя теорию релейных устройств, начальные сведения о которой даны в приложении 2. Авторы рекомендуют до изучения основного содержания книги ознако-

миться с материалом соответствующего приложения. Такой порядок обычно существует при обучении студентов.

У читателя книги предполагается знание основ следующих дисциплин: «Электрические машины», «Электрическая часть станций и подстанций», «Электромагнитные переходные процессы» и «Электромеханические переходные процессы».

Главы 1, 8 и заключение написаны А. С. Засыпкиным, гл. 2 и 3 — совместно В. М. Покровским и А. С. Засыпкиным, гл. 4—7 — А. А. Аллилуевым, приложение 1 — М. М. Савиным, приложение 2 — В. А. Плаксиным. Научная обработка материала и общая редакция книги выполнены А. Д. Дроздовым и А. С. Засыпкиным.

Авторы с благодарностью отмечают большую работу по рецензированию и ценные советы сотрудников кафедры автоматизации и релейной защиты энергосистем МЭИ профессора А. М. Федосеева, ст. преп. Н. С. Лебедевой, доцентов Н. И. Овчаренко, Е. Л. Сиротинского, В. Е. Казанского, В. Л. Козиса, профессора КПИ Е. П. Гизила и доцента НПИ Е. П. Миронова и выражают глубокую признательность к т. н. В. А. Семенову, взявшему на себя труд по редактированию рукописи.

Все замечания и пожелания по книге авторы примут с признательностью и просят их направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, изд-во «Энергия».

Авторы

Раздел I

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рабочий режим электроэнергетической системы характеризуется двумя основными величинами — частотой f и напряжениями в ее узлах U_i . Отклонения этих величин являются основными показателями качества электроэнергии.

Частота в энергосистеме является показателем соответствия (баланса) между суммарной мощностью первичных двигателей (турбин) и суммарной активной мощностью нагрузок, включая потери мощности в элементах энергосистемы. Нарушение этого баланса может происходить вследствие изменения нагрузки энергосистемы или суммарной мощности турбин. Оно вызывает изменение частоты в энергосистеме, которое продолжается до тех пор, пока не установится баланс мощностей, соответствующий новому значению частоты. Причиной восстановления баланса (саморегулирования) является регулирующий эффект нагрузки, т. е. зависимость активной мощности нагрузки от частоты.

Для восстановления требуемого (номинального) значения частоты необходимо вручную или автоматически подействовать на изменение суммарной мощности первичных двигателей или суммарной активной мощности нагрузки. Обычно в рабочих режимах воздействуют на мощность турбин путем изменения выпуска энергоносителя (пара, воды).

Напряжения в узлах системы U_i в основном определяются значениями э. д. с. синхронных машин, реактивными мощностями нагрузок и, следовательно, перетоками реактивных мощностей при данной конфигурации сети. Во всех точках сети обеспечивается баланс вырабатываемой и потребляемой реактивных мощностей. Внезапное нарушение этого баланса при увеличении

вырабатываемой реактивной мощности приводит к мгновенному повышению напряжения в рассматриваемой точке, а при увеличении потребляемой — к снижению напряжения и балансу на новом уровне. Когда напряжение станет ниже определенного значения (около 60—70% нормального), нарушается устойчивая работа потребителей (в основном асинхронных двигателей). Для восстановления требуемого уровня напряжений в основных узлах электрической сети обычно в нормальных режимах воздействуют вручную или автоматически на изменение тока возбуждения синхронных генераторов, компенсаторов и синхронных двигателей, на изменение мощности специальных реактивных нагрузок (батарей конденсаторов, управляемых реакторов и др.), коэффициентов трансформации силовых трансформаторов.

Баланс активных мощностей в энергосистеме при заданной частоте может существовать при различных вариантах распределения нагрузок между генераторами, но только один из них является экономически наиболее выгодным. С изменением суммарной активной нагрузки меняется и наиболее выгодное распределение мощностей между генераторами.

Суммарные затраты энергосистемы на выработку электроэнергии зависят не только от распределения активных мощностей, но также и от уровней напряжений и перетоков реактивных мощностей, так как потери активной мощности в каждом последовательном элементе сети пропорциональны квадрату полного тока, а в параллельном — возрастают с увеличением напряжения.

В аварийных режимах при возникновении к. з., при аварийных отключениях элементов сети резко нарушается баланс активных и реактивных мощностей в энергосистеме, что может привести к нарушению устойчивости параллельной работы электростанций и лавине напряжения в узлах энергосистемы.

Предотвратить развитие аварии тем легче, чем быстрее будут приняты меры по ликвидации нарушения нормального режима и восстановлению баланса активных и реактивных мощностей.

Основными функциями устройств автоматического регулирования режима энергосистемы являются следующие:

поддержание на заданном уровне как в нормальном, так и в послеаварийном режиме частоты в энергосисте-

ме и напряжений в узловых точках, что способствует повышению качества электроэнергии;

экономически наивыгоднейшее распределение активных и реактивных нагрузок между включенными агрегатами и поддержание оптимального состава работающих агрегатов;

повышение надежности работы энергосистемы и электроснабжения потребителей путем предотвращения нарушений нормального режима и ускорения ликвидации возникающих аварийных ситуаций.

В настоящее время большая часть электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС). Автоматическое регулирование режима энергосистемы по частоте и активной мощности невозможно без автоматизации регулирования тепловых процессов на ТЭС. Основные функции устройств автоматического регулирования тепловых процессов:

поддержание на заданном уровне основных показателей качества тепловой энергии (давление и температура энергоносителя);

экономически наивыгоднейшее распределение тепловой нагрузки между параллельно работающими парогенераторами (на ТЭЦ с общим паропроводом);

повышение надежности работы оборудования в аварийных ситуациях.

Глава первая

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

1-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ (АРВ) СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Основные функции АРВ

Автоматические регуляторы возбуждения относятся к устройствам автоматического регулирования режима энергосистемы по напряжению и реактивной мощности. При изменении возбуждения генератора меняется его

э. д. с., что приводит к изменению напряжения генератора, работающего на изолированную нагрузку. Если генераторы включены на общие шины, изменение возбуждения одного из них приводит к перераспределению реактивных нагрузок между работающими генераторами. Совместное действие индивидуальных АРВ генераторов электростанции, работающей в энергосистеме, определяет напряжение на шинах и значение выдаваемой реактивной мощности. Поэтому вопросы автоматического регулирования возбуждения неразрывно связаны с вопросами регулирования напряжения и реактивной мощности.

Основными функциями АРВ являются:

поддержание заданного значения напряжения на выводах генератора или на шинах высшего напряжения. Используемые только для этой цели устройства АРВ называют иногда автоматическими регуляторами напряжения — АРН;

наивыгоднейшее распределение реактивных нагрузок между параллельно работающими генераторами и электростанциями в целях минимизации потерь электроэнергии с учетом необходимости поддержания требуемых уровней напряжения в узловых точках энергосистемы;

кратковременное увеличение тока возбуждения синхронных машин до максимального допустимого (потолочного) значения при значительных снижениях напряжения — форсировка возбуждения для повышения устойчивости параллельной работы и ускорения восстановления напряжения в сети после отключения коротких замыканий (к. з.).

✓ Основные типы систем возбуждения и способы регулирования возбуждения

Под термином «система возбуждения» понимается комплекс устройств, предназначенных для обеспечения возбуждения синхронной машины в нормальных и аварийных режимах. Основным элементом системы возбуждения является возбудитель — источник питания постоянным током обмотки возбуждения синхронной машины. Поэтому системы возбуждения классифицируются по виду применяемого возбудителя. Наиболее распространенными системами возбуждения синхронных машин в настоящее время являются: электромашинная,

полупроводниковая высокочастотная, ионная, тиристорная и бесщеточная.

Электромашинная система с вращающимся возбудителем постоянного тока, соединенным непосредственно с валом генератора или с отдельно стоящим двигателем, применяется для возбуждения турбогенераторов до 100 МВт, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов до 75 МВ·А; возбудитель, соединенный с валом генера-

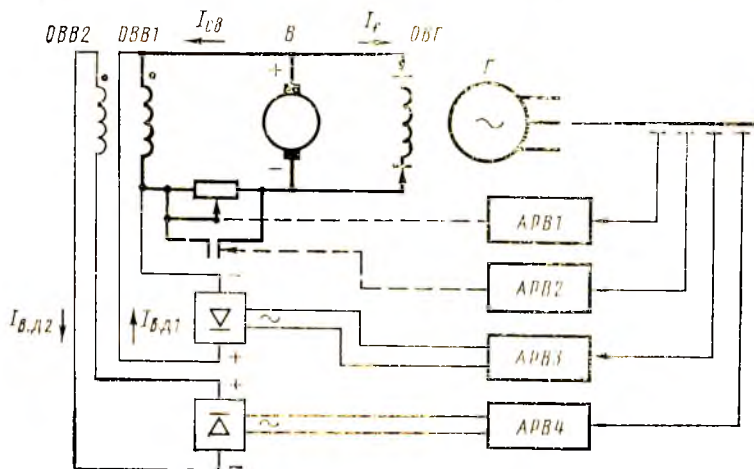


Рис. 1-1. Способы регулирования в системе электромашинного возбуждения.

тора через редуктор, применяется для возбуждения турбогенераторов до 300 МВт, а возбудитель с подвозбудителем на валу генератора — для гидрогенераторов до 180 МВ·А.

Регулирование возбуждения в электромашинной системе осуществляется следующими способами (рис. 1-1): изменением сопротивления в цепи основной обмотки возбудителя непрерывно (РВ1) или дискретно (РВ2). Непрерывное регулирование этим способом производится угольными и реостатными регуляторами машин малой мощности. Ручное регулирование с помощью реостата используется при настройке и проверке схем возбуждения. Дискретное регулирование широко применяется для обеспечения быстрой форсировки возбуждения генераторов в аварийных условиях и для развозбуждения гидрогенераторов. Регуляторы же

напряжения с дискретным регулированием, например вибрационно-импульсные [5], на современных электростанциях не применяются;

дополнительным возбуждением возбудителя по основной (АРВ3), дополнительной (АРВ4) или одновременно по нескольким обмоткам.

Подпитка постоянным (выпрямленным) током $I_{в.д}$ изменяется автоматическим регулятором, не имеющим

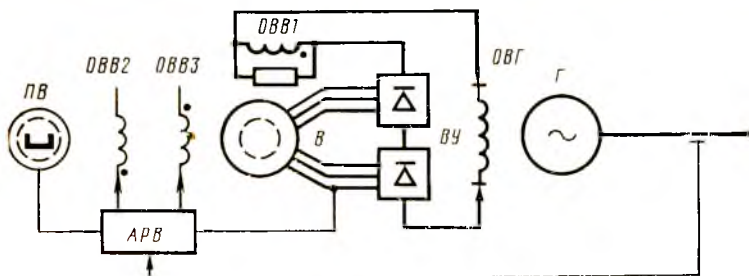


Рис. 1-2. Принципиальная схема полупроводниковой высокочастотной системы возбуждения.

механических подвижных элементов. В качестве регулирующих элементов в регуляторах используются дроссельные и трансформаторные магнитные усилители и в последнее время начинают применяться полупроводниковые управляемые вентили (тиристоры).

Включение регулятора на основную обмотку возбуждения ОВВ1 может быть только согласованным, т. е. таким, что направления токов самовозбуждения $I_{св}$ и дополнительного $I_{в.д1}$ совпадают. Включение на дополнительную обмотку возбуждения ОВВ2 может быть как согласованным, так и встречным (противовключение). При равных числах витков обмоток ОВВ1 и ОВВ2 на рис. 1-1 результирующий ток возбуждения возбудителя

$$I_{в.в} = I_{св} + I_{в.д1} - I_{в.д2}.$$

Регулирование как $I_{в.д1}$, так и $I_{в.д2}$ приводит к изменению тока возбуждения возбудителя $I_{в.в}$, а следовательно, к регулированию тока возбуждения генератора I_f . Присоединение АРВ к первичной цепи на рис. 1-1 показано условно.

Полупроводниковая высокочастотная система возбуждения является основной для турбогенераторов типа ТВВ мощностью 150—500 МВт (рис. 1-2).

Возбуждение турбогенератора осуществляется через силовую полупроводниковую выпрямительную установку ВУ от генератора В повышенной частоты (500 Гц) индукторного типа. Его рабочие обмотки переменного тока и обмотки возбуждения *ОВВ1*, *ОВВ2*, *ОВВ3* постоянного тока расположены в пазах статора. Ротор генератора В непосредственно связан с валом турбогенератора, выполнен в виде десятизубцового сердечника и обмотки не имеет. При наличии возбуждения ротор, имеющий частоту вращения 3000 об/мин, создает пульсацию магнитного потока с частотой 500 Гц. Высокочастотный подвозбудитель ПВ (400 Гц), возбуждаемый постоянными магнитами, служит источником питания автоматического регулятора возбуждения АРВ. Вал ПВ соединен с валом возбудителя В. Возможен и применяется вариант высокочастотной системы без подвозбудителя.

Обмотка возбуждения *ОВВ1* включена по схеме последовательного самовозбуждения. Благодаря такому включению обмотки возбуждения бросок свободной составляющей тока ротора генератора, возникающий при коротких замыканиях, увеличивает ток возбуждения, способствуя повышению устойчивости параллельной работы и ускорению восстановления напряжения после отключения к. з.

Регулирование возбуждения генератора Г осуществляется автоматически изменением подведенного к неуправляемым выпрямителям переменного напряжения индукторного генератора посредством изменения тока в его обмотках независимого возбуждения *ОВВ2* и *ОВВ3*, т. е. тем же способом, как в предыдущем случае *АРВ3* и *АРВ4*.

Ионная и тиристорная системы возбуждения применяются для турбогенераторов типа ТВВ мощностью 200—300 МВт, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов большой мощности.

Один из вариантов ионного возбудителя, применяемый на ряде мощных гидро- и турбогенераторов, показан на рис. 1-3. Возбудитель выполнен с двумя группами вентиляей. Одна группа — рабочая ВР — в схеме самовозбуждения питается от отпаек выпрямительного транс-

форматора *ВТ* (рис. 1-3), в схеме независимого возбуждения—от отпаек вспомогательного генератора переменного тока. Рабочая группа обеспечивает в номинальном режиме приблизительно 70% тока возбуждения. Вторая группа — форсировочная *ВФ* — питается от полного напряжения. В номинальном режиме *ВФ* обеспечивает приблизительно 30% тока возбуждения. В режиме форсировки (при полном открытии вентилей) она обеспечивает кратковременное увеличение напряжения ро-

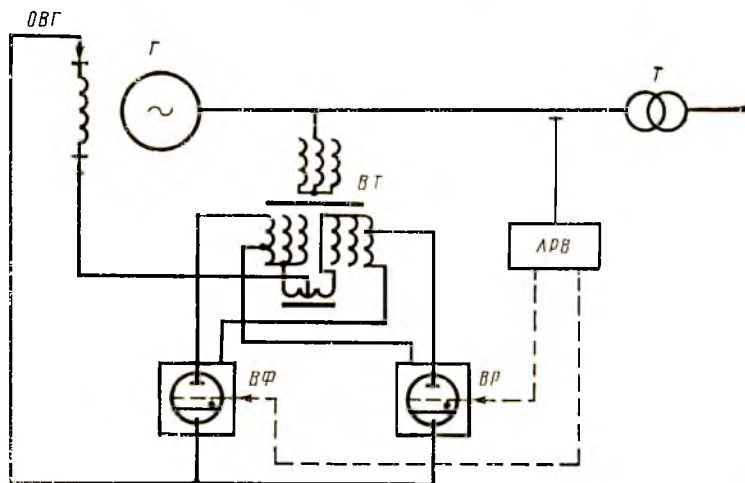


Рис. 1-3. Принципиальная схема ионного возбудителя с двумя группами вентилей.

тора гидрогенератора до 4, а турбогенератора до 2—2,5-кратного номинальному напряжению ротора. Наибольший ток ротора с помощью АДВ ограничивается на уровне $2I_{\text{ном}}$.

При питании системы возбуждения от выпрямительного трансформатора (схема самовозбуждения) в цепь питания форсировочной группы может включаться вторичная обмотка последовательного трансформатора *ВДТ* (на рис. 1-3 *ВДТ* не показан), первичная обмотка которого включена в нулевые выводы цепи статора генератора. Этот трансформатор обеспечивает форсирование возбуждения при близких к з., когда напряжение на зажимах генератора уменьшается, а ток статора возрастает.

Регулирование возбуждения осуществляется изменением постоянной составляющей напряжения на обмотке ротора путем автоматического изменения моментов отпирания управляемых клапанов, входящих в схему управляемого выпрямителя.

Управляемые кремниевые клапаны — тиристоры начинают широко применяться для возбуждения генераторов, синхронных компенсаторов и двигателей. Схемы тиристорного возбуждения аналогичны схемам полного возбуждения, но более экономичны, просты и надежны

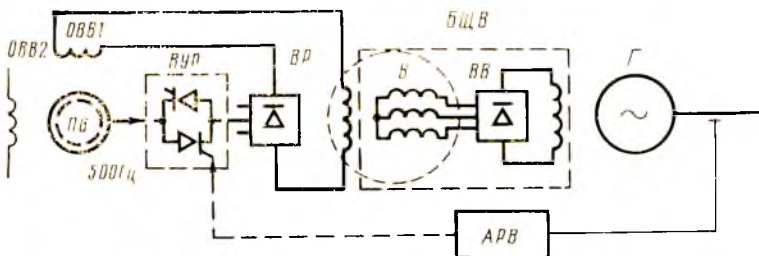


Рис. 1-4. Принципиальная схема бесщеточного возбуждения.

в эксплуатации. Поэтому ставится вопрос о полной замене в ближайшие годы ртутных преобразователей на тиристорные для генераторов переменного тока практически любой мощности.

Бесщеточная система возбуждения является основной для турбогенераторов типа ТВВ большой мощности (рис. 1-4).

Возбуждение турбогенератора Г осуществляется через вращающийся вместе с ротором полупроводниковый неуправляемый выпрямитель ВВ от трехфазного генератора В. Обмотка возбуждения этого генератора расположена на статоре. Обмотки переменного тока, расположенные на роторе, образуют с вращающимся выпрямителем бесщеточный возбудитель БЩВ.

Регулирование бесщеточного возбудителя осуществляется изменением переменного напряжения, подведенного к неуправляемым выпрямителям рабочей ВР и форсировочной ВФ групп от индукторного генератора ПВ (частотой 500 Гц) через соответствующие устройства с управляемыми клапанами (тиристорами) ВУР и ВУФ. Управление этими устройствами осуществляется автоматически изменением моментов отпирания клапанов

лей. На рис. 1-4 не показаны ВФ, ВУФ и система регулирования ПВ, аналогичная рис. 1-2.

Характеристики систем возбуждения. При больших возмущениях (вызывающих снижение напряжения прямой последовательности на входе АРВ более чем на 5—7,5% уставки АРВ) системы возбуждения характеризуются указанными ниже показателями.

1. *Предельное напряжение возбуждителя*, подключенного к обмотке ротора генератора (потолок возбуждения по напряжению), — относительное значение наибольшего (потолочного) напряжения возбуждителя в переходном режиме при форсировке возбуждения:

$$U_{jп*} = U_{jп} / U_{jном},$$

где $U_{jном}$ — номинальное напряжение возбуждения (при номинальной нагрузке генератора и горячем роторе).

Предельное установившееся напряжение возбуждителя $U_{jп.у*}$ называют *кратностью форсировки*.

Предельный ток возбуждения — наибольшее относительное значение тока возбуждения, создаваемого системой возбуждения, в установившемся режиме после прекращения нарастания тока:

$$I_{jп*} = I_{jп} / I_{jном},$$

где $I_{jном}$ — номинальный ток возбуждения (при номинальной нагрузке генератора).

По действующим в СССР нормам значения $U_{jп.у*}$ и $I_{jп*}$ должны быть, как правило, не менее 2 независимо от типа системы возбуждения гидрогенераторов, турбогенераторов и синхронных компенсаторов.

При электромашинной системе возбуждения обычно $U_{jп*} = U_{jп.у*} = I_{jп*}$. При быстродействующих системах возбуждения (ионная, тиристорная и др.) достигается $U_{jп*} \geq 4$, что позволяет ускорять нарастание тока ротора до двукратного значения, после чего вступает в действие устройство ограничения форсировки.

Требование к резервным системам возбуждения, которые устанавливаются только на тепловых электростанциях:

$$U_{jп.у*} = I_{jп*} \geq 1,3.$$

2. *Номинальная скорость нарастания напряжения* возбуждителя (быстродействие системы возбуждения) $v_{ном}$ определяется по методу, иллюстрируемому на рис. 1-5.

На кривой изменения напряжения U_f при форсировке, происходящей вследствие скачкообразного изменения напряжения в сети или на входе системы регулирования возбуждения, отмечается точка b с ординатой $eb = U_{fном} + 0,632\Delta U_{fн}$. Абсцисса точки b ($0e = t_1$) равнялась бы постоянной времени, если бы закон изменения $U_f(t)$ был экспоненциальным. Через точку b проводится прямая ab . Номинальная скорость нарастания напряжения возбудителя рассчитывается по формуле, отн. ед./с:

$$v_{ном} = \frac{eb}{0a} \frac{1}{(t_1 + \Delta t)} = 0,632 \frac{\Delta U_{fн}}{t_1 + \Delta t}.$$

Поправка Δt зависит от абсолютного значения и знака площади $\Delta S = S_{abc} - S_{adb}$, ограниченной отрезком прямой ab и кривой нарастания напряжения adb :

$$\Delta t = \Delta S / cb.$$

При $\Delta S \leq 20\% S_{abc}$ полагают $\Delta t = 0$.

Для всех основных систем возбуждения гидрогенераторов, турбогенераторов и синхронных компенсаторов $v_{ном}$ должно быть не менее 2 отн. ед./с. Для резервных систем возбуждения быстроедействие не задается.

3. **Запаздывание** систем возбуждения при форсировке $T_{з.с.в}$ представляет собой отрезок времени с момента подачи на вход АРВ сигнала, вызывающего необходимость полной форсировки возбуждения, до момента, когда в процессе форсировки напряжение

на зажимах возбудителя отклонится от начального на величину, равную 3% разности конечного и начального значений напряжения. Запаздывание основных систем возбуждения при форсировке не должно превышать 0,03 с.

При малых возмущениях системы возбуждения характеризуются значениями коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев.

В установившихся режимах системы регулирования возбуждения характеризуются знаком и абсолютным

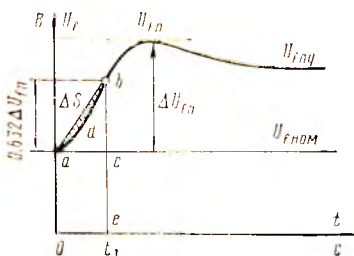


Рис. 1-5. Изменение напряжения возбуждения при форсировке.

значением коэффициента статизма по спрямленной внешней характеристике, представляющей собой линейную при постоянном $\cos \varphi_r$ зависимость напряжения генератора U_r от тока статора I_r или реактивного тока $I_{r.p}$ (реактивной мощности Q_r).

Основные параметры режима, по которым осуществляется регулирование (параметры регулирования).

1. Мгновенное отклонение регулируемой величины (например, напряжения) от заданного значения.

Регулятор воспринимает это отклонение и изменяет ток возбуждения синхронной машины, стремясь восстановить заданное значение регулируемой величины. Следует отметить, что все АРВ, применяемые в эксплуатации, не содержат интегрирующих звеньев и имеют естественный статизм, вследствие чего они не могут абсолютно точно поддерживать заданное значение регулируемой величины. В результате возникает статическая ошибка регулирования (отклонение регулируемой величины от заданной), значение которой тем меньше, чем больше коэффициент усиления регулятора [см. П1-71)]. При регулировании напряжения на выводах генератора по условию стабилизации (заданное напряжение $U_{уст} = \text{const}$)

$$\Delta U_r = \frac{\Delta U_{исх}}{1+k}; \quad k_c = -\frac{\Delta U_r}{\Delta I_{r.p}} = \frac{x_d}{1+k} > 0,$$

где ΔU_r — статическая ошибка при включенном регуляторе; $\Delta U_{исх} \approx -\Delta I_{r.p} x_d$ — исходное рассогласование при отключенном регуляторе и изменении напряжения из-за изменения тока статора; $k = k_r k_v k_{рег}$ — коэффициент усиления разомкнутой системы регулирования, состоящей из генератора, возбудителя и регулятора; k_c — коэффициент статизма системы регулирования по реактивному току.

Увеличение коэффициента усиления k ограничено условием устойчивости системы регулирования [см. (§ П1-3)].

2. Главные возмущающие воздействия (параметры режима, существенно влияющие на регулируемую величину) — ток статора и угол сдвига фаз между напряжением и током статора синхронной машины.

При увеличении тока нагрузки или угла сдвига фаз возрастает потеря напряжения в сопротивлении генератора и снижается напряжение на выводах машины.

Для предотвращения этого изменения АРВ, реагирующий на возмущение, должен увеличить ток возбуждения и, следовательно, э. д. с. и тем самым скомпенсировать влияние изменения возмущения.

Скорость действия АРВ по возмущению достаточно велика, так как регулятор начинает действовать еще до появления заметного отклонения регулируемой величины. Однако точность регулирования, как правило, неудовлетворительна из-за трудности компенсации всех возмущающих воздействий.

3. Производные по времени (первая и вторая) регулируемой величины и главных возмущающих воздействий. Введение производных в закон регулирования значительно ускоряет процесс регулирования, не влияя на статические характеристики. Использование производных особенно эффективно при быстродействующих системах возбуждения.

4. Мгновенное отклонение и первая производная частоты.

Введение этих параметров в закон регулирования возбуждения способствует повышению устойчивости параллельной работы.

В настоящее время находятся в эксплуатации и рассматриваются далее следующие устройства АРВ:

устройства релейной форсировки возбуждения и развозбуждения;

электромагнитный корректор с устройством токового компаундирования;

управляемое фазовое компаундирование;

устройство автоматического регулирования высокочастотного полупроводникового возбуждения;

регулятор возбуждения сильного действия.

1-2. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ФОРСИРОВКА ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАЗВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА С ЭЛЕКТРОМАШИНЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ

Автоматическая форсировка возбуждения осуществляется релейным устройством быстродействующего возбуждения (УБВ), показанным схематически в виде АРВ2 на рис. 1-1. Основная задача УБВ — при аварийном понижении напряжения генератора форсировать его возбуждение до максимально допустимого (потолочного) значения с целью повышения устойчивости парал-

тельной работы генераторов, ускорения самозапуска электродвигателей и повышения надежности действия релейной защиты с выдержкой времени.

Действие релейного УВВ заключается в частичном или полном шунтировании сопротивления в цепи обмотки возбуждения возбуждателя синхронной машины при значительном снижении напряжения на ее выводах.

Устройствами УВВ в соответствии с ПУЭ оборудованы все синхронные генераторы и компенсаторы независимо от наличия других устройств АРВ. В быстродействующих системах возбуждения применяются бесконтактные УВВ.

Автоматическое развозбуждение осуществляется релейным устройством быстродействующего развозбуждения (УБР). Задача УБР, которыми оснащаются только гидрогенераторы, — ограничить рост напряжения на выводах гидрогенератора с целью сохранения питания подключенных к нему потребителей при разгоне его после сброса основной нагрузки.

Действие релейного УБР заключается в автоматическом введении в цепь возбуждения возбуждателя резистора при необходимости резкого снижения возбуждения.

Принципиальная схема релейных УВВ и УБР показана на рис. 1-6,а. Минимальное реле напряжения $РН_{\text{ф}}$ подключено к междуфазному напряжению трансформатора напряжения $TН$ через автомат цепей напряжения $Ав$. При номинальном напряжении генератора и включенном $Ав$ реле напряжения подтянуто и его контакт разомкнут.

Напряжение на выводах генератора, при котором реле напряжения срабатывает (отпадает) и замыкает контакт, выбирается по условию надежного возврата (подтягивания) при номинальном напряжении $U_{\text{ном}}$ с коэффициентом надежности $k_n=1,05$. Если коэффициент возврата минимального реле напряжения $k_v=1,1$, то

$$U_{\text{РНф}} = \frac{U_{\text{ном}}}{k_n k_v} = \frac{U_{\text{ном}}}{1,1 \cdot 1,05} = 0,85 U_{\text{ном}} \quad (1-1)$$

Данная схема УВВ обеспечивает надежную работу при трехфазных к. з. и при замыканиях между двумя фазами, к которым присоединено реле. При других видах к. з. чувствительность УВВ оказывается сниженной.

Для обеспечения большей чувствительности УБВ к разным видам к. з. применяется схема включения реле напряжения через фильтр напряжения прямой последовательности.

Отключение УБВ или снижение форсировки во избежание перегрева ротора осуществляется персоналом или автоматически от специальной защиты ротора (реле РВ). Предотвращение действия УБВ генератора, работающего на холостом ходу, что может привести к значительному повышению напряжения на выводах статора, осуществляется контактом реле положения «включено» выключателя В (РПВ) в цепи обмотки контактора КФ.

Максимальное реле напряжения РН_р является пусковым органом устройства развозбуждения. Оно действует на контактор развозбуждения КР, включающий добавочный резистор R_д в цепь обмотки возбуждения возбuditеля.

Напряжение на выводах генератора, при котором срабатывает реле РН_р, выбирается по условию надежного возврата реле ($k_{\text{н}}=1,05$) при номинальном напряжении. Если коэффициент возврата максимального реле напряжения $k_{\text{н}}=0,9$, то

$$U_{\text{нп}} = \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{в}}} U_{\text{ном}} = \frac{1,05}{0,9} U_{\text{ном}} \approx 1,2 U_{\text{ном}} \quad (1-2)$$

Пример 1-1. Расчет релейной форсировки турбогенератора ТГВ-300 при работе его с машинным возбудителем ВТ-1600.

Исходные данные для расчета:

номинальный ток ротора $I_{f \text{ ном}}=3050$ А;

кратность форсировки $k_{\text{ф}}=U_{f \text{ п.у.}}=U_{f \text{ п.к.}}=2$;

сопротивление обмотки ротора при 15°C $R_f=0,103$ Ом;

сопротивление обмотки самовозбуждения возбудителя при 40°C $R_{\text{в.в}}=2,6$ Ом;

ток обмотки независимого возбуждения, приведенный к числу витков обмотки самовозбуждения, $I_{\text{в(п.о)}}=1,3$ А (см. рис. 1-6,б);

нагрузочная характеристика возбудителя — рис. 1-6,б, кривая 1.

Расчет проводим в следующей последовательности:

1. Сопротивление ротора в холодном состоянии при температуре $t=40^\circ\text{C}$

$$R_{f \text{ хол}} = \frac{235 + t}{235 + 15} R_{f 15^\circ} = \frac{235 + 40}{235 + 15} \cdot 0,103 = 0,113 \text{ Ом.}$$

Сопротивление в горячем состоянии при $t=100^\circ\text{C}$

$$R_{f \text{ гор}} = \frac{235 + 100}{235 + 15} 0,103 = 0,138 \text{ Ом.}$$

2. Напряжение возбудителя в номинальном режиме

$$U_{f \text{ ном}} = I_{f \text{ ном}} R_{f \text{ гор}} = 3050 \cdot 0,138 = 420 \text{ В.}$$

при форсировке на горячий ротор

$$U_{f\phi} = k_{\phi} U_{fном} = 2 \cdot 420 = 840 \text{ В.}$$

3. Токи возбуждения возбудителя по нагрузочной характеристике с учетом тока 1,3 А в обмотке независимого возбуждения

$$U_{fном} = 420 \text{ В} \rightarrow I_{в.в.ном} = 27 - 1,3 = 25,7 \text{ А};$$

$$U_{f\phi} = 840 \text{ В} \rightarrow I_{в.в.\phi} = 88 - 1,3 = 86,7 \text{ А.}$$

4. Полное сопротивление цепи обмотки самовозбуждения для обеспечения номинального режима

$$R_{в.в} + R_{св} = \frac{U_{fном}}{I_{в.в.ном}} = \frac{420}{25,7} = 16,3 \text{ Ом};$$

для обеспечения $k_{\phi} = 2$ при форсировке на горячий ротор

$$R_{в.в} + R_{св} - R_{ш} = \frac{U_{f\phi}}{I_{в.в.\phi}} = \frac{840}{86,7} = 9,7 \text{ Ом.}$$

5. Сопротивление добавочного резистора в цепи самовозбуждения

$$R_{св} = \frac{U_{fном}}{I_{в.в.ном}} - R_{в.в} = 16,3 - 2,6 = 13,7 \text{ Ом.}$$

Сопротивление резистора, шунтируемого при форсировке,

$$R_{ш} = \frac{U_{fном}}{I_{в.в.ном}} - \frac{U_{f\phi}}{I_{в.в.\phi}} = 16,3 - 9,7 = 6,6 \text{ Ом.}$$

6. Кратность форсировки на холодный ротор

$$k_{\phi,хол} = \frac{U_{f\phi}}{I_{fном} R_{fхол}} = \frac{840}{3050 \cdot 0,113} = 2,44.$$

На рис. 1-6,б кривая 2, являющаяся характеристикой шунтовой цепи возбудителя, определяется уравнением:

$$U_f = (I_{в.в} - I_{в(н.о)}) (R_{в.в} + R_{св}),$$

прямая 3 — уравнением:

$$U_f = (I_{в.в} - I_{в(н.о)}) (R_{в.в} + R_{св} - R_{ш}).$$

Точки их пересечения с нагрузочной характеристикой возбудителя определяют соответственно номинальный и форсировочный режимы.

1-3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОРРЕКТОР НАПЯЖЕНИЯ

Корректор напряжения — это автоматический регулятор возбуждения, реагирующий на отклонение регулируемой величины, т. е. напряжения. Название «корректор напряжения» связано с тем, что это устройство применяется совместно с другим АРВ — устройством компарирования (см. ниже); при этом обеспечивается кор-

рекция напряжения синхронной машины в нормальных режимах. Наибольшее распространение в СССР получили электромагнитные (т. е. основанные на использовании магнитных усилителей) корректоры напряжения.

Электромагнитный корректор напряжения (ЭМК) содержит (см. рис. 1-7):

измерительный орган *ИО* — датчик отклонения напряжения от заданного значения;

магнитный усилитель *МУ* — усилитель сигнала измерительного органа;

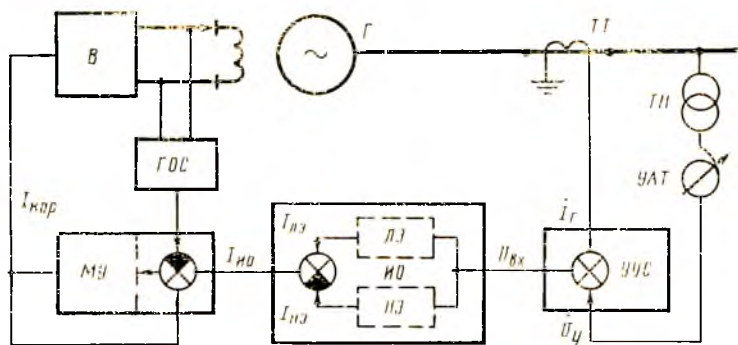


Рис. 1-7. Функциональная схема корректора напряжения.

гибкую обратную связь *ГОС*, повышающую устойчивость системы регулирования;

устройство установки статизма *УУС* — для изменения абсолютного значения и знака коэффициента статизма системы регулирования;

задающее устройство — установочный автотрансформатор *УАТ* или потенциал-регулятор.

Измерительные органы различных конструкций, применяемые в электромагнитных корректорах напряжения, основаны на принципе сравнения токов двух элементов с линейной и нелинейной характеристиками. В наиболее простой схеме выходной сигнал $I_{ио}$ получается как разность токов линейного и нелинейного сопротивлений, к которым приложено одно и то же напряжение $U_{вх}$ (рис. 1-8):

$$I_{ио} = I_{лз} - I_{нз}.$$



Рис. 1-8. Выходные токи линейного и нелинейного элементов и измерительного органа.

При увеличении отклонения напряжения от установки $U_{уст}$ увеличивается выходной ток измерительного органа, причем знак его определяется знаком отклонения напряжения.

Измерительный орган обычно выполняется трехфазным для повышения чувствительности АРВ к несимметричным режимам. Варианты измерительных органов показаны на рис. 1-9.

Линейный элемент измерительного органа рис. 1-9,а состоит из трехфазного линейного дросселя D и выпрямителя $ВЛ$. Нелинейный элемент состоит из пятитермического насыщенного трансформатора $НТ$ (или трех однофазных), вторичные обмотки которого соединены в разомкнутый треугольник, и выпрямителя $ВН$. Нейтраль первичных обмоток $НТ$ изолирована, поэтому гармоники, кратные третьей, отсутствуют в токах и имеют место в кривой напряжения на обмотках трансформатора. Напряжение на разомкнутом треугольнике содержит только третью и кратные ей нечетные гармоники. Нелинейность зависимости $I_{нз} = f(U_{вх})$ при этом больше, чем при обычном насыщенном дросселе.

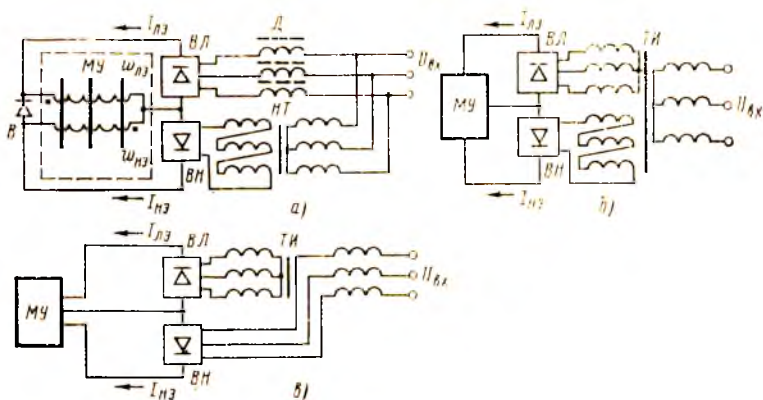


Рис. 1-9. Схемы измерительных органов электромагнитных корректоров напряжения.

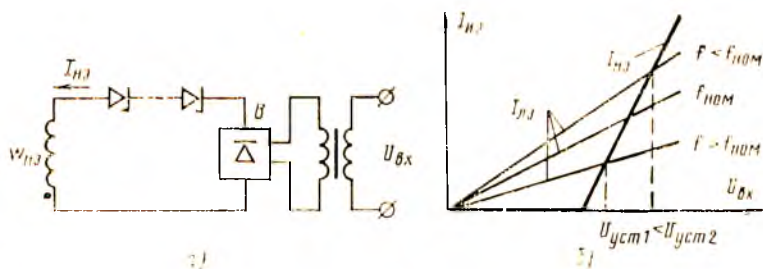


Рис. 1-10. Зависимость характеристики измерительного органа ЭМК от частоты.

а — схема нелинейного элемента на стабилизаторах; *б* — характеристики измерительного органа при различных значениях частоты.

В измерительных органах (рис. 1-9, *б* и *в*) дроссель линейного элемента и насыщенный трансформатор нелинейного элемента заменены одним насыщенным трехфазным измерительным трансформатором *ТИ*. Напряжения на вторичных обмотках *ТИ*, входящих в линейный элемент, пропорциональны входному напряжению. Ток нелинейного элемента создается напряжением обмоток, соединенных в разомкнутый треугольник (рис. 1-9, *б*), или токами первичных обмоток трансформатора *ТИ* (рис. 1-9, *в*).

Недостатком рассмотренных измерительных органов является зависимость тока выхода от частоты, приводящая в ряде случаев к отрицательному регулируемому действию корректора при аварийном понижении частоты в энергосистеме, а также при увеличении частоты на выводах генератора, отключенного от сети со сбросом нагрузки. Для улучшения частотной зависимости *ИО* предложено выполнять *ИЭ* на кремниевых стабилизаторах по схеме рис. 1-10, *а*, а в качестве *ЛЭ* использовать линейный дроссель. Ток *ИЭ* в этой схеме не зависит от частоты. Зависимость тока *ЛЭ* от частоты

$$I_{\text{ЛЭ}} = k_{\text{ЛЭ}} \frac{U_{\text{ав}}}{x_{\text{дп}}} = k'_{\text{ЛЭ}} U_{\text{вх}} / f$$

оказывает положительный эффект регулирования: при аварийном понижении частоты уставка *ИО* повышается, при повышении — снижается (рис. 1-10, *б*), что в известной степени компенсирует зависимость напряжения в сети от частоты.

В качестве измерительного органа, не реагирующего на отклонение частоты, в последние годы используется нелинейный мост на кремниевых стабилитронах и резисторах, питающийся от трехфазного мостового выпрямителя В (рис. 1-11,а). На рис. 1-11,б показана характеристика этого измерительного органа — зависимость тока выхода нелинейного моста, включенного на обмотку управления магнитного усилителя, от напряжения питания корректора. С увеличением входного напряжения,

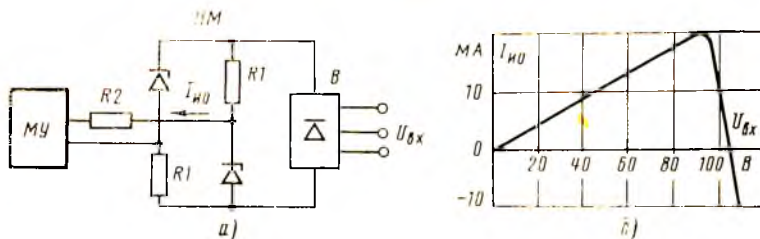


Рис. 1-11. Измерительный орган ЭМК с использованием нелинейного моста.

пока стабилитроны заперты, выходной ток возрастает пропорционально входному напряжению:

$$I_{HO} = \frac{\beta_u U_{BX}}{2R_1 + R_2 + R_y}, \quad (1-3)$$

где R_y — сопротивление обмотки управления МУ; β_u — коэффициент выпрямления по напряжению выпрямителя В.

После того как напряжение на стабилитронах возрастает до $U_{ст}$, выходной ток снижается с увеличением входного напряжения:

$$I_{HO} = \frac{2U_{ст} - \beta_u U_{BX}}{R_2 + R_y}, \quad (1-4)$$

где $U_{ст}$ — напряжение стабилизации.

При $U_{BX} = U_{уст}$ выходной ток равен нулю. Отклонение входного напряжения от уставки приводит к пропорциональному увеличению выходного тока, знак которого определяется знаком отклонения напряжения.

Коэффициент усиления измерительного органа на рабочем участке:

$$\Delta I_{HO} / \Delta U_{BX} = \beta_u / (R_2 + R_y)$$

определяется сопротивлением в диагонали нелинейного моста, которое выбирается в зависимости от требуемого значения постоянной времени магнитного усилителя. Изменение коэффициента усиления в определенных пределах осуществляется резистором $R2$.

Магнитный усилитель МУ, усиливающий сигнал измерительного органа, выполняется с внешними или внутренними обратными связями по току выхода.

Если ток обратной связи совпадает по направлению с током линейного элемента, то обратная связь положительна при $I_{12} > I_{11}$ (т. е. при $U_{вх} < U_{уст}$) и отрицательна при $I_{12} < I_{11}$ ($U_{вх} > U_{уст}$). Построение соответствующей этому случаю характеристики корректора $I_{кор}(U_{вх})$ по характеристикам измерительного органа $I_{110}(U_{вх})$ и магнитного усилителя $I_{МУ}(I_{110})$ показано на рис. 1-12 кривыми 1.

Выход корректора с характеристикой 1 включается на обмотку возбуждения возбудителя так, чтобы $I_{кор} = I_{в.д.1}$, действовал согласно с током $I_{св}$ (см. рис. 1-1, *АРВЗ*). Поэтому такая схема включения корректора называется согласованной. Точка N_c на характеристике корректора, соответствующая номинальному напряжению генератора, находится на крутопадающей части характеристики. Абсцисса этой точки $U_{вх.ном} < U_{уст}$.

Любое отклонение напряжения генератора приводит к резкому изменению тока корректора. При снижении напряжения $I_{кор}$ увеличивается, увеличивается возбуждение возбудителя и э. д. с. генератора. Следовательно, напряжение в установившемся режиме снизится на меньшую величину, чем при отсутствии корректора. При повышении напряжения генератора ток выхода корректора снижается, что уменьшает возрастание напряжения. Таким образом, согласованный корректор на рабочем участке характеристики противодействует отклонениям

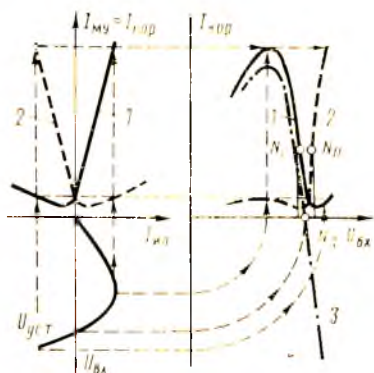


Рис. 1-12. Построение характеристик согласованного, противовключенного и двухсистемного корректоров.

напряжения генератора от заданного значения. Чтобы предотвратить увеличение $I_{кор}$ в области $U_{вх} > U_{уст}$, помимо отрицательной обратной связи применяются дополнительные меры, в частности включение выпрямителя B между обмотками линейного и нелинейного элементов (см. рис. 1-9,а). Пока $I_{лэ} > I_{нэ}$, выпрямитель заперт и влияния на работу схемы не оказывает. В области напряжений $U_{вх} > U_{уст}$ выпрямитель открывается, токи в обмотках $\omega_{лэ}$ и $\omega_{нэ}$ уравниваются и результирующий ток управления МУ остается приблизительно равным нулю. Другим способом улучшения характеристики согласованного корректора является применение промежуточного трансформатора $ТК$ и насыщающегося дросселя $ДН$ (см. рис. 1-18).

Если обратная связь МУ отрицательна при $I_{лэ} > I_{нэ}$ и положительна при $I_{лэ} < I_{нэ}$, то характеристика корректора $I_{кор}(U_{вх})$ имеет вид, показанный на рис. 1-12 (кривая 2). Такой корректор должен включаться на отдельную обмотку возбуждения возбудителя (см. рис. 1-1, $APB4$). Поэтому его называют противовключенным. Комбинация из согласованного и противовключенного корректоров называется двухсистемным корректором $I_{кор.д} = I_{кор.с} - I_{кор.п}$ (кривая 3).

Зависимость напряжения генератора U_r от тока нагрузки при постоянном значении $\cos \varphi$, обеспечиваемая корректором без устройства установки статизма (УУС на рис. 1-7), называется *естественной характеристикой регулирования*. Естественная характеристика регулирования близка к астатической и имеет положительный статизм, обычно не превышающий 1–2%. Устойчивость регулирования достигается при необходимости применением отрицательной гибкой обратной связи ГОС с зажимов возбудителя на дополнительную обмотку управления МУ. Дифференцирующее звено ГОС обычно выполняется трансформаторным (см. рис. П1-23,а).

Устройство установки статизма УУС служит для получения необходимого наклона характеристики регулирования, т. е. требуемого статизма системы. Конструктивно УУС чаще всего выполняются с использованием резисторов, падения напряжения на которых пропорциональны фазным токам генератора (рис. 1-13).

Напряжение установочного автотрансформатора $\dot{U}_y$ равно геометрической сумме напряжения на входе измерительного органа $\dot{U}_{\text{вх}}$ и $\Delta\dot{U}$. Поэтому $\dot{U}_{\text{вх}} = \dot{U}_y - \Delta\dot{U}$, где

$$\Delta U = \frac{R_K}{n_{\text{ТТ}} n_{\text{ТС}}} I_r = k_i I_r; \quad U_y = k_u U_r. \quad (1-5)$$

Угол α между векторами $\dot{U}_y$ и $\Delta\dot{U}$ можно изменять степенями через 30° , пересоединяя обмотки трансформатора статизма $ТС$.

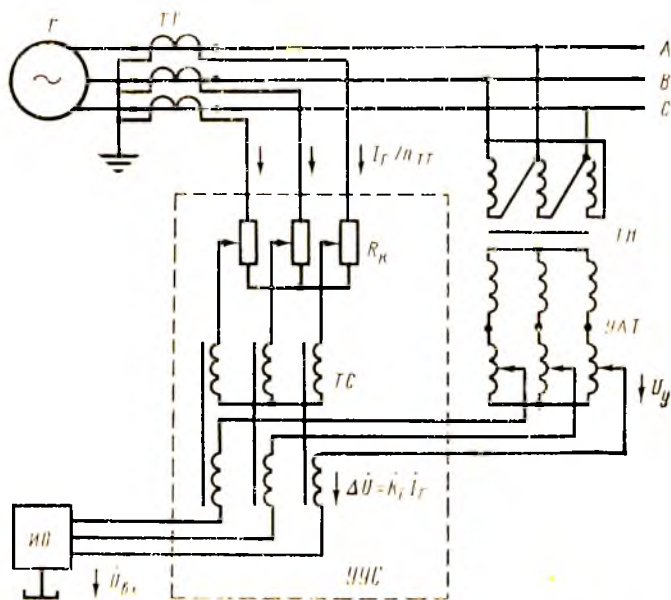


Рис. 1-13. Схема включения устройства установки статизма.

Для регуляторов с естественной характеристикой, близкой к астатической, напряжение на входе измерительного органа в установившемся режиме $U_{\text{вх}} = \text{const}$. Поэтому если угол α между векторами $\dot{U}_y$ и $\Delta\dot{U}$ при $\cos \varphi_{\text{ном}}$ будет тупым ($\alpha > 90^\circ$, рис. 1-14), то с увеличением $\Delta U = k_i I_r$ напряжение $U_y = k_u U_r$ под действием регулятора будет уменьшаться, т. е. характеристика регулирования имеет положительный статизм. Если угол меж-

ду U_y и $\Delta \vec{U}$ при $\cos \varphi_{ном}$ будет острым ($\alpha < 90^\circ$, рис. 1-14), то с увеличением $\Delta U(I_r)$ напряжение $U_y(U_r)$ будет увеличиваться, т. е. статизм характеристики регулирования становится отрицательным. На рис. 1-14 все напряжения приведены к цепи статора генератора.

При изменении коэффициента мощности нагрузки меняется наклон характеристики регулирования из-за изменения угла между векторами $\vec{U}_y$ и $\Delta \vec{U}$.

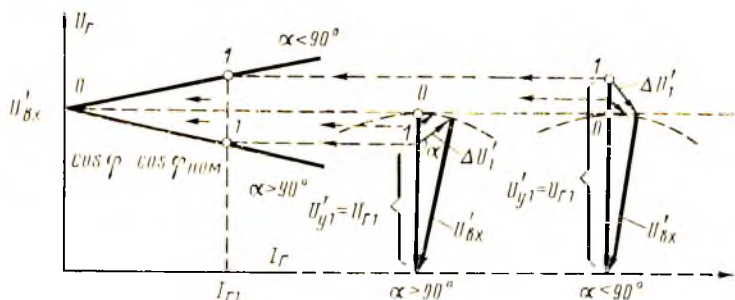


Рис. 1-14. Характеристики регулирования при включенном устройстве установки статизма.

Для того чтобы напряжение на выводах генератора зависело только от реактивного тока (не зависело от активного тока), нужно, чтобы при $\cos \varphi = 1$ угол между $\vec{U}_y$ и $\Delta \vec{U}$ был равен 90° (так как $\Delta U \ll U_y$ и они находятся в квадратуре, то в конце процесса регулирования $U_y \approx U_{yx} \approx \text{const}$ при $P = \text{var}$). Такую фазировку можно обеспечить как с трансформатором $ТС$ (рис. 1-13), так и без него, если к входу измерительного органа подвести напряжения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{\dot{U}_{AB}}{n_{TH}} \pm \frac{R_K}{n_{TT}} \dot{I}_C; \\ \dot{U}_2 &= \frac{\dot{U}_{BC}}{n_{TH}} \pm \frac{R_K}{n_{TT}} \dot{I}_A; \\ \dot{U}_3 &= \frac{\dot{U}_{CA}}{n_{TH}} \pm \frac{R_K}{n_{TT}} \dot{I}_B. \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

При знаке «+» перед вторым членом характеристика регулирования в координатах «напряжение — реактив-

ный ток генератора» имеет положительный статизм, при знаке «—» — отрицательный. Значение коэффициента статизма регулируется сопротивлением R_K .

Установочный автотрансформатор или потенциал-регулятор УАТ, изменяющий отношение U_y/U_r , является задающим элементом корректора. Он служит для изменения в процессе эксплуатации заданных значений напряжения генератора. Снижение U_{yx} с помощью УАТ регулятор воспринимает как понижение напряжения генератора и увеличивает ток возбуждения. Это приводит к повышению напряжения генератора. Для снижения напряжения генератора нужно с помощью УАТ повысить U_{yx} . Таким образом можно, воздействуя на УАТ, параллельно перемещать характеристику регулирования вдоль оси U_r .

Рассмотренная схема АРВ имеет следующие недостатки:

- отказывает в действии при глубоких понижениях напряжения;

- обладает малым запасом устойчивости при небольших коэффициентах статизма естественной характеристики регулирования.

Для уменьшения мощности корректора и, следовательно, увеличения быстродействия и запаса устойчивости в систему регулирования обычно дополнительно вводят устройство компаундирования.

1-4. УСТРОЙСТВО ТОКОВОГО КОМПАУНДИРОВАНИЯ

Токовое компаундирование является регулированием возбуждения по главному возмущению — модулю тока статора. При этом осуществляется непрерывная функциональная зависимость тока возбуждения генератора от тока статора $I_f(I_r)$.

Принципиальная схема устройства токового компаундирования (УК), входящего в разомкнутую автоматическую систему регулирования (АСР), показана на рис. 1-15. Дополнительный ток I_K от УК, подаваемый согласно с током самовозбуждения в основную или дополнительную обмотку возбуждения возбудителя, обеспечивает увеличение возбуждения, что компенсирует значительную часть падения напряжения в генераторе от тока статора. При включении УК на основную обмотку процесс компаундирования начинается лишь при токе

генератора, превышающем некоторую величину $I_{\text{пор}}$, называемую «порогом» компаундирования. При $I_{\text{г}} < I_{\text{пор}}$ выпрямитель ВК заперт обратным напряжением $U_{\text{в.в.х.х}} = I_{\text{св}} R_{\text{в.в.}}$.

Необходимая степень компаундирования генератора достигается соответствующим подбором коэффициента

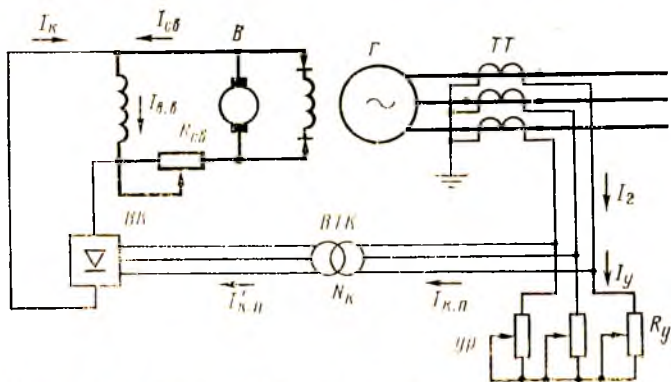


Рис. 1-15. Схема устройства токового компаундирования.

трансформации $N_{\text{к}}$ выпрямительного трансформатора ВТК и сопротивления $R_{\text{у}}$ установочного реостата УР. Промежуточный трансформатор служит, кроме того, для разделения цепей переменного и постоянного тока, а установочный реостат — для создания нормальных условий работы генераторных трансформаторов тока ТТ.

Компаундирование называют «нормальным», если при отсутствии других устройств АРВ обеспечивается номинальное напряжение генератора при номинальной нагрузке. На холостом ходу генератора, когда $I_{\text{к}} = 0$, номинальное напряжение на его выводах обеспечивается за счет тока самовозбуждения; при этом сопротивление $R_{\text{св}}$ выбирается так, чтобы ток ротора $I_{\text{г}} = I_{\text{г.х.}}$.

«Нормальное» компаундирование можно обеспечить при различных сочетаниях $N_{\text{к}}$ и $R_{\text{у}}$. Для их однозначного определения используется второе условие — компаундирование должно быть устойчивым, т. е. коэффициент статизма компаундированного генератора — $\Delta U_{\text{г}} / \Delta I_{\text{г.р}} > 0$ при любой нагрузке генератора (см. § 1-11). Для выполнения этого условия необходимо, чтобы характеристика компаундирования $I_{\text{г}}(I_{\text{г}})$ пересекалась с каждой из U-образных характеристик генератора: $I_{\text{г}}(I_{\text{г}})$ при

$P_f = \text{var}$ и $U_f = \text{const}$ (рис. 1-16) только в одной точке. Требуемую характеристику компаундирования при включении УК на основную обмотку можно построить, если из точки N , соответствующей номинальным токам статора и ротора, провести прямую NB под углом α к оси абсцисс так, чтобы $\alpha \geq \beta$, где β — угол наклона харак-

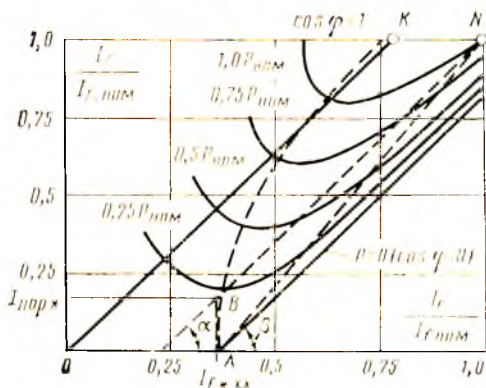


Рис. 1-16. Выбор характеристики компаундирования.

теристики для $P=0$ ($\cos \varphi=0$), до пересечения с прямой $I_f = I_{f*х.х.}$ Ордината точки пересечения $I_{пор*}$ определяет значение «порога» компаундирования, которое необходимо обеспечить выбором N_K и R_y . При включении УК на дополнительную обмотку условие устойчивости всегда обеспечивается (прямая NA).

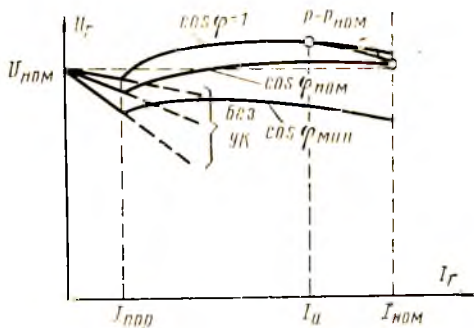


Рис. 1-17. Внешние характеристики «нормально» компаундированного генератора.

Внешние характеристики «нормально» компаундированного генератора при различных $\cos \varphi$ нагрузки приведены на рис. 1-17. Если изменяется только реактивная составляющая тока, внешняя характеристика имеет положительный коэффициент статизма (см. $P=P_{\text{ном}}$), что обеспечивает устойчивость распределения реактивных нагрузок между параллельно работающими генераторами (см. § 1-11).

К достоинствам данной системы регулирования следует отнести:

быстродействие при глубоких понижениях напряжения, вызванных к. з.;

высокую степень устойчивости из-за малой постоянной времени регулятора.

Недостатком является низкая точность регулирования напряжения, поскольку оно зависит не только от полного тока статора, но и от ряда других факторов, на которые УК не реагирует: фазы тока статора (рис. 1-17), характеристик возбудителя и генератора, частоты вращения агрегата, сопротивления ротора, зависящего от температуры, и др., относящихся к дополнительным неконтролируемым возмущениям.

Для более точного поддержания напряжения генератора устройство компаундирования дополняется корректором напряжения, включаемым на одну из обмоток возбуждения возбудителя. Устройство компаундирования и электромагнитный корректор образуют комбинированную АСР.

1-5. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ С УСТРОЙСТВОМ КОМПАУНДИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КОРРЕКТОРОМ НАПЯЖЕНИЯ

Устройство компаундирования с электромагнитным корректором напряжения является распространенным видом АРВ. Регуляторы этого вида используются при электромашинах возбудителях для турбогенераторов до 100 МВт, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов до 75 МВ·А. Для гидрогенераторов и синхронных компенсаторов используется, как правило, токовое компаундирование с двухсистемным электромагнитным корректором напряжения.

В качестве примера рассмотрим панель УК с ЭМК типа ЭПА-305, которая применяется в качестве АРВ

турбогенераторов. На панели смонтированы: устройство релейной форсировки, устройство компаундирования и односистемный корректор напряжения. На рис. 1-18 приведена схема панели без устройства релейной форсировки, рассмотренного в § 1-2. Устройство компаундирования содержит: установочные резисторы $CY1$ и $CY2$, промежуточный трансформатор компаундирования $ТПК$ и выпрямитель $B1$. Принцип действия УК рассмотрен в § 1-4, где соответствующие элементы устройства обозначены: $УР$, $ВТК$ и $ВК$.

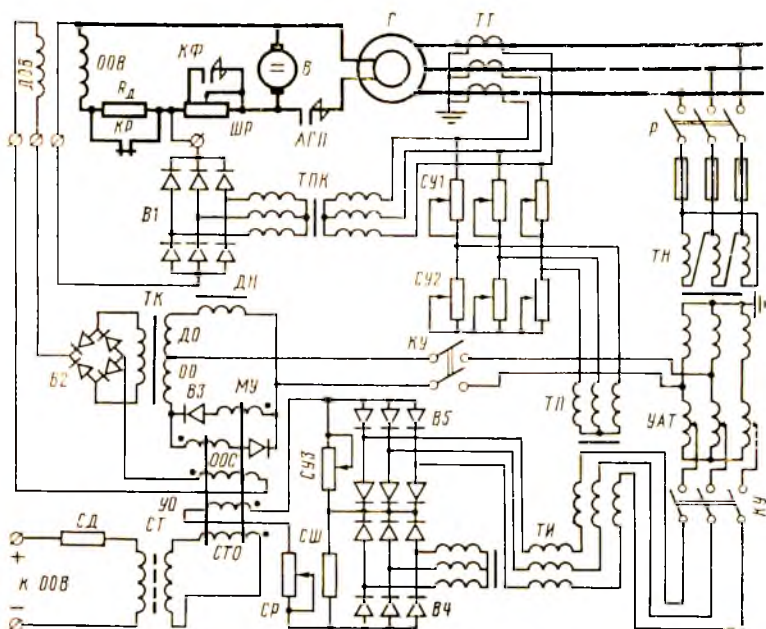


Рис. 1-18. Схема панели УК с ЭМК типа ЭПА-305.

Электромагнитный корректор напряжения состоит из элементов, рассмотренных в § 1-3. Питание ЭМК осуществляется от группы однофазных трансформаторов напряжения $ТН$, первичные обмотки которых соединены в треугольник, а вторичные — в звезду для увеличения отдаваемой мощности.

Измерительный орган корректора $ТИ$ выполнен на основе трехфазного насыщающегося трансформатора

(см. рис. 1-9, в). Падение напряжения на резисторе *СУЗ* пропорционально току в первичной обмотке трансформатора *ТИ* и нелинейно зависит от напряжения статора. Падение напряжения на резисторе *СШ* (выход линейного элемента) пропорционально напряжению статора. Ток обмотки управления *УО* магнитного усилителя *МУ* определяется разностью этих напряжений.

Магнитный усилитель *МУ* однофазный, с внутренней обратной связью, действующей согласно с током линейного элемента. Поэтому зависимость тока выхода магнитного усилителя от напряжения статора приобретает вид, показанный на рис. 1-12 кривой 1.

Ток выхода *МУ* трансформируется промежуточным трансформатором корректора *ТК*, выпрямляется мостовой схемой *В2* и через обмотку отрицательной обратной связи *ООС МУ* подается в дополнительную обмотку возбуждителя *ДОВ*.

Для того чтобы устранить подъем характеристики корректора в области повышенных напряжений, часть первичной обмотки *ТК ДО* включена встречно с основной обмоткой *ОО ТК* и последовательно с дросселем *ДН*. При повышении напряжения дроссель насыщается, ток в цепи встречно включенной обмотки *ДО* увеличивается и вторичный ток трансформатора *ТК*, а следовательно, и выпрямленный ток не возрастают.

Гибкая обратная связь осуществляется стабилизирующим трансформатором *СТ*, первичная обмотка которого через добавочный резистор *СД* подключается к обмотке возбуждения возбуждителя или на якорь возбуждителя, а вторичная — к обмотке стабилизации *СТО МУ*.

Устройство установки статизма выполнено на трех однофазных трансформаторах *ТП*, собранных в трехфазную группу. Первичные обмотки включены параллельно сопротивлениям *СУ2*, а вторичные обмотки — последовательно с обмотками трансформатора *ТИ*.

Для регулирования возбуждения гидрогенераторов и синхронных компенсаторов применяются двухсистемные корректоры напряжения (ЭПА-161, ЭПА-162 и др. [18, 19]) с устройствами токового компаундирования (ЭПА-141, ЭПА-142 и др.). Панели ПРВ-401 и ЭПА-151 содержат, кроме двухсистемного корректора и устройства токового компаундирования, устройство релейной форсировки возбуждения, а ПРВ-401 также и устройство релейной расфорсировки возбуждения.

Пример 1-2. Рассчитать режимы работы устройства токового компаундирования и согласованного корректора для генератора Т2-25-2 [18, 19].

Исходные данные для расчета

Токи ротора:

при холостом ходе генератора $I_{f\text{ х.х}}=152\text{ А}$;

при номинальной активной нагрузке и наибольшем

$$\cos \varphi=0,9 \quad I_{f1}=264\text{ А};$$

при номинальной активной нагрузке и наименьшем

$$\cos \varphi=0,7 \quad I_{f2}=408\text{ А}.$$

Номинальное напряжение статора генератора 10,5 кВ. Коэффициент трансформации трансформаторов тока $n_{\text{ТТ}}=400$. Сопротивления обмоток при 15°C:

возбуждения генератора $R_{f15^\circ}=0,352\text{ Ом}$;

возбуждения возбудителя основной $R_{\text{в.о}15^\circ}=11,85\text{ Ом}$ и дополнительной $R_{\text{в.д}15^\circ}=6,35\text{ Ом}$.

Нагрузочная характеристика возбудителя $U_f(I_{\text{в.в}})$ (не приведена).

Отношение витков основной и дополнительной обмоток возбуждения возбудителя — 3.

Расчет производится в следующей последовательности.

1. Минимальный ток корректора $I_{\text{кор.мин}}$ зависит от модификации корректора, которая выбирается по паспортному значению сопротивления нагрузки. Сопротивление нагретой дополнительной обмотки, на которую включен корректор (при $t=70^\circ\text{C}$):

$$R_{\text{в.д}70^\circ}=R_{\text{в.д}15^\circ}\frac{235+70}{235+15}=6,35\frac{305}{250}=7,75\text{ Ом}.$$

Выбираем корректор ЭМК, у которого паспортное значение сопротивления нагрузки 8 Ом, а $I_{\text{кор.мин}}=0,4\text{ А}$. Ток корректора при холостом ходе генератора $I_{\text{кор.х.х}}=(2\div 3)I_{\text{кор.мин}}$.

Принимаем $I_{\text{кор.х.х}}=3\cdot 0,4=1,2\text{ А}$.

2. Результирующий ток возбуждения возбудителя $I_{\text{в.в.х.х}}$ определяем при

$$U_{f\text{ х.х}}=I_{f\text{ х.х}}R_{f120^\circ}=152\cdot 0,352\frac{235+120}{235+15}=152\cdot 0,5=76\text{ В}$$

по нагрузочной характеристике:

$$I_{\text{в.в.х.х}}=2,1\text{ А}.$$

Ток основной обмотки возбуждения

$$I_{\text{в.о}}=I_{\text{в.в.х.х}}-I_{\text{кор.х.х}}\frac{w_{\text{в.д}}}{w_{\text{в.о}}}=2,1-1,2\frac{1}{3}=1,7\text{ А}.$$

Сопротивление $R_{\text{св}}$, определяющее ток $I_{\text{в.о}}$ (ток компаундирования $I_{\text{к}}=0$), подсчитываем по формуле:

$$R_{\text{св}}=\frac{U_{f\text{ х.х}}}{I_{\text{в.о}}}-R_{\text{в.о}70^\circ}=\frac{76}{1,7}-11,85\frac{235+70}{235+15}=44,7-14,5=30,2\text{ Ом}.$$

3. Сопротивление установочного реостата компаундирования определяется по режиму номинальной активной нагрузки генератора при наибольшем $\cos \varphi = 0,9$.

Ток корректора $I_{кор.1}$ принимается равным $I_{кор.х.х} = 1,2$ А.

Результирующий ток возбуждения возбудителя $I_{в.в1}$ определяем при $U_{f1} = I_{f1} R_{f120^\circ} = 264 \cdot 0,5 = 132$ В по нагрузочной характеристике: $I_{в.в1} = 4,1$ А.

Ток основной обмотки возбуждения

$$I_{в.о} = I_{в.в1} - I_{кор.х.х} \frac{\omega_{в.д}}{\omega_{в.о}} = 4,1 - 1,2 \frac{1}{3} = 3,7 \text{ А.}$$

Напряжение на основной обмотке возбуждения

$$U_{в.о} = I_{в.о} R_{в.о70^\circ} = 3,7 \cdot 14,5 = 53,6 \text{ В.}$$

Ток самовозбуждения возбудителя

$$I_{св} = \frac{U_{f1} - U_{в.о}}{R_{св}} = \frac{132 - 53,6}{30,2} = 2,6 \text{ А.}$$

Ток компаундирования

$$I_k = I_{в.о} - I_{св} = 3,7 - 2,6 = 1,1 \text{ А.}$$

Переменный ток компаундирования

$$I'_{к.п} = I_k / \beta_i = \frac{1,1}{1,2} = 0,916 \text{ А,}$$

где $\beta_i = 1,2 \div 1,3$ — коэффициент выпрямления по току для трехфазной схемы.

Вторичный ток статора

$$I_2 = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} U_{ном} \cos \varphi_1 n_{ТТ}} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,9 \cdot 400} = 3,82 \text{ А.}$$

Коэффициент трансформации промежуточного трансформатора УК

$$N_k = \frac{(0,5 \div 0,7) I_2}{I'_{к.п}} = (0,5 \div 0,7) \frac{3,82}{0,916} = 2,1 \div 2,9.$$

Принимаем $N_k = 2,2$.

Ток в установочном реостате:

$$I_y = I_2 - I'_{к.п} N_k = 3,82 - 0,916 \cdot 2,2 = 1,8 \text{ А.}$$

Напряжение на установочном реостате:

$$U_2 = \frac{1}{N_k} \left(\frac{U_{в.о}}{\beta_u} + \frac{\Delta U_n}{\sqrt{3}} \right),$$

где $\beta_u = 2,2 \div 2,3$ — коэффициент выпрямления фазного напряжения мостовой схемой; ΔU_n — линейное падение напряжения в выпрямителе, приближенно для селеновых вентилей равно $\Delta U_n =$

$= \left(1 + \frac{0,3}{m} I_k \right) n$; m , n — соответственно число параллельно и по-

следовательно включенных пластин в плече выпрямителя, определяется по условию обеспечения устойчивости выпрямителя в нормальном режиме генератора и при коротком замыкании.

Примем без расчета $m=2$, $n=8$ и определим:

$$\Delta U_{\pi} = \left(1 + \frac{0,3}{2} 1,1 \right) \cdot 8 = 9,3 \text{ В};$$

$$U_2 = \frac{1}{2,2} \left(\frac{53,6}{2,3} + \frac{9,3}{\sqrt{3}} \right) = 13 \text{ В}.$$

Сопротивление установочного реостата

$$R_y = \frac{U_2}{I_y} = \frac{13}{1,8} = 7,2 \text{ Ом}.$$

4. Определение нагрузки корректора производится по режиму номинальной активной нагрузки генератора при наименьшем возможном $\cos \varphi_2 = 0,7$ (ток ротора $I_{f2} = 408 \text{ А}$).

Результирующий ток возбуждения возбудителя $I_{в.в2}$ определяем при $U_{f2} = I_{f2} R_{f120^\circ} = 408 \cdot 0,5 = 204 \text{ В}$ по нагрузочной характеристике: $I_{в.в2} = 6,9 \text{ А}$.

Вторичный ток статора

$$I_2 = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} U_{ном} \cos \varphi_2 n_{ТТ}} = \frac{25\,000}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,7 \cdot 400} = 4,91 \text{ А}.$$

Ток в основной обмотке возбуждения возбудителя

$$\begin{aligned} I_{в.о} &= \frac{\left[N_K^2 R_y + \frac{0,3n}{m\sqrt{3}} \beta_i \right] U_f + \left[I_2 N_K R_y - \frac{1n}{\sqrt{3}} \right] R_{св} \beta_i}{\left[N_K^2 R_y + \frac{0,3n}{m\sqrt{3}} \beta_i \right] (R_{в.о70^\circ} + R_{св}) + R_{в.о70^\circ} R_{св} \frac{\beta_i}{\beta_u}} = \\ &= \frac{\left[2,2^2 \cdot 7,2 + \frac{0,3 \cdot 8}{2 \cdot 1,73} \cdot 1,2 \right] 204 + \left[4,91 \cdot 2,2 \cdot 7,2 - \frac{1 \cdot 8}{1,73} \right] 30,2 \cdot 1,2}{\left[2,2^2 \cdot 7,2 + \frac{0,3 \cdot 8}{2 \cdot 1,73} \cdot 1,2 \right] (14,5 + 30,2) + 14,5 \cdot 30,2 \frac{1,2}{2,3}} = \\ &= 5,45 \text{ А}. \end{aligned}$$

Ток корректора

$$I_{кор2} = (I_{в.в2} - I_{в.о}) \frac{w_{в.о}}{w_{в.д}} = (6,9 - 5,45) \cdot 3 = 4,35 \text{ А}.$$

Ток $I_{кор2} < 5 \text{ А}$, т. е. возможно применение панели ЭНА с корректором ЭМК при параллельном соединении силовых обмоток магнитного усилителя.

Все другие величины определяются по формулам, приведенным ранее.

1-6. УПРАВЛЯЕМОЕ ФАЗОВОЕ КОМПАУНДИРОВАНИЕ

Точность действия АРВ по возмущению можно существенно повысить, если регулирование возбуждения осуществлять не только по току статора, но и по углу

сдвига фаз между током и напряжением генератора. Такое регулирование получило название фазового компаундирования.

Устройство фазового компаундирования обеспечивает непрерывную функциональную зависимость тока возбуждения генератора от тока и напряжения статора с учетом угла сдвига фаз φ между ними.

Электродвижущая сила генератора за синхронным реактивным сопротивлением

$$E_r = |\dot{U}_r + jx_r I_r|, \quad (1-7)$$

так как $R_r \ll x_r$.

Если магнитные цепи генератора и возбудителя не насыщены (линеаризованная машина) и отсутствует ток самовозбуждения возбудителя, то

$$E_r = k I_{в.д.},$$

где $I_{в.д.}$ — ток возбуждения возбудителя от АРВ.

Следовательно, для поддержания заданного напряжения ненасыщенной машины при изменении тока I_r и угла φ устройство фазового компаундирования должно изменять ток в обмотке возбуждения ненасыщенного возбудителя по закону:

$$I_{в.д.} = \frac{1}{k} |\dot{U}_r + jx_r I_r|. \quad (1-8)$$

Вследствие насыщения магнитных систем генератора и возбудителя зависимость между E_r и $I_{в.д.}$ нелинейна. Поэтому при регулировании $I_{в.д.}$ по приведенному закону напряжение генератора не будет оставаться постоянным. Для поддержания напряжения генератора на заданном уровне (регулирования с заданным статизмом) устройство фазового компаундирования должно дополняться корректором напряжения ЭМК (АРН по отклонению).

Принципиальная схема фазового компаундирования, реализующая требуемый закон, показана на рис. 1-19.

Трансформатор фазового компаундирования $T\Phi K$ работает в режиме трансформатора тока. Ток I_1 пропорционален току, а I_2 — напряжению генератора, так как сопротивление балластного резистора R_6 значительно больше эквивалентного сопротивления схемы, измеренного со стороны зажимов обмотки $\omega_2 T\Phi K$.

Уравнение м. д. с. $T\Phi K$:

$$I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 = I_3 \omega_3 + I_0 \omega_3,$$

где I_0 — намагничивающий ток, приведенный к обмотке ω_3 .

При отключенном ЭМК сердечник $T\Phi K$ не насыщен, поэтому $I_0 \ll I_3$ и, следовательно, выходной ток

$$I_{\Phi.к} = \beta_i I_3 = \frac{\beta_i}{\omega_3} |I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2|, \quad (1.9)$$

где β_i — коэффициент выпрямления выпрямителя по току.

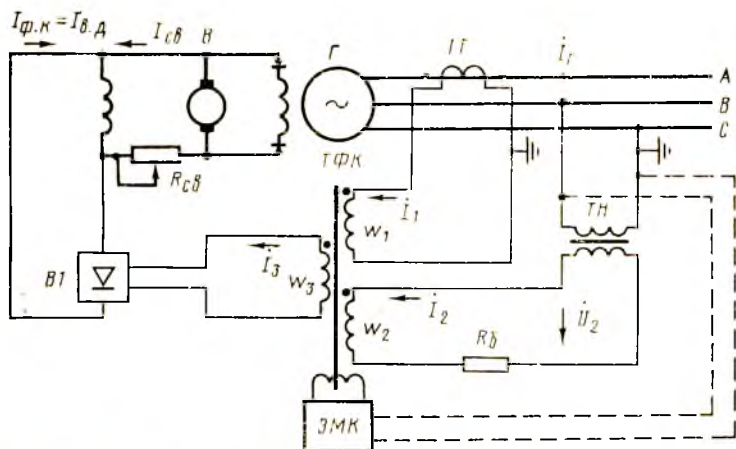


Рис. 1-19. Принципиальная схема фазового компаундирования.

Выразим токи I_1 и I_2 через фазные ток и напряжение генератора и подставим в последнюю формулу:

$$I_1 = \frac{I_{rA}}{n_{TT}}; \quad I_2 = \frac{\dot{U}_{BC}}{n_{TH} R_0} = -\frac{j \sqrt{3} \dot{U}_{rA}}{n_{TH} R_0};$$

$$I_{\Phi.к} = \frac{\beta_i}{\omega_3} \left| \frac{I_{rA} \omega_1}{n_{TT}} - \frac{j \sqrt{3} \dot{U}_{rA} \omega_2}{n_{TH} R_0} \right| =$$

$$= \frac{\sqrt{3} \beta_i \omega_2}{n_{TH} R_0 \omega_3} \left| \dot{U}_{rA} + j \frac{\omega_1 n_{TH} R_0}{n_{TT} \sqrt{3} \omega_2} I_{rA} \right|.$$

Если подобрать параметры схемы так, чтобы

$$\frac{\sqrt{3}\beta_i \omega_2}{n_{\Gamma H} R_6 \omega_3} = \frac{1}{k}; \quad \frac{\omega_1 n_{\Gamma H} R_6}{n_{\Gamma T} \sqrt{3} \omega_2} = x_{\Gamma},$$

то

$$I_{\text{ф.к}} = \frac{1}{k} |\dot{U}_{\Gamma} + jx_{\Gamma} I_{\Gamma}|,$$

что и требуется для поддержания неизменным напряжения на выводах ненасыщенной машины.

Требуемая зависимость получена благодаря правильной фазировке токов I_1 и I_2 : при $\cos \varphi = 1$ I_1 опережает I_2 на 90° .

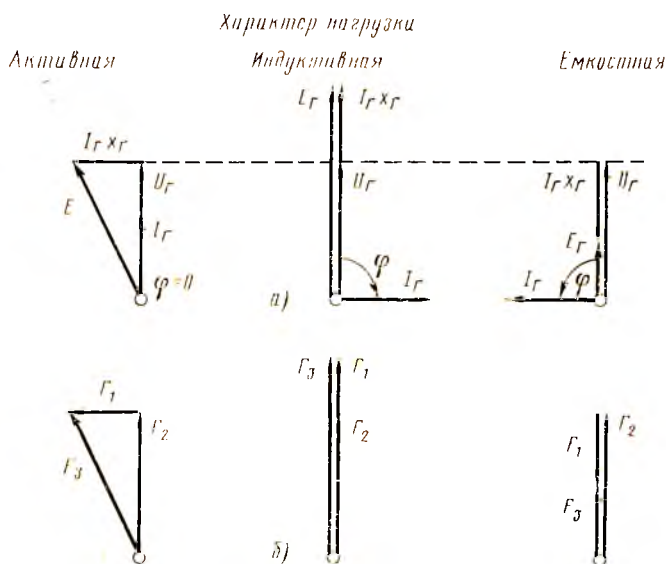


Рис. 1-20. Упрощенные векторные диаграммы при различном характере нагрузки.

а — синхронного генератора при $U_{\Gamma} = \text{const}$, $I_{\Gamma} = \text{const}$; *б* — м. д. с. рабочих обмоток ТФК.

На рис. 1-20 представлены упрощенные векторные диаграммы, поясняющие принцип действия фазового компаундирования.

Ток компаундирования $I_{\text{ф.к}} = \beta_i F_3 / \omega_3$ при изменении коэффициента мощности генератора обеспечивает воз-

буждение генератора (E_r), близкое к значению, необходимому для поддержания постоянства напряжения U_r на его выводах.

Помимо рассмотренной схемы фазового компаундирования возможны и другие варианты, отличающиеся способом векторного суммирования составляющих тока возбуждения от цепей тока и напряжения генератора: электрическое суммирование токов или напряжений, магнитное суммирование потоков [27].

При всех способах суммирования должно выполняться правило фазировки: *в суммирующем устройстве сигнал, пропорциональный току генератора, при активной нагрузке должен опережать сигнал, пропорциональный напряжению генератора, на 90°* . Суммироваться могут переменные токи, напряжения, магнитные потоки.

Коррекция напряжения в устройствах фазового компаундирования осуществляется проще, чем при компаундировании по току, поскольку меньше колебания напряжения и меньшая мощность требуется для коррекции напряжения.

Управление фазовым компаундированием от электромагнитного корректора ЭМК может осуществляться подмагничиванием суммирующего трансформатора ТФК (рис. 1-19), а также некоторыми другими способами [27].

Подмагничивание трансформатора увеличивает ток намагничивания (ток «отсоса»). При этом уменьшается ток на выходе схемы фазового компаундирования. Для правильной работы устройства характеристика ЭМК должна соответствовать противовключенной схеме.

Институтом электродинамики АН УССР предложен универсальный полупроводниковый регулятор на принципе управляемого фазового компаундирования. В нем первичный регулятор (фазовое компаундирование), обеспечивающий нужное качество переходных процессов, дополняется вторичным многофункциональным регулятором, формирующим и реализующим задаваемую типовую характеристику регулирования синхронной машины (генератора, компенсатора, двигателя).

1-7. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ С УПРАВЛЯЕМЫМ ФАЗОВЫМ КОМПАУНДИРОВАНИЕМ

а) Для генераторов с электромашинными возбудителями постоянного тока регулятор разработан в Институ-

те электротехники АН УССР (ныне Институт электродинамики АН УССР) [21, 22]. Регуляторы имеют обозначение РВА-62, выпускаются в универсальном исполнении с двумя модификациями, применяются для генераторов мощностью до 100 МВт и компенсаторов до 75 МВ·А.

Регулятор состоит из двух основных узлов:

устройства фазового компаундирования;

электромагнитного корректора напряжения, управляющего устройством фазового компаундирования.

Эти узлы смонтированы в одном кожухе и представляют собой один блок. Его масса и габариты в 2 раза меньше, чем у УК с ЭМК (см. § 1-5) при той же мощности на выходе. Принципиальная схема регулятора приведена на рис. 1-21.

Устройство фазового компаундирования состоит из многообмоточного трансформатора с подмагничиванием УТП (трансформаторный магнитный усилитель), фазосдвигающего дросселя ДФ и автотрансформатора АТ.

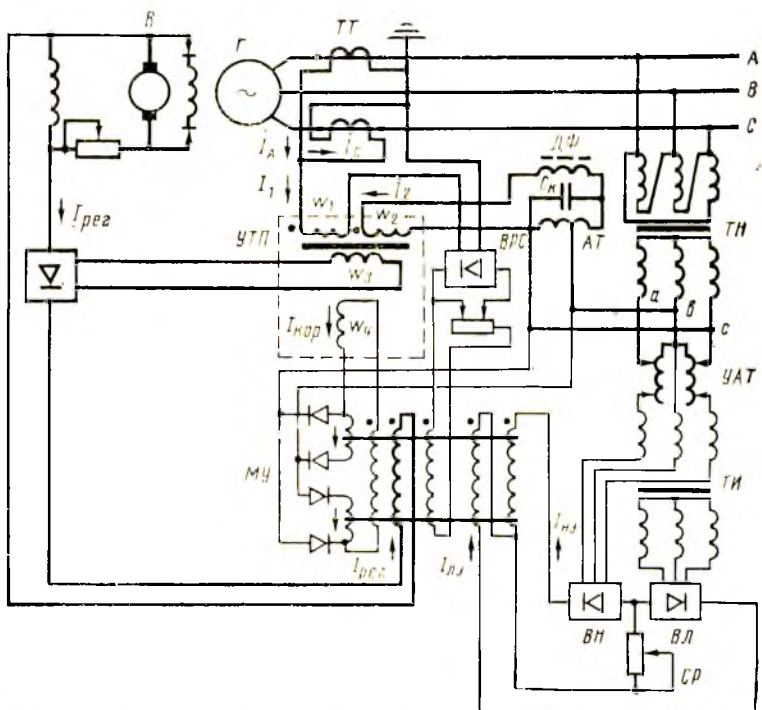


Рис. 1-21. Принципиальная схема регулятора УБК-3 (РВА-62).

Магнитопровод УТП состоит из двух Ш-образных сердечников. Катушки подмагничивающей обмотки ω_1 включены так, что отсутствует трансформаторная связь между обмотками переменного тока и подмагничивающей обмоткой.

Дроссель ДФ имеет воздушный зазор и служит балластным сопротивлением в цепи обмотки ω_2 . Дроссель создает фазовый сдвиг примерно 60° .

Для проверки правильности фазировки питающих цепей построим векторную диаграмму токов I_1 и I_2 при $\cos \varphi = 1$ (рис. 1-22).

На диаграмме:

$\dot{U}'_{AB}, \dot{U}'_{BC}, \dot{U}'_{CA}$ — междуфазные напряжения генератора, приведенные ко вторичной стороне трансформатора напряжения ТН;

$\dot{U}_{bc}$ — напряжение на автотрансформаторе АТ:

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}'_{bc} + \dot{U}'_{AC}.$$

Ток I_1 отстает от $\dot{U}_{bc}$ на 60° ; $I_1 = I_A - I_C$. Из диаграммы видно, что I_1 опережает I_2 на 90° .

Конденсатор C_k компенсирует реактивную мощность в цепи обмотки ω_2 , за счет чего значительно разгружается ТН.

Электромагнитный корректор напряжения состоит из измерительного органа (ТИ с выпрямителями ВЛ и ВН) и промежуточного магнитного усилителя МУ, выход которого включен на подмагничивающую обмотку УТП. Принцип работы измерительного органа рассмотрен в § 1-3. Регулировочный резистор СР предназначен для одновременного изменения токов $I_{ЛЭ}$ и $I_{НЭ}$ при наладке регулятора.

Промежуточный магнитный усилитель МУ выполнен с внутренней и внешними обратными связями. Внутренняя обратная связь направлена согласно с током $I_{НЭ}$, поэтому выходная характеристика корректора соответ-

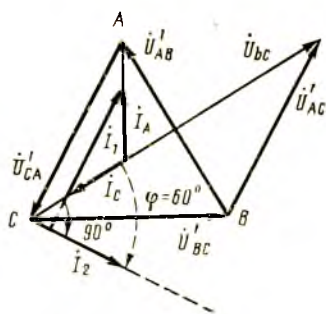


Рис. 1-22. Векторная диаграмма токов и напряжений питающих цепей УТП при $\cos \varphi = 1$.

ствуется противовключенной схеме и имеет вид, показанный на рис. 1-12 кривой 2.

Характеристики регулятора — семейство зависимостей выходного тока регулятора от напряжения генератора при определенных токах нагрузки и коэффициенте мощности — показаны на рис. 1-23.

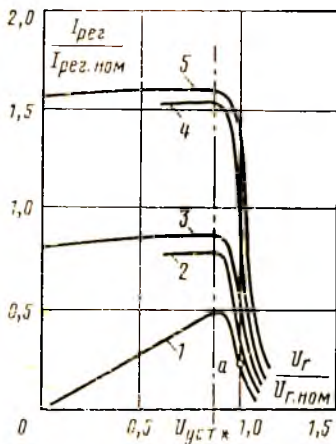


Рис. 1-23. Характеристики регулятора без дополнительных обратных связей.

1 — $I_r = 0$; 2 — $I_r = 0,5 I_{ном}$; $\cos \varphi >$
 $> \cos \varphi_{ном}$; 3 — $I_r = 0,5 I_{ном}$; $\cos \varphi <$
 $< \cos \varphi_{ном}$; 4 — $I_r = I_{ном}$; $\cos \varphi >$
 $> \cos \varphi_{ном}$; 5 — $I_r = I_{ном}$; $\cos \varphi <$
 $< \cos \varphi_{ном}$.

При $U_g > U_{уст}$ подмагничивание УТП током корректора резко возрастает, следовательно, уменьшается выходной ток регулятора. Рабочая точка (U_g , $I_{рег}$) должна находиться на крутопадающем участке характеристик регулятора для обеспечения регулирования возбуждения при колебаниях напряжения.

Из характеристик, приведенных на рис. 1-23, следует, что с уменьшением коэффициента мощности при одном и том же U_g и, следовательно, $I_{кор}$ ток выхода регулятора $I_{рег}$ возрастает, что облегчает условия работы корректора.

Вследствие зависимости $I_{рег}$ от коэффициента мощности генератора обратная связь МУ по току выхода регулятора различно смещает характеристики регулятора по оси U_g в зависимости от коэффициента мощности и, таким образом, изменяет фазочувствительность регулятора.

Обратная связь по току выхода корректора позволяет изменять крутизну характеристик в соответствии с условиями устойчивости регулирования.

Обратная связь по току статора, осуществляемая через выпрямитель ВРС, позволяет менять зависимость характеристик регулятора от тока статора и используется для установки требуемого статизма системы регулирования по току статора.

Изменяя с помощью обратных связей взаимное расположение характеристик регулятора, можно настроить систему регулирования как с положительным, так и с отрицательным статизмом. Сместив кривые 2—5 (рис. 1-23) вправо, получим отрицательный статизм, влево — положительный.

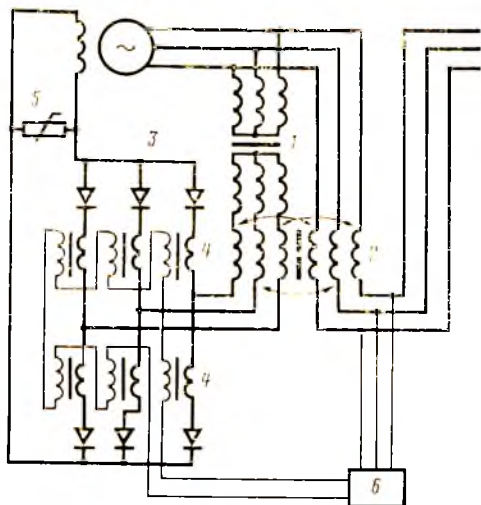


Рис. 1-24. Принципиальная схема силового фазового компаундирования.

Устойчивость регулирования на холостом ходу и при нагрузке достигается без применения дополнительных элементов стабилизации благодаря высокому быстродействию корректора и малому коэффициенту усиления.

Форсировочная способность регулятора с управляемым фазовым компаундированием при к. з. и глубоких снижениях напряжения выше, чем УК с ЭМК. Обусловлено это тем, что коэффициент трансформации УТП выбирается с учетом подмагничивания, т. е. он значительно меньше, чем при обычном компаундировании. При понижении напряжения подмагничивание исчезает и степень компаундирования резко возрастает.

б) Для гидрогенераторов со статической системой самовозбуждения целесообразно применять систему силового фазового компаундирования, которая включается непосредственно на обмотку возбуждения

генератора [27]. На заводе «Уралэлектротяжмаш» имени В. И. Ленина принята система, принципиальная схема которой показана на рис. 1-24.

В схеме силового фазового компаундирования применено электрическое суммирование напряжений от трансформатора напряжения 1 и последовательного трансформатора с воздушным зазором 2. Управление фазовым компаундированием осуществляется подмагничиванием дросселей 4, включенных в плечи выпрямительного моста 3, током корректора 6. Резистор с нелинейной характеристикой 5 служит для снижения обратных напряжений на вентилях в аварийных режимах.

Основное регулирование возбуждения осуществляется со стороны трансформаторов 1 и 2 схемы возбуждения. Роль регулятора 6 сводится только к некоторой корректировке возбуждения генератора с целью получения требуемого статизма, при отклонении частоты от номинальной, при изменении температуры ротора.

Пример 1-3. Выбрать модификацию и основные параметры регулятора РВА-62 (УБК-3) для генератора Т2-25-2 с возбудителем ВТ-120-3000 [9, 24].

Исходные данные (из примера 1-2):

$U_{f\text{ х.х}}=76$ В; $I_{\text{в.в.х.х}}=2,1$ А — напряжение возбуждения генератора и ток возбуждения возбудителя в режиме холостого хода генератора;

$U_{f2}=204$ В; $I_{\text{н.в}2}=6,9$ А при наименьшем $\cos \varphi$;

$R_{\text{в.о}70^\circ}=14,5$ Ом — сопротивление основной обмотки возбуждения возбудителя при 70°C .

Для выбора модификации регулятора необходимо определить требуемые выходные величины регулятора: $U_{\text{макс}}$ и $I_{\text{макс}}$ — максимальные рабочие значения выпрямленного напряжения и тока регулятора, которые определяются в режиме полной нагрузки нагретого генератора с наименьшим $\cos \varphi$ при пониженной частоте и повышенном напряжении по соотношениям:

$$0,75U_{\text{макс}} \geq I_{\text{в.в}2}R_{\text{в.о}}; \quad 0,75I_{\text{макс}} \geq I_{\text{н.в}2} - I_{\text{св}2}.$$

Ток самовозбуждения в этом режиме $I_{\text{св}2}$ выбирается таким, чтобы в режиме холостого хода $I_{\text{св.х.х}}$ был менее $0,85I_{\text{в.в.х.х}}$

$\left(R_{\text{св}} \geq \frac{U_{f\text{ х.х}} - I_{\text{в.в.х.х}}R_{\text{в.о}}}{0,85I_{\text{в.в.х.х}}} \right)$, т. е. чтобы обеспечивалась возможность регулирования:

$$\begin{aligned} I_{\text{св}2} &= \frac{U_{f2} - I_{\text{н.в}2}R_{\text{в.о}}}{R_{\text{св}}} \leq 0,85I_{\text{в.в.х.х}} \frac{U_{f\text{ х.х}} - I_{\text{в.в.х.х}}R_{\text{в.о}}}{U_{f\text{ х.х}} - I_{\text{в.в.х.х}}R_{\text{в.о}}} = \\ &= 0,85 \cdot 2,1 \cdot \frac{204 - 6,9 \cdot 14,5}{76 - 2,1 \cdot 14,5} = 4,08 \text{ А.} \end{aligned}$$

Рекомендуется выбирать значение $I_{св2}$ в пределах (0,5 — 0,65) $I_{в.в2}$. Принимаем $I_{св2} = 3,9$ А, тогда

$$I_{\text{макс}} \geq \frac{6,9 - 3,9}{0,75} = 4 \text{ А}; U_{\text{макс}} \geq \frac{6,9 \cdot 14,5}{0,75} = 133 \text{ В}.$$

Сравнивая полученные значения $U_{\text{макс}}$ и $I_{\text{макс}}$ с данными табл. 1-1, выбираем модификацию 2.

Таблица 1-1

Основные параметры РВА-62 (УБК-3)

Модификация	Максимальные рабочие значения на выходе регулятора (выпрямленные)		Максимальное допустимое обратное напряжение при релейной форсировке, В
	Напряжение, В	Ток, А	
1	70	9,0	250
2	140	4,5	500

При необходимости можно удвоить допустимые величины напряжения или тока регулятора, используя два трансформатора УТН с общим корректором.

1-8. АРВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ТИПА ТВВ С ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СИСТЕМОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Принципиальная схема системы возбуждения была рассмотрена в § 1-1. АРВ осуществляется автоматическим регулятором возбуждения типа ЭПА-325. Регулятор предназначен для обеспечения начального возбуждения генератора, поддержания напряжения генератора в заданных пределах в нормальных режимах работы, а также для обеспечения форсировки возбуждения генератора при коротких замыканиях в сети.

Основные элементы регулятора (рис. 1-25):

противовключенный электромагнитный корректор напряжения ЭМК;

устройство бесконтактной форсировки УБФ;

блок ограничения форсировки БОФ;

устройство начального возбуждения;

устройство расфорсировки.

Электромагнитный корректор напряжения осуществляет регулирование возбуждения турбогенератора в нормальных режимах при небольших колебаниях напряжения. Он получает питание от подвозбудителя ПВ

тренней обратной связью и выпрямительный мост. УБФ работает по принципу согласованного корректора и воздействует на обмотку независимого возбуждения *ОВВ2*, которая включена согласованно с последовательной обмоткой возбуждения возбуждителя. При снижении напряжения турбогенератора УБФ увеличивает ток в согласованной обмотке возбуждения, что обеспечивает форсировку возбуждения турбогенератора.

Блок ограничения форсировки БОФ предназначен для предотвращения повышения напряжения возбуждителя в процессе форсировки выше заданного потолочного значения. Необходимость БОФ обусловлена тем, что кратность форсировки высокочастотного индукторного генератора больше двух. Выход БОФ, который получает питание от одной из рабочих обмоток индукторного генератора, включен на обмотки управления магнитных усилителей ЭМК и УБФ. Работает БОФ по принципу противовключенного корректора. При увеличении напряжения возбуждения выше заданного значения ток выхода БОФ резко возрастает, в результате чего возрастает ток выхода ЭМК и снижается ток выхода УБФ.

Начальное возбуждение индукторного генератора при вводе системы возбуждения в работу производится подачей выпрямленного тока от подвозбудителя ПВ в согласованную обмотку *ОВВ2*.

Расфорсировка выполняется путем изменения уставки блока ограничения форсировки подачей тока подмагничивания от ПВ на обмотку управления ОУ измерительного трансформатора ТИВ. Устройство расфорсировки срабатывает при длительном повышении напряжения индукторного генератора.

На турбогенераторах типов ТВВ-165-2 и ТВВ-200-2 применяется высокочастотная система возбуждения в одномашинном исполнении без подвозбудителя. Начальное возбуждение осуществляется подачей выпрямленного тока от собственных нужд, а ЭМК и устройство расфорсировки получают питание от рабочей обмотки возбуждителя 500 Гц.

Пример 1-4. Расчет режимов работы автоматического регулятора возбуждения типа ЭПА-325 генератора ТВВ-165-2 [25].

Параметры генератора:

$P_{ном}=150$ МВт; $U_{ном}=18$ кВ; $\cos \varphi_{ном}=0,85$,
сопротивление обмотки ротора постоянному току $R_f=0,131$ Ом при $t=15^\circ\text{C}$.

По данным испытаний: ток ротора $I_f=370$ А в режиме прогресса на холостом ходу при $U_r=0,5U_{ном}$, температура ротора $t=60^\circ\text{C}$; $I_{f\text{ х.х}}=780$ А — холостой ход при $U_r=U_{ном}$, $t=60^\circ\text{C}$; $I_{f\text{ ном}}=1880$ А — режим номинальной нагрузки, $t=105^\circ\text{C}$.

Сопротивление ротора:
при $t=60^\circ\text{C}$

$$R_f = 0,131 \frac{235 + 60}{235 + 15} = 0,155 \text{ Ом};$$

при $t=105^\circ\text{C}$

$$R_f = 0,131 \frac{235 + 105}{235 + 15} = 0,178 \text{ Ом}.$$

Нагрузочные характеристики полупроводниковой системы возбуждения с возбудителем типа ВГТ-2500-500 приведены в табл. 1-2.

Таблица 1-2

Нагрузочные характеристики возбудителя ВГТ-2500-500

М. д. с. возбуждения ВГТ $\Sigma A w_{\text{в}}$, А	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400
Выпрямленное напряжение U_d , В, при: $R_f=0,155$ $R_f=0,178$	40 44	80 88	120 130	158 172	196 214	240 263	275 305	316 350

Приведенные в таблице координаты точек нагрузочных характеристик получены графически по внешним характеристикам $U_d = f(I_d)$ при $\Sigma A w_{\text{в}} = \text{вар}$, снятым при возбуждении от независимой обмотки, и по прямым $U_d = I_d R_f$.

- 1) Для каждого из расчетных режимов определяются:
напряжение ротора $U_f = U_d = I_f R_f$;
полная м. д. с. возбуждения ВГТ $\Sigma A w_{\text{в}}$ — по соответствующей нагрузочной характеристике и значениям U_d ;
м. д. с. обмотки последовательного возбуждения

$$A w_{\text{ОВВ1}} = I_f k_{\text{ш}} \frac{w_{\text{ОВВ1}}}{n_{\text{п}}},$$

где $k_{\text{ш}}$ — коэффициент, учитывающий шунтирование $ОВВ_1$ ($R_{\text{ОВВ1}} = 4,5 \cdot 10^{-4}$ Ом) сопротивлением $R_{\text{ш}} = 0,0155$:

$$k_{\text{ш}} = \frac{0,0155}{0,0155 + 0,00045} = 0,97;$$

$w_{\text{ОВВ1}}=5$ — число витков обмотки $ОВВ_1$ на полюс; $n_{\text{п}}=4$ — число полюсов статора.

Обмотки полюсов соединены параллельно, следовательно,

$$A w_{\text{ОВВ1}} = I_f 0,97 \frac{5}{4} = I_f 1,21;$$

м. д. с. обмоток независимого возбуждения $ОВВ_2$ и $ОВВ_3$

$$A w_{\text{о. н. в}} = \Sigma A w_{\text{п}} - A w_{\text{ОВВ1}};$$

разность токов в обмотках независимого возбуждения согласованной ОВВ2 (УБФ) и противовключенной ОВВ3 (ЭМК)

$$I_{УБФ} - I_{ЭМК} = \frac{AW_{О.Н.В}}{w_{О.Н.В}},$$

где $w_{О.Н.В}=32$ — число витков каждой обмотки независимого возбуждения на полюс.

Результаты расчетов приведены в табл. 1-3.

Таблица 1-3

Расчет токов обмоток независимого возбуждения

Режим		I_f, A	U_f, B	$\Sigma Aw_f, A$	$Aw_{ОВВ1}, A$	$Aw_{О.Н.В}, A$	$I_{УБФ} - I_{ЭМК}, A$
Прогрев при $U_r = 0,5U_{ном}$		370	57	430	447	-17	-0,53
Холостой ход $U_r = U_{ном}$		780	121	910	943	-33	-1,03
Номинальная нагрузка		1880	335	2300	2270	+30	+0,94

Вывод: на холостом ходу и при малых нагрузках ток ЭМК несколько превосходит ток УБФ, при номинальной нагрузке — наоборот. В рассмотренных режимах регулятор работает вблизи точки пересечения характеристик ЭМК и УБФ.

2) Определение точки перегиба выходной характеристики блока ограничения форсировки производится по формуле:

$$U_{БОФ} = \frac{2I_{fном}R_f}{2\beta_u k_n}, \quad (1-10)$$

где $\beta_u=1,01$ — коэффициент выпрямления силовых кремниевых мостов по напряжению; $k_n=1,07$ — коэффициент неравномерности распределения напряжения между шкафами ВУ; $R_f=0,155$ Ом — сопротивление холодного ротора; $I_{fном}=1880$ А.

Подставим эти величины в формулу:

$$U_{БОФ} = \frac{2 \cdot 1880 \cdot 0,155}{2 \cdot 1,01 \cdot 1,07} = 270 \text{ В.}$$

При такой настройке БОФ напряжение на роторе будет ограничиваться значением

$$U_f = 270 \cdot 2\beta_u k_n = 270 \cdot 2 \cdot 1,01 \cdot 1,07 = 584 \text{ В,}$$

которое соответствует кратности форсировки, равной 2 при холодном роторе. Кратность форсировки на горячий ротор:

$$k_\Phi = \frac{584}{0,178 \cdot 1880} = 1,75.$$

1-9. АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ВОЗБУЖДЕНИЯ СИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Автоматический регулятор возбуждения сильного действия (АРВ СД) называется так потому, что в отличие от пропорциональных регуляторов (§ 1-3—1-8) интенсивность воздействия его на систему возбуждения значительно превышает относительное изменение регулируемого параметра.

Отличительные особенности АРВ СД:

реагирует на несколько параметров режима синхронной машины и на их производные по времени;

имеет большие коэффициенты усиления и высокое быстродействие;

применяется на турбогенераторах, гидрогенераторах и синхронных компенсаторах с быстродействующими системами возбуждения — ионной или тиристорной.

Выбор параметров режима, по которым осуществляется сильное регулирование, и коэффициентов передачи регулятора является основной задачей, возникающей при конструировании регуляторов, а также при наладке перед включением в эксплуатацию. Этот выбор определяется параметрами синхронных машин и энергосистемы, а также возможностью измерения тех или иных параметров режима. Производится указанный выбор путем расчетов на аналоговых и цифровых вычислительных машинах, экспериментов на динамических моделях и в энергосистеме.

Наиболее эффективное регулирование, обеспечивающее устойчивость параллельной работы в различных режимах, может быть осуществлено при использовании наряду с отклонением напряжения ΔU отклонения и производных угла δ между векторами э. д. с. генератора и напряжения приемной части энергосистемы: $\Delta\delta$, δ' и δ'' . Однако параметры угла и его производных не используются из-за недостаточной надежности телепередачи фазы напряжения шин приемной энергосистемы. Вместо них используют отклонение и первую производную частоты Δf и f' , что практически равноценно δ' и δ''

$$\left(\Delta f = \frac{1}{2\pi} \delta'; f' = \Delta f' = \frac{1}{2\pi} \delta'' \text{ при } f_{\text{сист}} = \text{const} \right).$$

В настоящее время для регуляторов возбуждения сильного действия принято регулирование по отклоне-

нию напряжения ΔU , первой производной напряжения U' , отклонению частоты Δf , первой производной частоты f' , при наличии жесткой отрицательной обратной связи с колец ротора на вход регулятора. Коэффициенты передачи по этим входам имеют значения:

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

$$k_{U'} = 0 \div 7,5 \text{ ед. возб./ед. напр./с};$$

$$k_{\Delta f} = 0 \div 12 \text{ ед. возб./Гц}; \quad k_{f'} = 0 \div 5 \text{ ед. возб./Гц/с}.$$

Единица возбуждения соответствует возбуждению при номинальном режиме генератора, единица напряжения — номинальному напряжению статора.

По этому закону осуществляют регулирование возбуждения АРВ гидрогенераторов станций, выдающих мощность в нескольких направлениях (Братская, Саратовская, Красноярская ГЭС), турбогенераторов ТГВ-300, ТГВ-500 и синхронных компенсаторов КСВ-100000.

В случае передачи электроэнергии от мощной ГЭС в одном направлении возможно применение регуляторов, реагирующих на параметры ΔU , U' , ΔI , I' , I'' , при наличии жесткой отрицательной связи с колец ротора. Здесь ΔI , I' и I'' — отклонение, первая и вторая производные тока линии.

Для мощных синхронных компенсаторов приемных подстанций дальних линий электропередачи используются регуляторы сильного действия, реагирующие на ΔU , U' , U'' , ток статора.

Автоматическое регулирование возбуждения сильного действия обеспечивает:

доведение предела статической устойчивости передачи $P_{\text{макс}}$ до предела линии благодаря возможности почти полной компенсации потери напряжения на реактивных сопротивлениях генераторов и трансформаторов; увеличение предельной передаваемой мощности по условиям динамической устойчивости благодаря интенсивному успокоению качаний после отключения коротких замыканий;

лучшее поддержание необходимого уровня напряжения в заданной точке электропередачи и уменьшение колебаний напряжения в системах с толчкообразной нагрузкой;

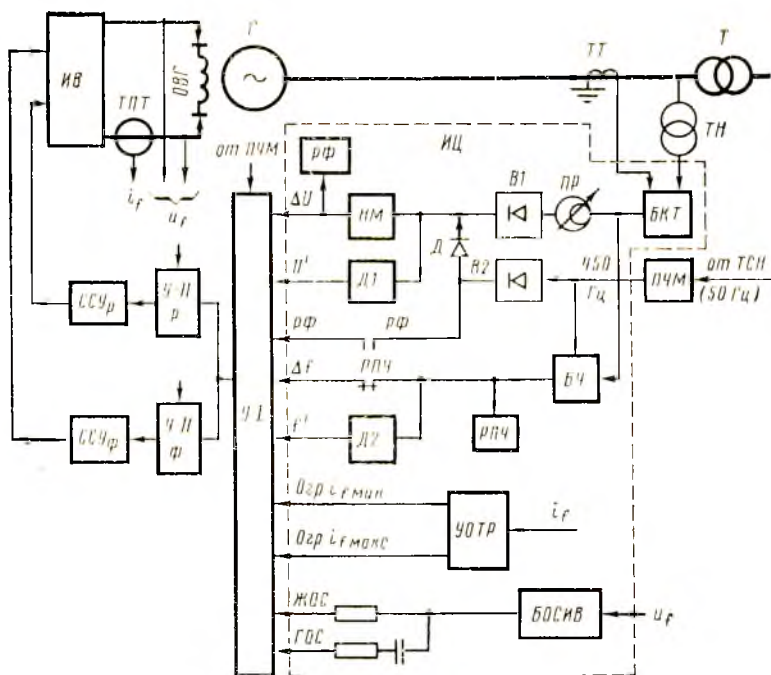


Рис. 1-26. Функциональная схема регулятора возбуждения сильного действия.

снижение стоимости изготовления генераторов в связи с понижением требований к некоторым параметрам (допустимо увеличение переходного x'_d и синхронного x_d сопротивлений и уменьшение постоянной инерции T_J).

Система сильного регулирования возбуждения состоит из управляемого преобразователя (ионного или тиристорного, § 1-1) и собственно регулятора сильного действия. Регуляторы различного назначения — для турбогенераторов, гидрогенераторов или синхронных компенсаторов — выполняются по однотипным схемам. Разработаны они во Всесоюзном электротехническом институте (ВЭИ) имени В. И. Ленина.

Рассмотрим функциональную схему и принцип действия АРВ турбогенераторов ТГВ-200 и ТГВ-300 с регулятором АРВ-300И.

Регулятор сильного действия состоит из четырех функциональных частей (рис. 1-26): измерительные цепи

ИЦ, двухкаскадный магнитный усилитель (У-І, У-ІІР, У-ІІФ), источник питания магнитных усилителей — преобразователь частоты ПЧМ и система сеточного управления (ССУ_р, ССУ_ф).

Измерительные цепи состоят из нескольких входных каналов: канал напряжения (ΔU , U'), канал частоты (Δf , f'), канал тока ротора ($O_{\text{эр}} i_f$) и канал обратной связи по напряжению ротора U_f от обмотки возбуждения генератора ОВГ.

Измерительные цепи ΔU , U' , Δf , f' питаются от трансформатора напряжения ТН через блок компаундирования по току БКТ, выполняющий роль устройства установки статизма.

БКТ (рис. 1-27) состоит из двух промежуточных трансформаторов тока ПТТ_А и ПТТ_С и двух резисторов R. Напряжения на выходе БКТ:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{12} &= \frac{\dot{U}_{AB}}{n_{\text{ПТ}}} - \frac{i_C R}{n_{\text{ТТ}} n_{\text{ПТТ}}}; \\ \dot{U}_{23} &= \frac{\dot{U}_{BC}}{n_{\text{ПТ}}} - \frac{i_A R}{n_{\text{ТТ}} n_{\text{ПТТ}}}; \\ \dot{U}_{31} &= \frac{\dot{U}_{CA}}{n_{\text{ПТ}}} - \frac{i_B R}{n_{\text{ТТ}} n_{\text{ПТТ}}}, \text{ так как } i_B = -(i_A + i_C). \end{aligned}$$

Данная фазировка цепей тока и напряжения БКТ обеспечивает отрицательный статизм характеристики регулирования напряжения по реактивному току и, следовательно, компенсацию потери напряжения на реактивном сопротивлении блочного трансформатора Т.

Канал напряжения включает потенциал-регулятор ПР с устройством дистанционного управления (на рис. 1-26 не показано), трехфазный выпрямитель В1, нелинейный мост НМ, реле форсировки РФ, выпрямитель подпора В2. Ио-

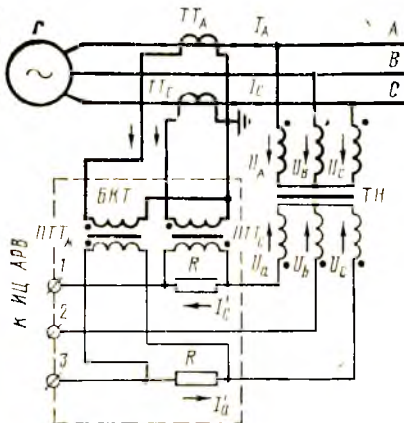


Рис. 1-27. Схема блока компаундирования по току (БКТ).

тенциал-регулятор служит для изменения уставки регулятора по напряжению в пределах $\pm 10\text{--}15\%$.

В качестве измерительного элемента использован нелинейный мост *НМ* на кремниевых стабилитронах (см. § 1-3, рис. 1-11,а), на выход которого включена одна из обмоток управления суммирующего усилителя *У-1*. Чтобы при значительных понижениях напряжения генератора выходной ток измерительного органа не снижался (см. рис. 1-11,б), в схему измерительного моста введен подпорный выпрямитель *В2*, который питается от стабилизированного источника напряжения 450 Гц (*ПЧМ*). В нормальном режиме *В2* дает $\sim 65\%$ номинального напряжения питания измерительного моста и влияния на работу канала напряжения не оказывает, так как диод *Д* заперт напряжением *В1*. При значительных понижениях напряжения генератора (например, из-за близких коротких замыканий) напряжение на входе моста не может стать меньше напряжения подпора.

В канал напряжения входит и цепь реле форсировки *РФ*, имеющего уставку $(0,8\text{--}0,95) U_{\text{ном}}$ и задержку при возврате 60—80 мс. Реле предназначено для сохранения форсировки по цепи *РФ* сразу после отключения короткого замыкания, поскольку цепь производной по напряжению (и по производным тока, если эти цепи есть в регуляторе) в момент отключения короткого замыкания дает сигнал на развозбуждение.

С выхода канала напряжения через дифференцирующее звено *Д1* на вход *У-1* подается сигнал, пропорциональный производной напряжения статора *U'*.

Дифференцирующее звено состоит из конденсатора и переменного резистора, обеспечивающих возможность ступенчатого изменения коэффициента усиления k_U' .

Канал частоты состоит из блока частоты *БЧ*, дифференцирующего звена *Д2* и реле повышения частоты *РПЧ*. Блок частоты (рис. 1-28) содержит два резонансных контура с резонансными частотами 45 Гц (*Д1—С1*) и 55 Гц (*Д2—С2*). Выпрямленные токи контуров подаются встречно на обмотки управления магнитного усилителя *МУ*. При частоте 50 Гц сумма м. д. с. управления равна нулю. В зависимости от знака отклонения частоты преобладает ток того или другого контура, т. е. знак м. д. с. и выходного напряжения дифференциального усилителя *МУ* определяется знаком Δf . Значение выход-

ного напряжения в диапазоне частот 47,5—51,5 Гц приблизительно пропорционально Δf .

Кремниевые стабилитроны $Ст1$ и $Ст2$ осуществляют стабилизацию напряжения питания $БЧ$ и тем самым устраняют зависимость характеристики блока от напряжения генератора.

Дифференцирующее звено $Д2$ (см. рис. 1-26), выполненное по такой же схеме, что и $Д1$, формирует сигнал, пропорциональный производной частоты f' .

Реле повышения частоты $РПЧ$ срабатывает при повышении частоты выше 51,5 Гц и отключает цепь Δf от $У-1$, предотвращая неоправданную форсировку возбуждения при сбросе нагрузки.

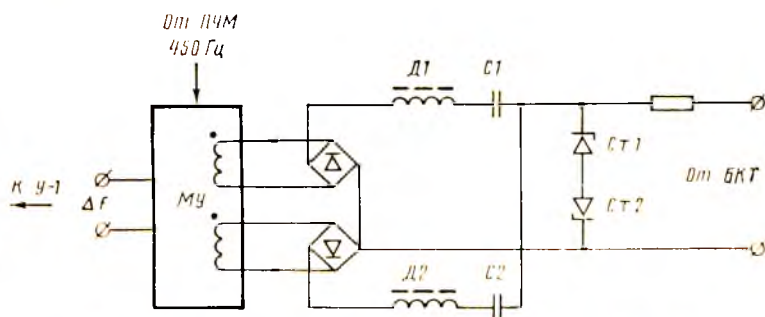


Рис. 1-28. Упрощенная схема блока частоты (БЧ).

Канал тока ротора состоит из трансформатора постоянного тока $ТПТ$, органов мгновенного ограничения максимального $Огр i_{f \max}$ и минимального тока ротора $Огр i_{f \min}$ и органа ограничения перегрузки с выдержкой времени, зависящей от величины перегрузки $ООП$, и может включаться на суммирующий магнитный усилитель $У-1$ (рис. 1-29) или непосредственно на $ССУ$.

Трансформатор постоянного тока $ТПТ$, представляющий собой магнитный усилитель, служит для измерения тока ротора i_f . Вторичный ток $ТПТ$ создает на нагрузочном резисторе $R1$ напряжение U_{R1} , пропорциональное i_f , которое является управляющим параметром схемы.

Ограничение максимального тока ротора величиной $2I_{f \text{ ном}}$ необходимо в связи с пониженной термической устойчивостью мощных турбогенераторов, которые допускают двукратную форсировку возбуждения всего до 20 с. Ограничение осуществляется цепью $Ст5$, $Ст6$, $R9$.

При $i_f = 2I_{fном}$: $U_{R1} = U_{ст5} + U_{ст6}$, где $U_{ст5}$ и $U_{ст6}$ — уровни стабилизации. Дальнейшее увеличение тока ротора приводит к появлению тока в управляющей обмотке $У-I$, который вызывает интенсивное действие АРВ на понижение возбуждения. Коэффициент усиления по каналу ограничения регулируется резистором $R9$ и может достигать 200—250 ед. возб./ед. тока. Для предотвращения нарушения устойчивости регулирования применяется гибкая обратная связь $R10—C1$.

Ограничение минимального тока ротора необходимо для предотвращения нарушения статической устойчивости параллельной работы генератора в результате снижения тока ротора под действием АРВ при повышении напряжения в сети из-за избытка реактивной мощности. Минимальная уставка ограничителя снизу составляет 75% тока возбуждения холостого хода $I_{fхх}$. Она опре-

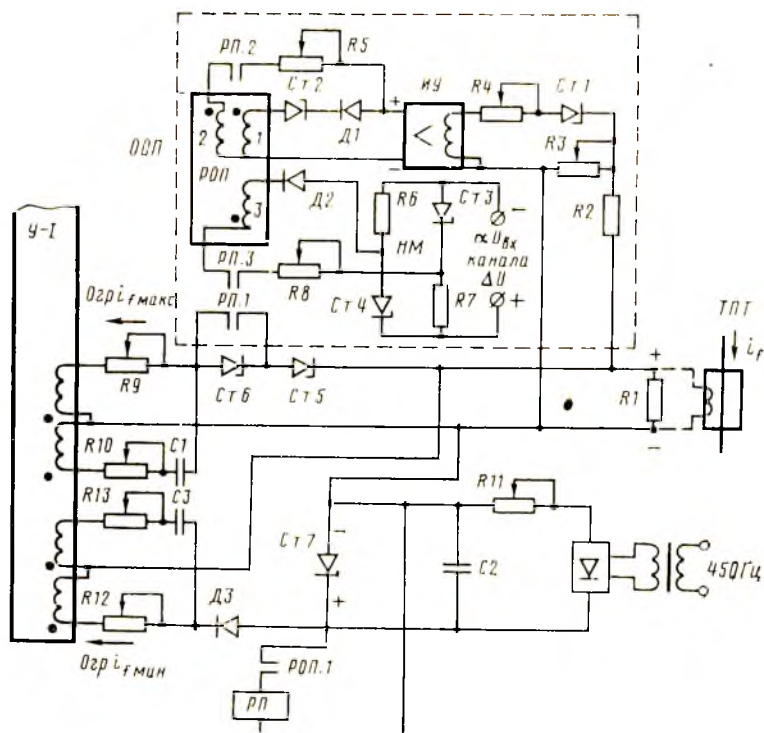


Рис. 1-29. Принципиальная схема узла ограничения тока ротора.

деляется величиной эталонного напряжения U_0 на стабильтроне $Ст7$. При $U_{R1} < U_0$ в управляющей обмотке $У-I$ появляется ток, приводящий к интенсивному повышению возбуждения генератора. При $U_{R1} > U_0$ ток не протекает благодаря наличию диода $ДЗ$. Гибкая обратная связь $R13—C3$ повышает устойчивость регулирования.

Перегрузка при $I_{f\text{ ном}} < i_f < 2I_{f\text{ ном}}$ ограничивается органом ограничения перегрузки $ООП$ с зависимой выдержкой времени. Выдержка времени должна быть такой, чтобы перегрев ротора не превысил допустимой величины. При токе $i_f > 1,3 I_{f\text{ ном}}$ процесс нагрева ротора близок к адиабатическому (тепло, выделяемое в роторе, идет на повышение его температуры) и зависимость перегрева обмотки от перегрузки определяется соотношением:

$$\Theta = k \int_0^t (i_f - I_{f\text{ ном}})^2 R_f dt; i_f > I_{f\text{ ном}} \quad (1-11)$$

В схеме $ООП$ реализуется данное выражение: напряжение $U_{R1} \frac{R_3}{R_2 + R_3} - U_{ст1}$, пропорциональное $i_f - I_{f\text{ ном}}$, возводится в квадрат и интегрируется интегрирующим усилителем $ИУ$ с емкостной обратной связью. Как только напряжение на выходе $ИУ$ (Θ) превысит $U_{ст2}$, срабатывает реле ограничения перегрузки $РОП$ и контактом $РОП.1$ запускает реле-повторитель $РП$, которое контактом $РП.1$ шунтирует стабильтрон $Ст6$ в цепи ограничения максимума. Этим уставка ограничителя снижается до $I_{f\text{ ном}}$. Реле $РП$ одновременно замыкает цепи самоудерживания (контакт $РП.2$, обмотка $2РОП$, $R5$) и возврата $РОП$ (контакт $РП.3$, обмотка $3РОП$, $Д2$, $НМ$ — нелинейный мост). Ток в цепи возврата $РОП$ начинает протекать только при $U_{г} > 0,9U_{г\text{ ном}}$, когда напряжение на выходе $НМ$ меняет знак и возрастает с увеличением $U_{г}$. Ток в цепи самоудерживания снижается при понижении напряжения на выходе $ИУ$. Возврат произойдет тем быстрее, чем больше $U_{г}$ и меньше $U_{ИУ}$, пропорциональное Θ .

Канал обратных связей по напряжению ротора содержит жесткую обратную связь $ЖОС$ и гибкую — $ГОС$. $ЖОС$ служит для уменьшения постоянной времени и ли-

неаризации характеристик АРВ, ГОС — для повышения устойчивости АРВ. В блок обратной связи поного возбудителя входит разделительное устройство, устраняющее гальваническую связь между входом и выходом блока и предотвращающее тем самым возможность попадания высоковольтного потенциала роторной цепи в измерительные цепи регулятора. Постоянное напряжение на входе БОСНВ преобразуется модулятором в переменное, которое затем трансформируется и демодулируется.

Суммирующий двухкаскадный магнитный усилитель осуществляет суммирование и усиление сигналов, поступающих по входным каналам. Оба каскада выполнены по дифференциальной схеме. Вторые каскады усилителя У-ПР и У-ПФ включены на системы сеточного управления рабочей и форсировочной групп.

Система сеточного управления (ССУ). Системы сеточного управления ССУ_р и ССУ_ф осуществляют управление открытием клапанов рабочей и форсировочной групп. Они формируют положительные сеточные импульсы с вертикальным фронтом с определенной амплитудой и длительностью и регулируют момент подачи импульса в зависимости от сигнала управления со стороны АРВ. На генераторах, вводимых в работу до 1969 г., использовалась электромагнитная ССУ. В настоящее время устанавливают полупроводниковую систему типа ССУП-4, разработанную ВНИИЭМ. Переход к новой ССУ связан с тем, что прежняя из-за недостаточной мощности не обеспечивала четкую работу клапанов ЭВУ-250/2,5 в различных режимах. Система управления тиристорным преобразователем (СУТ) аналогична ССУП.

Полупроводниковая система типа ССУП-4 использует вертикальный принцип фазосмещения и формирования управляющих импульсов при помощи транзисторных мультивибраторов. ССУП-4 для каждой группы клапанов разделена на 6 каналов, в каждом из которых самостоятельно производится фазосмещение управляющего импульса для одного ртутного клапана.

Вертикальный принцип фазосмещения заключается в изменении момента перехода через нулевое значение разности опорного синусоидального и управляющего постоянного напряжения при изменении последнего. В ССУП-4 образование импульса в момент перехода результирующего входного сигнала через нуль осуществ-

вляется фиксирующим усилителем на транзисторах $T1$ и $T2$, упрощенная схема которого показана на рис. 1-30, а. Кривые входных напряжений (опорного $u_{оп}$ и управляющего u_y), а также выходного напряжения ССУ $u_{ССУ}$ при двух значениях u_y показаны на рис. 1-30, б.

Пока результирующее входное напряжение $u_{вх} = u_{оп} - u_y > 0$, транзистор $T1$ закрыт, а $T2$ открыт. В момент изменения знака фиксирующий усилитель срабатывает: $T1$ открывается, $T2$ закрывается. Полупроводни-

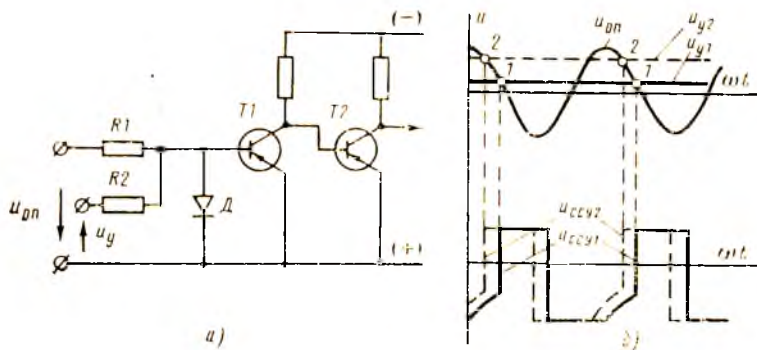


Рис. 1-30. Упрощенная схема фиксирующего усилителя (а) и кривые входных и выходного напряжений ССУП-4 (б).

ковая схема, подключенная к фиксирующему усилителю, запускается и формирует выходное напряжение $u_{ССУ}$ (рис. 1-30, б). Чем больше управляющее напряжение u_y , тем раньше происходит срабатывание ($u_y < u_{оп. макс.}$), т. е. уменьшается угол регулирования вентиля. Величина u_y может изменяться вручную или от АРВ.

Быстродействие регулятора сильного действия достигается благодаря применению магнитных усилителей с частотой питания 450 Гц. Источником питания 450 Гц является стабилизированный **статический преобразователь частоты** на магнитных элементах ПЧМ (рис. 1-31). Преобразование напряжения 50 Гц в напряжение 450 Гц в схеме ПЧМ производится статическим умножителем частоты — удевятерителем. Удевятеритель состоит из девяти трансформаторов $T1—T9$, результирующие магнитные потоки которых образуют девятифазную симметричную систему $\Phi_1—\Phi_9$ (рис. 1-31, б). Симметрия системы

потоков достигается выбором следующего соотношения чисел витков первичных обмоток трансформаторов:

$$\omega_1 : \omega'_1 : \omega''_1 = 1 : \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \frac{2\pi}{9} : \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \frac{\pi}{9} = 1 : 0,741 : 0,394, \quad (1-12)$$

где ω_1 — число витков первичной обмотки 1-2 трансформаторов $T7—T9$; ω'_1 — число витков обмотки 1-2 трансформаторов $T1—T6$; ω''_1 — число витков обмотки 3-4 трансформаторов $T1—T6$.

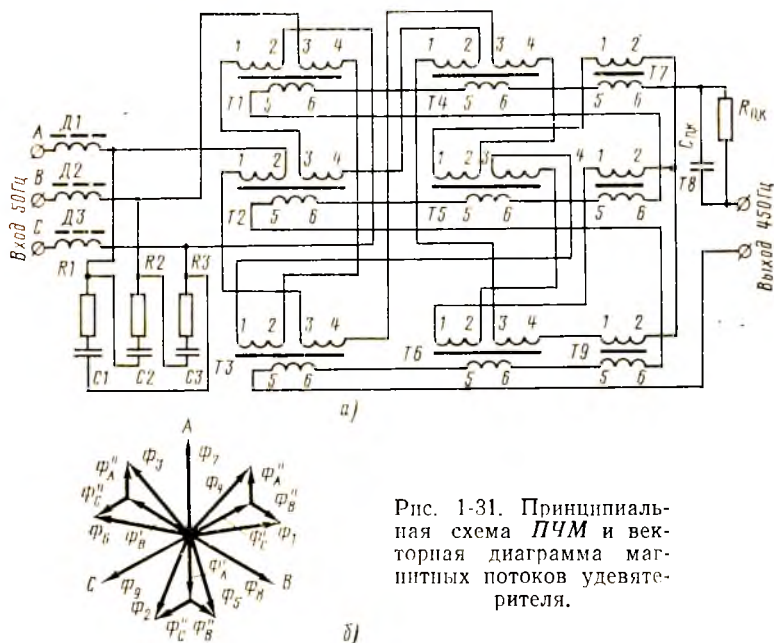


Рис. 1-31. Принципиальная схема ПЧМ и векторная диаграмма магнитных потоков удвятирителя.

Напряжение, например, фазы A приложено к обмоткам 1-2 $T7$, 1-2 $T2$, 1-2 $T5$, 3-4 $T3$ и 3-4 $T4$ и создает потоки Φ_7 , Φ'_A , Φ''_A , отношение которых равно отношению чисел витков соответствующих обмоток.

Вторичные обмотки всех трансформаторов соединены в разомкнутый девятиугольник. Выходное напряжение удвятирителя, равное геометрической сумме э. д. с. всех вторичных обмоток трансформаторов, до насыщения магнитопроводов равно нулю. В режиме насыщения

на выходе удевятерителя появляется э. д. с. нечетных гармоник, кратных числу сердечников, т. е. девятой, двадцать седьмой и т. д. Необходимая для работы удевятерителя стабилизация напряжения питания осуществляется при помощи феррорезонанса насыщенных индуктивностей фаз удевятерителя и емкостей $C1—C3$ и включения перед резонансными контурами линейных дросселей $D1—D3$.

Кроме рассмотренного аналогового устройства для «сильного регулирования» возбуждения может применяться цифровая система управления. В Сибирском энергетическом институте СО АН СССР завершен цикл исследований по разработке цифровых автоматических регуляторов возбуждения (ЦАРВ). Образец цифрового регулятора ЦАРВ-V имеет перестраиваемую структуру (внешнюю адаптацию) и выполнен на интегральных микросхемах.

1-10. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Расчет динамики процесса регулирования возбуждения в общем случае представляет собой сложную задачу, решение которой зависит от многих факторов: структуры схемы регулирования, динамических и статических характеристик отдельных элементов, режима работы генератора, схемы подключения его к энергосистеме. Требования к точности математического описания динамических характеристик АРВ существенно зависят от назначения расчета.

Для сравнения и оценки динамических свойств систем АРВ в ряде случаев достаточным является приближенный анализ устойчивости регулирования напряжения на выводах статора в режиме холостого хода ($I_r=0$), так как холостой ход изолированно работающего генератора — режим наиболее тяжелый в отношении устойчивости регулирования возбуждения. Анализ проводится при следующих допущениях: структурная схема системы АРВ упрощенная; уравнения движения звеньев системы линейные (линеаризованные); частота вращения ротора постоянная. Структурная схема системы АРВ в этом случае обычно представляется в таком же виде, как и для простейшей схемы (см. рис. П1-6). Генератор, возбуждатель и АРВ вводятся в структурную схему как инерционные звенья первого порядка и характеризуются

коэффициентами усиления на линейном участке k_r , k_n , $k_{\text{рег}}=k_n k_M$ и эквивалентными постоянными времени T_r , T_n , $T_{\text{рег}}=T_M$. Как показано в § П1-3, необходимое и достаточное условие устойчивости в этом случае:

$$k = k_r k_n k_{\text{рег}} \leq k_{\text{кр}} = 2 + \frac{T_{\text{рег}}}{T_n} + \frac{T_n}{T_r} + \frac{T_r}{T_{\text{рег}}} + \frac{T_{\text{рег}}}{T_r} + \frac{T_n}{T_{\text{рег}}} + \frac{T_r}{T_n}, \quad (1-13)$$

где k — коэффициент усиления разомкнутой системы; $k_{\text{кр}}$ — критический коэффициент усиления.

Отсюда следует, что при быстродействующем полном или тиристорном возбудителе ($T_n \ll T_r$) с безынерционным регулятором ($T_{\text{рег}} \ll T_r$) система регулирования будет иметь апериодическую устойчивость при весьма большом коэффициенте усиления, т. е. при малом коэффициенте статизма естественной характеристики регулирования.

В устройствах управляемого фазового компаундирования выходная мощность корректора мала и регулятор в целом является малоннерционным, что дает возможность получить достаточно устойчивое регулирование при большом коэффициенте усиления и малом статизме.

В электромагнитных корректорах, применяющихся с устройствами токового компаундирования, из-за необходимости мощных выходных магнитных усилителей постоянная времени регулятора $T_{\text{рег}}$ получается соизмеримой с T_n . При этом для устойчивого регулирования напряжения при относительно невысоком статизме (3—4%) необходимо применять специальные меры стабилизации. Один из способов стабилизации — введение гибкой отрицательной обратной связи (ГОС), охватывающей возбудитель и усилитель корректора. ГОС обычно выполняется в виде дифференцирующего трансформатора (стабилизирующий трансформатор — СТ), первичная обмотка которого подключается на напряжение якоря возбудителя, а вторичная — на одну из управляющих обмоток магнитного усилителя корректора. Рассмотрим влияние стабилизирующего трансформатора СТ на процесс регулирования.

Передаточная функция дифференцирующего трансформатора

$$W_{\text{ст}}(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{k_{\text{ст}} p}{T_{\text{ст}} p + 1}$$

Если $T_{CT} \approx 0$, то СТ — идеальное дифференцирующее звено, и передаточная функция сложного звена, замещающего магнитный усилитель корректора, возбудитель и СТ, имеет вид:

$$W(p) = \frac{W_M(p) W_B(p)}{1 + W_M(p) W_B(p) W_{CT}(p)} =$$

$$= \frac{k_M k_B}{T_M T_B p^2 + (T_M + T_B + k_M k_B k_{CT}) p + 1}.$$

Не внося существенной погрешности, первым членом в знаменателе обычно можно пренебречь. Тогда

$$W(p) = \frac{k_M k_B}{(T_M + T_B + k_M k_B k_{CT}) p + 1} \quad (1-14)$$

и система регулирования превращается в систему второго порядка [два инерционных звена $W(p)$ и $W_T(p)$], которая устойчива при любом коэффициенте усиления (см. § П1-3). Стабилизация системы в данном случае получается за счет замедления процесса регулирования. Поэтому более перспективным направлением повышения устойчивости при одновременном улучшении качества процесса регулирования является разработка быстроедействующих корректоров [20].

Для анализа статической устойчивости энергосистем с генераторами, имеющими современные АРВ, приведенное выше упрощенное математическое описание является неприемлемым. В этом случае структурная схема

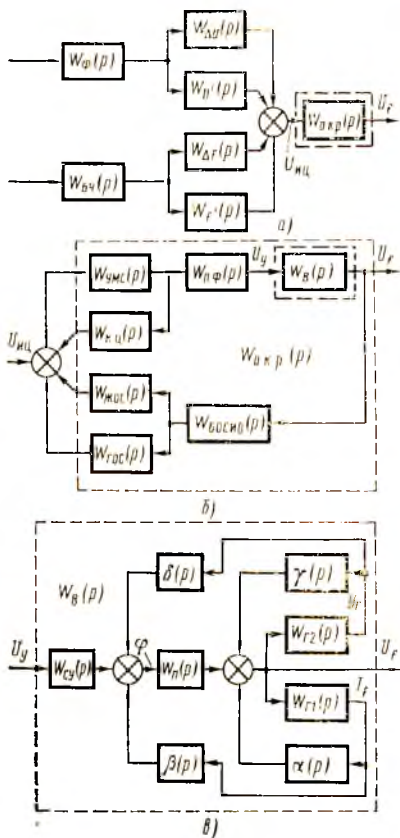


Рис. 1-32. Структурные схемы.
а — автоматического регулятора возбуждения сильного действия; б — основного канала регулирования ОКР; в — возбудителя ионного или тиристорного.

значительно усложняется, хотя уравнения движения системы по-прежнему считаются линейными (линеаризованы). На рис. 1-32 дан пример применяемой структурной схемы АРВ сильного действия со стабилизацией по отклонению и производной частоты и одnogрупповой преобразовательной установкой (ионной или тиристорной) [28]. В структурную схему введены основные элементы, оказывающие влияние на поведение АРВ в режиме малых колебаний в системе.

Рассмотрим вид передаточных функций отдельных звеньев. Возбудитель W_B является сложным звеном, структурная схема которого показана на рис. 1-32,б:

$$W_B(p) = \frac{\Delta U_f(p)}{\Delta U_y(p)} = \frac{W_{cy}(p) W_{\Pi}(p)}{1 - W_{\Gamma 1}(p) [\beta(p) W_{\Pi}(p) + \alpha(p)] - W_{\Gamma 2}(p) [\delta(p) W_{\Pi}(p) + \gamma(p)]},$$

где $W_{\Gamma 1}(p)$, $W_{\Gamma 2}(p)$ — передаточные функции генератора, зависящие от режима его работы; в режиме холостого хода при m контурах в оси d (трансформаторные э. д. с. не учитываются)

$$\begin{aligned} W_{\Gamma 1}(p) &= \frac{\Delta I_f(p)}{\Delta U_f(p)} = \\ &= \frac{1 + px_{ad} \sum_{k=1}^m (R_{kd} + px_{k1}^a)^{-1}}{R_f + px_f + px_{ad} (R_f + px_f^a) \sum_{k=1}^m (R_{kd} + px_{k1}^a)^{-1}}; \\ W_{\Gamma 2}(p) &= \frac{\Delta U_{\Gamma}(p)}{\Delta U_f(p)} = \\ &= \frac{x_{ad}}{R_f + px_f + px_{ad} (R_f + px_f^a) \sum_{k=1}^m (R_{kd} + px_{k1}^a)^{-1}}; \end{aligned}$$

$W_{\Pi}(p) = k_{\Pi}$ — передаточная функция преобразователя, соответствует безынерционному звену;

$W_{cy}(p) = \frac{e^{-p\tau_{cy}}}{1 + pT_{cy}}$ — передаточная функция системы управления

преобразователем, соответствует инерционному звену первого порядка с запаздыванием; $\alpha(p)$, $\beta(p)$ характеризуют влияние тока ротора I_f на напряжение ротора U_f и на фазу сеточного импульса

$\Phi(p)$ [$\alpha(p)$ в статическом режиме соответствует внешней характеристике преобразователя, $\beta(p)$ учитывает влияние искажения формы напряжения питания системы управления вследствие коммутационных процессов]; $\gamma(p)$ и $\delta(p)$ выражают зависимости $U_f(p)$ и $\Phi(p)$ от напряжения генератора $U_r(p)$ и имеют место в схеме самовозбуждения.

Возбудитель W_v входит как звено в основной канал регулирования $W_{окр}$. Помимо него, в ОКР входят (рис. 1-32,б):

суммирующий магнитный усилитель УМС с корректирующей цепью КЦ, являющейся гибкой отрицательной обратной связью,

$$W_{УМС}(p) = \frac{k_p e^{-p\tau}}{1 + 2\sigma_p T + p^2 T^2};$$

$$W_{КЦ}(p) = \frac{k_3 p T_2}{1 + p T_1 + p^2 T_2^2};$$

промежуточный фильтр ПФ, применяемый при полупроводниковой системе сеточного управления,

$$W_{ПФ}(p) = k_{ПФ} \frac{1 + p \cdot 0,15 \cdot 10^{-4} + p^2 \cdot 0,26 \cdot 10^{-8}}{1 + p \cdot 4,4 \cdot 10^{-2} + p^2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4} + p^3 \cdot 2,4 \cdot 10^{-6} + p^4 \cdot 0,5 \cdot 10^{-8}};$$

блок обратной связи пилонного возбудителя БОСНВ, представляющий собой инерционное звено с постоянной времени 5—7 мс; жесткая обратная связь

$$W_{ЖОС}(p) = k_{ЖОС};$$

гибкая обратная связь

$$W_{ГОС}(p) = 0,1 n k_{ГОС} \frac{p}{1 + p 0,006}; \quad n = 0 \div 2.$$

Можно упростить структурную схему АРВ, заменив все элементы основного канала регулирования от входа сумматора до колец ротора одним колебательным звеном с запаздыванием. Передаточная функция этого звена

$$W_{ОКР}(p) = \frac{e^{-p\tau_p}}{1 + p^2 \sigma_p T_p + p^2 T_p^2}.$$

Коэффициенты T_p , τ_p , σ_p находятся путем аппроксимации результирующей частотной характеристики (РЧХ) основного канала регулирования.

Измерительные цепи АРВ (рис 1-32,а) включают канал напряжения и канал частоты. Фильтр в канале напряжения

$$W_{\Phi}(p) = \frac{k_{\Phi}}{1 + p \cdot 1,3 \cdot 10^{-2} + p^2 \cdot 0,83 \cdot 10^{-4}}.$$

Для одного из вариантов настройки блока частоты

$$W_{БЧ}(p) = \frac{k_{БЧ} e^{-0,013p}}{1 + p \cdot 5,6 \cdot 10^{-2} + p^2 \cdot 6,2 \cdot 10^{-4} + p^3 \cdot 3,9 \cdot 10^{-6}}.$$

Передаточные функции других звеньев, представляющих собой пассивные схемы, определяются непосредственно по параметрам элементов; для АРВ-300И:

$$W_{\Delta U}(p) = k_{\Delta U}; \quad W_{U'}(p) = 0,1nk_U, \frac{p}{1 + p \cdot 2,6 \cdot 10^{-3}n};$$

$$W_{\Delta f}(p) = 0,1nk_{\Delta f} \frac{p(1,3n + 80)10^{-2}}{1 + p(1,3n + 80)10^{-2}};$$

$$W_{f'}(p) = 0,1nk_{f'}, \frac{p}{1 + p \cdot 2,6 \cdot 10^{-3}n},$$

где $n = 1 \div 10$ — число делений шкалы регулятора.

При решении задачи выбора оптимальной настройки АРВ (оптимальных значений n) на основании оценки качества переходных процессов линеаризация звеньев и другие упрощения, принимаемые при анализе статической устойчивости энергосистем, делают по крайней мере сомнительной возможность практического использования получаемых результатов.

1-11. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ УСТРОЙСТВАМИ АРВ

Регулирование реактивной мощности синхронных генераторов осуществляется устройствами АРВ со специальной настройкой.

Настройка АРВ должна быть такой, чтобы значение регулируемого напряжения для любых коэффициентов мощности нагрузки зависело только от реактивной составляющей тока (реактивной мощности). При такой настройке регулятора напряжение генератора не зависит от активной составляющей тока, поэтому при изменении активной нагрузки реактивная мощность генератора не изменяется и регулирование реактивной нагрузки осуществляется независимо от регулирования активной нагрузки.

Требуемую настройку регулятора можно получить: при использовании электромагнитного корректора — выбором схемы соединения обмоток трансформатора статизма (ТС) или соответствующей фазировкой цепей тока и напряжения в устройстве установки статизма (УУС) (см. § 1-3); при управляемом фазовом компаундировании — с помощью внешних обратных связей по току выхода регулятора и току статора.

Можно получить любую настройку регулятора: статическую с различными знаками статизма и астатическую. При статической настройке каждому значению напряжения на выводах генератора U_r соответствует определенное значение реактивной составляющей тока $I_{r.p}$ (реактивной мощности). Уравнение характеристики регулирования

$$U_r = U_0 - k_c I_{r.p},$$

или в конечных приращениях:

$$\Delta U_r + k_c \Delta I_{r.p} = 0. \quad (1-15)$$

Левую часть этого уравнения можно рассматривать как сигнал на входе измерительного органа АРВ с астатической естественной характеристикой регулирования в конце процесса регулирования (закон регулирования) при неизменном значении U_0 . Величина U_0 может изменяться с помощью УАТ вручную или автоматически.

Коэффициент статизма регулятора k_c , кВ/кА (а также k_c , %):

$$\begin{aligned} k_c &= - \frac{\Delta U_r}{\Delta I_{r.p}}; \\ k_c \% &= - \frac{\Delta U_{r*}}{\Delta I_{r.p*}} 100 = \\ &= - \frac{\Delta U_r}{U_{r,ном}} \frac{I_{r,ном}}{\Delta I_{r.p}} 100 = k_c \frac{I_{r,ном}}{U_{r,ном}} 100. \end{aligned}$$

Напряжение на шинах электростанции с несколькими генераторами и распределение реактивных нагрузок между ними зависит от совместного действия регуляторов всех генераторов электростанции.

При построении систем автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности электростанции в целом возможно применение методов, приведенных ниже.

Регулирование с положительным статизмом. Простейшим методом регулирования напряжения на шинах электростанции и распределения реактивных нагрузок между генераторами, включенными на эти шины, является регулирование всеми генераторами, АРВ которых настроены, как указано выше, и имеют статические характеристики с положительным статизмом.

Поскольку изменение напряжения на шинах ΔU одинаково для всех n генераторов, то уравнения характеристик регулирования для каждого i -го генератора можно записать в виде $\Delta U + k_{ci} \Delta I_{г.р. i} = 0$; $i=1, 2, \dots, n$.

Разделив каждое из n уравнений на соответствующий коэффициент статизма и сложив их, получим:

$$\Delta U + \frac{1}{\sum_{i=1}^n 1/k_{ci}} \sum_{i=1}^n \Delta I_{г.р. i} = 0.$$

Подставив величину ΔU из этого уравнения в уравнение характеристики регулирования i -го и k -го генераторов, получим:

$$\begin{aligned} \Delta I_{г.р. i} &= \frac{1}{k_{ci}} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta I_{г.р. i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_{ci}}} = \frac{k_{c\text{эс}}}{k_{ci}} \Delta I_{\text{эс п}}; \\ \frac{\Delta I_{г.р. i}}{\Delta I_{г.р. k}} &= \frac{k_{ck}}{k_{ci}}. \end{aligned} \quad (1-16)$$

Таким образом, при использовании данного метода напряжение на шинах электростанции регулируется с положительным статизмом

$$k_{\text{эс}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_{ci}}}, \quad (1-17)$$

а реактивные нагрузки распределяются обратно пропорционально соответствующим коэффициентам статизма.

Метод иллюстрирует рис. 1-33,а, на котором приведена характеристика регулирования напряжения электростанции (ЭС), состоящей из двух генераторов с характеристиками 1 и 2:

$$I_{\text{эср}} = I_{1\text{р}} + I_{2\text{р}} \text{ при } U_{\text{ш}} = U_{\text{р1}} = U_{\text{р2}}.$$

Изменение нагрузки электростанции на $\Delta I_{\text{эс}}$ приводит к понижению напряжения на ΔU и перераспределению реактивных токов между генераторами. Восстановить требуемое напряжение на шинах и распределение реак-

тивных нагрузок можно, воздействуя вручную на УАТ индивидуальных АРВ.

Автоматическое поддержание постоянного напряжения можно обеспечить астатической настройкой АРВ одного из генераторов, который при этом будет воспринимать изменения суммарной реактивной нагрузки в пределах своей мощности.

При астатической или статической с отрицательным коэффициентом статизма настройке регуляторов нескольких генераторов, работающих на общие шины, необходимо применять специальные устройства автомати-

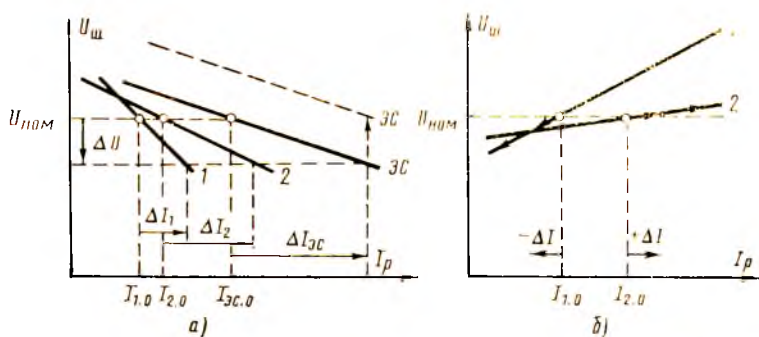


Рис. 1-33. Регулирование напряжения на шинах электростанции индивидуальными АРВ.

ческого распределения реактивных токов. Иначе заданное распределение реактивных токов между этими генераторами будет неустойчивым, что иллюстрируется рис. 1-33,б. Начальное распределение реактивных токов $I_{1.0}$ и $I_{2.0}$ неустойчиво, так как при их небольшом случайном перераспределении АРВ одного генератора будет развозбуждать его, а АРВ другого — форсировать возбуждение. Действительно, пусть реактивный ток первого генератора уменьшился, а второго увеличился на ΔI . При этом $I_{\Sigma p} = I_{1p} + I_{2p}$ и, следовательно, $U_{ш}$ остаются неизменными. АРВ первого генератора в соответствии со своей характеристикой воспринимает напряжение на шинах как повышенное и стремится снизить его, развозбуждая генератор; АРВ второго воспринимает напряжение на шинах как пониженное и увеличивает возбуждение генератора. Процесс перераспределения нагрузок протекает лавинообразно.

Если генераторы электростанции включены на общие шины через повышающие трансформаторы, можно применять регуляторы как с астатической, так и со статической настройкой с отрицательным статизмом. Действительно, напряжение на шинах станции в этом случае

$$U_{ш} \approx U'_г - I'_{г.р} x_{тр}, \quad (1-18)$$

где $U'_г$ и $I'_{г.р}$ — напряжение и реактивный ток генератора, приведенные к стороне ВН трансформатора; $x_{тр}$ — реактивное сопротивление трансформатора.

Если генератор снабжен регулятором с астатической настройкой ($U'_г = \text{const}$), то характеристика регулирования блока имеет положительный коэффициент статизма, равный $x_{тр}$.

Для уменьшения изменения напряжения на шинах целесообразно выполнять статическую настройку регулятора возбуждения с отрицательным статизмом, т. е.

$$U_g = U_0 + k_c I_{г.р}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} U_{ш} &= (U_0 + k_c I_{г.р}) N_t - I'_{г.р} x_{тр} = U'_0 + k_c N_t^2 I'_{г.р} - \\ &- I'_{г.р} x_{тр} = U'_0 - (x_{тр} - k'_c) I'_{г.р}, \end{aligned} \quad (1-19)$$

где N_t — коэффициент трансформации трансформатора.

Регулятор своим действием частично компенсирует падение напряжения в трансформаторе. Распределение реактивных нагрузок обратно пропорционально величинам $(x_{тр} - k'_c)_i$.

Метод смещения характеристик с положительным статизмом. Уравнение характеристики регулирования генератора можно записать в виде

$$U_g = U_{уст} - s Q_g, \quad (1-20)$$

где Q_g — реактивная нагрузка генератора; s — коэффициент статизма по реактивной мощности; $U_{уст}$ — заданное напряжение генератора при $Q_g = 0$.

Если $U_{уст} = U_0$ неизменно, то напряжение на шинах станции уменьшается при увеличении реактивной нагрузки.

Известно, что в большинстве случаев потребление реактивной мощности, а следовательно, и потеря напряже-

ния в сети от шин данной электростанции до потребителя возрастает с увеличением активной нагрузки потребителей. Поэтому с ростом активной нагрузки напряжение на шинах электростанции необходимо повышать для поддержания напряжения у потребителя на допустимом уровне.

При регулировании по методу смещения характеристик с положительным статизмом величина $U_{уст}$ не остается постоянной, а автоматически под действием вторичного регулятора изменяется по закону:

$$U_{уст} = U_0 + kP, \quad (1-21)$$

где P — активная мощность генератора; k — постоянный коэффициент.

При этом внешние характеристики генератора, т. е. зависимости U_r от реактивной мощности Q_r , имеют положительный статизм для обеспечения устойчивого распределения реактивных нагрузок между генераторами, но смещаются при изменении активной мощности. Если активной нагрузке P_1 соответствует диапазон возможных значений реактивной нагрузки $\Delta_1 Q$, P_2 — диапазон $\Delta_2 Q$ и т. д., то напряжение на шинах электростанции при колебаниях суммарной нагрузки не будет выходить из заштрихованной области (рис. 1-34), т. е. обеспечивается

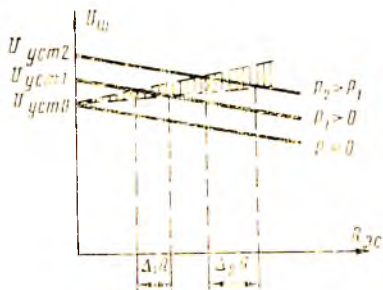


Рис. 1-34. Регулирование напряжения по методу смещения характеристик с положительным статизмом.

встречное регулирование напряжения при пропорциональном распределении реактивной нагрузки. Метод применим при $\cos \varphi \approx \text{const}$.

Метод долевого статизма. Применяется для астатического или встречного регулирования напряжения на шинах электростанции с пропорциональным распределением реактивных нагрузок между генераторами.

Закон регулирования по этому методу каждого генератора при *астатическом регулировании* определяется:

$$\Delta U_i + s_i \left(Q_{ri} - \beta_i \sum_{i=1}^n Q_{ri} \right) = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1-22)$$

где $\Delta U_i = U_{gi} - U_0$ — отклонение напряжения от заданного значения; β_i — доля участия i -го генератора в покрытии суммарной реактивной нагрузки электростанции $\sum_{i=1}^n Q_{gi}$; $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$; s_i — положительный коэффициент долевого статизма.

Разделив каждое уравнение на соответствующий коэффициент долевого статизма и просуммировав все уравнения с учетом того, что $\Delta U_1 = \dots = \Delta U_i = \dots = \Delta U_n = \Delta U$, получим:

$$\Delta U \sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i} + \left(1 - \sum_{i=1}^n \beta_i\right) \sum_{i=1}^n Q_{gi} = 0.$$

Отсюда условия, при которых завершится процесс регулирования: $\Delta U = 0$, так как $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$ и $s_i > 0$; $Q_{gi} = \beta_i \sum_{i=1}^n Q_{gi}$ — из закона регулирования i -го генератора при $\Delta U = 0$.

АРВ каждого генератора регулируют напряжение не со статизмом по реактивной нагрузке генератора, а со статизмом по исчезающему в конце процесса регулирования отклонению фактической реактивной нагрузки Q_{gi} от заданной доли суммарной реактивной нагрузки электростанции:

$$\Delta Q_{gi} = Q_{gi} - \beta_i \sum_{i=1}^n Q_{gi} = 0.$$

Поэтому данный метод называют еще методом минимого статизма.

Левую часть уравнения (1-22), отражающего закон регулирования каждого генератора, можно рассматривать как сигнал на входе индивидуального АРВ.

Процесс регулирования протекает в принципе следующим образом. При изменении реактивной нагрузки напряжение на шинах электростанции отклоняется от заданного значения и все регуляторы приходят в действие от сигнала ΔU . Они изменяют ток возбуждения и реактивные нагрузки генераторов так, чтобы восстано-

вить напряжение на шинах до прежнего значения. Реактивная нагрузка перераспределяется между генераторами под действием сигнала ΔQ_{ri} до тех пор, пока нагрузки генераторов не станут равными заданным частям суммарной нагрузки. Тогда регулирующие воздействия исчезнут и система регулирования напряжения придет в устойчивое состояние.

При *встречном регулировании* напряжения закон регулирования по этому методу каждого генератора определяется выражением

$$\Delta U_i - s'_i \Delta Q_{ri} + s''_i \left(Q_{ri} - \beta_i \sum_{l=1}^n Q_{rl} \right) = 0; \quad (1-23)$$

$$s''_i > s'_i; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Разделив каждое уравнение на соответствующий коэффициент долевого статизма s''_i и просуммировав все уравнения с учетом того, что $\Delta U_i = \Delta U_n = \Delta U$, получим условие, при котором завершится процесс регулирования или, иными словами, закон регулирования всей станции в статическом режиме

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{s'_i}{s''_i} \Delta Q_{ri}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s''_i}}.$$

При $s'_i = \dots = s'_n = s'$ и $s''_i = \dots = s''_n = s''$, учтя, что

$$\sum_{i=1}^n \Delta Q_{ri} = \Delta Q_{\Sigma},$$

получим:

$$\Delta U - \frac{s'}{n} \Delta Q_{\Sigma} = 0.$$

Распределение реактивных нагрузок осуществляется в основном по условию уравнивания с помощью схем многолучевой звезды или многоугольника (см. § 1-12), позволяющих достаточно просто формировать сигнал

$$Q_{ri} - \beta_i \sum_{l=1}^n Q_{rl}$$

Метод интегрального отклонения напряжения. Уравнения системы регулирования, действующей по этому методу, имеют вид:

$$\Delta U + s_i \left(Q_i - \psi_i \int_{t_0}^t k \Delta U dt \right) = 0; \quad (1-24)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где ψ_i — функция, определяющая задаваемую генератору реактивную нагрузку в зависимости от значения интеграла отклонения напряжения; t — текущее время.

Процесс регулирования закончится (прекратится изменение интеграла) при $t=t_n$, когда напряжение станет равно заданному ($\Delta U=0$) и, следовательно, реактивная нагрузка будет равна:

$$Q_i = \psi_i \int_{t_0}^{t_n} k \Delta U dt. \quad (1-25)$$

От вида функции ψ_i зависит распределение реактивных нагрузок между генераторами.

Введя в закон регулирования вместо ΔU сигнал $\Delta U - s' \Delta Q_{\text{эс}}$, можно обеспечить встречное регулирование напряжения на шинах с изменяемым распределением реактивных нагрузок.

1-12. ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ГЕНЕРАТОРОВ

Групповым регулированием называют централизованное регулирование генераторов станции как единого агрегата. Оно особенно эффективно на многоагрегатных станциях с однотипными агрегатами. Групповое регулирование упрощает участие станции в общесистемном регулировании.

Одним из устройств группового регулирования генераторов станции является система группового управления возбуждением (ГУВ) синхронных генераторов, которая осуществляет автоматическое корректирование режима работы группы генераторов по напряжению и реактивной мощности. Системы ГУВ основаны на использовании метода долевого статизма. Они успешно эксплуатируются на многих гидроэлектростанциях и ведется их разработка для крупных блочных тепловых электростанций.

Основными элементами системы ГУВ являются:

центральное задающее устройство, позволяющее одновременно управлять возбуждением всех генераторов, входящих в группу;

устройство автоматического распределения реактивной нагрузки между генераторами, входящими в группу.

По способу управления возбуждением системы ГУВ могут быть выполнены в двух вариантах:

системы, в которых центральный регулятор напряжения ЦРН непосредственно осуществляет регулирование возбуждения генераторов;

системы, в которых центральное устройство задания лишь изменяет уставки индивидуальных АРВ (выполняет роль вторичного регулятора).

При выборе варианта системы основным критерием является простота схемы и аппаратуры регулирования. Системы с ЦРН рекомендуются для многоагрегатных станций (более 4—6 агрегатов). Системы с централизованным изменением уставок индивидуальных АРВ — для малоагрегатных станций (2—4 агрегата), так как усложнения, вносимые введением ЦРН, в этом случае уже не оправдываются упрощением схемы из-за отказа от индивидуальных измерительных органов. На всех станциях с АРВ сильного действия применяются системы с централизованным изменением уставок, так как применение ЦРН требует введения дополнительного каскада усиления, что затрудняет обеспечение необходимых скоростей регулирования.

Распределение реактивных нагрузок между генераторами в существующих системах ГУВ выполняется по условию уравнивания параметра, характеризующего реактивную нагрузку генератора (параметра распределения).

В качестве схемы уравнивания используется, как правило, схема многолучевой звезды.

Схема многолучевой звезды для уравнивания реактивных нагрузок приведена на рис. 1-35. В многолучевую звезду с помощью шин уравнивания ШУ объединены измерительные элементы реактивной мощности *ИМР* (или другого параметра распределения) и автоматические регуляторы возбуждения — *АРВ* (исполнительные элементы) генераторов, входящих в группу. Определим с помощью схемы замещения (рис. 1-35,б) регулирующее воздействие на *l*-й *АРВ*, т. е. величину i_l .

На схеме замещения:

$E_l = kQ_l$ — э. д. с. l -го ИМР, являющегося датчиком реактивной мощности; R, R_y — внутреннее сопротивление ИМР и сопротивление обмотки управления магнитного усилителя АРВ соответственно.

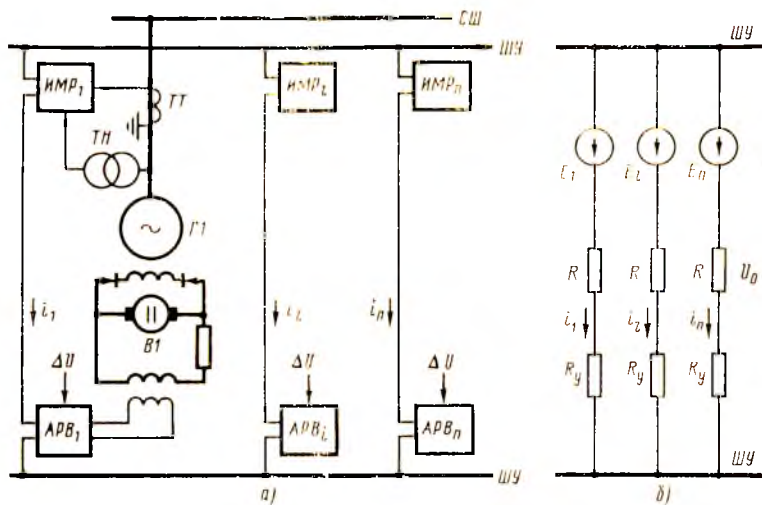


Рис. 1-35. Схема многолучевой звезды для уравнивания реактивных нагрузок.

Ток в l -й ветви:

$$i_l = \frac{E_l - U_0}{R + R_y}.$$

По первому закону Кирхгофа

$$\sum_{l=1}^n i_l = 0, \text{ следовательно, } \sum_{l=1}^n E_l = nU_0 \text{ и}$$

$$U_0 = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n E_l.$$

Подставив это выражение в формулу для i_l , получим:

$$i_l = \frac{1}{R + R_y} \left(E_l - \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n E_l \right) = \frac{k}{R + R_y} \left(Q_l - \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n Q_l \right), \quad (1-26)$$

где $\frac{k}{R+R_y} \sim s_l$ — коэффициент долевого статизма; $\frac{1}{n} = \beta_l$ — доля участия l -го генератора в покрытии суммарной реактивной нагрузки станции.

Если датчик параметра распределения имеет большое внутреннее сопротивление по сравнению с сопротивлением исполнительного элемента, целесообразно применять схему многоугольника (рис. 1-36). На схеме замещения (рис. 1-36, б):

$I_l = kQ_l$ — ток $ИМР_l$ при закороченном выходе;

g , g_y — внутренняя проводимость $ИМР$ и проводимость обмотки управления магнитного усилителя АРВ соответственно.

Регулирующим воздействием является ток

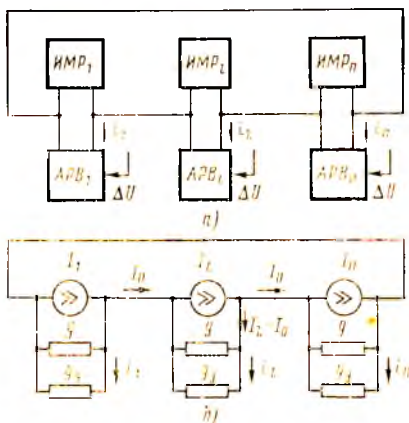


Рис. 1-36. Схема многоугольника для уравнивания реактивных нагрузок.

$$i_l = (I_l - I_0) \frac{g_y}{g + g_y}.$$

По второму закону Кирхгофа для контура, проходящего через все g_y ,

$$\frac{1}{g_y} \sum_{l=1}^n i_l = 0,$$

следовательно,

$$\sum_{l=1}^n I_l = nI_0 \text{ и } I_0 = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n I_l;$$

$$i_l = \frac{g_y}{g + g_y} \left(I_l - \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n I_l \right) = \frac{kg_y}{g + g_y} \left(Q_l - \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n Q_l \right), \quad (1-27)$$

где

$$\frac{kg_y}{g + g_y} \sim s_l; \quad \frac{1}{n} = \beta_l.$$

Таким образом, и в одной и другой схеме токи по цепям уравнивания будут протекать до тех пор, пока Q_i не станет равной $\beta_i \sum_{l=1}^n Q_l$, т. е. заданной части суммарной реактивной нагрузки.

Равенство относительных реактивных нагрузок незначительно отличается от наиболее экономичного распределения (обеспечивающего минимум суммарных потерь активной мощности) даже при различии типов генераторов, схем их присоединения к сборным шинам и активных нагрузок [30].

В качестве параметра распределения для генераторов, неодинаково загруженных активной мощностью (например, часть генераторов работает в режиме синхронного компенсатора), вместо реактивной мощности (реактивного тока) применяют ток или напряжение ротора для исключения неоправданного резерва реактивной мощности на электростанции в максимум нагрузки.

Уравнивание напряжений предпочтительнее, поскольку при этом обеспечивается большая устойчивость и скорость процесса автоматического распределения реактивных нагрузок из-за отсутствия в контуре распределения инерционного звена — обмотки ротора.

Распределение по току ротора применяется для генераторов с ионным (тиристорным) возбуждением и АРВ сильного действия. В этом случае непосредственный ввод в схему ГУВ напряжения ротора невозможен из-за высокого потенциала цепей ионного возбуждения. Поэтому в качестве датчиков тока ротора используются изолирующие измерительные устройства — трансформаторы постоянного тока. Автоматическое распределение по току ротора получается достаточно устойчивым вследствие малой инерционности системы регулирования возбуждения.

Применение систем автоматического распределения необходимо независимо от наличия группового управления в тех случаях, когда требуется настроить приведенные к общим шинам внешние характеристики генераторов астатически или с отрицательным статизмом.

Рассмотрим схемы некоторых применяемых в настоящее время систем ГУВ.

На рис. 1-37 приведена схема ГУВ с центральным регулятором напряжения и уравнивателем реактивных

нагрузок по напряжению ротора. Регулирование возбуждения всех генераторов группы производится центральным регулятором напряжения *ЦРН*, который может быть выполнен на базе регулятора типа РВА-62. Питание силовой части *ЦРН* осуществляется от резервированных

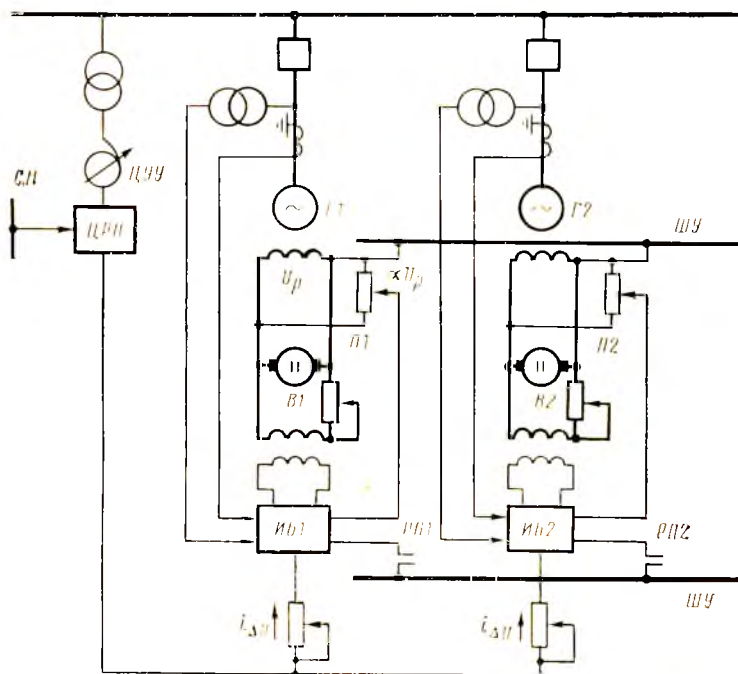


Рис. 1-37. Схема ГУВ с центральным регулятором напряжения и уравниванием по напряжению ротора.

шин собственных нужд станции (СН). Управление возбуждением всех генераторов производится воздействием на центральное установочное устройство *ЦУУ*. Исполнительные блоки *ИБ* могут быть также выполнены на базе регуляторов типа РВА-62. К выходу *ЦРН* подключается обмотка управления управляющего магнитного усилителя, которая в обычной схеме РВА-62 обтекается током измерительного органа напряжения. Трансформаторы напряжения и тока генератора питают силовую часть *ИБ*, ток выхода которого подается в обмотку возбуждения возбудителя.

Распределение реактивных нагрузок осуществляется схемой уравнивания напряжений роторов. Датчики напряжений роторов (потенциометры Π) и обмотки управления исполнительными блоками $ИБ$ соединяются шинами уравнивания $ШУ$ в многолучевую звезду. При равенстве напряжений потенциометров ток в обмотках управления $ИБ$ отсутствует. Если в процессе регулирования равенство реактивных нагрузок генераторов нарушится, то напряжения роторов не будут равны и

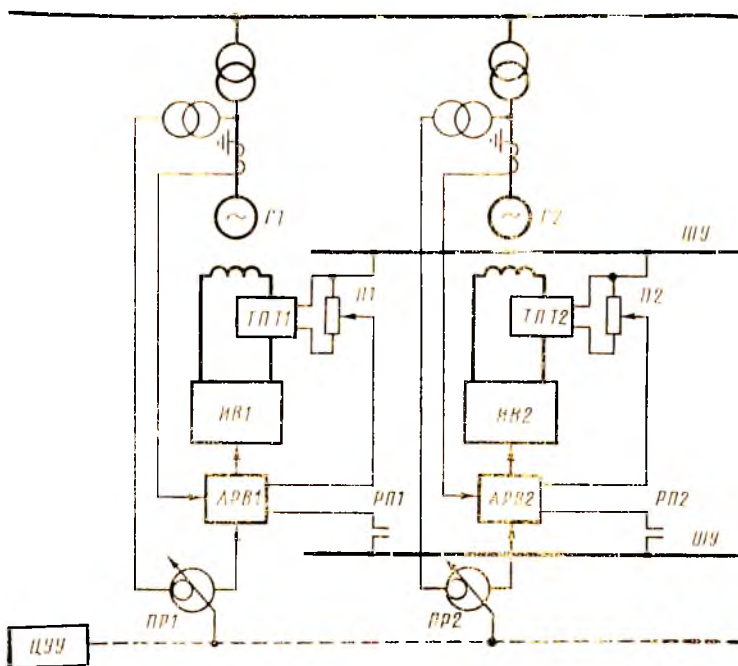


Рис. 1-38. Схема ГРУ с централизованным изменением уставок индивидуальных АРВ и уравниванием по току ротора.

в обмотках управления $ИБ$ появятся токи. Значение тока каждого $ИБ$ определяется алгебраической разностью между средним напряжением роторов и напряжением ротора соответствующего генератора. Изменение возбуждения генераторов будет продолжаться до тех пор, пока напряжения на потенциометрах всех генераторов станут равными. Регулировкой потенциометров можно

изменять долю участия каждого генератора в распределении.

Устройства релейной форсировки возбуждения и развозбуждения сохраняются индивидуальными для каждого генератора.

На рис. 1-38 приведена схема ГУВ с централизованным изменением уставок индивидуальных АРВ сильного действия и уравниванием по току ротора.

Изменение уставок индивидуальных АРВ осуществляется одновременным изменением с помощью потенциал-регуляторов *ПР* напряжений, подводимых к измерительным органам регуляторов. Роторы *ПР* связаны между собой и двигателем центрального установочного устройства *ЦУУ* жесткой механической или сельсинной связью.

В схему уравнивания включены потенциометры *П* и дополнительные обмотки управления выходными усилителями АРВ сильного действия. Напряжения на потенциометрах пропорциональны токам роторов. Датчики тока ротора — трансформаторы постоянного тока *ТПТ* — установлены в цепях обмоток роторов, подключенных к ионным возбудителям *ИВ*.

Контакты реле *РП1*, *РП2* и т. д. отключают цепи уравнивания от общей схемы при отключении соответствующего генератора от сети.

1-13. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Отклонение напряжения от номинального является одним из основных показателей качества электроэнергии. От значения напряжения зависят:

производительность труда на промышленных предприятиях (в связи с зависимостью от напряжения момента вращения двигателей и светотдачи ламп накаливания);

срок службы изоляции электрооборудования и особенно ламп накаливания (при повышении напряжения срок службы сокращается);

расход электроэнергии.

Поэтому допустимые отклонения напряжения в среднем составляют $\pm 5\%$ [32]. Улучшение качества электроэнергии у потребителей, т. е. поддержание напряжения на требуемом уровне, является важной народнохозяйственной задачей.

Напряжение у потребителя, подключенного к какой-либо точке электрической распределительной сети, зависит от:

- напряжения на шинах электростанций питающей сети, т. е. основной сети энергосистемы;

- коэффициентов трансформации трансформаторов, установленных между питающими и распределительными сетями;

- потери напряжения в сетях, зависящей от их схемы и параметров, от величины нагрузок, от места подключения и режима работы источников реактивной мощности.

При наличии регулируемых под нагрузкой трансформаторов (трансформаторов с РПН) между питающими и распределительными сетями поддержание напряжения у потребителя на нормальном уровне обеспечивается комплексом средств, установленных в распределительных сетях. Задача же регулирования напряжения в питающих сетях — обеспечить экономичный режим по условию минимума потерь активной мощности. При отсутствии в распределительных сетях достаточного количества трансформаторов с РПН для регулирования напряжения в этих сетях в определенных пределах могут привлекаться средства регулирования основных питающих сетей.

В настоящее время применяются следующие способы регулирования напряжения в распределительных сетях: встречное регулирование напряжения на шинах электростанций (регулирование с отрицательным статизмом по величине определяющих нагрузок);

- регулирование коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов с РПН, вольтдобавочных агрегатов;

- регулирование мощности компенсирующих устройств, включенных в точке, где регулируется напряжение (синхронные компенсаторы и двигатели, управляемые батареями статических конденсаторов);

- изменение реактивности управляемых реакторов;

- применение специальных источников реактивной мощности, обеспечивающих плавное регулирование реактивной мощности со значительно большей скоростью, чем синхронные компенсаторы [31].

Автоматизация процесса регулирования напряжения на шинах электростанции описана в предыдущих пара-

графах. Здесь же рассмотрим некоторые вопросы автоматизации других способов регулирования.

Автоматическое регулирование напряжения трансформаторами с РПН осуществляется изменением коэффициента трансформации путем переключения ответвлений обмоток, т. е. ступенчато. Степень регулирования отечественных трансформаторов $\Delta U_{ст}=1,25\div 2,5\% U_{ном}$. При использовании положения «мост» ступень регулирования снижается вдвое.

Плавное изменение коэффициента трансформации подмагничиванием магнитопровода иногда применяют для трансформаторов небольшой мощности специального назначения.

На трансформаторах с РПН устанавливаются автоматические регуляторы напряжения. Эти регуляторы имеют зону нечувствительности и выдержку времени.

Зона нечувствительности $\Delta U_{неч}$ выбирается так, чтобы после переключения ответвлений трансформатора на одну ступень изменение регулируемого напряжения было меньше величины $\Delta U_{неч}$:

$$\Delta U_{ст} < \Delta U_{неч} = \Delta U_{в} + \Delta U_{п} \quad (\text{см. рис. 1-39}).$$

(Практически $\Delta U_{неч} = (1,1\div 1,2) \Delta U_{ст}$.)

В противном случае напряжение после переключения может выйти за противоположную границу зоны нечувствительности и произойдет излишнее действие регулятора в обратном направлении. Сказанное иллюстрирует рис. 1-39.

Выдержка времени необходима для предотвращения лишних переключений при кратковременных выходах напряжения из зоны нечувствительности регулятора.

Величина $t_{ср}$ обычно 1—3 мин. Наряду с регуляторами, имеющими независимую выдержку времени, разработаны конструкции АРН с ограниченно зависимой временной характеристикой.

Среди разнообразных конструкций регуляторов наиболее совершенными являются полупроводниковые АРН. Бесконтактные регуляторы не изнашиваются от многократных запусков при кратковременных колебаниях напряжения и имеют существенно меньшее потребление по сравнению с электромеханическими АРН.

Функциональная схема простейшего бесконтактного регулятора напряжения двухобмоточного трансформато-

ра с РПН приведена на рис. 1-40. Регулятор присоединяется к измерительным трансформаторам $TН$ и $TТ$ через промежуточные трансформаторы $ПТН$ и $ПТТ$. При отклонениях напряжения два выходных реле регулятора посылают в привод переключателя ответвлений сигналы «выше» ($P1$) или «ниже» ($P2$) с выдержкой времени,

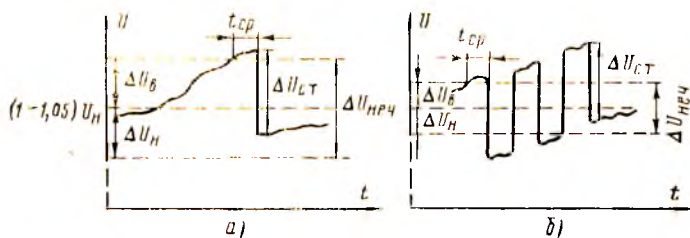


Рис. 1-39. Изменение напряжения на выводах трансформатора с РПН при различных зонах нечувствительности регулятора.

$a - \Delta U_{неч} > \Delta U_{с.т.}$; $b - \Delta U_{неч} < \Delta U_{с.т.}$

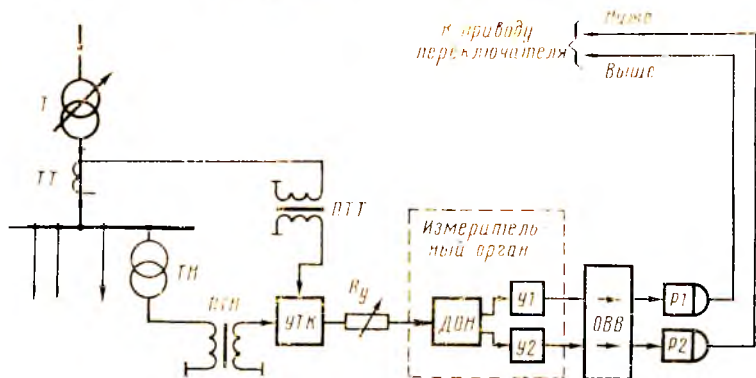


Рис. 1-40. Функциональная схема регулятора напряжения трансформатора с РПН.

создаваемой органом выдержки времени $ОВВ$. При аварийных снижениях напряжения (на 20—30%) сигнал «выше» блокируется. Рассмотрим принцип действия основных элементов регулятора.

Измерительный орган регулятора (датчик отклонения напряжения — $ДОН$) может реагировать на изменение значения напряжения в месте установки регулятора (при отключенном $УТК$);

значения геометрической суммы напряжения в месте установки регулятора и падения напряжения от тока линии в эквивалентном сопротивлении УТК (токовая компенсация падения напряжения в линии);

значения напряжения в месте установки регулятора с коррекцией от тока в питающей линии.

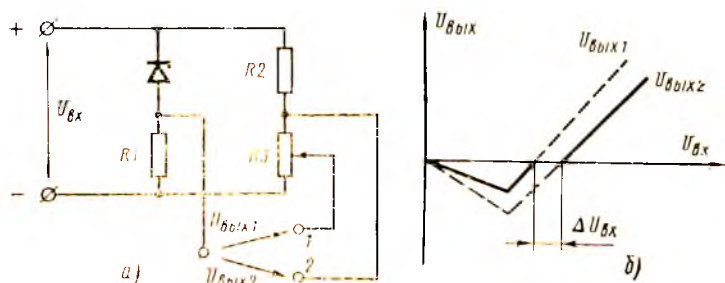


Рис. 1-41. Измерительный орган со стабилизатором.
а — схема; б — характеристика.

Измерительные органы полупроводниковых регуляторов напряжения выполняются с использованием кремниевых стабилизаторов и туннельных диодов. Применяются комбинированные измерительные органы, имеющие два выхода (по числу трактов регулятора). Схема измерительного органа на стабилизаторе с двумя выходами приведена на рис. 1-41,а, на рис. 1-41,б — его характеристика.

Усилитель с релейной характеристикой $У1$ реагирует на значение $U_{вых1}$ при $U_{вых1} < 0$; $У2$ — на значение $U_{вых2}$ при $U_{вых2} > 0$. В пределах $\Delta U_{вх}$, определяющего зону нечувствительности регулятора, $У1$ и $У2$ не действуют.

Устройство токовой компенсации УТК осуществляет имитацию падения напряжения в распределительной сети от центра питания, где установлен регулятор, до точки, в которой нужно поддерживать напряжение. Активное и индуктивное сопротивления сети могут имитироваться различными по характеру сопротивлениями, например только активными, а необходимые фазы составляющих падения напряжения получают подбором соответствующих фаз тока.

На рис. 1-42,а показана схема устройства компенсации с использованием токов трех фаз. Напряжение на входе измерительного органа регулятора:

$$\dot{U}_{\text{рег}} = \dot{U}_{BC} - \Delta \dot{U}_K,$$

где $\Delta \dot{U}_K$ — напряжение компенсации, вводимое в АРН,

$$\Delta \dot{U}_K = \dot{I}_A R_1 + \dot{I}_{BC} R_2.$$

Векторная диаграмма напряжений схемы токовой компенсации при симметричной нагрузке построена на рис. 1-42,б. Из векторной диаграммы видно, что

$$\dot{I}_{BC} R_2 \sim \dot{I}_L R_L; \dot{I}_A R_1 \sim \dot{I}_L j x_L,$$

так как $\dot{I}_{BC} R_2$ отстает от напряжения $\dot{U}_{BC}$ на угол φ , а $\dot{I}_A R_1$ опережает его на $90^\circ - \varphi$.

Здесь $\dot{I}_L$ — ток линии; R_L, x_L — активное и индуктивное сопротивления линии.

Таким образом, напряжение, подаваемое на вход регулятора, пропорционально напряжению у потребителя

в некоторой точке сети, определяемой расчетом.

В схеме компенсации токами двух фаз при включении регулятора на $\dot{U}_{BC}$, разность токов $\dot{I}_B - \dot{I}_C$ подается на последовательно включенные сопротивления R и x , имитирующие соответственно активное и индуктивное сопротивления линии. В схеме компенсации током одной фазы на сопротивления R и x подается ток $\dot{I}_A$, при этом сопротивление R имитирует x_L , а x — сопротивление R_L .

Применяется и приближенная компенсация, когда независимо от соотношения x_L/R_L на сопротивление R подается

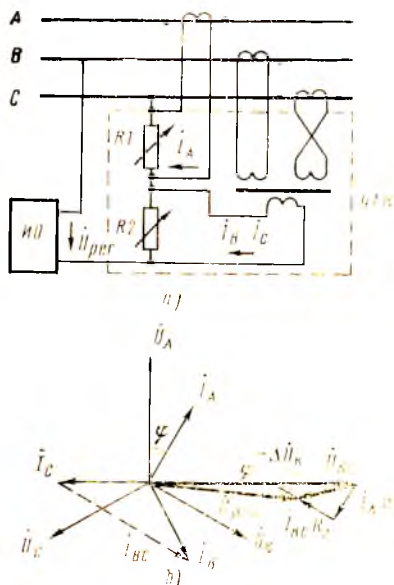


Рис. 1-42. Устройство компенсации с использованием токов трех фаз.

а — схема; б — векторная диаграмма

ток отстающей фазы (I_C , если регулятор включен на U_{BC}).

Кроме рассмотренного простейшего регулятора напряжения применяются более сложные АРН, обладающие большими возможностями. Так, выпускаемые Рижским заводом автоматические регуляторы типа АРТ-1Н (взамен снятых с производства регуляторов БАУРПН-2) обеспечивают возможность: изменения уставки по напряжению; группового регулирования параллельно включенных трансформаторов; контроля, блокировки и сигнализации при неисправности элементов собственной схемы и электроприводов РПН [36].

Автоматическое изменение емкости батареи конденсаторов осуществляется устройствами, подобными рассмотренному, т. е. устройствами, дискретного действия с определенной зоной нечувствительности.

Трехфазная конденсаторная батарея емкостью C в фазе является источником реактивной мощности $Q_K = U^2 \omega C$. Батарея состоит из секций, каждая из которых включается своим выключателем.

При увеличении реактивной нагрузки подстанции напряжение на ее шинах снижается. При снижении напряжения до $U_{ср.н.}$, соответствующего нижней границе зоны нечувствительности, регулятор включает очередную секцию конденсаторов, что приводит к повышению напряжения на $\Delta U_{ст.}$. В простейшем случае

$$\Delta U_{ст} \approx \frac{x_d}{U_{нож}} Q_{ki},$$

где x_d — сопротивление питающей линии; Q_{ki} — реактивная мощность одной секции конденсаторов.

При повышении напряжения до $U_{ср.в.}$, соответствующего верхней границе зоны нечувствительности, регулятор отключает очередную секцию, что приводит к снижению напряжения на $\Delta U_{ст.}$

График изменения напряжения на шинах подстанции в зависимости от ее реактивной нагрузки при изменении емкости батареи, состоящей из четырех секций, показан на рис. 1-43. Пределы колебания напряжения зависят от мощности каждой секции конденсаторов. Снижая мощность секции и соответственно увеличивая число секций, можно уменьшить пределы колебания напряжения.

Регулирование может осуществляться в зависимости от напряжения на входе регулятора, как уже рассмотре-

но, или в зависимости от значения и знака реактивной мощности, проходящей по питающей линии, а часто — от комбинированного воздействия указанных величин.

Регулирование возбуждения синхронного компенсатора. Синхронный компенсатор будет работать в режиме выдачи или потребления реактивной мощности в зависимости от значения тока возбуждения. Изменяя ток возбуждения синхронного компенсатора, можно изменять величину и знак потери напряжения в питающей линии,

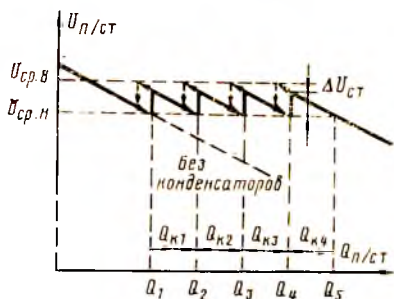


Рис. 1-43. Изменение напряжения на шинах подстанции в зависимости от ее реактивной нагрузки при изменении емкости включенных конденсаторов.

регулируя тем самым напряжение на приемной подстанции в необходимых пределах. Обычно СК регулируют напряжение на шинах приемной подстанции по астатической характеристике.

Схемы АРВ синхронных компенсаторов аналогичны применяемым для синхронных генераторов, рассмотренным ранее. Особенности включения АРВ синхронных компенсаторов указаны в [37].

Система совместного регулирования напряжения и перетоков реактивной мощности. Регулятор напряжения и реактивной мощности, так называемый UQ -регулятор ($UQ-P$), обеспечивает регулирование напряжения на шинах подстанции и загрузку трансформатора реактивной мощностью в заданных пределах для обеспечения высокого к. п. д. работы линий электропередачи. Он воздействует на изменение коэффициента трансформации трансформатора с РПН, мощности источников реактивной мощности (поперечно включенных конденсаторов и реакторов) и возбуждения генераторов одной из основных электростанций, связанных с данной подстанцией [38]. Желаемые уровни параметров режима U_0 и Q_0 подаются на $UQ-P$ с центрального вычислительного устройства, применяемого одновременно для автоматического

распределения активных нагрузок. Таким образом, это вычислительное устройство координирует работу местных устройств регулирования напряжения и реактивной мощности.

Вопросы для самопроверки

1. Почему невозможно встречное включение регулятора на основную обмотку возбуждения машинного возбuditеля?
2. Как влияет наличие регуляторов возбуждения:
 - на статическую и динамическую устойчивость параллельной работы электрических станций;
 - на ток к. з.;
 - на процесс самозанука электродвигателей после отключения к. з.?
3. По каким параметрам производится регулирование в различных типах АРВ?
4. Для чего и как осуществляется автоматическая форсировка возбуждения генераторов с различными системами возбуждения?
5. Рассчитайте значение тока трехфазного к. з., протекающего в генераторе, при котором сработает устройство релейной форсировки.
6. Каков принцип действия измерительных органов напряжения, применяемых в системах АРВ?
7. Каким образом осуществляется изменение вида характеристик регулирования (а статическая, статическая с различными знаками коэффициента статизма) при АРВ различных типов?
8. Почему устройство токового компаундирования без корректора напряжения не обеспечивает постоянства напряжения на выводах генератора?
9. Нарисуйте принципиальные схемы фазового компаундирования с электрическим суммированием токов и с магнитным суммированием потоков (по первому закону Кирхгофа соответственно для электрической и магнитной цепи). Проверьте выполняется ли для нарисованных схем правило фазировки.
10. Каковы отличительные особенности регуляторов сильного действия?
11. Каким образом обеспечивается автоматическое регулирование реактивной мощности генератора независимо от регулирования активной мощности?

12. Как обеспечить встречное регулирование напряжения на шинах станции?

13. С помощью каких устройств может регулироваться напряжение у потребителей?

Глава вторая

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

2-1. ТРЕБОВАНИЯ К РЕГУЛИРОВАНИЮ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Отклонение частоты, в отличие от отклонения напряжения, является общесистемным показателем качества электрической энергии, так как во всех точках синхронно работающей системы частота одинакова. Изменение частоты происходит при нарушении баланса между суммарной мощностью первичных двигателей (турбин) и нагрузкой генераторов. Действительно, в соответствии с законом сохранения энергии суммарная мощность турбин P_T расходуется на покрытие активной электрической нагрузки системы P_H и потерь активной мощности на станциях и в сетях $P_{пот}$, а также на изменение кинетической энергии вращающихся агрегатов энергосистемы:

$$P_T = P_H + P_{пот} + J\omega \frac{d\omega}{dt}, \quad (2-1)$$

где J — суммарный момент инерции вращающихся агрегатов энергосистемы; $\omega = 2\pi f$ — угловая скорость ($\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ при частоте $f = 50 \text{ Гц}$).

В установившемся режиме $\omega = \text{const}$, так как имеет место баланс мощностей:

$$P_T - (P_H + P_{пот}) = 0.$$

При набросе или сбросе нагрузки, а также при аварийном отключении отдельных агрегатов возникает небаланс мощностей, приводящий к изменению частоты в энергосистеме.

Конструктивные параметры вращающихся агрегатов, производящих и потребляющих электрическую энергию,

рассчитываются таким образом, чтобы при номинальной частоте к. п. д. был максимальным. Отклонение частоты от номинального значения ухудшает экономические показатели отдельных элементов и энергосистемы в целом. Наиболее существенно отклонения частоты сказываются на работе самих электростанций: изменение производительности механизмов собственных нужд, приводом которых являются асинхронные электродвигатели (питательные насосы, циркуляционные насосы, дымососы, вентиляторы), нарушает режим работы парогенератора и турбины; изменение частоты вращения турбины вызывает рост потерь и ускоряет износ рабочих лопаток. Все это приводит к снижению экономических показателей работы электростанций.

У вращающихся токоприемников с изменением частоты ухудшается к. п. д., изменяется производительность, что в ряде случаев отражается на технологическом процессе. Так, например, в текстильной промышленности изменение частоты вращения частей станка отражается на качестве нити и вызывает брак в тканях. Для многих потребителей заметное снижение производительности наступает при понижении частоты на 1 Гц и более.

Таким образом, для надежной и экономичной работы отдельных элементов энергосистемы недопустимы значительные отклонения частоты (более 1—2%). Однако точность поддержания частоты в пределах 1—2% совершенно недостаточна для обеспечения экономичной работы энергосистемы в целом. Объясняется это тем, что при изменении частоты значительно и по-разному меняются нагрузки генераторов вследствие различных коэффициентов статизма характеристик первичных регуляторов турбины. Обычно относительный статизм первичных регуляторов турбины

$$s_* = -\Delta f_* / \Delta P_* = 0,02 \div 0,06,$$

где $\Delta f_* = \Delta f / f_{\text{ном}}$; $\Delta P_* = \Delta P / P_{\text{ном}}$ — относительные отклонения частоты в энергосистеме и мощности агрегата. При $\Delta f_* = 0,01$ (1%, 0,5 Гц)

$$\Delta P_* = -\frac{\Delta f_*}{s_*} = \frac{0,01}{0,02 \div 0,06} = 0,5 \div 0,167.$$

Такие, даже кратковременные, перераспределения нагрузок приводят к частым отклонениям режима энергосистемы от экономически наилучшего, а следовательно, к пережогу топлива в целом по энергосистеме.

Поэтому согласно Правилам устройства электроустановок и Правилам технической эксплуатации в современных энергосистемах отклонение частоты допускается в пределах $50 \pm (0,1 \div 0,2)$ Гц, т. е. $\Delta f \% = 0,2 \div 0,4 \%$. Таким образом, при нормальных эксплуатационных условиях частота должна регулироваться с очень высокой точностью, практически по астатической характеристике.

Регулирование частоты осуществляется изменением суммарной мощности турбин путем изменения впуска энергоносителя (пара, воды). Однако для обеспечения минимума затрат энергосистемы на покрытие фактической нагрузки изменение мощностей турбин должно осуществляться так, чтобы не нарушались ограничения по допустимым значениям перетоков мощности и условия наименее выгодного распределения активных нагрузок (§ 2-2). Таким образом, регулирование частоты в энергосистеме неразрывно связано с регулированием мощности и распределением активных нагрузок между отдельными агрегатами и электростанциями.

В объединенной энергосистеме требование к точности регулирования частоты выше, чем в изолированно работающей энергосистеме, так как отклонения частоты влияют на распределение мощностей как между отдельными электростанциями, так и между энергосистемами. Последнее приводит к экономически существенному изменению потоков мощности по межсистемным связям. Однако удовлетворить требованию точности регулирования частоты в объединении все же легче, так как с увеличением числа станций, участвующих в регулировании, уменьшается отклонение мощности каждой из них при одном и том же возмущении.

С ростом энергосистем увеличивается вероятность появления слабых связей, имеющих недостаточную пропускную способность, в связи с чем на первый план во многих случаях вместо регулирования частоты выдвигается задача регулирования (ограничения) перетоков мощности. Допустимые значения перетоков активной мощности по межсистемным линиям электропередачи определяются условиями устойчивости параллельной работы и поддерживаются в заданных пределах вручную или с помощью специальных автоматических устройств — ограничителей перетоков. В отдельных случаях наряду с автоматическим ограничением осуществляется автоматическое регулирование перетоков актив-

ной мощности по межсистемным линиям электропередачи, что необходимо для обеспечения экономичной работы энергосистем или для выполнения контрактных (договорных) обязательств с зарубежными энергосистемами. Объединенное диспетчерское управление, исходя из условий максимальной экономичности всего объединения, подсчитывает и задает каждой энергосистеме график суммарной активной мощности ее электростанций, а в ряде случаев — график суммарного перетока активной мощности из заданной системы во все смежные. Регулирование нормального режима данной энергосистемы должно осуществляться в соответствии с этим графиком и условиями наивыгоднейшего распределения нагрузок между электростанциями и агрегатами. Корректировка режима осуществляется автоматически или вручную в случае отклонения в процессе эксплуатации нагрузки энергосистемы или состава агрегатов по сравнению с планом.

Требования к регулированию частоты и перетоков активной мощности между объединениями, входящими в Единую энергетическую систему, аналогичны.

2-2. УСЛОВИЯ НАИВЫГОДНЕЙШЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНЫХ НАГРУЗОК

Активная нагрузка между параллельно работающими агрегатами одной электростанции (блоки ГРЭС, турбоагрегаты и парогенераторы ТЭЦ с общим паропроводом, гидроагрегаты ГЭС) должна распределяться так, чтобы обеспечивались условия:

$$b_1 = \dots = b_i = \dots = b_n; \quad P_1 + \dots + P_i + \dots + P_n = P_n, \quad (2-2)$$

где b_i — удельный («относительный» — у многих авторов) прирост расхода энергоносителя i -го агрегата. Величина $b_i = dB_i/dP_i$ определяет изменение расхода энергоносителя в единицу времени B_i (т/ч, Гкал/ч, м³/с) при изменении нагрузки агрегата P_i на одну единицу; для всех агрегатов $b_i > 0$; P_i , P_n — нагрузка i -го агрегата и суммарная нагрузка, заданная всем n агрегатам соответственно.

Справедливость приведенных условий подтверждается следующими простыми соображениями. Пусть параллельно работают два агрегата с нагрузками P_1 и P_2 , причем $b_1 < b_2$; $P_1 + P_2 = P_n$. Не изменяя заданной нагруз-

ки P_n , увеличиваем нагрузку первого агрегата с меньшим удельным приростом на небольшую величину ΔP и уменьшаем на эту же величину нагрузку второго агрегата. При этом изменится расход энергоносителя первого агрегата на $\Delta B_1 = b_1 \Delta P$, второго — на $\Delta B_2 = -b_2 \Delta P$, а обоих агрегатов на $\Delta B_1 + \Delta B_2 = \Delta P (b_1 - b_2) < 0$, т. е. получится экономия. Такое перераспределение для любого количества агрегатов, очевидно, выгодно вести до тех пор, пока удельные приросты сравниваются.

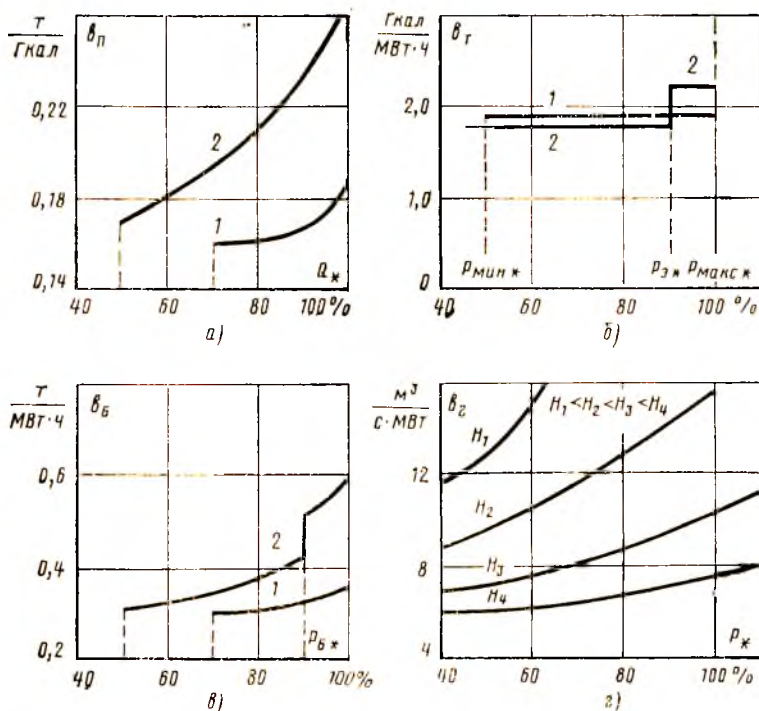


Рис. 2-1. Характеристики удельных приростов.

а — парогенераторов; б — турбин с дроссельным регулированием (1) и перегрузочным клапаном (2); в — энергоблоков; г — гидроагрегата при различных напорах H .

Зависимость $b_i(P_i)$, называемая характеристикой удельного прироста, строится по расходной характеристике агрегата $B_i(P_i)$ путем графического дифференцирования. На рис. 2-1 приведены типичные характеристики

удельных приростов различных агрегатов: парогенераторов (рис. 2-1,а), турбин (рис. 2-1,б), блоков парогенератор — турбина — генератор (рис. 2-1,в), гидроагрегата (рис. 2-1,г). Значение удельного прироста блока при каждой нагрузке подсчитывается по формуле, т/МВт·ч:

$$b_6 = b_{\text{п}} b_{\text{т}},$$

где $b_{\text{п}}$ — удельный приrost парогенератора, т/Гкал (расход топлива измеряется в тоннах условного топлива); $b_{\text{т}}$ — удельный приrost турбины, Гкал/(МВт·ч).

При $P = P_{\text{макс}}$ и $P = P_{\text{мин}}$ условно считают, что характеристики удельного прироста параллельны оси ординат. Это обеспечивает работу агрегата в регулировочном диапазоне (от $P_{\text{мин}}$ до $P_{\text{макс}}$) при распределении нагрузки по правилу равенства удельных приростов. Характеристика удельного прироста гидроагрегата зависит от действующего напора на ГЭС и поэтому строится для нескольких реальных напоров $H_1 < H_2 < H_3 < H_4$.

Из рис. 2-1 видно, что с увеличением нагрузки агрегата удельный приrost не убывает. Это свойство характеристик удельного прироста используется при построении систем регулирования активной мощности.

По характеристикам удельных приростов отдельных агрегатов и условию наивыгоднейшего распределения нагрузок можно построить характеристику удельного прироста электростанции $b_{\text{ЭС}}(P_{\text{п}})$ и зависимости нагрузок каждого агрегата от распределяемой между ними суммарной нагрузки $P_i(P_{\text{п}})$. Эти зависимости для тепловой электростанции, состоящей из двух блоков одинаковой мощности с характеристиками удельных приростов рис. 2-1,в, построены на рис. 2-2. Здесь

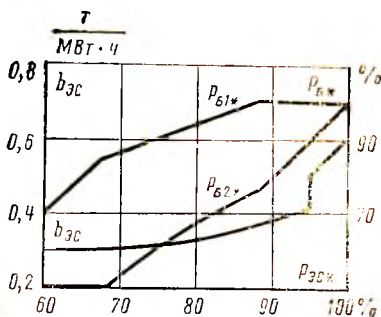


Рис. 2-2. Наивыгоднейшее распределение нагрузки электростанции между блоками.

$$b_{\text{ЭС}} = b_1 = b_2; P_{\text{ЭС}*} = \frac{1}{2} (P_{61*} + P_{62*}).$$

Характеристики удельного прироста гидроэлектростанций строятся с учетом пуска или остановки последующих агрегатов. Пуск очередного агрегата производится при увеличении нагрузки гидроэлектростанции до такого значения, при котором расход воды после пуска станет меньше, чем до пуска этого агрегата, остановка — при уменьшении нагрузки.

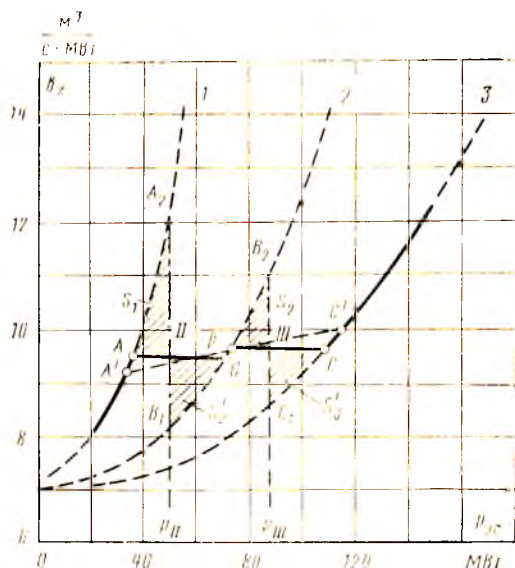


Рис. 2-3. Пример построения характеристики удельного прироста ГЭС для одного значения напора.

На рис. 2-3 штриховыми кривыми 1, 2 и 3 показаны характеристики удельного прироста гидроэлектростанции с однотипными агрегатами при работе соответственно одного, двух и трех агрегатов. Кривые 2 и 3 построены путем умножения абсцисс характеристики одного агрегата на число агрегатов при различных ординатах с учетом поправок на потери напора, зависящие от расхода воды всей гидроэлектростанцией [43]. При увеличении нагрузки до P_{II} осуществляется пуск второго агрегата, до P_{III} — третьего. После пуска очередного агрегата и соответствующего уменьшения нагрузки каждого из работающих удельный прирост каждого из них, а следовательно, и всей гидроэлектростанции резко снижается. В резуль-

тате характеристика удельных приростов гидростанции приобретает вид пилообразной кривой (см. рис. 2-3) $A-A_2-B_1-B-B_2-C_1-C$ с разрывами непрерывности при P_{II} и P_{III} . Многозначная характеристика удельного прироста не пригодна для определения по ней мощности гидростанции в процессе автоматического регулирования. Один из распространенных способов получения однозначной упрощенной характеристики заключается в замене действительной характеристики на участке разрыва непрерывности отрезком прямой, параллельной оси абсцисс (AB, DC), так чтобы обеспечивалось равенство площадей между осью абсцисс и характеристиками исходной и упрощенной, т. е.

$$S_1=S'_2; \quad S_2=S'_3.$$

Пользование спрямленной указанным способом ступенчатой характеристикой (а не исходной) обеспечивает наивыгоднейший режим работы при учете того, что участки AB и DC являются зонами нежелательных нагрузок [43].

В случае многоагрегатных гидростанций, когда разница между значениями удельных приростов соседних ступеней невелика, спрямленную часть характеристики можно заменить прямой, имеющей некоторый наклон к оси абсцисс ($A'-C'$, рис. 2-3).

Таким образом, значения удельного прироста как для тепловых станций, так и для гидростанций повышаются с ростом нагрузки.

Активная нагрузка между тепловыми электростанциями в сосредоточенных энергосистемах с короткими линиями, когда потерями активной мощности в сетях можно пренебречь, должна распределяться по условию уравнивания удельных приростов часовой стоимости затрат (удельных приростов издержек), а не часового расхода условного топлива, так как стоимость одной тонны условного топлива на различных станциях различна:

$$\varepsilon_1=\dots=\varepsilon_i=\dots=\varepsilon_n; \quad P_1+\dots+P_i+\dots+P_n=\Sigma P_n, \quad (2-3)$$

где $\varepsilon_i=dT_i/dP_i$ — удельный прирост часовой стоимости затрат (издержек) i -й электростанции; T_i — часовая стоимость затрат (издержки) на выработку мощности P_i ; ΣP_n — суммарная нагрузка всех электростанций.

Следует заметить, что в условиях дефицита топлива более целесообразным может оказаться распределение

нагрузки по минимуму расхода условного топлива. При этом хотя и будут иметь место повышенные затраты, однако суммарный расход условного топлива будет на 1—2% меньше.

Распределение нагрузки между тепловыми электростанциями, когда потерями активной мощности в сетях пренебречь нельзя, должно производиться с учетом этих потерь по условиям:

$$\frac{\epsilon_1}{1 - \frac{\partial \Pi}{\partial P_1}} = \dots = \frac{\epsilon_i}{1 - \frac{\partial \Pi}{\partial P_i}} = \dots = \frac{\epsilon_n}{1 - \frac{\partial \Pi}{\partial P_n}} = \mu; \quad (2-4)$$

$$P_1 + \dots + P_i + \dots + P_n = \Sigma P_{\Pi} + \Pi,$$

где μ — удельный прирост затрат энергосистемы с учетом потерь в сетях; Π — суммарные потери в сетях; $\partial \Pi / \partial P_i$ — удельный прирост потерь при увеличении активной мощности i -й электростанции.

При определении удельного прироста потерь i -й электростанции, выражающего изменение потерь активной мощности в сетях при изменении мощности электростанции на единицу, предполагается, что мощности всех остальных электростанций неизменны, а баланс мощностей обеспечивается за счет изменения нагрузки в производной, но одной и той же для разных электростанций «балансирующей» точке.

Справедливость приведенных условий, если пренебречь влиянием распределения активных мощностей на распределение реактивных мощностей, подтверждается следующими простыми соображениями. Увеличим нагрузку i -й электростанции на малую величину ΔP_i . Нагрузка балансирующей точки должна быть изменена при этом на величину ΔP_{Π} . Чтобы частота в энергосистеме не изменилась,

$$\Delta P_i = \Delta P_{\Pi} + \Delta \Pi,$$

где $\Delta \Pi$ — приращение потерь в сетях $\Delta \Pi = (\partial \Pi / \partial P_i) \Delta P_i$, так как мощности остальных электростанций не изменяются.

Следовательно,

$$\Delta P_{\Pi} = \Delta P_i (1 - \partial \Pi / \partial P_i) = \Delta P_i \sigma_i,$$

где $\sigma_i = \Delta P_{\Pi} / \Delta P_i$ — доля полезно используемой мощности при приросте мощности на i -й электростанции.

Пусть прирост затрат на i -й электростанции (и в энергосистеме) составит при этом

$$\Delta T_i = \varepsilon_i \Delta P_i.$$

Найдем прирост затрат энергосистемы на единицу полезно отпущенной мощности — удельный прирост затрат с учетом потерь

$$\mu = \frac{\Delta T_i}{\Delta P_{ii}} = \frac{\varepsilon_i}{1 - \frac{\partial \Pi}{\partial P_i}} = \frac{\varepsilon_i}{\pi_i}. \quad (2-5)$$

Если величины μ не одинаковы для каких-либо двух электростанций, то можно получить экономию в энергосистеме, увеличив нагрузку станции с меньшим значением μ и соответственно снизив нагрузку станции с большим значением. Оптимальный режим наступит тогда, когда нагрузки электростанций перераспределятся так, что удельные приросты затрат с учетом потерь сравняются.

Распределение нагрузки между тепловыми и гидравлическими электростанциями в смешанной энергосистеме необходимо производить так, чтобы за расчетный период (цикл регулирования) при заданном потреблении воды турбинами ГЭС, которое определяется по прогнозу притока воды и расхода для судоходства, орошения и т. п., затраты тепловых электростанций были наименьшими. Для экономичного распределения нагрузки в этом случае необходимо соблюдать условия:

$$\frac{\varepsilon_i}{1 - \frac{\partial \Pi}{\partial P_i}} = \dots = \frac{\lambda_j b_j}{1 - \frac{\partial \Pi}{\partial P_j}} = \mu; \quad (2-6)$$

$$\sum_{i=a}^n P_i + \sum_{j=\beta}^v P_j = \sum P_{ii} + \Pi;$$

$$\int_0^T B_j dt = N_j.$$

где $i=a, b, \dots, n$ — индекс тепловой станции; $j=\alpha, \beta, \dots, v$ — индекс гидростанции; $b_j = \partial B_j / \partial P_j$ — удельный прирост часового расхода воды j -й ГЭС; N_j — заданный расход воды j -й ГЭС за период T .

Коэффициент λ_j (неопределенный множитель), равный изменению затрат тепловых электростанций при изменении пропуска воды через турбины гидростанции

на единицу, предварительно рассчитывается для каждой станции за период T , исходя из предполагаемых графиков нагрузки, так чтобы расход воды на ГЭС за расчетный период T имел заданное значение N_j , и периодически корректируется. Неоправданно заниженное значение коэффициента λ_j приведет к тому, что электрическая нагрузка j -й ГЭС будет задаваться слишком большой, что в свою очередь приведет к снижению напора и затоплению нижнего бьефа и наоборот.

Для расчета коэффициентов λ_j и удельных приростов потерь $\partial\Pi/\partial P$ в различных режимах работы энергосистемы используются вычислительные машины.

2.3. МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Регулирование с положительным статизмом. Простейшим методом регулирования частоты в энергосистеме и распределения активных нагрузок между генераторами является регулирование всеми агрегатами, регуляторы частоты вращения которых (§ 2-4) имеют характеристики с положительным статизмом.

Поскольку отклонение частоты Δf одинаково для всех n генераторов энергосистемы, то уравнение характеристики регулирования для каждого (i -го) агрегата можно записать в виде:

$$\Delta f + s_i \Delta P_i = 0; \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (2-7)$$

Решив систему n уравнений с учетом того, что $\sum_{i=1}^n \Delta P_i = \Delta P_c$ (суммарное изменение мощности системы), получим:

$$\Delta f + s_c \Delta P_c = 0; \quad s_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i}}; \quad \frac{\Delta P_i}{\Delta P_c} = \frac{s_k}{s_i}, \quad (2-8)$$

где s_i , s_k , s_c — коэффициенты статизма i -го, k -го агрегатов и всей энергосистемы, т. е. частота в энергосистеме регулируется со статизмом по суммарной активной мощности (не астатически), а нагрузки между агрегатами распределяются обратно пропорционально коэффициентам статизма регуляторов частоты вращения (не наимыгоднейшим образом).

Обычно коэффициент статизма энергосистемы, отн. ед.,

$$s_{c*} = s_c \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{НОМ } i}}{f_{\text{НОМ}}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{НОМ } i}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_{\text{НОМ } i}}{s_{i*}}} = 0,05 - 0,1.$$

Подсчитаем, какое относительное изменение нагрузки системы вызывает отклонение частоты $\Delta f = 0,4\%$:

$$\Delta P_c \% = \frac{\Delta f \%}{s_{c*}} = \frac{0,4}{0,05 - 0,1} = 8 \div 4\%.$$

Практически изменения нагрузки могут быть еще больше, следовательно, отклонение частоты выйдет за $0,4\%$.

При этом методе автоматического регулирования необходимо дополнительно вручную по распоряжению диспетчера воздействовать на системы регулирования турбин для поддержания частоты в энергосистеме и перераспределения активных нагрузок.

Астатическое регулирование одним агрегатом. Этот метод может применяться для астатического регулирования частоты в небольшой по мощности изолированной энергосистеме. Для регулирования выделяется один агрегат, регулятор частоты вращения которого имеет астатическую настройку. Этот агрегат воспринимает все изменения нагрузки энергосистемы в пределах своего регулировочного диапазона. Нагрузки остальных агрегатов в конце процесса регулирования неизменны. Действительно, если $s_1 = 0$, а $s_i \neq 0$ ($i = 2, \dots, n$), то из формул (2-8)

$$s_c = \frac{1}{\frac{1}{s_1} + \sum_{i=2}^n \frac{1}{s_i}} = 0; \quad \Delta f = -s_c \Delta P_c = 0;$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_c \frac{s_c}{s_1} = \frac{\Delta P_c}{1 + s_1 \left(\frac{1}{s_2} + \dots + \frac{1}{s_n} \right)} = \Delta P_c;$$

$$\Delta P_i = \Delta P_1 \frac{s_1}{s_i} = 0.$$

Наивыгоднейшее распределение активных нагрузок при этом методе обеспечивается вручную.

Включение на параллельную работу нескольких агрегатов, регуляторы скорости которых имеют астатическую настройку, приводит, если не принять специальных мер, к неопределенному распределению активных нагрузок между ними, что является неприемлемым. Действительно, если $s_1=0$ и $s_2=0$, а $s_i \neq 0$ ($i=3, \dots, n$), то

$$\Delta P_1 = \frac{\Delta P_c}{1+0.00} ; \Delta P_2 = \frac{\Delta P_c}{1+0.00} ; \Delta P_i = 0.$$

Метод ведущего генератора. Этот метод отличается от предыдущего тем, что к регулированию частоты привлекаются, помимо ведущего агрегата с астатической настройкой, еще несколько ведомых агрегатов регулирующей электростанции, регуляторы частоты вращения которых имеют характеристики с положительным статизмом. Активная нагрузка на этих агрегатах принудительно меняется тем или иным способом в зависимости от нагрузки ведущего агрегата обычно по закону:

$$\Delta P_i = k_i \Delta P_v, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (2-9)$$

где $\Delta P_v, \Delta P_i$ — изменение нагрузки ведущего и ведомых агрегатов; k_i — коэффициент пропорциональности.

Ведущий агрегат, обеспечивающий астатическое регулирование частоты, воспринимает лишь часть изменения нагрузки системы, что расширяет регулировочный диапазон:

$$\Delta P_v + \Delta P_v \sum_{i=1}^n k_i = \Delta P_c,$$

откуда

$$\Delta P_v = \frac{\Delta P_c}{1 + \sum_{i=1}^n k_i}. \quad (2-10)$$

Метод долевого статизма применяется для астатического регулирования частоты одной электростанцией с пропорциональным распределением нагрузки между агрегатами, регулирующими частоту.

Закон регулирования по этому методу каждого агрегата определяется выражением

$$\Delta f + s_i \left(P_i - \alpha_i \sum_{i=1}^n P_i \right) = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2-11)$$

где α_i — доля участия i -го агрегата в покрытии суммарной активной нагрузки $\sum_{i=1}^n P_i$; $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$; s_i — коэффициент долевого статизма.

Разделив каждое уравнение на соответствующий коэффициент долевого статизма и просуммировав все уравнения, получим условия, при которых завершится процесс регулирования:

$$\Delta f = 0; \quad P_i = \alpha_i \sum_{i=1}^n P_i, \quad (2-12)$$

т. е. в любом установившемся режиме нагрузка каждого агрегата составляет определенную заранее заданную долю суммарной нагрузки всех агрегатов, регулирующих частоту. Регулирование ведется со статизмом по исчезающему в конце процесса регулирования отклонению фактической активной нагрузки агрегата от заданной доли суммарной активной нагрузки электростанции:

$$\Delta P_i = P_i - \alpha_i \sum_{i=1}^n P_i = 0.$$

Поэтому данный метод называют еще методом мнимого статизма.

Левую часть уравнения (2-11), отражающего закон регулирования каждого агрегата, можно рассматривать как сигнал на входе усилительного устройства регулятора частоты вращения. Процесс регулирования протекает в принципе следующим образом. При нарушении баланса активных мощностей в энергосистеме частота отклоняется от заданного значения и все регуляторы приходят в действие от сигнала Δf . Они изменяют мощности агрегатов так, чтобы восстановить частоту до прежнего значения.

Активная нагрузка перераспределяется между агрегатами под действием сигнала ΔP_i до тех пор, пока нагрузки агрегатов не станут равными заданным долям суммарной нагрузки и сигнал не исчезнет. Установившийся режим не может наступить при $\Delta f \neq 0$, так как суммарный сигнал при этом может быть равен нулю только в одном регуляторе, а в других будет отличаться от нуля, и они будут продолжать регулирование.

Регулирование частоты одной станцией с пропорциональным распределением нагрузок в большинстве случаев не является экономически самым выгодным. Рассмотренный метод применяется на гидростанциях с однотипными агрегатами, имеющими приблизительно одинаковые характеристики удельного прироста, в виде схем уравнивания активных мощностей или пропорциональных им открытий направляющих аппаратов гидротурбин (§ 2-5).

Самым выгодным распределением нагрузок между электростанциями осуществляется вручную по команде диспетчера или автоматически с помощью дополнительных автоматических устройств, работающих по методу интегрального отклонения частоты (см. ниже).

Метод долевого статизма в принципе можно применять для астатического регулирования частоты несколькими электростанциями с пропорциональным распределением на-

грузки между ними, понимая под P_i и $\sum_{i=1}^n P_i$ в законе ре-

гулирования соответственно активную нагрузку i -й станции и суммарную нагрузку станций, регулирующих частоту. Однако для передачи на каждую регулируемую станцию суммарной нагрузки необходима надежная сеть телеканалов связи и устройств телеизмерения, что резко снижает эффективность такого применения метода, не обеспечивая самого выгодного распределения активных нагрузок.

Метод интегрального отклонения частоты. Интегральным отклонением частоты называют величину

$$\delta f = - \int_{t_1}^t \Delta f_* dt, \quad (2-13)$$

где t_0 — начальный момент времени, когда $\delta f = 0$; $\Delta f_* = \Delta f / f_{\text{ном}}$ — мгновенное относительное отклонение частоты.

Интегральное отклонение частоты называют также отклонением электрического времени, так как δf равно разности астрономического и электрического времени. Электрическое время определяется по изменению положения стрелки электрических часов:

$$t_3 = \int_{t_0}^t \frac{f_c}{f_{\text{ном}}} dt,$$

астрономическое время можно рассматривать как показание электрических часов, питающихся от источника эталонной частоты:

$$t_n = \int_{t_0}^t \frac{f_{\text{э}}}{f_{\text{ном}}} dt = t,$$

если $f_{\text{э}} = f_{\text{ном}}$.

Разность показаний

$$t_n - t_3 = - \int_{t_0}^t \frac{f_c - f_{\text{э}}}{f_{\text{ном}}} dt = - \int_{t_0}^t \Delta f_* dt = \delta f.$$

Схемы датчиков интегрального отклонения частоты рассматриваются в § 2-7 и 2-8.

Свойства интегрального отклонения частоты:

величина δf одинакова для всех агрегатов и станций синхронно работающей энергосистемы, если отсчитывается от одного и того же момента времени t_0 ;

при изменении нагрузки энергосистемы и отклонении частоты от заданного значения величина δf изменяется в ту же сторону, что и суммарная нагрузка энергосистемы: с увеличением суммарной нагрузки понижается частота и увеличивается с течением времени интегральное отклонение частоты, с уменьшением нагрузки и повышением частоты δf уменьшается;

изменение δf продолжается до тех пор, пока не будет устранено отклонение частоты от заданного значения; при $\Delta f = 0$, т. е. когда имеет место баланс мощностей, δf не изменяется.

Эти свойства интегрального отклонения частоты позволяют использовать его в качестве параметра зада-

ния при построении автоматических систем регулирования частоты и активной мощности.

Действительно, нагрузка между агрегатами, регулирующими частоту, распределяется в процессе регулирования путем сравнения фактической нагрузки агрегата P_i с некоторым заданием $P_{уст i}$, и тогда действие системы регулирования каждого агрегата описывается уравнением

$$\Delta f + s_i(P_i - P_{уст i}) = 0. \quad (2-14)$$

Для обеспечения наивыгоднейшего распределения нагрузок необходимо с изменением режима работы энергосистемы автоматически изменять задание в соответствии с характеристиками удельных приростов агрегатов

$$P_{уст i(\varepsilon)} = \eta_i(\varepsilon_{уст i})$$

по условию наивыгоднейшего распределения активных нагрузок (§ 2-2):

$$\mu_{уст 1} = \dots = \mu_{уст i} = \dots = \mu_{уст n} = \mu_{уст}.$$

Здесь η_i обозначает функциональную зависимость, соответствующую характеристике удельного прироста i -го агрегата; $\mu_{уст}$ — задаваемое значение удельного прироста с учетом потерь в сетях;

$$\varepsilon_{уст i} = \mu_{уст} \left(1 - \frac{\partial \Pi}{\partial P_i} \right) = \mu_{уст} \sigma_i.$$

Если нагрузка системы увеличивается, нужно увеличивать задаваемую мощность каждой станции и агрегату, сохраняя одинаковыми их удельные приросты с учетом потерь в сетях μ_i , и наоборот. Изменение заданий нужно вести до тех пор, пока не наступит баланс мощностей при $f_c = f_{ном}$. Учитывая, что удельный прирост любой станции повышается с ростом ее нагрузки, в качестве общесистемного задания можно использовать величину удельного прироста $\mu_{уст}$. В некоторых системах регулирования в качестве общесистемного задания используется $I_g \mu_{уст}$.

Требования к изменению задаваемого удельного прироста в процессе регулирования:

задаваемые значения $\mu_{уст}$ или $I_g \mu_{уст}$ должны быть одинаковы для всех станций;

при изменении нагрузки энергосистемы необходимо изменять $\mu_{уст}$ или $I_g \mu_{уст}$ в ту же сторону, в какую изменилась суммарная нагрузка энергосистемы;

изменение $\mu_{уст}$ или $\lg \mu_{уст}$ необходимо прекратить тогда, когда частота станет равной номинальной.

Этими требованиями руководствуется диспетчер при управлении режимом энергосистемы. Для автоматического изменения задаваемого удельного прироста в качестве параметра задания можно использовать интегральное отклонение частоты, поскольку его свойства отвечают требованиям к изменению задания, т. е.

$$\mu_{уст} = \mu_0 + k_\mu \delta f \text{ или } \lg \mu_{уст} = \lg \mu_0 + k_\mu \delta f, \quad (2-15)$$

где μ_0 — значение удельного прироста при $\delta f = 0$. Коэффициент k_μ может не быть постоянным, лишь бы величина $k_\mu \delta f$ обладала теми же свойствами, что и δf .

Процесс регулирования по рассматриваемому методу протекает следующим образом. При нарушении баланса мощностей в энергосистеме появляется отклонение частоты от номинального значения ($\Delta f \neq 0$); автоматически изменяется $\mu_{уст}$ и мощность, задаваемая каждой станции или агрегату, участвующему в регулировании:

$$P_{уст\ i}(\Delta f) = \eta_i(\mu_{уст} \sigma_i) \quad (2-16)$$

или

$$P_{уст\ i}(\Delta f) = \eta'_i(\lg \mu_{уст} + \lg \sigma_i).$$

Под действием сигналов Δf и $P_i - P_{уст\ i}(\Delta f)$ изменяется мощность агрегатов. Регулирование прекратится тогда, когда перестанут изменяться $P_{уст\ i}(\Delta f)$, т. е. когда восстановится номинальная частота. В установившемся режиме частота номинальная, а распределение нагрузок наивыгоднейшее:

$$\Delta f = 0; \quad P_i = P_{уст\ i}(\Delta f) = \eta_i(\epsilon_{уст\ i}). \quad (2-17)$$

Роль сигнала Δf заключается в повышении качества регулирования.

По описанному методу работают современные автоматические системы регулирования частоты и мощности, воздействующие на несколько электростанций (§ 2-7, 2-8).

В энергосистемах Советского Союза применяется предложенная институтом «Энергосетьпроект» система с отдельным регулированием плановых и внеплановых изменений активной нагрузки.

В соответствии с этим принципом распределение плановых изменений активной нагрузки между элект-

тростанциями осуществляется путем задания каждой станции графиков изменения ее мощности, которые реализуются автоматически через системы группового регулирования активной мощности агрегатов станции или вручную дежурным персоналом.

Распределение внеплановых изменений активных нагрузок производится с приближенным учетом экономических факторов и технологических особенностей электростанций.

Достоинством этой системы является то, что она обеспечивает основные требования по поддержанию частоты, сравнительно проста, может вводиться в действие поэтапно, не требуя больших одновременных затрат.

Методы регулирования частоты и потоков обменной мощности в объединенных энергосистемах. Для обеспечения параллельной работы энергосистем, входящих в объединение, так же как при методе мнимого статизма, регулирование частоты каждой энергосистемой осуществляется со статизмом по отклонению потока обменной активной мощности от заданного. Поскольку отклонение частоты Δf одинаково для всех n энергосистем объединения, то уравнение регулирования каждой i -й энергосистемы можно записать в виде

$$\Delta f + \sigma_{ci} \Delta P_{оби} = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2-18)$$

где σ_{ci} — коэффициент регулирования для i -й энергосистемы; $\Delta P_{оби}$ — отклонение потока обменной мощности i -й энергосистемы от заданной уставки $P_{оби}$.

Уставка по каждой межсистемной связи одинакова для соединяемых ею энергосистем.

Будем считать поток обменной мощности положительным, если он направлен из рассматриваемой энергосистемы, тогда

$$P_{оби} = -P_{обк} \text{ и } \Delta P_{оби} = -\Delta P_{обк}, \quad (2-19)$$

где i и k — индексы связанных между собой энергосистем.

Поскольку все энергосистемы связаны попарно, то

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_{ои} = 0. \quad (2-20)$$

Разделим каждое из n уравнений регулирования отдельных энергосистем на соответствующий коэффициент

регулирования и просуммируем их для нахождения уравнения регулирования объединения:

$$\Delta f \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{ci}} + \sum_{i=1}^n \Delta P_{об i} = 0. \quad (2.21)$$

Так как

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_{об i} = 0, \text{ а } \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{ci}} \neq 0,$$

то в конце процесса регулирования $\Delta f = 0$ независимо от выбора значений σ_{ci} .

Если для каждой энергосистемы выбрать коэффициент регулирования σ_{ci} равным значению полного статизма частотной характеристики данной энергосистемы $\sigma_{ci} = -\Delta f / \Delta P_{об i}$, то на изменение нагрузки в одной из энергосистем, например k -й, будут реагировать автоматические регуляторы частоты и мощности только этой энергосистемы, а автоматические регуляторы частоты и мощности связанной с ней энергосистемы, например i -й, будут бездействовать до изменения задаваемого значения суммарного перетока (свойство автономности). Действительно, в этом случае при

$$\Delta P_{об i} = -\Delta f / \sigma_{ci} > 0$$

значение

$$\Delta P_{об k} = -\Delta P_{об i} < 0;$$

левая часть уравнения регулирования i -й энергосистемы при $\sigma_{ci} = \sigma_{ci}$

$$\Delta f + \sigma_{ci} \left(-\frac{\Delta f}{\sigma_{ci}} \right) = 0,$$

т. е. регуляторы бездействуют, а в k -й энергосистеме

$$\Delta f + \sigma_{ck} \Delta P_{об k} < 0,$$

так как $\Delta f < 0$ и $\Delta P_{об k} < 0$, т. е. регуляторы будут поднимать нагрузку генераторов до тех пор, пока не установятся $\Delta f = 0$ и $\Delta P_{об k} = 0$. При указанном выборе коэффициентов регулирования σ_c реализуется так называемый *метод регулирования частоты по внутреннему статизму энергосистемы*.

Такое же автономное регулирование можно обеспечить и без специального выбора коэффициентов регули-

рования σ_c , применяя метод селективного регулирования частоты. По этому методу автоматические регуляторы частоты во всех энергосистемах с различными знаками Δf и $\Delta P_{об}$ автоматически блокируются и работают только в энергосистеме с изменившейся нагрузкой, в которой знаки Δf и $\Delta P_{об}$ совпадают.

Если для одной энергосистемы принять $\sigma_{c1}=0$, то эта энергосистема, называемая регулирующей, будет астатически регулировать частоту в объединении ($\Delta f=0$), помогая любой энергосистеме, в которой изменилась нагрузка, быстрее восстановить частоту. После восстановления частоты в объединении регулирование в энергосистеме с изменившейся нагрузкой будет продолжаться до тех пор, пока не восстановится заданный поток обменной мощности, т. е. пока эта энергосистема не примет на себя весь прирост нагрузки. Такой метод иногда называют *методом регулирующей энергосистемы*.

Реализация закона регулирования $\Delta f=0$ или $\Delta f + \sigma_{c1}\Delta P_{об1}=0$ в каждой энергосистеме может осуществляться соответственно с помощью метода интегрального отклонения частоты при автоматическом ограничении потока активной мощности предельно допустимым значением или с помощью метода интегрального отклонения частоты и обменной мощности, при котором в качестве системного параметра задания используется

$$\int_{t_0}^t (\Delta f_* + \sigma_{ci*} \Delta P_{об i*}) dt. \quad (2-22)$$

2-4. РЕГУЛЯТОРЫ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ТУРБИН

Регулятор частоты вращения является первичным регулятором турбины. Он автоматически изменяет движущий момент турбины, воздействуя через регулирующий орган на впуск энергоносителя (пара, газа, воды). В качестве регулирующего органа тепловой турбины применяются регулирующие клапаны, а гидротурбины — направляющий аппарат. У поворотно-лопастных гидротурбин два регулирующих органа: направляющий аппарат и лопасти рабочего колеса.

Первоначально, когда электростанции с небольшим количеством генераторов работали на изолированную нагрузку, первичный регулятор имел одно целевое назначение — поддержание в заданных пределах частоты

вращения (угловой скорости) турбины и, следовательно, частоты переменного тока при колебаниях нагрузки. В современных энергосистемах первичный регулятор турбины является одним из основных элементов общей системы регулирования режима по частоте и активной мощности. Его целевое назначение расширилось — помимо регулирования частоты он участвует в автоматическом перераспределении активных нагрузок между агрегатами. Старое название «регулятор скорости» используется до настоящего времени.

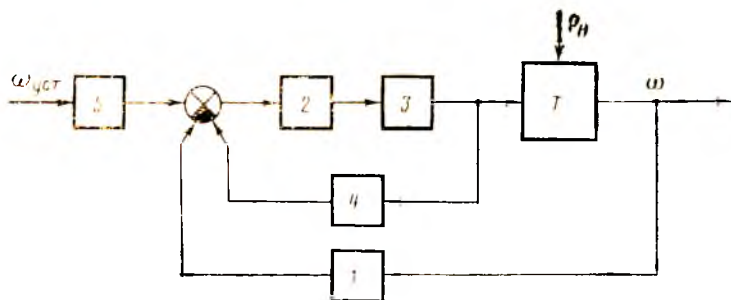


Рис. 2-4. Функциональная схема регулятора частоты вращения.

Применяемые в настоящее время регуляторы частоты вращения выполняются как регуляторы косвенного действия с гидравлическими усилителями и, несмотря на существенные конструктивные отличия, имеют одинаковую функциональную схему (рис. 2-4).

Регулятор содержит следующие функциональные элементы:

измерительное устройство 1 — датчик отклонения частоты вращения агрегата от заданного значения, датчик отклонения частоты напряжения, ускорения или других параметров регулирования;

усилительно-преобразовательное устройство 2 — магнитные и гидравлические усилители;

гидравлический исполнительный механизм ГИМ 3, воздействующий через регулирующий орган турбины Т на изменение впуска энергоносителя;

устройство коррекции 4 — жесткая и гибкая обратные связи по положению главного или вспомогательного ГИМ;

задающее устройство 5 — механизм изменения частоты вращения — МИЧВ (иначе — механизм изменения скорости вращения — МИСВ, числа оборотов — МИЧО, механизм регулирования оборотов — МРО, механизм управления турбиной — МУТ).

К вспомогательным устройствам относятся: механизм ограничения открытия направляющего аппарата, механизм управления комбинатором поворотной лопастью гидротурбины и др.

По роду используемых приборов различают следующие типы регуляторов частоты вращения:

центробежные, использующие в качестве датчика частоты вращения центробежный маятник;

гидродинамические, использующие в качестве датчика частоты вращения центробежный насос, создающий давление масла, зависящее от частоты вращения турбины; центробежные и гидродинамические регуляторы называют гидромеханическими;

электрогидравлические, использующие электрические элементы для построения измерительного устройства, предварительного усилителя, устройства коррекции и задающего устройства.

Конструктивное выполнение центробежных регуляторов для гидравлических и тепловых турбин различно. Для тепловых турбин усилие на выходе регулятора, управляющее клапанами впуска пара, сравнительно небольшое, и его удастся обеспечить с помощью одного каскада гидроусилителя. В гидравлических турбинах эти усилия больше, поэтому применяются два и более каскадов гидравлических усилителей.

Центробежный регулятор частоты вращения. Принципиальная схема простейшего центробежного регулятора частоты вращения с жесткой обратной связью показана на рис. 2-5,а. Нумерация функциональных элементов соответствует рис. 2-4.

Регулятор работает следующим образом. При изменении частоты вращения турбины T , например, в сторону уменьшения центробежный маятник 1 перемещает муфту из A_0 в положение A' , а поршень золотникового усилителя 2 из среднего положения вниз. Масло под давлением начинает поступать в нижнюю полость гидравлического исполнительного механизма (ГИМ) 3, а из верхней полости идет на слив. Поршень ГИМ, перемещаясь, воздействует на регулирующий орган тур-

бинны, увеличивая впуск энергоносителя. Это регулирующее воздействие способствует увеличению частоты вращения, т. е. перемещению точек A и C рычага AB из A' и C' вверх. Одновременно на перемещение точки C оказывает влияние перемещение поршня ГИМ благодаря жесткой обратной связи 4. Связь между перемещениями точек A , B и C из исходного положения

$$\Delta C = \Delta A \frac{BC}{AB} + \Delta B \frac{AC}{AB}.$$

Регулирование будет продолжаться до тех пор, пока поршень золотникового усилителя 2, а следовательно, и точка C не займут вновь нейтральное положение, при

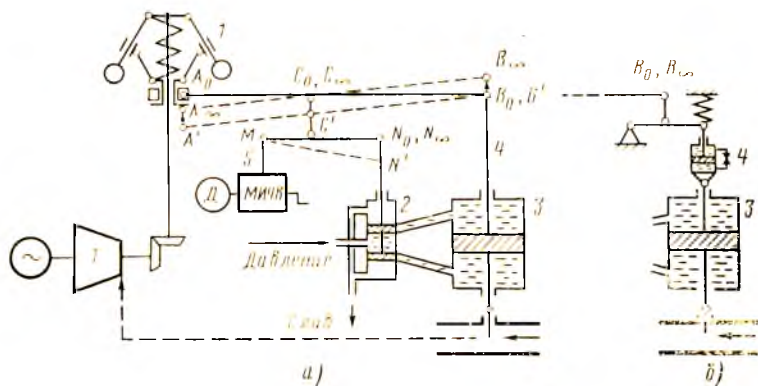


Рис. 2-5. Принципиальная схема центробежного регулятора частоты вращения.

a — с жесткой обратной связью; b — с гибкой обратной связью.

котором окна золотника закрыты, т. е. в установившемся режиме $\Delta C=0$, $\Delta A + (AC/BC) \Delta B=0$. Можно принять, что $\Delta A \approx k'_1 \Delta \omega = k_1 \Delta f$, $\Delta B \approx k_2 \Delta P$, тогда условие установившегося режима (закон регулирования агрегата)

$$\Delta f + s \Delta P = 0, \quad (2-23)$$

где

$$s = \frac{k_2}{F_1} \frac{AC}{BC}$$

— положительный коэффициент статизма.

Если отключить жесткую обратную связь ($\Delta P=0$), то по (2-23) $\Delta \dot{f}=0$, однако регулирование будет неустойчивым, так как поршень золотника будет занимать нейтральное положение при отсутствии баланса мощностей турбины и нагрузки.

Для смещения характеристики регулирования частоты вращения (зависимости f от активной нагрузки) вдоль оси f служит механизм изменения частоты вращения *МИЧВ*. Перемещая с помощью *МИЧВ* точку *М* вверх (вручную или автоматически с использованием двигателя *Д*), воздействуют на поршень золотника, перемещая его вниз. Увеличение впуска энергоносителя приведет к увеличению частоты вращения при работе генератора на изолированную нагрузку. При работе генератора в энергосистеме (при неизменной частоте) с помощью *МИЧВ* можно изменять нагрузку агрегата в пределах его регулировочного диапазона.

Для астатического регулирования частоты применяют вместо жесткой гибкую обратную связь 4 (рис. 2-5,б), состоящую из гидравлического демпфера (цилиндр, заполненный маслом, с поршнем; верхняя и нижняя полости цилиндра сообщаются через трубку с малым регулируемым отверстием) и пружины, образующих так называемое изодромное устройство.

После изменения нагрузки турбины изодромное устройство в начале процесса регулирования ведет себя как жесткая обратная связь (поршень не может быстро переместиться в цилиндре демпфера), чем предотвращается перерегулирование. Затем под действием пружины, стремящейся вернуться в первоначальное недеформированное состояние, поршень постепенно перемещается, вытесняя масло из одной полости демпфера в другую. Процесс регулирования закончится тогда, когда поршень золотника и поршень демпфера займут первоначальное положение, т. е. $\Delta C=0$, $\Delta B=0$, а следовательно, $\Delta A=0$. Последнее свидетельствует о том, что частота вращения турбины вернулась к первоначальному значению.

Гибкая обратная связь может применяться вместе с жесткой обратной связью для улучшения качества процесса регулирования.

Структурная схема АСР частоты вращения с гибкой и жесткой обратными связями показана на рис. 2-6. Звенья структурной схемы и соответствующие звенья

функциональной схемы (см. рис. 2-4) обозначены одинаковыми номерами. Поскольку золотниковый усилитель 2 и ГИМ 3 только совместно обладают направленностью действия, они объединены в одно звено.

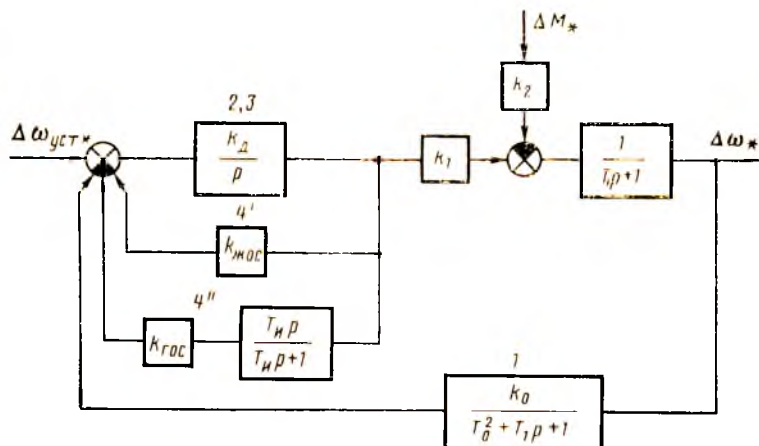


Рис. 2-6. Структурная схема АСР частоты вращения с центробежным регулятором.

Передаточные функции звеньев после линеаризации (формулы даются без вывода):

турбины — по регулируемому воздействию и возмущению

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_T p + 1}, \quad W_2(p) = -\frac{k_2}{T_T p + 1},$$

где $T_T = J \frac{\omega_{\text{ном}} z_0}{M_{\text{ном}} z_{\text{ном}}}$ — постоянная времени турбины; $k_1 =$

$= \frac{\omega_0 z_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}} z_0}$; $k_2 = \frac{z_0}{z_{\text{ном}}}$ — безразмерные коэффициенты пере-

дачи; J — момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу турбины; $M_{\text{ном}}$, $\omega_{\text{ном}}$, $z_{\text{ном}}$ — номинальные значения движущего момента, угловой скорости и степени открытия регулирующего органа соответственно; ω_0 , z_0 — значения соответствующих величин в исходном режиме;

центробежного измерителя частоты вращения

$$W_{\text{ич}}(p) = \frac{k_0}{T_0^2 + T_1 p + 1},$$

где T_0, T_1 — постоянные времени; k_0 — безразмерный коэффициент передачи;

золотникового усилителя с ГИМ

$$W_d(p) = \frac{k_d}{p},$$

где k_d, c^{-1} — относительный коэффициент усиления по скорости;

изодромного устройства с рычажной передачей

$$W_{и}(p) = k_{гос} \frac{T_{и}p}{T_{и}p + 1},$$

где $T_{и} = c_d / c_{п}$ — постоянная времени изодрома; $c_d, c_{п}$ — коэффициент демпфирования и коэффициент жесткости пружины соответственно.

Исследование устойчивости АСР и качества процесса регулирования выполняются методами, изложенными в § П1-3 и П1-4. В качестве примера исследуем устойчивость АСР с гибкой обратной связью ($k_{жос} = 0$), пренебрегая инерционностью центробежного измерителя частоты вращения ($T_0 = 0, T_1 = 0$).

Эквивалентная передаточная функция золотникового усилителя с ГИМ, охваченных гибкой отрицательной обратной связью,

$$W'_d(p) = k'_d \frac{T_{и}p + 1}{p(T'_d p + 1)},$$

где $k'_d = \frac{k_d}{1 + k_d k_{гос} T_{и}}$; $T'_d = \frac{T_{и}}{1 + k_d k_{гос} T_{и}}$ — эквива-

лентные коэффициент передачи и постоянная времени соответственно.

Характеристическое уравнение замкнутой системы

$$(T'_d p + 1)(T_T p + 1)p + k(T_{и}p + 1) = 0,$$

где $k = k_1 k_0 k'_d$ — коэффициент усиления разомкнутой системы.

Раскрывая скобки, получаем:

$$T_T T'_d p^3 + (T_T + T'_d)p^2 + (k T_{и} + 1)p + k = 0.$$

Так как параметры $T_T, T_{и}, T'_d, k$ существенно положительны, то положительны и все коэффициенты характеристического уравнения, т. е. необходимое условие

устойчивости выполняется. Условие положительности определителя Гурвица Δ_2 в данном случае имеет вид:

$$(T_T + T'_D)(kT_H + 1) - kT_T T'_D = T_T + T'_D + kT_H T'_D + \\ + kT_T (T_H - T'_D) > 0,$$

так как всегда $T_H > T'_D$. Таким образом система устойчива при любых значениях параметров. Несмотря на то что наличие неучтенных инерционностей в маятнике и других элементах сужает область устойчивости, системы с изодромной обратной связью получили широкое распространение именно благодаря устойчивости при отсутствии статической ошибки.

Электрогидравлический регулятор частоты вращения.

В настоящее время для регулирования частоты вращения гидротурбин широко применяются электрогидравлические регуляторы (ЭГР), у которых в отличие от гидромеханических регуляторов измерительное и задающее устройства, органы обратной связи и предварительный усилитель выполнены на электрических элементах. Это упрощает гидромеханическую схему и позволяет весьма просто вводить в схему регулирования дополнительное воздействие по ускорению агрегата и сигналы от внешних устройств, например от устройства распределения активной мощности, от частотного корректора и др.

На рис. 2-7 приведена упрощенная схема ЭГР Ленинградского металлического завода. Схема питается от вспомогательного генератора $BГ$, установленного на одном валу с турбиной. Частота напряжения $U_{вх}$ пропорциональна частоте вращения агрегата и при номинальной частоте равна 50 Гц.

В качестве измерительного устройства ЭГР используется параллельный контур $L1, C1$, настроенный в резонанс при частоте 50 Гц, с трансформатором $Tr1$ и емкостью $C2$. При номинальной частоте вращения напряжение на вторичной обмотке трансформатора $Tr1$ практически равно нулю из-за большого сопротивления контура. При отклонении частоты вращения от номинальной сопротивление контура $L1, C1$ уменьшается и на вторичной обмотке трансформатора появляется напряжение U_1 , действующее значение и фаза которого зависят от абсолютного значения и знака отклонения частоты. Если частота увеличивается ($\Delta f > 0$), через

контур течет емкостный ток, создающий на емкости $C2$ напряжение U_1 , совпадающее по фазе с $U_{вх}$. Если частота уменьшается ($\Delta f < 0$), то U_1 находится в противофазе с $U_{вх}$. Таким образом измерительное устройство является датчиком отклонения частоты, так как $U_1 \approx k_1 \Delta f$.

Потенциометрический датчик $П1$ с трансформатором $Тр2$ образуют механизм изменения частоты вращения $МИЧВ$; $U_2 = U_{20} + k_2 \Delta f_{уст}$. Датчик $П2$ с трансформатором

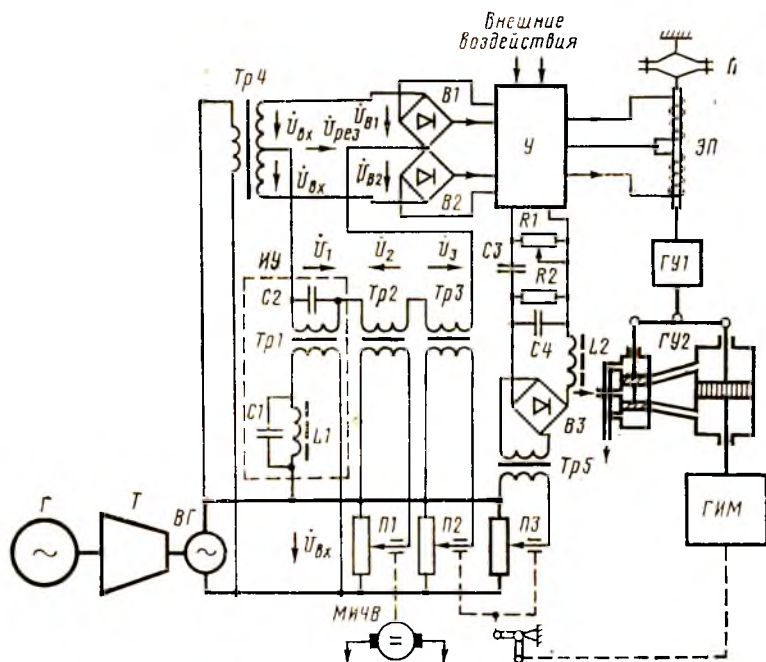


Рис. 2-7. Упрощенная принципиальная схема электрогидравлического регулятора частоты вращения.

$Тр3$ являются элементами жесткой обратной связи по положению главного исполнительного механизма ГИМ (по углу открытия α направляющего аппарата турбины); $U_3 = U_{30} + k'_3 \Delta \alpha \approx U_{30} + k_3 \Delta P$, где ΔP — изменение мощности турбины.

Результирующее напряжение в диагонали фазочувствительной схемы, образованной трансформатором $Тр4$ и выпрямительными мостами $B1$ и $B2$, представляет собой

сумму напряжений, коллинеарных $U_{\text{вх}}$. Поэтому

$$U_{\text{рез}} = \pm U_1 - U_2 + U_3; \quad U_{\text{В1}} = U_{\text{вх}} + U_{\text{рез}}; \quad U_{\text{В2}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{рез}}. \quad (2-24)$$

Токи выхода фазочувствительной схемы подаются на магнитный или электронный усилитель-сумматор $\mathcal{U}$ навстречу друг другу. Усилитель-сумматор воздействует на уравновешенный пружинной Π электромагнитный привод $\mathcal{ЭП}$, преобразующий электрические сигналы в механические, поступающие на гидравлический усилитель $\Gamma\mathcal{У1}$. Гидравлический усилитель $\Gamma\mathcal{У2}$ и $\Gamma\mathcal{ИМ}$ представляют собой обычную гидромеханическую систему, действующую на открытие или закрытие направляющего аппарата.

Гибкая обратная связь в данном регуляторе осуществляется через датчик $\Pi3$, механически связанный с направляющим аппаратом турбины. Датчик подключен к трансформатору $\text{Тр}5$, напряжение вторичной обмотки которого выпрямляется выпрямителем $\text{В}3$, сглаживается фильтром $L2, C4, R2$ и через дифференцирующую цепь $C3, R1$ подается на один из входов усилителя-сумматора. Гибкая электрическая обратная связь оказывает на систему регулирования такое же действие, как и изодромная обратная связь в гидромеханическом регуляторе. Время действия обратной связи зависит от постоянной времени дифференцирующей цепи и может регулироваться резистором $R1$.

Условие равновесия регулятора при отсутствии внешних воздействий на $\mathcal{U}$ в силу (2-24): $U_{\text{рез}} = 0$. Поэтому в исходном установившемся режиме при $\Delta f = 0$ $U_{20} = U_{30}$, а закон регулирования имеет вид:

$$k_1 \Delta f - k_2 \Delta f_{\text{уст}} + k_3 \Delta P = 0. \quad (2-25)$$

Для астатической настройки регулятора следует отключить связь между $\Pi2$ и $\Gamma\mathcal{ИМ}$. Тогда $k_3 \Delta P = 0$ и $\Delta f = 0$, если нет воздействия на МИЧВ ($\Delta f_{\text{уст}} = 0$).

Регуляторы турбин, имеющие статическую настройку [см. (2-23), (2-25)], обеспечивают в энергосистеме регулирование частоты с положительным статизмом (§ 2-3). Регулятор с астатической настройкой может использоваться для астатического регулирования частоты одним агрегатом или группой агрегатов (§ 2-3).

2-5. ПЕРВИЧНЫЕ ГРУППОВЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Групповой регулятор частоты и мощности предназначен для управления мощностью группы турбин как единого агрегата. В состав группового регулятора входят индивидуальные регуляторы турбин с астатической настройкой (§ 2-4) и специальное устройство, называемое корректором активной мощности. Корректор активной мощности связывает регуляторы отдельных турбин группы между собой и с центральным задающим устройством, обеспечивая принудительное распределение (уравнивание) нагрузок между агрегатами и групповое управление мощностью.

В зависимости от способа воздействия корректора на регулятор турбины — непосредственно на поршень золотникового усилителя или через *МИЧВ* — различают соответственно первичные и вторичные групповые регуляторы. Непосредственное воздействие на золотники регуляторов турбин, а не на *МИЧВ* исключает ряд промежуточных звеньев, что повышает скорость регулирования и упрощает схему.

Первичные групповые регуляторы частоты и активной мощности основаны на использовании метода долевого статизма (§ 2-3) и применяются на гидростанциях с однотипными агрегатами.

В качестве примера рассмотрим устройство группового регулирования частоты и мощности (УГРМ), разработанное в институте «Гидроэнергопроект».

Упрощенная принципиальная схема УГРМ приведена на рис. 2-8.

Основными элементами УГРМ являются:

центральное задающее устройство, в которое входят: орган задания суммарной активной мощности (регулятор мощности *РМ*), состоящий из задатчика мощности *ЗМ* и дифференциального магнитного усилителя *МУ* с выходом на переменном токе; орган задания открытия направляющих аппаратов гидротурбин (задатчик открытия *ЗО*), в качестве которого используется автотрансформатор с плавной регулировкой;

устройство уравнивания открытий направляющих аппаратов гидротурбин, состоящее из датчиков открытия направляющих аппаратов *ДНА* и исполнительных блоков *ИБ*, соединенных в схему многолучевой звезды.

В качестве исполнительных блоков *ИБ*, воздействующих на поршни золотников *ПЗ* регуляторов турбин, применены бесконтактные сельсинны, работающие в режиме моментного двигателя. При отсутствии тока в обмотке ротора *ИБ* момент на его валу равен нулю. Направление момента зависит от фазы тока в роторе.

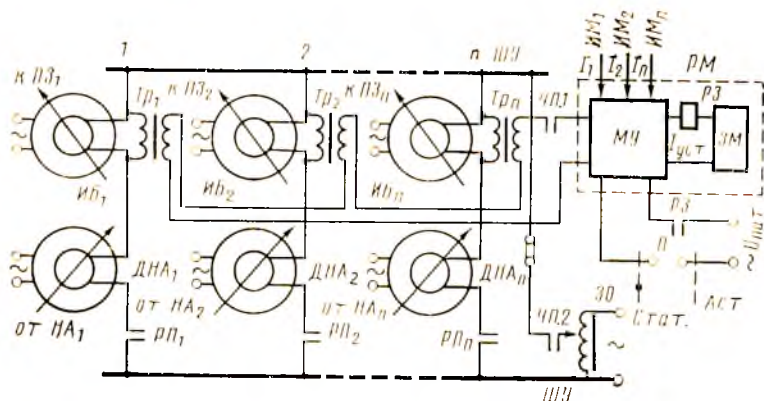


Рис. 2-8. Принципиальная схема УГРМ.

Если органы задания отключены (контакты *ЧП.1* и *ЧП.2* разомкнуты), устройство работает в режиме астатического регулирования частоты. При отклонении частоты в энергосистеме регуляторы турбин действуют на изменение открытия *НА*. Если открытие *НА* турбин изменяется одинаково, то напряжения на выходах *ДНА* равны и токи в обмотках роторов *ИБ* не протекают. При неодинаковом открытии *НА* турбин в схеме уравнивания появятся токи и исполнительные блоки будут действовать через золотники на *НА* турбин до тех пор, пока открытие каждого *НА* не станет равно среднему открытию.

Число цепей схемы уравнивания определяется числом гидрогенераторов, привлеченных к регулированию частоты. Подключение гидроагрегата к системе регулирования осуществляется контактами реле РП, которое

срабатывает после включения выключателя генератора и открытия *НА* турбины на определенный угол.

В режиме регулирования активной мощности (переключатель *П* в положении *Стат.*) регулятор мощности *РМ* воздействует на роторы *ИБ* через промежуточные трансформаторы $Tr_1, Tr_2, \dots, Tr_n$. Абсолютное значение и фаза (0 или 180°) напряжения на выходе *МУ* зависит от абсолютного значения и знака отклонения фактической мощности от заданной

$$U_{PM} = k \left(\sum_{i=1}^n I_i - I_{уст} \right), \quad (2\ 26)$$

где I_i — ток управления *МУ*, пропорциональный активной мощности *i*-го агрегата, на выходе его измерителя мощности *ИМ_i* (см. § 2-6); $I_{уст}$ — ток управления от датчика мощности *ЗМ* или других общестанционных устройств регулирования.

В установившемся режиме, когда фактическая мощность станет равна заданной, $U_{PM}=0$.

Чтобы не произошла разгрузка электростанции при обрыве или других неполадках в цепи задания мощности, предусматривается реле *РЗ*, которое при исчезновении тока снимает своими контактами питание с магнитного усилителя.

Регулировать суммарную мощность *ГЭС* можно и датчиком открытия *ЗО*, воздействуя через цепи уравнивания на изменение открытия *НА* турбин.

Регулятор мощности обеспечивает более точную обработку заданного значения активной мощности по сравнению с *ЗО*, так как связь между мощностью и открытием *НА* турбины в общем случае не однозначна и зависит от действующего напора.

Для быстрого ввода резервной мощности *ГЭС* при действии устройства частотного пуска *ЧП* схема *УГРМ* автоматически переводится в режим астатического регулирования частоты. Это достигается отключением выходных цепей *РМ* или *ЗО* от устройства уравнивания.

Устройство корректора активной мощности *УКАМ* [46], разработанное в *ОРГРЭС*, по назначению и принципу действия аналогично *УГРМ*, хотя и отличается конструктивно. Описание применяемых в настоящее время систем группового регулирования мощности см. в [47].

2-6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ВТОРИЧНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

Измерительные органы частоты в системах автоматического регулирования предназначены для выявления отклонения частоты сети от заданного значения и преобразования этого отклонения в сигнал, параметр которого может быть легко введен в последующие элементы системы регулирования.

Измерительный орган частоты должен отвечать следующим требованиям:

зона нечувствительности не должна превышать $\pm 0,025 \div 0,05$ Гц;

иметь малое потребление по входным цепям при выском к. п. д. и быстродействии;

должен быть надежен, стабилен в работе и удобен в эксплуатации.

В настоящее время в системах регулирования режима по частоте и мощности, так же как в АРВ сильного действия (§ 1-9) и ЭГР частоты вращения (§ 2-4), применяются измерительные органы частоты, использующие электрические или электромеханические фильтры.

Измерительный орган частоты с частотным полосовым фильтром, разработанный во ВНИИЭ, состоит из частотоизмерительной схемы и усилителя-корректора (рис. 2-9). Частотоизмерительная схема предназначена для получения постоянного тока, пропорционального абсолютному значению и соответствующего знаку отклонения частоты энергосистемы от заданного значения. Она состоит из частотного полосового фильтра ЧПФ (дроссели $L1, L2, L3$ и конденсаторы $C1, C2$), включенного в диагональ фазочувствительной схемы (трансформатор Tr и выпрямители $B1, B2$).

В схеме используется свойство фильтра изменять угол сдвига фаз α между напряжениями на его входе и выходе в зависимости от частоты в пределах от 0 до 180° при практически неизменном значении выходного напряжения. При частоте f_c , равной частоте настройки фильтра f_ϕ , угол сдвига между этими напряжениями равен $\pi/2$ (рис. 2-9, в).

Выходной сигнал частотоизмерительной схемы — ток управления дифференциального магнитного усилителя-корректора

$$I_y = I_1 - I_2 = k_1 (U_{B1} - U_{B2}).$$

На основании векторных диаграмм (рис. 2-9,з)

$$U_{B1} = \sqrt{U_1^2 + U_\phi^2 - 2U_1U_\phi \cos(\pi - \alpha)};$$

$$U_{B2} = \sqrt{U_2^2 + U_\phi^2 - 2U_2U_\phi \cos \alpha}.$$

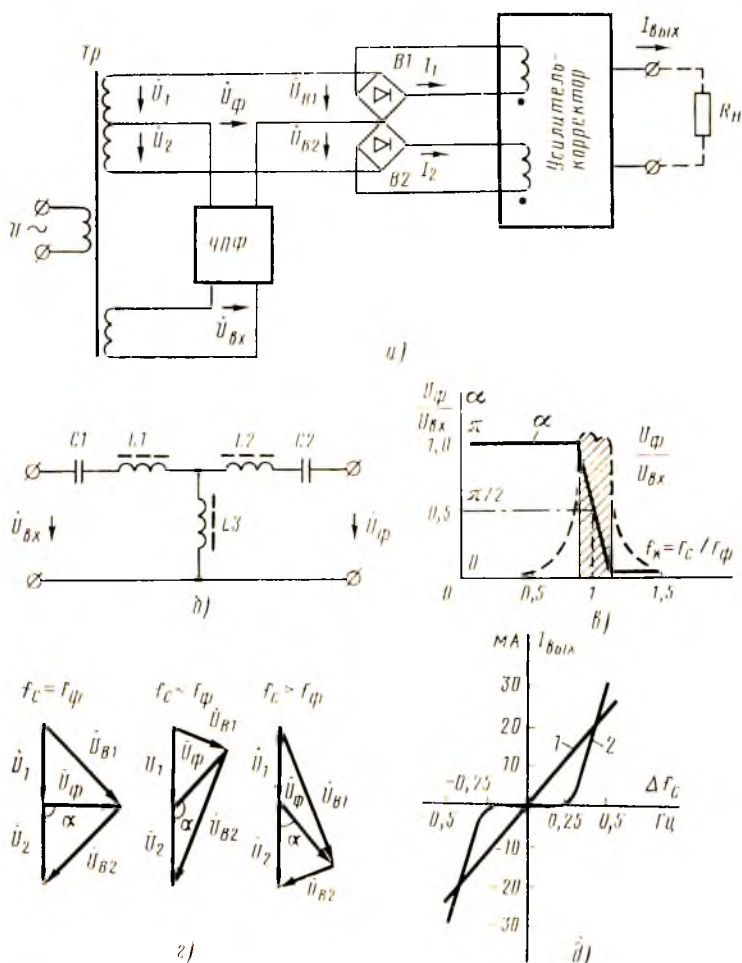


Рис. 2-9. Измерительный орган частоты с частотным полосовым фильтром.

а — принципиальная схема; б — схема ЧПФ; в — амплитудная и фазовая частотные характеристики ЧПФ; г — векторные диаграммы; д — выходная характеристика без зоны нечувствительности (1) и с зоной нечувствительности (2).

При $U_1=U_2=U_\phi=U_c$ (соотношение, обеспечивающее максимальную чувствительность частотоизмерительной схемы) эти выражения преобразуются к виду:

$$U_{B1} = 2U_c \sqrt{\frac{1 - \cos(\pi - \alpha)}{2}} = 2U_c \sin \frac{\pi - \alpha}{2};$$

$$U_{B2} = 2U_c \sin \alpha/2.$$

Ток управления усилителя-корректора

$$I_y = k_1 2U_c \left(\sin \frac{\pi - \alpha}{2} - \sin \frac{\alpha}{2} \right) =$$

$$= k_1 2 \sqrt{2} U_c \sin \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right) = k_2 U_c \sin \frac{\Delta \alpha}{2}, \quad (2-27)$$

где

$$\Delta \alpha = \frac{\pi}{2} - \alpha = k_1 \Delta f_c / f_\phi;$$

$$\Delta f_c = f_c - f_\phi.$$

При малых отклонениях частоты и неизменном напряжении

$$I_y = k \Delta f_c.$$

Заводские характеристики измерительного органа частоты — зависимости тока выхода усилителя $I_{\text{вых}}$ от Δf_c — приведены на рис. 2-9, б. Зону нечувствительности измерительного органа можно менять в широких пределах путем изменения тока смещения магнитного усилителя-корректора. В режиме регулирования частоты зона нечувствительности, как правило, равна нулю, а в режиме регулирования мощности с коррекцией по частоте зона нечувствительности устанавливается в пределах $50 \pm 0,2$ Гц.

Недостатками рассмотренного измерительного органа являются зависимость выходного сигнала от напряжения сети и недостаточная стабильность из-за нестабильности индуктивностей, выполняемых на ферромагнитных сердечниках с зазором.

Камертонный измеритель частоты, разработанный в ЭНИИ, состоит из следующих частей (рис. 2-10): камертонного датчика 1, усилителя на транзисторах 2, фазочувствительной схемы 3 и фазовращающего моста 4.

Напряжение сети от измерительного трансформатора подается на первичную обмотку трансформатора $Tr1$.

С одной из вторичных обмоток этого трансформатора напряжение снимается на диагональ моста, состоящего из емкостей $C1$ и $C2$ и переменных спаренных между собой резисторов $R1$ и $R2$. В другую диагональ моста включены обмотки возбуждения камертонного датчика $\omega_{в1}$ и $\omega_{в2}$. Сдвиг фаз между напряжениями в диагоналях моста, т. е. между напряжением сети и напряжением на обмотках возбуждения камертона, зависит от сопротивлений $R1$ и $R2$.

На обеих ножках камертона укреплены постоянные магниты. При колебаниях камертона, возникающих под

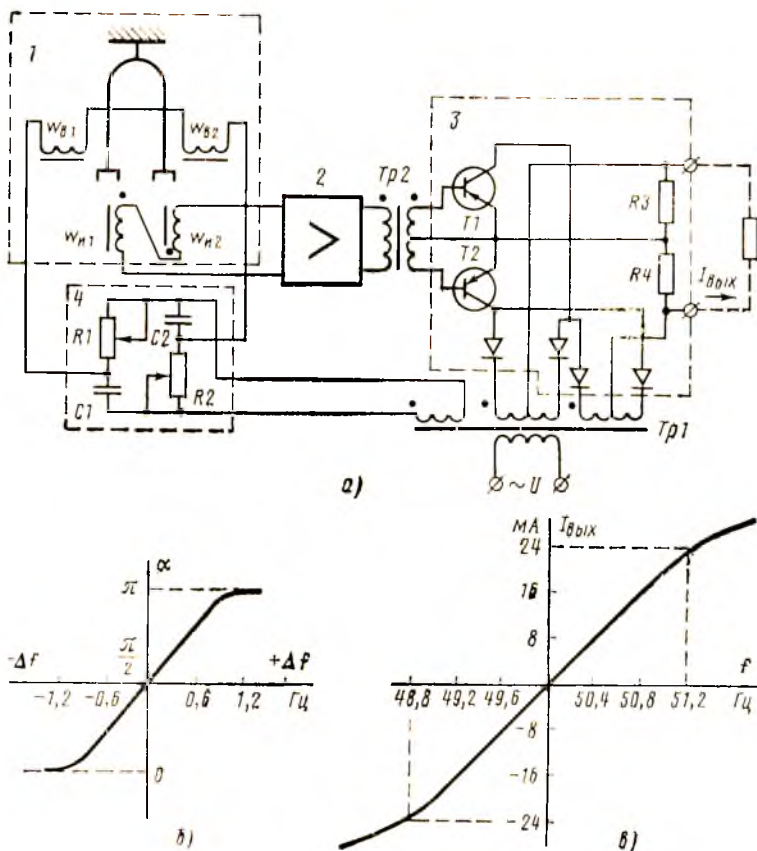


Рис. 2-10. Камертонный измеритель частоты.

а — принципиальная схема; б — фазовая характеристика камертонного датчика; г — выходная характеристика.

действием переменного напряжения на его обмотках возбуждения, в обмотках $\omega_{и1}$ и $\omega_{и2}$, расположенных в поле постоянных магнитов камертона, наводится э. д. с., которая сдвинута по фазе относительно напряжения на обмотках $\omega_{в1}$ и $\omega_{в2}$. Если частота напряжения, приложенного к обмоткам $\omega_{в1}$ и $\omega_{в2}$, равна собственной частоте камертона, то угол сдвига $\alpha = \pi/2$. При уменьшении частоты угол α уменьшается, при увеличении — увеличивается (рис. 2-10,б). Таким образом, камертонный датчик преобразовывает отклонение частоты в изменение фазы между двумя напряжениями.

Напряжение, возбуждаемое колеблющимися магнитами камертона в обмотках $\omega_{и1}$ и $\omega_{и2}$, усиливается усилителем 2 и с его выходного трансформатора $Tr2$ подается на базы транзисторов $T1$ и $T2$ фазочувствительной схемы 3. Постоянная составляющая выходного напряжения схемы 3 равна нулю при угле сдвига $\pi/2$ между напряжениями сети и трансформатора $Tr2$, при угле сдвига 0° и π она наибольшая, но различной полярности.

Выходная характеристика камертонного измерителя частоты с уставкой 50 Гц приведена на рис. 2-10,в.

Изменение уставки измерителя по частоте осуществляется изменением фазы напряжения, подводимого к камертону, с помощью резисторов $R1$ и $R2$. Максимальное изменение фазы фазовращающим мостом $\pm 20^\circ$, что соответствует изменению уставки примерно $\pm 0,2$ Гц.

Измерительный орган частоты с двойным Т-образным RC-фильтром (регистрирующий частотомер — частотный корректор РЧК-65) применяется в аппаратуре регулирования режима по частоте и мощности, разработанной в ОРГРЭС. Значительные габариты индуктивностей и емкостей в фильтрах LC для промышленной частоты и сравнительно малая их добротность на этой частоте явились причиной появления фильтров из резисторов и конденсаторов.

Среди различных частотозависимых цепей RC наиболее часто встречается двойной Т-образный фильтр ($R1, C1, R2, C2, R3, C3$ на рис. 2-11,а). Основное его достоинство — сравнительно высокая для цепей RC добротность.

Как правило, фильтры RC применяются в сочетании с ламповыми или транзисторными усилителями. Частота

настройки симметричного двойного Т-образного фильтра определяется по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi RC},$$

где $R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$.

Оптимальные параметры фильтра будут при $R_3=R/2$, $C_3=2C$.

Амплитудная и фазовая частотные характеристики симметричного фильтра показаны на рис. 2-11, б сплош-

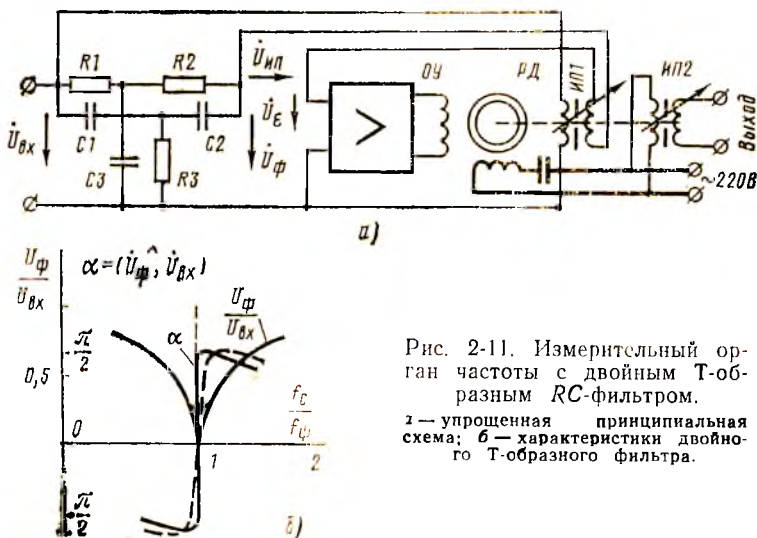


Рис. 2-11. Измерительный орган частоты с двойным Т-образным RC-фильтром.

а — упрощенная принципиальная схема; б — характеристики двойного Т-образного фильтра.

ными линиями. При резонансной частоте выходное напряжение снижается до нуля, а фазовая характеристика имеет малую зону пропорциональности. Поэтому в измерительном органе ОРГРЭС для промышленной частоты используется обычно несимметричный двойной Т-образный фильтр с ненулевой настройкой и почти предельным значением добротности. Параметры его выбираются по соотношениям:

$$C_1 \approx 5C_2; C_3 = C_1 + C_2; R_1C_1 = R_2C_2 = R_3C_3 = \frac{1}{2\pi f_\phi}. \quad (2-28)$$

При этом значение добротности $Q_{RC} = R_2/2(R_1 + R_2)$. Такая «ненулевая» настройка обеспечивает $U_\phi \neq 0$ и

$\alpha=0$ при $f_c/f_\phi=1$ (штриховые кривые на рис. 2-11,б). На рис. 2-11,а приведена упрощенная схема измерителя частоты, собранного по автокомпенсационной схеме с двойным Т-образным фильтром в качестве измерительного органа.

Выходной величиной измерительного органа U_{II} , на которую реагирует реверсивный двигатель РД, является составляющая напряжения U_ϕ , сдвинутая на $\pi/2$ относительно $U_{вх}$. При отклонении частоты сети f_c от f_ϕ напряжение U_{II} изменяется пропорционально Δf с тем же знаком

$$U_{II} = U_\phi \sin \alpha = k_1 \Delta f$$

и двигатель начинает вращаться в ту или иную сторону в зависимости от знака Δf .

Автоматическая компенсация напряжения U_{II} осуществляется индукционным бесконтактным линейным потенциометром (индукционным преобразователем) ИП1 типа ИПБ-45. Напряжение на его выходе $U_{инп}$ пропорционально углу поворота двигателя φ . Вращение двигателя прекратится, когда

$$U_{II} - U_{инп} = 0, \text{ т. е. } \varphi = k_2 \Delta f. \quad (2-29)$$

Одновременно реверсивный двигатель вращает выходной индукционный преобразователь ИП2 типа ИПБ-45, напряжение на выходе которого в установившемся режиме пропорционально отклонению частоты в сети, и перемещает стрелку указателя и перо регистратора частоты.

Благодаря автокомпенсационной схеме колебания питающего напряжения не вызывают погрешности, свойственной большинству отечественных и зарубежных частотомеров. Кроме того, достоинством данного частотомера является свойство «запоминания»: при исчезновении питающего напряжения или повреждении усилителя прибор остается в положении, предшествовавшем повреждению.

Измерительные органы мощности. Для ввода в схему регулирования параметра, пропорционального фактической мощности генератора, электропередачи или суммарной мощности электростанции, используются в основном

статические преобразователи мощности (СПМ), которые по сравнению с электромеханическими преобразователями (например, обычным ваттметром с индукционным преобразователем — ВАПИ) более надежны и долговечны в работе, меньше потребляют по цепям тока и напряжения при большем сигнале на выходе. Ниже рассматриваются принципиальные схемы СПМ, наиболее часто применяющиеся в системах регулирования частоты и мощности.

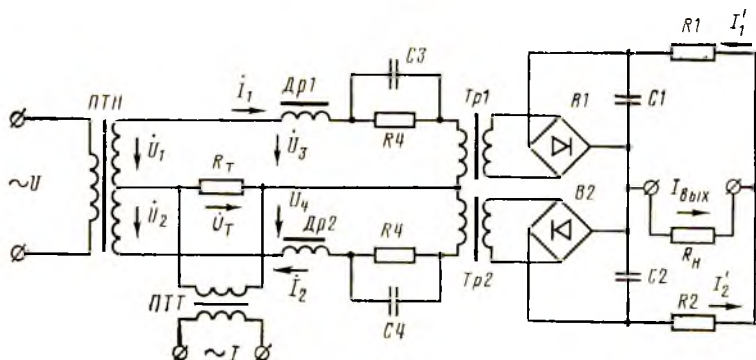


Рис. 2-12. Принципиальная схема измерителя мощности типа МДМ-4.

Измеритель мощности типа МДМ-4 (ОЗАП Мосэнерго) состоит из промежуточных трансформаторов напряжения ПТН и тока ПТТ, дросселей Др1 и Др2, резисторов и конденсаторов, собранных по фазочувствительной схеме (рис. 2-12).

Схема СПМ построена по принципу квадратичного умножения, т. е. осуществляет операцию умножения согласно уравнению:

$$xy = \frac{1}{4} [(x + y)^2 - (x - y)^2]. \quad (2-30)$$

Для получения квадратичных зависимостей используются нелинейные насыщающиеся дроссели Др1 и Др2, соединенные последовательно с трансформаторами Тр1 и Тр2, вторичные обмотки которых подключены к выпрямителям В1 и В2.

Напряжения $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ на вторичной обмотке трансформатора ПТН пропорциональны линейному напряжению сети, а напряжение $\dot{U}_T$ на сопротивлении R_T пропорционально разности соответствующих фазных токов.

По второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_1 + \dot{U}_T \text{ и } \dot{U}_4 = \dot{U}_2 - \dot{U}_T,$$

а модули этих напряжений:

$$\left. \begin{aligned} U_3 &= \sqrt{U_{\text{н}}^2 + U_{\text{т}}^2 + 2U_{\text{н}}U_{\text{т}} \cos \varphi}; \\ U_4 &= \sqrt{U_{\text{н}}^2 + U_{\text{т}}^2 - 2U_{\text{н}}U_{\text{т}} \cos \varphi}, \end{aligned} \right\} \quad (2-31)$$

где $U_{\text{н}}=U_1=U_2$, а φ — угол сдвига между напряжениями $U_{\text{н}}$ и $U_{\text{т}}$.

Вольт-амперная характеристика дросселей $Dp1$ и $Dp2$ выбирается таким образом, чтобы на рабочем участке получалась квадратичная зависимость между средним значением выпрямленных токов I'_1 и I'_2 и действующим значением приложенных напряжений U_3 и U_4 .

Другими словами, ток на выходе выпрямителей

$$I'_1 = k_1 U_3^2;$$

$$I'_2 = k_1 U_4^2.$$

Так как на выходе статического преобразователя токи вычитаются, то результирующий ток в нагрузке равен:

$$I_{\text{вых}} = I'_1 - I'_2 = k_1 (U_3^2 - U_4^2).$$

Подставив в последнее уравнение значения U_3 и U_4 из (2-31), получим:

$$I_{\text{вых}} = 4k_1 U_{\text{н}} U_{\text{т}} \cos \varphi.$$

Так как $U_{\text{н}}$ пропорционально линейному напряжению сети, а $U_{\text{т}}$ — току, то, пренебрегая угловой погрешностью измерительных и промежуточных трансформаторов тока и напряжения, при симметричной нагрузке получаем:

$$I_{\text{вых}} = k_2 UI \cos \varphi = k_p P, \quad (2-32)$$

т. е. ток выхода СПМ пропорционален активной мощности.

Статический преобразователь мощности на диодах (рис. 2-13) построен по тому же принципу, что и МДМ. Он состоит из входного устройства и блока функциональных преобразователей — квадраторов. Входное устройство (два промежуточных трансформатора $ПТН$ и $ПТТ$ и два выпрямительных моста $B1$ и $B2$) служит

для получения двух выпрямленных напряжений, одно из которых пропорционально геометрической сумме напряжения и тока трехфазной сети, а другое — их геометрической разности.

Два симметричных квадратора выполнены из диодов Д1—Д4. Напряжение подпора U_{01} — U_{04} на каждом диоде зависит от значений сопротивлений делителя $R_1, R_2 \dots R_7, R_8$ и величины опорного напряжения $U_{ст}$. До тех пор пока входное напряжение, пропорциональное U_1 или U_2 , меньше любого напряжения подпора, ток проходит

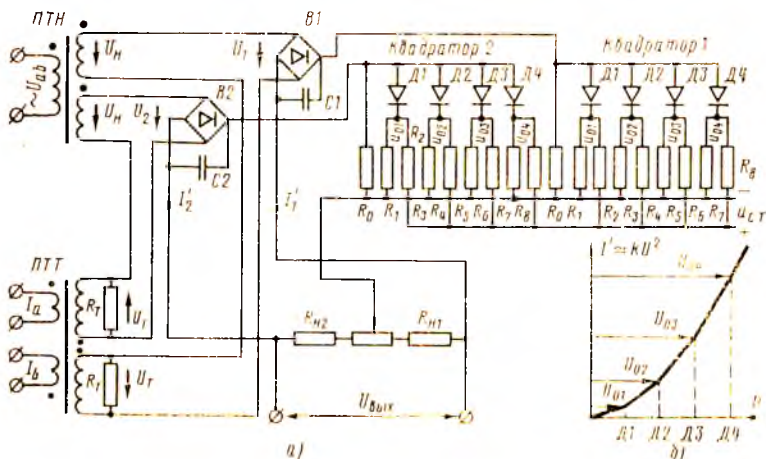


Рис. 2-13. Статический преобразователь мощности на диодах.
а — принципиальная схема; б — характеристика квадратора.

только по резисторам R_0 . Если увеличить входное напряжение на квадраторе, то после того, как оно станет больше величины U_{01} , диод Д1 отпирается и параллельно резистору R_0 подключается резистор R_1 (считаем, что прямое сопротивление диода близко к нулю). Таким образом меняется наклон характеристики квадратора (рис. 2-13,б). По мере увеличения напряжения на входе открывается второй диод, третий и т. д.

Подпорные напряжения на диодах и значения сопротивлений делителей выбираются так, чтобы обеспечить зависимости:

$$I'_1 \approx k_1 U^2, \text{ и } I'_2 \approx k_2 U^2, \quad (2-33)$$

где U_1 и U_2 , соответствующие U_3 и U_4 в МДМ, — модули геометрической суммы и разности напряжений, пропорциональных напряжению и току в сети (2-31); I'_1 , I'_2 — средние значения выпрямленных токов. Напряжение на выходе измерительного устройства

$$U_{\text{вых}} = R_{\text{н}}(I'_1 - I'_2),$$

если

$$R_{\text{н1}} = R_{\text{н2}} = R_{\text{н}}.$$

Подставляя в это уравнение значения токов, выраженные через напряжение и ток сети, получаем значение напряжения на выходе измерительного органа мощности:

$$U_{\text{вых}} = k_1 R_{\text{н}}(U_1^2 - U_2^2) = k_2 UI \cos \varphi = k_p P. \quad (2-34)$$

При достаточном количестве ячеек в квадраторе и стабильности его элементов статический преобразователь можно выполнить с классом точности 0,5.

Недостатком описанного преобразователя является необходимость опорного стабилизированного напряжения.

На рис. 2-14,а приведена схема статического преобразователя мощности ИМ-1 ВНИИЭ, квадраторы которого выполнены на опорных диодах. В этом случае опорного стабилизированного напряжения не требуется. Выходная характеристика такого преобразователя приведена на рис. 2-14,б.

Статический преобразователь активной мощности на магнитных элементах с прямоугольной петлей гистерезиса основан на принципе время-импульсной и амплитудной модуляции (ВИМ-АМ), который заключается в изменении скважности периодических импульсов пропорционально одному сомножителю (например, току в контролируемой цепи) и амплитуды этих импульсов пропорционально второму сомножителю (например, напряжению этой цепи) [48].

Описываемый ниже статический преобразователь мощности (СПМ) разработан на заводе «Электропулт» и выпускается серийно. В однофазном исполнении он состоит из входного устройства (ПТТ, ПТН), двух одинаковых трансформаторов $Tr1$, $Tr2$, выполненных на сердечниках с прямоугольной петлей гистерезиса, двух транзисторов $T1$, $T2$ и схемы суммирования на резисторах $R1$, $R2$ (рис. 2-15).

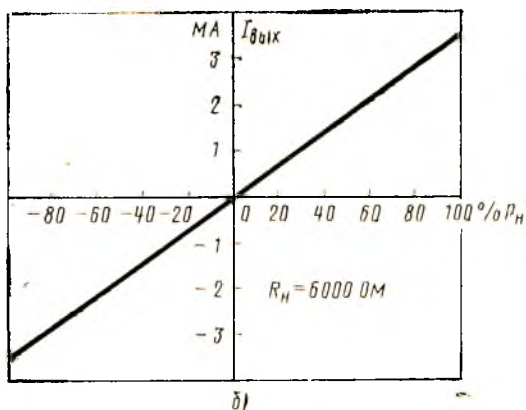
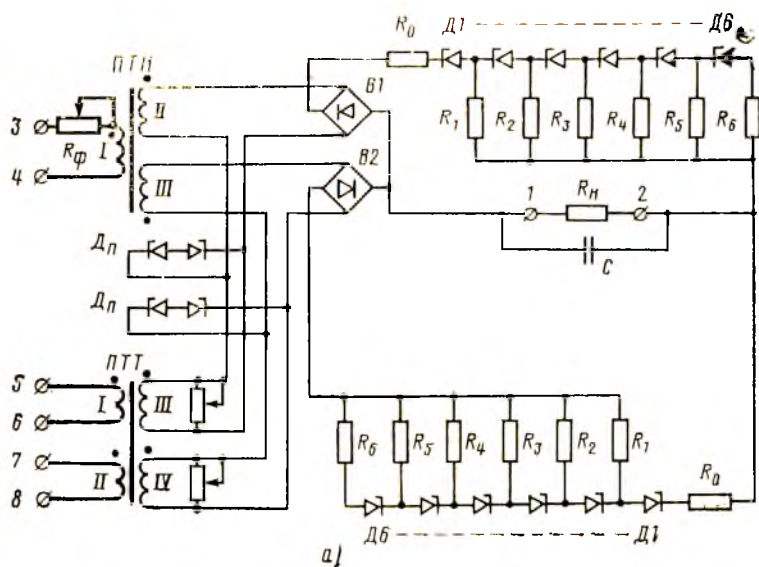


Рис. 2-14. Измеритель мощности ИМ-1 ВНИИЭ.
а — принципиальная схема; б — выходная характеристика.

В полупериод управления на обмотки ω_1 трансформаторов $Tr1$ и $Tr2$ прикладывается напряжение соответственно:

$$u_{11} = |u_1 + u_T|; \quad u_{12} = |u_1 - u_T|,$$

где u_1 — напряжение на резисторе $R6$, стабилизированное бареттером B ; u_T — напряжение на резисторах $R3$

и $R4$ ($R_3=R_4$), пропорциональное входному току СПМ, причем во всех режимах $U_{1m} > U_{Tm}$.

Так как в общем случае $|u_1 + u_T| \neq |u_1 - u_T|$, то размагничивание сердечников трансформаторов $Tr1$ и $Tr2$ за полупериод управления будет разным.

Полярность обмоток w_{III} выбрана таким образом, что ток в цепи эмиттер — база транзисторов $T1, T2$ в управляющий полупериод отсутствует.

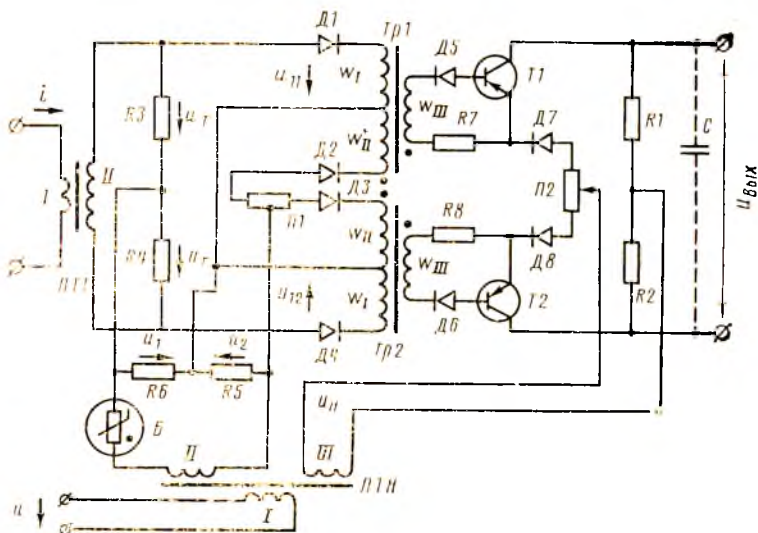


Рис. 2-15. Статический преобразователь мощности на магнитных элементах с ППГ.

В следующий рабочий полупериод под действием стабилизированного напряжения u_2 на обмотках w_{II} сердечники $Tr1$ и $Tr2$ перейдут в первоначальное насыщенное состояние за разное время.

При перемагничивании сердечников в рабочем полупериоде напряжение на обмотке w_{III} создает ток в переходе эмиттер — база, и транзисторы $T1, T2$ открываются на различное время.

Выходное напряжение $u_{вых}=0$, когда $T1$ и $T2$ одновременно закрыты или открыты, и $u_{вых} \approx u_n$ (u_n пропорционально входному напряжению СПМ), когда открыт только один из транзисторов. Как видно из графиков на рис. 2-16, поясняющих работу статического преобразователя.

зователя, среднее значение выходного напряжения за период равно:

$$U_{\text{вых. ср}} = \frac{U_{\text{ин}}}{2\pi} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_3). \quad (2-35)$$

Значение $\cos \alpha_3$ и $\cos \alpha_4$ определяется величиной $\Delta\Phi$ изменения магнитного потока в соответствующем сер-

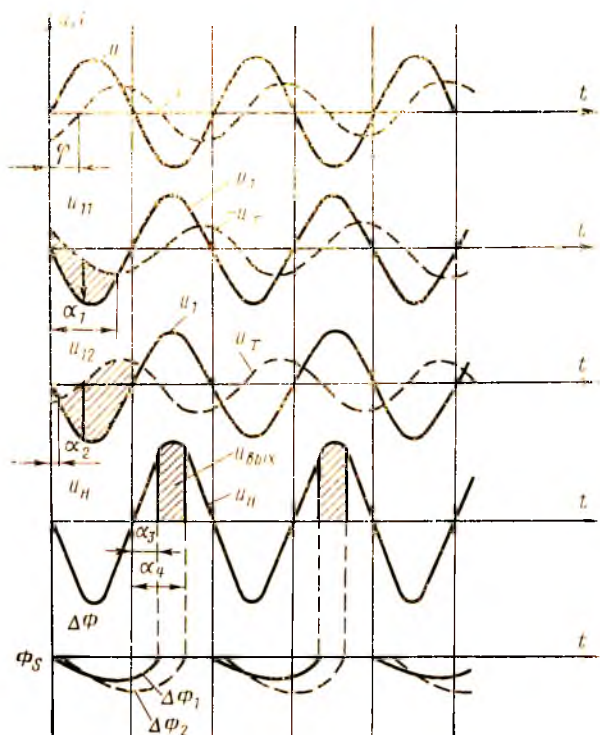


Рис. 2-16. Пояснение принципа действия схемы СПМ на магнитных элементах с ППГ.

дечнике за полупериод управления. При допущении, что

$$\left(\frac{U_{\text{ин}}}{U_{\text{тн}}} \pm \cos \varphi \right) \gg \sin \varphi,$$

можно получить:

$$\cos \alpha_3 \approx \frac{k_1}{U_{2m}} (U_{1m} - U_{1m} \cos \varphi); \quad (2-36)$$

$$\cos \alpha_4 \approx \frac{k_1}{U_{2m}} (U_{1m} + U_{1m} \cos \varphi).$$

С учетом этих выражений среднее значение выходного тока преобразователя

$$I_{\text{вых. ср}} = k_2 U_{\text{вых. ср}} \approx k_2 \frac{k_1}{\pi U_{2m}} U_{1m} U_{1m} \cos \varphi. \quad (2-37)$$

Поскольку напряжение U_{2m} стабилизировано баретером и форма кривых измеряемого тока и напряжения синусоидальна, ток выхода СПМ:

$$I_{\text{вых. ср}} = k_3 UI \cos \varphi = k_p P. \quad (2-38)$$

Для измерения активной мощности в трехфазной сети заводом выпускается статический преобразователь типа СВПА-2. Последний содержит два однофазных элемента, включенных в сеть по схеме двух ваттметров.

Номинальный ток выхода СВПА-2 — 1 мА при номинальной измеряемой мощности в цепи. Максимальное активное сопротивление нагрузки 1500 Ом.

Безынерционный датчик мощности. В рассматриваемых схемах СПМ среднее значение выходного напряжения (тока) пропорционально мгновенной мощности, что при наличии пульсаций требует сглаживания выходного сигнала ($C1, C2$ на рис 2-12, 2-13; C на рис. 2-14, 2-15). Схемы СПМ, основанные на принципе перемножения мгновенных значений напряжения и тока с использованием датчиков Холла, электронных ламп с двумя управляющими сетками и др. также требуют отфильтровывания составляющей двойной частоты, поскольку

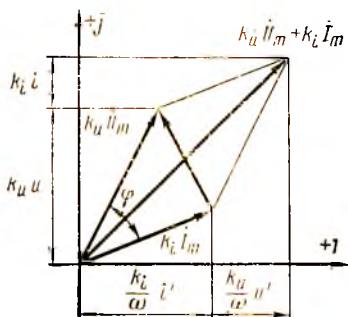


Рис. 2-17. Пояснение принципа действия безынерционного датчика мощности.

$$ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin (\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos (2\omega t - \varphi). \quad (2-39)$$

Сглаживание выходного сигнала снижает быстродействие.

Во ВНИИР предложена более быстродействующая схема измерения мощности.

Из векторной диаграммы, приведенной на рис. 2-17,

$$\left. \begin{aligned} |k_u \dot{U}_m + k_i I_m|^2 &= (k_u U_m)^2 + (k_i I_m)^2 + 2k_u k_i U_m I_m \cos \varphi; \\ |k_u \dot{U}_m - k_i I_m|^2 &= (k_u U_m)^2 + (k_i I_m)^2 - 2k_u k_i U_m I_m \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2-40)$$

Проекция вектора на минимую ось равна мгновенному значению синусоидальной величины, а на действительную — ее производной, поделенной на угловую частоту. Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} |k_u \dot{U}_m + k_i I_m|^2 &= (k_u u + k_i i)^2 + \frac{1}{\omega^2} (k_u u' + k_i i')^2; \\ |k_u \dot{U}_m - k_i I_m|^2 &= (k_u u - k_i i)^2 + \frac{1}{\omega^2} (k_u u' - k_i i')^2. \end{aligned} \right\} \quad (2-41)$$

Приравняв разности правых частей уравнений (2-41) и (2-40), получим:

$$\begin{aligned} (k_u u + k_i i)^2 + \frac{1}{\omega^2} (k_u u' + k_i i')^2 - (k_u u - k_i i)^2 - \\ - \frac{1}{\omega^2} (k_u u' - k_i i')^2 = 8k_u k_i U I \cos \varphi = k_p P. \end{aligned} \quad (2-42)$$

Таким образом, если выходное напряжение схемы сформировано в соответствии с левой частью уравнения (2-42) из мгновенных значений напряжения, тока и их производных, то оно во времени не изменяется и пропорционально активной мощности, а знак определяется направлением передачи активной мощности. Теоретически время измерения равно нулю.

2-7. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ ОРГРЭС (АРЧМ)

Система АРЧМ предназначена для автоматического выполнения следующих функций:

поддержания частоты в энергосистеме в заданных пределах;

регулирования (распределения) нагрузок электростанций по условию равенства удельных приростов затрат с приближенным учетом потерь в сетях;

регулирования перетоков обменной мощности с соседними энергосистемами в соответствии с заданным графиком суммы перетоков по внешним связям.

Система построена по централизованному принципу, т. е. отдельным электростанциям автоматически задает-

ся нагрузка с диспетчерского пункта энергосистемы по каналам телемеханики.

Регулирующий сигнал $P_{уст i}$ для каждой электростанции формируется с использованием интегрального отклонения частоты и обменной мощности по характеристике удельного прироста затрат, имеющейся на диспетчерском пункте. Интеграл суммы отклонений частоты и обменной мощности в некотором масштабе отражает изменение величины удельного прироста энергосистемы $\mu_{уст}$ (или $\lg \mu_{уст}$), так как его свойства отвечают требованиям к изменению задаваемого удельного прироста энергосистемы (или $\lg \mu_{уст}$) в процессе регулирования.

На рис. 2-18 представлена функциональная схема АРЧМ для одной из энергосистем объединения.

Отклонение частоты Δf получается на выходе блока частоты БЧ, в качестве которого используется частотомер РЧК (см. § 2-6).

Отклонение обменной мощности $\Delta P_{об}$ — это разность между заданной с помощью автоматического задатчика графика (АЗГ) суммой перетоков по внешним связям энергосистемы и действительным значением этой суммы, полученной по каналам телеизмерения от датчиков активной мощности $ИМ_1—ИМ_n$ (см. § 2-6):

$$\Delta P_{об} = P_{об.уст} - \sum_{i=1}^n P_{об i}. \quad (2-43)$$

Автоматический задатчик графика АЗГ представляет собой следящую систему, которая преобразует ординаты графика, нанесенного тушью на диаграммную бумагу, в переменное напряжение. Лента с графиком устанавливается на барабане, вращающемся со скоростью один оборот за 24 ч. Такая конструкция позволяет многократно повторять график.

В качестве блока удельного прироста БУП используется датчик интегрального отклонения частоты и обменной мощности (рис. 2-19). Он состоит из полупроводникового усилителя У, двухфазного асинхронного электродвигателя РД и связанного с ним через редуктор Р индукционного преобразователя ИПБ. Угол поворота электродвигателя, а следовательно, и изменение выходного напряжения преобразователя пропорцио-

нальны: $\int_{t_0}^t (\Delta f + \sigma_0 \Delta P_{об}) dt.$

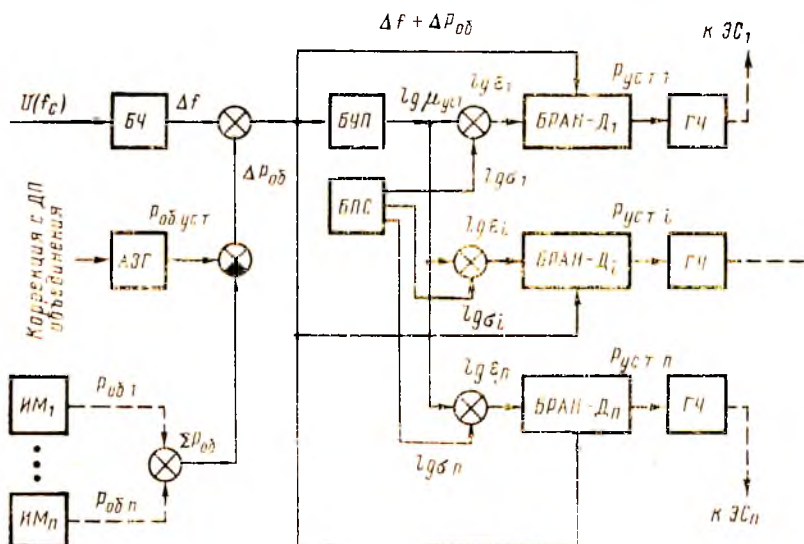


Рис. 2-18. Схема регулирования частоты и мощности АРЧМ ОРГРЭС

БЧ — блок частоты; *АЗГ* — автоматический задатчик графика; *ИМ₁ — ИМ_п* — энергосистемы; *БПС* — блок учета потерь в сетях; *БРАН-Д* — диспетчерский приема задания; *РЧК* — регистрирующий частотный корректор; *БРАН-С*; *ИР* — пропорционально-импульсный регулятор; *Д* — электродвигатель; *МИЧБ* —

Выходное напряжение БУП пропорционально задаваемому значению $\lg \mu_{\text{уст}}$ (см. § 2-3).

Задаваемые величины $\lg \varepsilon_i$ отдельных электростанций получают после внесения в $\lg \mu_{уст}$ поправок $\lg \sigma_i$ на потери в сети, определяемых с помощью блока учета потерь в сетях БПС (рис. 2-20). Этот блок представляет собой упрощенную модель реальной сети энергосистемы, выполненную при следующих допущениях: реактивные нагрузки не зависят от активных и в модель не вводятся; напряжения в узлах постоянны; сеть однородна.

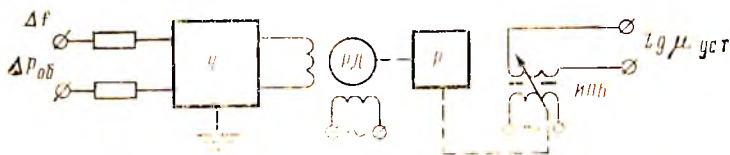
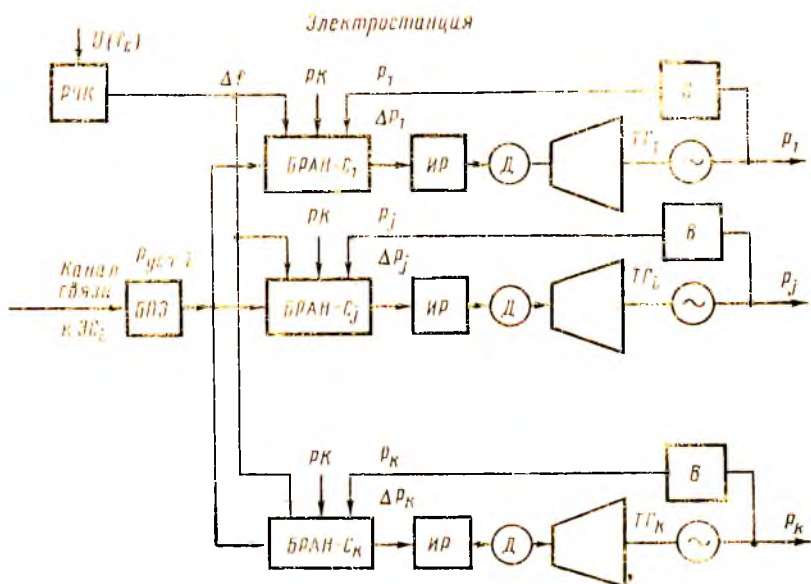


Рис. 2-19. Схема БУП.



районной энергосистемы, входящей в объединение.

измерители мощности межсистемных перетоков: БУП — блок удельного прироста; блок распределения активной нагрузки; ГЧ — генератор частоты; БПЗ — блок станционный блок распределения активной нагрузки; РК — ручной корректор; ТГ — турбогенератор; В — ваттметр с индукционным преобразователем.

Поэтому линии электропередачи и активные нагрузки потребителей моделируются активными сопротивлениями, а в соответствующих узлах вводятся токи, пропорциональные задаваемым значениям активных мощностей электростанций с выходов БРАН-Д и фактическим значениям межсистемных перетоков, получаемым по каналам телеизмерения от датчиков активной мощности $ИМ_1—ИМ_n$. Если в некоторых узлах сети график нагрузки не подобен графику энергосистемы, то в эти узлы вводится дополнительный ток от блока задания суточного графика коррекции БЗГ, имеющего такую же конструкцию, как АЗГ. Величина дополнительного тока определяется по статистическим данным графика нагрузки в рассматриваемом узле.

Токораспределение в такой модели отображает потокораспределение активных мощностей в однородной сети, а напряжение $U_{вхi}$ на входе каждого БРАН-Д соответствует $\lg \epsilon_i$.

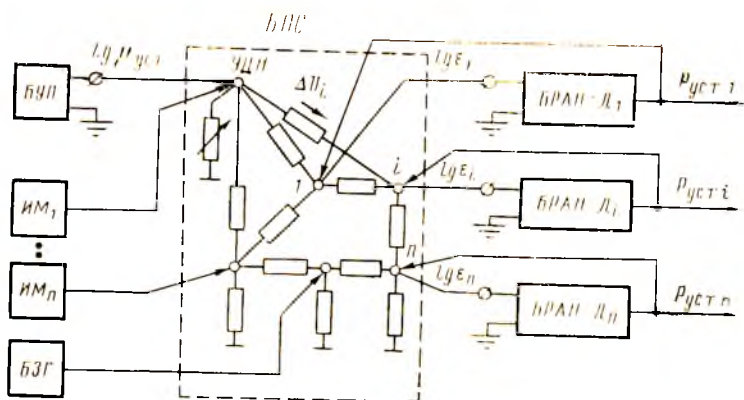


Рис. 2-20. Схема включения БПС.

Действительно,

$$\Delta U_i = \sum_{k=1}^l I_k R_{mk} = c \sum_{k=1}^l P_k R_{lk}, \quad (2-44)$$

где I_k — ток в k -й ветви модели с сопротивлением R_{mk} ; P_k — поток активной мощности в k -й ветви моделируемой сети с активным сопротивлением R_{lk} . Суммирование от 1 до l ведется по любой цепи от точки i до условного центра нагрузок УЦН.

Потери активной мощности, зависящие от тока, определяются по формуле

$$\Sigma \Pi = \sum_{k=1}^s \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_k^2} R_{lk},$$

где s — число всех ветвей сети.

Удельный прирост потерь

$$\frac{\partial \Pi}{\partial P_i} = \sum_{k=1}^s \frac{2P_k R_{lk}}{U_k^2} \frac{\partial P_k}{\partial P_i} = \sum_{k=1}^l \frac{2P_k R_{lk}}{U_{\text{ср.ном}}^2} \sum_{k=1}^n \frac{\partial P_k}{\partial P_i},$$

где n — число параллельных ветвей от точки i до УЦН; $U_{\text{ср.ном}}$ — среднее номинальное напряжение сети; $\sum_{k=1}^l P_k R_{lk}$ не зависит от пути суммирования от точки i до УЦН. Так как сумма коэффициентов

распределения $\partial P_k / \partial P_i$ для всех n параллельных ветвей, очевидно, равна единице, то

$$\frac{\partial \Pi}{\partial P_i} = \sum_{k=1}^l \frac{2P_k R_{\eta k}}{U_{\text{ср.ном}}^2}. \quad (2-45)$$

Поскольку

$$\lg \sigma_i = \lg \left(1 - \frac{\partial \Pi}{\partial P_i} \right) = \frac{\ln \left(1 - \frac{\partial \Pi}{\partial P_i} \right)}{\ln 10} =$$

$$= -0,43 \left[\frac{\partial \Pi}{\partial P_i} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \Pi}{\partial P_i} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{\partial \Pi}{\partial P_i} \right)^3 + \dots \right] \approx -0,43 \frac{\partial \Pi}{\partial P_i},$$

то с учетом (2-44) и (2-45)

$$\lg \sigma_i \approx -\frac{0,86}{c U_{\text{ср.ном}}^2} \Delta U_i. \quad (2-46)$$

Выбором масштаба c можно обеспечить

$$\lg \sigma_i \approx -\Delta U_i. \quad (2-47)$$

Напряжение на входе каждого (i -го) БРАН-Д

$$U_{\text{вх}i} = U_{\text{УЦН}} - \Delta U_i = \lg \mu_{\text{уст}} + \lg \sigma_i = \lg \mu_{\text{уст}} \sigma_i = \lg \varepsilon_i. \quad (2-48)$$

Диспетчерский блок распределения активной нагрузки БРАН-Д (рис. 2-21) представляет собой электро-механический функциональный преобразователь в виде следящей системы (У1, РД, ИП1) и сменного шаблона Ш, выполненного из тонкого листового материала (картон, прессшпан). Форма шаблона для диспетчерского БРАН отражает зависимость нагрузки соответствующей станции от логарифма ее удельного прироста: $P_i = \eta_i (\lg \varepsilon_i)$.

При отклонении частоты и обменной мощности изменяется их интегральное отклонение и напряжение $U_{\text{вх}i}$ на входе каждого БРАН-Д. Это изменение усиливается

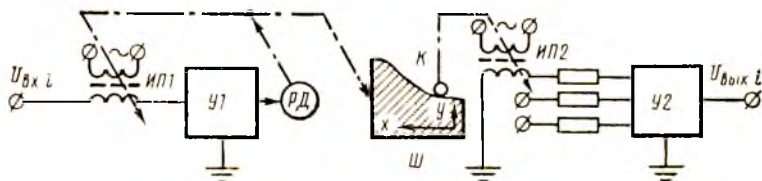


Рис. 2-21. Схема блока распределения активной нагрузки.

БРАН-Д: $U_{\text{вх}} = \lg \varepsilon_i$; $x = \lg \varepsilon_i$; $y = P_i$; $U_{\text{вх}x} = P_{\text{уст}i} - P_{\text{уст}i(0)} + \gamma_i (\Delta f + \sigma_c \Delta P_{06})$;
 БРАН-С: $U_{\text{вх}} = P_{\text{уст}i}$; $x = P_i$; $y = P_j$; $U_{\text{вх}x} = \Delta P_j - P_{\text{уст}j} - P_j + \gamma_j \Delta f$.

трехкаскадным полупроводниковым усилителем рассогласования $У1$ и приводит во вращение двухфазный реверсивный асинхронный электродвигатель $РД$ в ту или иную сторону в зависимости от знака изменения $U_{вх1}$. Двигатель перемещает каретку для крепления шаблона и ротор индукционного преобразователя $ИП1$ типа ИПБ-45, являющегося обратной связью по положению каретки, до тех пор, пока сигнал рассогласования не исчезнет. Это произойдет в установившемся режиме, когда $\Delta f + \sigma_c \Delta P_{об}$ и, следовательно, Δf (см. § 2-3) станут равными нулю. При перемещении каретки копир, связанный с выходным индукционным преобразователем $ИП2$, скользит по шаблону и изменяет напряжение на выходе $ИП2$ пропорционально изменению $P_{уст1(э)}$. В установившемся режиме задаваемые станциям мощности соответствуют наивыгоднейшему распределению активных нагрузок, так как перемещение кареток определяется величиной ε_i , а $P_{уст1(э)}$ находится по характеристике удельного прироста.

Выходным элементом $БРАН-Д$ является полупроводниковый суммирующий усилитель переменного напряжения $У2$, управляющий генератором-передатчиком $ГЧ$ (см. рис. 2-18) частотной системы телеизмерения. При пропорционально-интегральном регулировании на усилитель $У2$, кроме задаваемой станции мощности $P_{уст1(э)}$, подается пропорциональная составляющая суммы отклонений $\Delta f + \sigma_c \Delta P_{об}$.

С каждого $ГЧ$ управляющий сигнал

$$P_{уст1э} = P_{уст1(э)} + \gamma_i (\Delta f + \sigma_c \Delta P_{об})$$

в виде звуковой частоты определенного значения по каналу связи поступает на блок приема задания $БПЗ$ данной (i -й) электростанции. Он представляет собой частотомер звукового диапазона, аналогичный частотомеру РЧК-65, и выполняет одновременно роль указывающего, регистрирующего и регулирующего прибора, который преобразовывает значение частоты в напряжение промышленной частоты, пропорциональное заданию станции $P_{уст1}$. Этот сигнал поступает на станционные блоки распределения активной нагрузки $БРАН-С$, имеющие ту же конструкцию, что и диспетчерские. Число подключенных $БРАН-С$ равно числу агрегатов электростанции, принимающих участие в регулировании. Блок $БРАН-С$ отличается от $БРАН-Д$ следующим: форма шаблона отража-

ет зависимость нагрузки агрегата от суммарной нагрузки электростанции при наивыгоднейшем распределении ее между агрегатами (§ 2-2) $P_j = f_j(P_i)$, где j — индекс агрегата i -й электростанции; одинаковое перемещение кареток БРАН-С обеспечивается с помощью схемы выравнивания; на вход суммирующего усилителя У2, кроме задаваемой агрегату мощности $P_{уст}$, подается для сравнения с нею значение действительной нагрузки агрегата P_j , измеряемое ваттметром с индукционным преобразователем В, а также воздействия от ручного корректора нагрузки агрегата РК и частотного корректора РЧК.

Воздействие по отклонению частоты Δf осуществляется через частотный корректор РЧК, имеющий регулируемую зону нечувствительности.

Сигнал рассогласования с выхода БРАН-С подается на пропорционально-импульсный регулятор ИР, управляющий с помощью магнитного пускателя электродвигателем механизма изменения нагрузки турбины (МИЧВ).

Таким образом поддерживается соответствие между задаваемой электростанции нагрузкой и суммой нагрузок отдельных агрегатов, а также обеспечивается наивыгоднейшее распределение нагрузки между агрегатами.

Аппаратура АРЧМ ОРГРЭС может быть использована в системах регулирования, построенных по принципу разделения нагрузок на плановые и внеплановые, предложенному ОАТН ЭСП. В этом случае плановый график мощности станции вводится в БРАН-С с помощью автоматического задатчика графика АЗГ, а аппаратура телеизмерения служит для передачи на станцию внеплановых изменений нагрузки.

2-8. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ПО ЧАСТОТЕ И МОЩНОСТИ ВНИЭ (САУРЧМ)

Система САУРЧМ предназначена для автоматического выполнения следующих функций:

- поддержания номинального значения частоты в энергосистеме;

- распределения в процессе регулирования нагрузок между электростанциями в соответствии с равенством удельных приростов затрат с приближенным учетом потерь в сетях;

ограничения потоков активной мощности по сильно загруженным линиям электропередачи с целью предупреждения нарушения статической устойчивости.

Аппаратура САУРЧМ состоит из общесистемной и станционной частей.

Общесистемная часть формирует управляющее воздействие для станционной части в виде задания величины удельного прироста затрат тепловой электростанции

$$\varepsilon_{уст i} = \mu_{уст} \sigma_i + \Sigma \Delta \varepsilon_i; \quad i = a, b, \dots, n \quad (2-49)$$

и удельного прироста часового расхода воды гидроэлектростанции:

$$b_{уст i} = \frac{1}{\lambda_i} (\mu_{уст} \sigma_i + \Sigma \Delta \varepsilon_i); \quad i = a, \beta, \dots, v, \quad (2-50)$$

где $\mu_{уст}$ — величина удельного прироста затрат в условном центре энергосистемы (объединения); $\sigma_i = 1 - \partial \Pi / \partial P_i$; $\partial \Pi / \partial P_i$ — удельный прирост потерь в сетях по развиваемой мощности i -й электростанции; λ_i — коэффициент пересчета расхода воды на i -й гидроэлектростанции в затраты тепловых электростанций; $\Sigma \Delta \varepsilon_i$ — сумма дополнительных удельных приростов затрат, обусловленная различными условиями по ограничению, например, потоков активной мощности по сильно загруженным и слабым связям.

Так же как и в системе регулирования ОРГРЭС, общесистемным заданием является величина $\lg \mu_{уст}$, которая в САУРЧМ формируется по интегральному отклонению частоты

$$\lg \mu_{уст} = \lg \mu_c - k_{\mu} \int_{t_0}^t \Delta f_* dt.$$

Задание станции в виде удельного прироста затрат $\varepsilon_{уст}$ (или расхода $b_{уст}$) по сравнению с заданием в виде активной мощности $P_{уст}$ обладает тем преимуществом, что позволяет автоматически учитывать многие факторы, влияющие на характеристику удельного прироста агрегата или электростанции. Рассмотрим работу одного из вариантов функциональной схемы общесистемной части САУРЧМ (рис. 2-22).

Для получения величины $\lg \mu_{уст}$ служит датчик прироста издержек ДПИ-О. Схема датчика показана на рис. 2-23. Основным элементом ДПИ-О является сельсин C , который через редуктор P перемещает движок

потенциометра Π . Статор сельсина питается через усилитель мощности $УМ$ от $ДЧ$ — эталонного датчика частоты 50 Гц (рис. 2-22), а ротор — от сети измерительного трансформатора напряжения или сети собственных

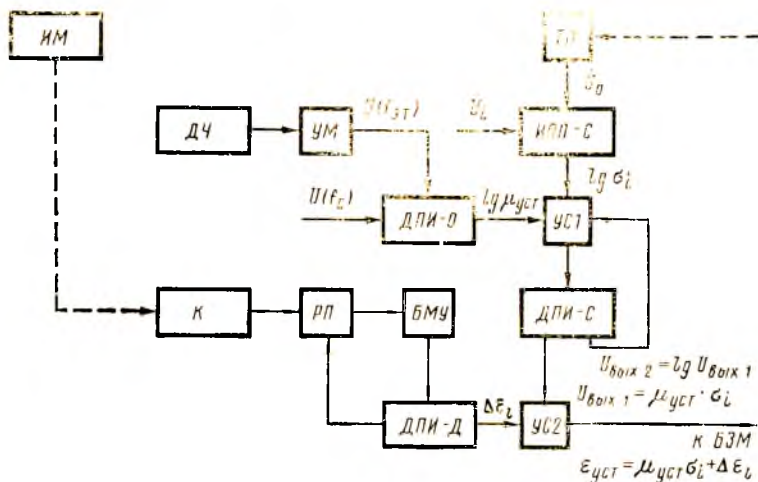


Рис. 2-22. Функциональная схема общесистемной части САУРЧМ.

нужд. При равенстве частот датчика и сети сельсин находится в неподвижном состоянии. При отклонении частоты сети от эталонной сельсин начинает вращаться, перемещая через редуктор движок потенциометра. Вращение сельсина в ту или другую сторону зависит от знака отклонения частоты, а угол поворота пропорционален

$$\int_{t_0}^t (f_{эт} - f_c) dt.$$

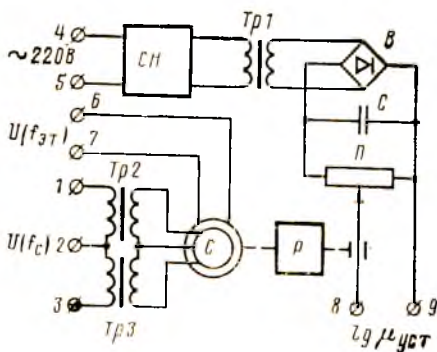


Рис. 2-23. Принципиальная схема $ДПИ-О$.

Напряжение на выходе ДПИ-О изменяется пропорционально углу поворота сельсина (δf) и, следовательно, может быть использовано в качестве $\lg \mu_{уст}$.

На усилитель-сумматор УС1 (рис. 2-22) воздействует и сигнал с измерителя прироста потерь в сети ИПП-С, напряжение на выходе которого пропорционально $\lg \sigma_i$.

В качестве измерителя прироста потерь в сети ИПП-С могут быть использованы две фазочувствительные схемы, реализующие выражение:

$$\lg \sigma_i = \lg [1 - k_1 (U_i \cos \alpha - U_0 \pm k_2 U_i \sin \alpha)], \quad (2.51)$$

где U_0 — напряжение в условном центре; U_i — напряжение на i -й станции; α — угол между векторами $\vec{U}_0$ и $\vec{U}_i$; k_1 и k_2 — периодически корректируемые коэффициенты.

Магнитный усилитель-сумматор УС1 (рис. 2-22) выполняется по дифференциальной схеме и воздействует на датчик прироста издержек станции ДПИ-С, предназначенный для определения задаваемого удельного прироста издержек электростанции. Упрощенная принципиальная схема ДПИ-С показана на рис. 2-24. Как и ДПИ-О, ДПИ-С представляет собой электромеханическое устройство. Состоит оно из двух потенциометров, движки которых синхронно перемещаются с помощью двигателя Д или вручную.

С потенциометра П1, имеющего линейную характеристику, сигнал $U_{вых1}$ поступает на один из входов усилителя-сумматора УС2. Сигнал $U_{вых2} = \lg U_{вых1}$ со второго потенциометра П2, имеющего логарифмическую харак-

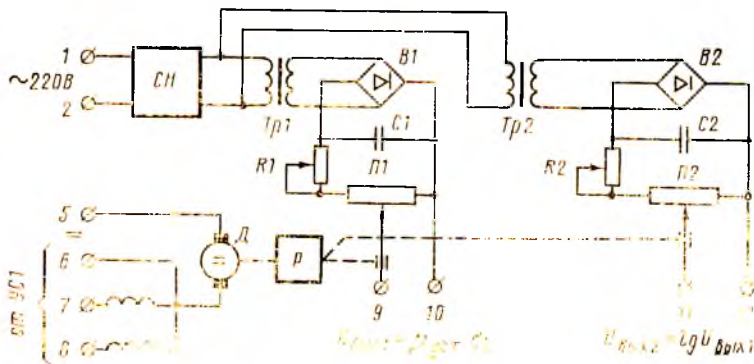


Рис. 2-24. Принципиальная схема ДПИ-С.

теристику, используется для обратной связи $УС1$. Вращение двигателя $ДПИ-С$ прекратится, когда сигнал на выходе $УС1$, а следовательно, и на его входе станет равным нулю:

$$\lg \mu_{уст} + \lg \sigma_i - \lg U_{вых1} = 0.$$

Отсюда в установившемся режиме

$$U_{вых1} = \mu_{уст} \sigma_i.$$

В случае ограничения потока активной мощности (перетока) по нескольким или одной связи, как на рис. 2-22, на другой вход усилителя-сумматора $УС2$ подается сигнал, пропорциональный $\Delta \varepsilon_i$, т. е. дополнительная поправка к величине $\mu_{уст} \sigma_i$ при отклонении потока активной мощности от заданного значения. Схема получения сигнала $\Delta \varepsilon_i$ для ограничения перетока по линии работает следующим образом. Измеритель мощности $ИМ$, установленный на этой линии, воздействует непосредственно или по каналу связи через корректирующий прибор $К$ на вход следящей системы $РП$. $БМУ$, $ДПИ-Д$.

В качестве корректора $К$ используется фазочувствительный усилитель с регулируемым коэффициентом усиления и зоной нечувствительности. При нормальном перетоке активной мощности по линии напряжение на выходе корректора равно нулю, при увеличении перетока сверх заданного значения на выходе корректора появляется напряжение, пропорциональное отклонению перетока. Это напряжение подается на вход измерительного органа регулирующего прибора $РП$ пропорционально-интегрального действия типа $РПИ-Б$ (см. § 3-3), воздействующего через магнитный усилитель $БМУ$ на блок $ДПИ-Д$, на выходе которого появляется сигнал, пропорциональный $\Delta \varepsilon_i$.

В качестве $ДПИ-Д$ используется такой же блок, как для $ДПИ-С$, но с двумя линейными потенциометрами. Один из потенциометров используется для обратной связи. После того как переток примет нормальное значение и напряжение на выходе корректора станет равным нулю, следящая система под действием обратной связи придет в исходное положение.

Станционная часть аппаратуры САУРЧМ должна обеспечивать по заданному $\epsilon_{уст}$ (или $b_{уст}$) такую мощность электростанции, чтобы фактическое расчетное значение удельного прироста было равно заданному. Для решения этой задачи станционная часть системы регулирования должна выполнять следующие функции:

определение нагрузки электростанции по ее характеристике удельного прироста при данном составе работающего оборудования;

наивыгоднейшее распределение нагрузки между агрегатами;

изменение характеристик удельного прироста и границ регулировочного диапазона агрегатов и электростанции при изменении состава оборудования и режима работы;

быстрое изменение нагрузки агрегатов в аварийных режимах.

Действие станционной части САУРЧМ рассмотрим на примере блочной тепловой электростанции (рис. 2-25). Ввиду отсутствия на такой станции поперечных связей по пару задача наивыгоднейшего распределения активной нагрузки между энергоблоками значительно упрощается. Для установившегося режима j -го энергоблока l -й электростанции связь между заданными и регулируемыми величинами в САУРЧМ без учета регулировочного диапазона описывается уравнениями (при $j = 1, 2, \dots, n$):

$$\left. \begin{aligned} P_{устj} - P_j &= 0, \\ Q_{устj} - Q_j + Q_{\Delta p j} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2-52)$$

Задаваемые электрическая и тепловая нагрузки определяются по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} P_{устj} &= \gamma_j \Delta f + \eta_j (\epsilon_{устj}); \\ Q_{устj} &= q P_{устj}; \\ Q_{\Delta p j} &= \gamma_1 (\Delta p + \gamma_2 \int \Delta p dt). \end{aligned} \right\} \quad (2-53)$$

В формулах (2-52) и (2-53) P_j , $P_{устj}$ — действительная и задаваемая активные нагрузки j -го турбоагрегата; γ_j — обратная величина коэффициента статизма АСР мощности j -го турбоагрегата по частоте; Δf — отклонение частоты от номинального значения; η_j — коэффициент, определяющий зависимость активной мощности блока от заданного значения удельного прироста в соответствии с характеристикой удельного прироста; Q_j —

В процессе регулирования схема работает следующим образом. При изменении частоты в энергосистеме на выходе измерительного блока ИЧ (§ 2-6) появляется сигнал $k_f \Delta f$, пропорциональный этому изменению и соответствующей полярности. Этот сигнал воздействует на блоки задания мощности энергоблока БЗМ-Б. Он необходим для увеличения скорости изменения нагрузки в аварийных режимах. Одновременно приходят в действие общесистемные устройства и вырабатывают новое задание станции в виде напряжения постоянного тока, пропорционального $\varepsilon_{уст.1}$. Это напряжение поступает также на все блоки БЗМ-Б, которые представляют собой бесконтактные функциональные преобразователи, реализующие зависимость между заданным удельным приростом и мощностью энергоблока согласно первому уравнению в (2-53).

Выработанный БЗМ-Б сигнал, пропорциональный $P_{уст.1}$, подается на регулятор мощности РМ турбогенератора. Регулятор мощности РМ состоит из бесконтактного электронного регулятора пропорционально-интегрального действия РПИ-Б (см. § 3-3) в сочетании с мощным дифференциальным магнитным усилителем.

Одновременно через устройство ввода УВ сигнал с БЗМ-Б подается на регулятор тепловой нагрузки парогенератора ($Q_{уст.1}$).

Под действием этих сигналов РМ и РТН приводят фактическую нагрузку агрегата в соответствие с заданной. Воздействие РМ на двигатель механизма изменения частоты вращения регулятора турбины РТ будет продолжаться до тех пор, пока фактическая мощность P_f , измеренная на выводах генератора измерителем мощности ИМ типа ИМ-1 (см. § 2-6), не станет равной заданной $P_{уст.1}$.

На РТН подается дополнительный сигнал $Q_{\Delta P_f}$, образованный интегрирующим преобразователем ПИ. Такой метод регулирования тепловой нагрузки позволяет поддерживать давление пара перед турбиной на заданном уровне. В установившемся режиме для описанной системы регулирования будем иметь:

$$\Delta f = 0; \quad \Delta p = 0; \quad P_f = \eta_f \varepsilon_{уст.1}. \quad (2-54)$$

Так как эти уравнения справедливы для любого энергоблока, принимающего участие в регулировании, то

система регулирования обеспечивает также и экономическое распределение активной нагрузки между ними.

Для автоматического учета различных факторов, влияющих на удельный прирост энергоблока и границы регулировочного диапазона, в схеме используется целый ряд датчиков давления и положения совместно со специальными блоками коррекции БК.

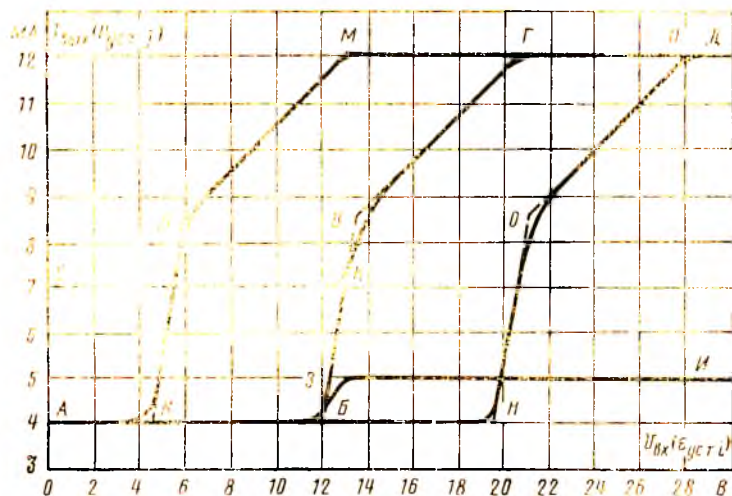


Рис. 2-26. Типовые характеристики БЗМ-Б-1.

А-Б-В-Г-Д — основная характеристика; Е-К-В-Г-Д — характеристика с введенным ограничением минимума; Л-Б-З-И — характеристика с введенным ограничением максимума; А-К-Л-М-Д, А-Н-О-П-Д — характеристики со смещением вдоль оси x .

Для коррекции верхней границы B регулировочного диапазона предусмотрены цепи: измеритель давления пара в регулирующей ступени ИДЗ—БКЗ—БЗМ-Б; измеритель давления пара перед турбиной ИД1—БК1—регулятор мощности РМ; измеритель перемещения регулирующих клапанов турбоагрегата ИП—БК2—БЗМ-Б; измеритель вакуума в конденсаторе ИВ—БК4—БЗМ-Б. Сигнал на выходе указанных цепей действует на снижение верхней границы регулировочного диапазона только при отклонении измеряемых параметров за допустимые пределы (рис. 2-26).

На смещение характеристик вдоль оси удельного прироста издержек действует цепь: измеритель вакуума ИВ—БК5—БЗМ-Б.

Цепи коррекции БК6, БК7 управляются контактами вспомогательного оборудования парогенератора и турбины и действуют на изменение границ регулировочного диапазона и смещение характеристики удельного прироста блока.

По данным ВНИИЭ экономический эффект от внедрения САУРЧМ выражается в снижении расхода топлива за счет правильного ведения режима работы электростанции и составляет для ТЭС с общим паропроводом мощностью 300—400 МВт 15 тыс. руб/год и для ТЭС блочного типа мощностью 800—900 МВт — 25 тыс. руб/год. Система САУРЧМ установлена на электростанциях Объединенной Южной энергосистемы.

Системы АРЧМ ОРГРЭС и САУРЧМ ВНИИЭ основаны на использовании метода плавных характеристик удельного прироста. Применение вместо него метода ступенчатых характеристик удельного прироста при кусочно-линейной аппроксимации расходных характеристик дает дополнительную экономию, по данным отечественных исследований 0,1—0,3% (по данным американских исследований — 0,1—0,4%).

2-9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВМ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ

В настоящее время все большее распространение получает использование универсальных ЭВМ, работающих в темпе протекания нормальных эксплуатационных и послеаварийных режимов, для целей автоматического регулирования частоты и мощности [93]. Переход от чисто аналоговых систем к прямому цифровому регулированию происходит постепенно, обычно через стадию гибридных систем, в которых универсальная ЭВМ осуществляет управление аналоговым устройством АРЧМ. Прямое цифровое управление по сравнению с аналоговым и гибридным обеспечивает более гибкий подход к формированию законов автоматического регулирования, что позволяет учесть большее число факторов.

Системы цифрового регулирования отличаются двумя важными особенностями: они располагаются на диспетчерских пунктах, где имеется вся необходимая информация для учета потерь в сети, и строятся на принципе раздельного решения двух задач — экономичного распределения активной нагрузки и регулирования частоты

и активной мощности. Темп работы системы АРЧМ значительно выше, чем системы экономичного распределения активной нагрузки. Однако на каждый из объектов выдается только один сигнал, состоящий из сигналов АРЧМ и растянутых во времени заданий на изменение нагрузки в цикле экономичного распределения.

Для управления режимом энергообъединения целесообразно использование иерархической структуры с ЭВМ на разных уровнях управления.

Работы, выполненные в ОДУ Северо-Запада [94], позволили сделать вывод о возможности использования ЭВМ «Видеотон 1010Б» для цифрового регулирования частоты и мощности в Объединенной энергосистеме.

2-10. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ АРЧМ

Сравнение и оценка динамических свойств автоматических систем регулирования частоты и мощности (АСР ЧМ), основанных на использовании различных методов регулирования, обычно осуществляются при следующих основных допущениях:

энергосистема приведена к одному обобщенному агрегату «турбина — генератор», что позволяет рассматривать общее (среднее) движение параллельно работающих агрегатов. Это допущение достаточно близко к действительности для сосредоточенных энергосистем при одинаковых характеристиках регулирующих устройств на всех агрегатах;

переходные процессы в парогенераторах не учитываются, так как они протекают гораздо медленнее, чем в АСР ЧМ;

предполагается, что аппаратура АСР ЧМ идеально реализует заданный закон регулирования, поэтому динамические параметры конкретной аппаратуры не учитываются.

При этих упрощениях структурная схема АСР ЧМ для малых отклонений переменных величин приведена на рис. 2-27,а. Соответствующая ей схема электронной модели — на рис. 2-27,в.

На рис. 2-27,а двойными линиями показана структурная схема нерегулируемой энергосистемы. Схема содержит интегрирующее звено 1, учитывающее инерцию вращающихся масс обобщенного агрегата $(T_J \frac{d\omega_*}{dt} = \Delta P_*$;

для реальных энергосистем $T_J \approx 10$ с), и пропорциональное звено c , учитывающее изменение мощности нагрузки ΔP_H и мощности обобщенной турбины при неизменном положении ее регулирующих клапанов ΔP_T с изменением частоты. Изменение нагрузки характеризуется регулирующим эффектом нагрузки k :

$$\frac{\Delta P_H}{P_{H0}} = k \frac{\Delta \omega}{\omega_{\text{ном}}}$$

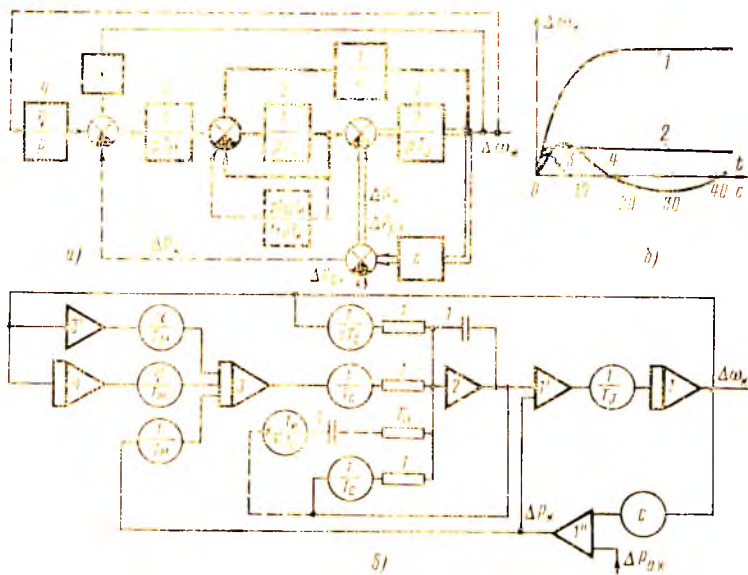


Рис. 2-27. Автоматическая система регулирования частоты.
а — структурная схема; б — вид переходных функций; в — схема электронной модели.

а изменение мощности турбины — коэффициентом саморегулирования m :

$$\frac{\Delta P_T}{P_{T0}} = m \frac{\Delta \omega}{\omega_{\text{ном}}}$$

Так как $\Delta P_p = \Delta P_H - \Delta P_T$, то

$$c = \frac{\Delta P_{p*}}{\Delta \omega_*} = \frac{\Delta P_H - \Delta P_T}{P_{H, \text{ном}}} \frac{\omega_{\text{ном}}}{\Delta \omega} = k \frac{P_{H0}}{P_{H, \text{ном}}} - m \frac{P_{T0}}{P_{T, \text{ном}}} \quad (2-55)$$

Условия, соответствующие нерегулируемой энергосистеме, реально имеют место при пониженной частоте и

полностью загруженных агрегатах. При этом $P_{н0} \approx \approx P_{г0} \approx P_{г.ном}$, $c = k - m$. Коэффициент c для реальных энергосистем может быть принят равным двум.

Передаточная функция нерегулируемой энергосистемы в соответствии с ее структурной схемой (см. § П1-2):

$$\frac{\Delta \omega_*(p)}{\Delta P_{0*}(p)} = \frac{1/c}{\frac{T_J}{c} p + 1}, \quad (2-56)$$

где ΔP_{0*} — относительная величина возмущения (изменения нагрузки, вызванного включением или отключением потребителя), а вид переходной функции показан кривой 1 на рис. 2-27,б.

Нерегулируемая энергосистема моделируется усилителями 1, 1', 1'' (рис. 2-27,в).

Если дополнить структурную схему нерегулируемой энергосистемы звеньями, показанными на рис. 2-27,а жирными линиями, то получим структурную схему энергосистемы, регулируемой только статическими регуляторами частоты вращения турбин. Обобщенный регулятор частоты вращения представлен одним интегрирующим звеном 2 с постоянной времени T_* (главный сервомотор — гидравлический исполнительный механизм — ГИМ), охваченным жесткой обратной связью, и пропорциональным звеном с коэффициентом усиления $1/s$ (главная обратная связь). Постоянная времени T_c главного ГИМ может быть принята равной 0,5 с, а статизм обобщенного регулятора скорости (эквивалентный статизм энергосистемы) s равным 0,1. Эквивалентный статизм энергосистемы значительно превышает статизм регуляторов отдельных турбин, так как обычно регуляторы на части агрегатов не работают по различным причинам (нечувствительность, предельная нагрузка и др.).

Передаточная функция энергосистемы в этом случае

$$\frac{\Delta \omega_*(p)}{\Delta P_{0*}(p)} = \frac{T_c p + 1}{T_J T_c p^2 + (c T_c + T_J) p + c + \frac{1}{s}}, \quad (2-57)$$

а вид переходной функции показан кривой 2 на рис. 2-27,б.

На рис. 2-27,а пунктиром показано реальное дифференцирующее звено, отображающее изодромию обрат-

ную связь, охватывающую ГИМ. Регуляторы частоты вращения только с изодромной обратной связью (астатические регуляторы) применяются на гидростанциях для «первичного» регулирования частоты.

Электронная модель энергосистемы, регулируемой только регуляторами частоты вращения, состоит из модели нерегулируемой энергосистемы, дополненной усилителем 2.

Структурная схема энергосистемы, дополнительно регулируемой вторичными регуляторами по мгновенному отклонению частоты (АРЧ), образуется из рассмотренной схемы добавлением интегрирующего звена 3 с постоянной времени T_M (механизм изменения частоты вращения МИЧВ с электроприводом) и пропорционального звена с коэффициентом усиления α (датчик отклонения частоты). Соответственно в электронной модели (рис. 2-27, в) добавляются усилители 3 и 3'. Благодаря наличию интегрирующего звена 3 частота регулируется астатически при статических регуляторах частоты вращения.

В соответствии со структурной схемой передаточная функция энергосистемы с АРЧ:

$$\frac{\Delta \omega_{*}(p)}{\Delta P_{e*}(p)} = \frac{p(T_c p + 1)}{T_J T_c p^3 + (c T_c + T_J) p^2 + \left(c + \frac{1}{s}\right) p + \frac{\alpha}{T_M}}. \quad (2-58)$$

Величина α/T_M представляет собой коэффициент усиления «вторичного» АРЧ. Условие устойчивости по критерию Гурвица (см. § П1-3)

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{T_M} &< \frac{(c T_c + T_J) \left(c + \frac{1}{s}\right)}{T_J T_c} = \\ &= \frac{(2 \cdot 0,5 + 10) (2 + 10)}{10 \cdot 0,5} = 26,4. \end{aligned}$$

Максимально быстрый процесс без перерегулирования имеет место при $\alpha/T_M = 2 \div 4$. Вид переходной функции при такой настройке показан кривой 3 на рис. 2-27, б.

Структурная схема энергосистемы с автоматическим регулированием частоты и мощности по интегральному отклонению частоты (АРЧМ) представлена полной схемой на рис. 2-27, а (добавляются связи, показанные штриховыми линиями). Интегрирующее звено 4 в системе АРЧМ ОРГРЭС (§ 2-7) выполняется общим для всех

станций энергосистемы и устанавливается на диспетчерском пункте (централизованное регулирование). Коэффициент η , характеризующий скорость изменения заданной нагрузки при единичном отклонении частоты, может изменяться в широких пределах в соответствии с изменением крутизны эквивалентной характеристики удельного прироста.

Сигнал на входе интегрирующего звена 3 (электродвигателя МИЧВ)

$$\eta \int \Delta \omega_* dt + \alpha \Delta \omega_* - \Delta P_* = 0 \quad (2-59)$$

в конце процесса регулирования, т. е. изменение генерируемой мощности ΔP_* , определяется мгновенными и интегральными отклонениями частоты (ПИ-регулирование). Так как установившийся режим может наступить только при $\Delta \omega_* = 0$, то $\Delta P_* = \eta \int \Delta \omega_* dt$, чем обеспечивается заданное распределение генерируемой мощности между станциями. Закон регулирования энергосистемы определяется приравливанием нулю суммы сигналов, поступающих на вход интегрирующего звена 2, т. е. фактически на золотник регулятора турбины, управляющий гидравлическим исполнительным механизмом.

В соответствии со структурной схемой передаточная функция энергосистемы с АРЧМ (линейной системы):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \omega_*(p)}{\Delta P_{0*}(p)} &= \frac{p \left(T_c p^2 + p + \frac{1}{T_M} \right)}{T_J T_c p^4 + (c T_c + T_J) p^3 + \left(c + \frac{1}{s} \right) p^2 +} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{1}{+ \frac{1}{T_M} (\alpha + c) p + \frac{\eta}{T_M}} \end{aligned} \quad (2-60)$$

Область устойчивости ограничивается кривой D -разбиения (см. § П1-3), имеющей в координатах (α, η) вид параболы:

$$\begin{aligned} &\frac{T_J T_c}{(c T_c + T_J)^2 T_M^2} (\alpha + c)^2 - \\ &- \frac{c + \frac{1}{s}}{(c T_c + T_J) T_M} (\alpha + c) + \frac{\eta}{T_M} = 0, \end{aligned} \quad (2-61)$$

и особой прямой $\eta = 0$.

Графически область устойчивости АРЧМ обычно изображается в плоскости параметров $(\alpha/T_M, \eta/T_M)$, которые представляют собой коэффициенты пропорционального и интегрального воздействия по частоте. Вид переходной функции зависит от значений этих коэффициентов внутри области устойчивости, соответствующей заданному значению T_M , и при обычно встречающихся настройках носит колебательный характер (кривая 4, рис. 2-27,б).

Обеспечить требуемое качество процесса регулирования при изменении η в широких пределах можно путем выбора больших значений α ($\alpha=50 \div 60$ при $T_M=10$ с). Пропорциональное воздействие по частоте устраняет «ложное» (в направлении, противоположном требуемому для поддержания частоты) действие сигнала ΔP_* в начальной стадии переходного процесса, пока не накопится относительно медленно изменяющееся «задание» $\eta \int \Delta \omega_* dt$.

Электронная модель энергосистемы с АРЧМ (линейной системы) представлена полной схемой на рис. 2-27,в.

Однако, как показали исследования [52, 53], результаты, полученные на линейной модели и в реальной энергосистеме с АРЧМ, существенно отличаются из-за неучета люфта в МИЧВ и других упрощений. Люфт в МИЧВ приводит к значительному уменьшению области параметров настройки, обеспечивающих высокое качество процесса регулирования, что необходимо учитывать при внедрении и наладке систем АРЧМ.

Решение задачи устойчивости и качества регулирования «в большом» (при значительных возмущениях) может быть выполнено на основе методов исследования нелинейных систем регулирования.

Вопросы для самопроверки

1. Как влияет колебание частоты в энергосистеме на работу турбин, механизмов собственного расхода на электростанциях и на производительность механизмов у потребителя?

2. В чем заключается принцип экономичного распределения активной нагрузки между агрегатами и электрическими станциями?

3. Перечислите основные методы регулирования частоты в энергосистеме.

4. Назначение регуляторов частоты вращения турбин и их характеристики.

5. Из каких основных элементов состоят измерители частоты?

6. Какое назначение измерительных органов мощности, принципы их построения?

7. Принципиальное отличие первичных и вторичных регуляторов частоты и активной мощности.

8. Сравните устойчивость и качество регулирования частоты различными автоматическими системами.

Глава третья

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТЭС

3-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА ТЭС

Тепловая электрическая станция является единым сложным объектом автоматизации, в котором с изменением нагрузки должно изменяться поступление топлива, воздуха и воды с целью обеспечения выработки требуемого количества энергии необходимого качества при выполнении условий надежности и экономичности работы оборудования. Кроме электрической энергии, на ТЭС вырабатывается тепловая энергия, качество которой характеризуется значениями давления и температуры энергоносителя (в основном пара и воды).

Автоматизация технологического процесса на ТЭС включает в себя:

автоматический дистанционный контроль текущих значений параметров технологического процесса;

дистанционное управление агрегатами, машинами, механизмами;

автоматическое регулирование периодических и непрерывных процессов;

автоматическую защиту основного и вспомогательного оборудования от возможных повреждений в процессе эксплуатации;

технологическую сигнализацию о состоянии основного и вспомогательного оборудования;

автоматическую блокировку, обеспечивающую включение или отключение механизмов в заданной последовательности;

расчет технико-экономических показателей работы электростанции в целом и ее подразделений или отдельных крупных установок.

При решении вопросов автоматизации технологического процесса на ТЭС все оборудование расчленяется на технологические участки в соответствии с характером технологических процессов: парогенераторный, турбинный, подогревательно-насосный и генераторный. Вопросы автоматизации решаются отдельно для каждого из этих участков, хотя и координируются между собой.

В последние годы ведется разработка и опытная эксплуатация комплексных информационно-вычислительных устройств с использованием ЭВМ.

Вопросы автоматизации технологического процесса на ТЭС в полном объеме изучаются студентами специальности 0649 («Автоматизация теплоэнергетических процессов»). Здесь же в порядке общего ознакомления рассмотрим только некоторые вопросы автоматического регулирования режима работы парогенератора, являющегося наиболее важной и сложной частью тепловой схемы ТЭС.

3-2. ПАРОГЕНЕРАТОР КАК ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Принципиальная технологическая схема барабанного парогенератора приведена на рис. 3-1. Парогенератор как объект регулирования является сложным динамическим звеном с несколькими взаимосвязанными входными и выходными величинами.

Основными входными величинами являются:

расход топлива B_T ; производительность дутьевых вентиляторов (расход воздуха) Q_B ; производительность дымососов (расход газа) Q_G ; расход питательной воды $D_{п.п.}$; расход воды на впрыск $D_{впр.}$; расход воды на продувку $D_{пр.}$; расход перегретого пара $D_{п.п.}$.

Основными выходными (регулируемыми) величинами являются: давление и температура перегретого пара $P_{п.п.}$, $t_{п.п.}$; разрежение в верхней части топки S_T ; коэффициент избытка воздуха α (% O_2); уровень воды в барабане H_6 ; солесодержание котловой воды $NaCl$.

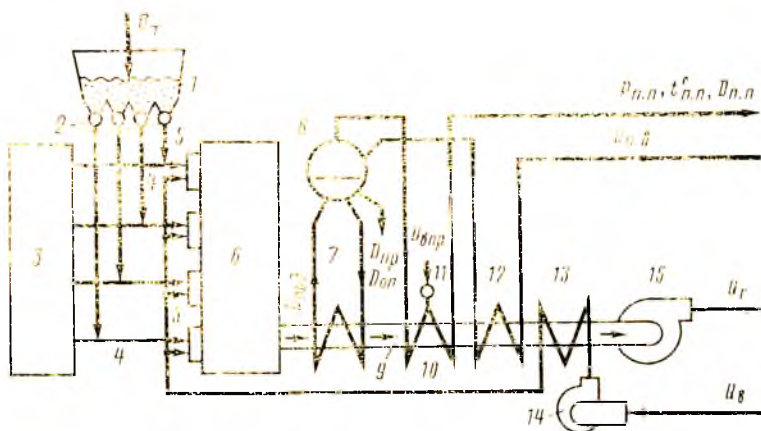


Рис. 3-1. Принципиальная технологическая схема барабанного парогенератора.

1 — бункер пыли; 2 — питатели пыли; 3 — короб первичного воздуха; 4 — пылепроводы; 5 — горелки; 6 — топка; 7 — циркуляционный контур; 8 — барабан; 9 — газодух; 10 — пароперегреватель; 11 — впрыскивающий парохладитель; 12 — водяной экономайзер; 13 — воздухоподогреватель; 14 — вентилятор; 15 — дымосос.

Связи между входными и выходными величинами схематически представлены на рис. 3-2. Особенность парогенератора заключается в сложности связей, так как выходные регулируемые величины одновременно являются входными воздействиями (возмущениями) по отношению к другим выходным величинам. Расход перегретого пара $D_{уп}$ изменяется регулятором частоты вращения турбины, поэтому отнесен к входным величинам парогенератора, однако $D_{уп}$ зависит от других входных и выходных величин, как указано на рис. 3-2.

Из приведенных на рис. 3-2 связей можно выделить основные (сплошные линии) и неосновные (штриховые). Для регулирования выходных величин используются

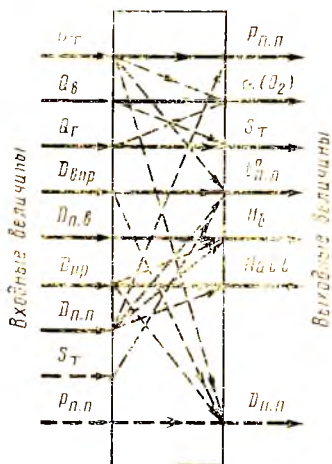


Рис. 3-2. Упрощенная схема связей между входными и выходными величинами парогенератора.

основные связи. Регулирование (стабилизация) осуществляется с помощью самостоятельных систем регулирования (§ 3-4), связанных, как правило, лишь через объект регулирования.

В динамическом отношении парогенератор по каждой из связей можно рассматривать как комбинацию последовательно и параллельно включенных звеньев: усилительных (безынерционных), инерционных первого порядка, интегрирующих, реальных дифференцирующих и звеньев транспортного запаздывания (см. § П1-2). В качестве отдельного звена целесообразно рассматривать участок АСР, обладающий однородностью протекания в нем физического или химико-технологического процесса.

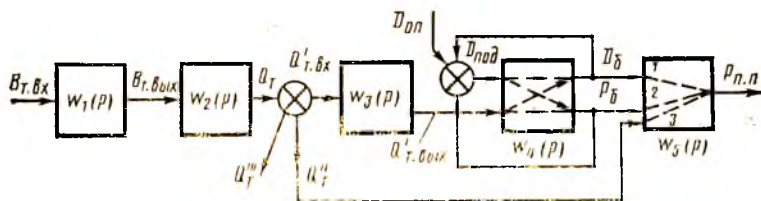


Рис. 3-3. Структурная схема парогенератора по каналу воздействия $B_T \rightarrow p_{п.п.}$

Для примера проследим прохождение входного сигнала через парогенератор (см. рис. 3-1) по связи: расход топлива B_T — давление перегретого пара $P_{п.п.}$, разбив парогенератор на ряд простых элементов (участков), обладающих однородностью протекающего в них физического или химико-технологического процесса.

Первый участок — транспортировка пылевидного топлива от питателей пыли 2 по пылепроводам 4 к горелкам 5. Это звено транспортного запаздывания с передаточной функцией

$$W_1(p) = e^{-p\tau_1},$$

где время запаздывания τ_1 зависит от скорости движения пылевоздушной смеси и длины пылепровода (для современных парогенераторов $\tau_1=0,5 \div 2,5$ с).

На структурной схеме парогенератора (рис. 3-3) входной и выходной величиной звена $W_1(p)$ является расход топлива.

Второй участок — подача частиц топлива в топку 6, их воспламенение и выгорание. Процесс тепловыделения приближенно описывается уравнением инерционного звена первого порядка с передаточной функцией

$$W_2(p) = \frac{k_2}{1 + pT_2},$$

где T_2 находится в диапазоне от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. Выделяемое в топке 6 в процессе сгорания тепло Q_T частично передается через поверхности нагрева воде циркуляционного контура 7 и идет на парообразование Q'_T , а частично — на перегрев пара в пароперегревателе 10 Q''_T . Остальная часть тепла Q'''_T расходуется на подогрев питательной воды в водяном экономайзере 12, воздуха в воздухоподогревателе 13 и уносится с уходящими газами.

Третий участок — теплопередача тепловой энергии радиационным и конвективным поверхностям нагрева парогенератора. Приближенно динамика процесса теплопередачи отражается передаточной функцией

$$W_3(p) = \frac{k_3}{1 + pT_3},$$

где $T_3 = 10 \div 15$ с.

Четвертый участок — парообразование в испарительных трубах. Конструктивно это звено составляют подъемные и опускные трубы циркуляционного контура 7 с расходами соответственно $D_{\text{под}}$ и $D_{\text{оп}}$ (см. рис. 3-1) и барабан 8. Изменение подводимого к воде тепла $Q'_{T, \text{вых}}$ приводит к изменению двух регулируемых величин — паропроизводительности барабана D_6 и давления пара в барабане P_6 , которые, являясь выходными величинами четвертого звена (рис. 3-3), одновременно оказывают влияние на паропроизводительность подъемных труб $D_{\text{под}}$ (обратные связи), т. е. одновременно являются и входными величинами.

Если D_6 поддерживать постоянной (например, регулирующими клапанами турбины), а Q'_T изменить скачком, то кривая разгона по давлению пара в барабане P_6 будет иметь форму, близкую к экспоненте, т. е.

$$W_4(p) = \frac{k_4}{1 + pT_4}.$$

Пятый участок — пароперегреватель 10, в котором происходит нагрев пара до требуемой температуры при

одновременном снижении его давления из-за гидравлического сопротивления трубок пароперегревателя. Этот участок имеет три входа: D_6 , P_6 , Q''_T . При $D_6 = \text{const}$

$$W_5(z)(p) = k_5(z); W_5(z)(p) = \frac{k_5(z)}{1 + pT_5}.$$

Структурная схема на рис. 3-3 приближенно отражает динамику работы парогенератора по одной из связей ($B_T \rightarrow P_{\text{п.п}}$). Получаемые рассмотренным способом структурные схемы основных связей используются при проектировании парогенератора.

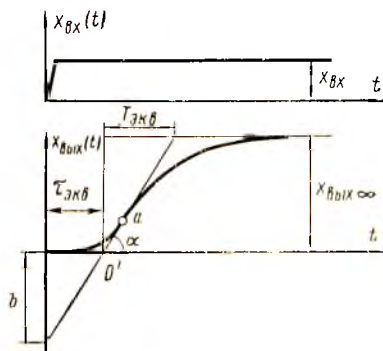


Рис. 3-4. Определение параметров эквивалентной передаточной функции парогенератора по кривой разгона.

При исследовании АСР имеющегося парогенератора о его динамических свойствах по какой-либо связи судят на основании экспериментальной кривой разгона. Кривая разгона по выбранной связи $B_T \rightarrow P_{\text{п.п}}$ представляет собой зависимость $P_{\text{п.п}}(t)$, снимаемую при скачкообразном изменении подачи топлива B_T . По кривой разгона определяется передаточная функция простейшей эквивалентной

структурной схемы объекта.

Часто эквивалентная структурная схема теплового объекта, в том числе и парогенератора, составляется только из последовательно соединенных звеньев: усиительного (безынерционного), инерционного первого порядка и запаздывающего:

$$W_{\text{э.кв}}(p) = \frac{k_{\text{э.кв}} e^{-p\tau_{\text{э.кв}}}}{1 + pT_{\text{э.кв}}}. \quad (3-1)$$

Параметры $k_{\text{э.кв}}$, $\tau_{\text{э.кв}}$ и $T_{\text{э.кв}}$ определяются по экспериментальной кривой разгона, как показано на рис. 3-4. На рис. 3-4: a — точка перегиба, в которой проводится касательная к кривой разгона; $\tau_{\text{э.кв}}$ — время запаздывания; $T_{\text{э.кв}}$ — время разгона объекта; $k_{\text{э.кв}} = x_{\text{вых} \infty} / x_{\text{вх}}$ — коэффициент усиления.

По найденной передаточной функции определяются: степень самовыравнивания

$$\rho_{\text{экв}} = 1/k_{\text{экв}};$$

относительная скорость разгона

$$\epsilon_{\text{экв}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{x_{\text{вх}}} = \frac{b}{\tau_{\text{экв}} x_{\text{вх}}} = \frac{x_{\text{вых}\infty}}{T_{\text{экв}} x_{\text{вх}}} = \frac{k_{\text{экв}}}{T_{\text{экв}}}. \quad (3-2)$$

Эквивалентная структурная схема с передаточной функцией (3-1) не применима только к связи $D_{\text{н.в.}} \rightarrow H_0$ (см. рис. 3-2), используемой для регулирования уровня воды в барабане. Для этой связи структурная схема составляется из последовательно соединенных интегрирующего и запаздывающего звеньев:

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{k_{\text{экв}} e^{-p\tau_{\text{экв}}}}{pT_{\text{экв}}} = \frac{\epsilon_{\text{экв}}}{p} e^{-p\tau_{\text{экв}}}. \quad (3-3)$$

3.3. ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

Все основные системы регулирования парогенератора выполняются по однотипным схемам с использованием электронных регуляторов, разработанных Всесоюзным теплотехническим институтом (ВТИ) и Московским заводом тепловой автоматики (МЗТА) и получивших широкое распространение для автоматизации агрегатов тепловых электростанций и промышленных энергетических объектов. Рассмотрим функциональную схему рис. 3-5 и принцип действия автоматического регулятора с электронным регулирующим прибором пропорционально-интегрального действия серии РПИБ.

Регулятор состоит из датчиков Д1, Д2, Д3; электронного регулирующего прибора РПИБ, включающего

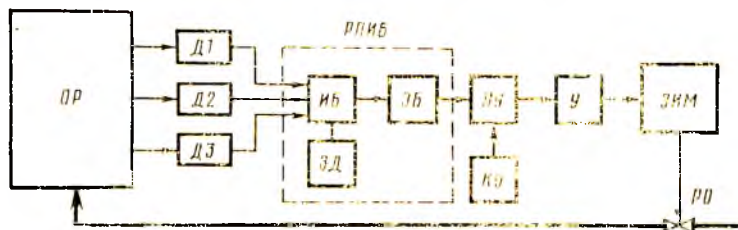


Рис. 3-5. Функциональная схема автоматического регулятора с электронным регулирующим прибором.

в себя измерительный блок *ИБ*, задатчик регулируемой величины *ЗД* и электронный блок *ЭБ*; переключающего устройства *ПУ*, осуществляющего перевод с автоматического регулирования на ручное; ключа ручного управления *КУ*; усилителя *У* и электрического исполнительного механизма *ЭИМ*, воздействующего на регулируемый орган *РО* объекта регулирования *ОР*.

Датчики или первичные измерительные приборы служат для измерения значения нужного параметра или его отклонения с последующим преобразованием неэлектрической величины в выходной сигнал, пригодный для передачи на управляющий элемент регулятора.

В зависимости от вида внешнего источника энергии преобразователи могут быть электрическими, гидравлическими или пневматическими. Датчики, снабженные преобразователями с унифицированным выходным сигналом (например, 0—5 мА и 0—20 мА для электрических сигналов, 0,5—2,5 кгс/см² для гидравлических сигналов, 0,2—1 кгс/см² для пневматических сигналов), относятся к так называемой Государственной системе приборов (ГСП).

В теплоэнергетических установках необходимо измерять давление, расход, температуру вещества (пара, газа, воды), уровень воды, содержание O_2 и CO_2 в газах, солесодержание в воде и т. п.

На рис. 3-6 показан схематический вид некоторых типов датчиков.

Для измерения больших давлений обычно применяются трубчато-пружинные датчики (рис. 3-6,а) и сильфонные (рис. 3-6,в) (сильфон — гармоникообразная мембрана). При сравнительно небольших давлениях применяются мембранные датчики давления (рис. 3-6,б). Все перечисленные датчики преобразуют значение подводимого к ним давления x_1 в перемещение y_1 . Точки перемещения жестко связаны с индукционными (ИП) или дифференциально-трансформаторными (ДТП) преобразователями (см. рис. 3-7,б), преобразующими перемещение в значение переменного напряжения.

Измерение расхода вещества (пара, газа, воды и т. п.) чаще всего осуществляется косвенным способом по перепаду давления на гидравлическом сопротивлении, создаваемом сужающей диафрагмой (рис. 3-6,г), который измеряется дифманометром (дифтягомером) (рис. 3-6,д). Разность давлений до и после диафрагмы

$P_1 - P_2$, а следовательно, и перемещение y_1 пропорциональны расходу.

Датчиками температуры обычно служат термодары (рис. 3-6,е) с электродами хромель — копель (термоэлектрические пирометры) или терморезисторы — электрические термометры сопротивления (рис. 3-6,ж). Эти датчики преобразуют значение температуры x_3 в значение постоянного напряжения y_2 .

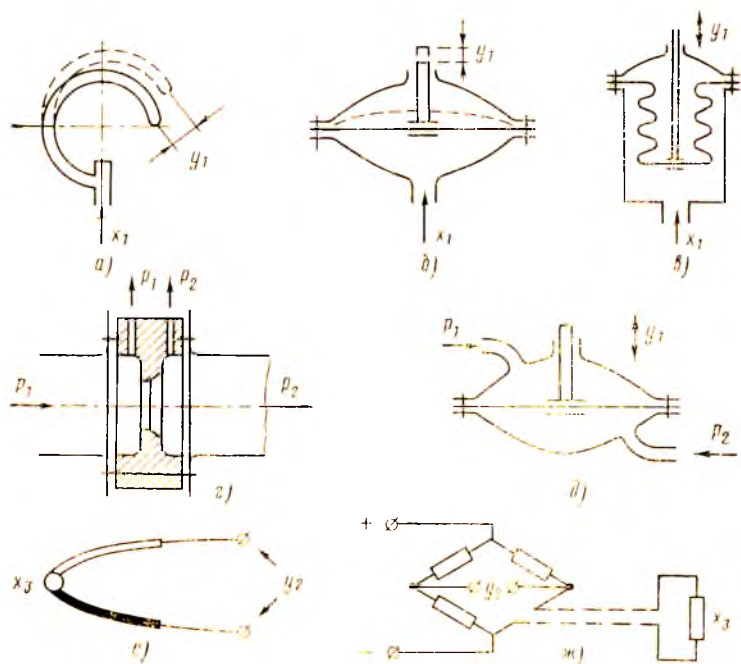


Рис. 3-6. Схематический вид основных типов датчиков.

а, б, в — давления; г, д — расхода; е, ж — температуры; x_1 — давление; y_1 — перемещение; $x_2 = P_1 - P_2$ — разность давлений; x_3 — температура; y_2 — напряжение.

В качестве датчика свободного кислорода в газах применяется магнитный газоанализатор (кислородомер), контролирующий магнитную восприимчивость газа с помощью неравновесного моста. С изменением содержания O_2 меняется магнитная восприимчивость газа и показание датчика.

Работа датчика CO_2 основана на сравнении теплопроводностей продуктов сгорания топлива и воздуха.

Измерительный блок *ИБ* предназначен для суммирования сигналов, поступающих от первичных приборов — датчиков, и сравнения результирующего сигнала с заданным значением. На МЗТА разработана серия измерительных блоков, которые классифицируются в зависимости от типа первичных приборов и могут работать в комплекте с датчиками переменного напряжения, с тер-

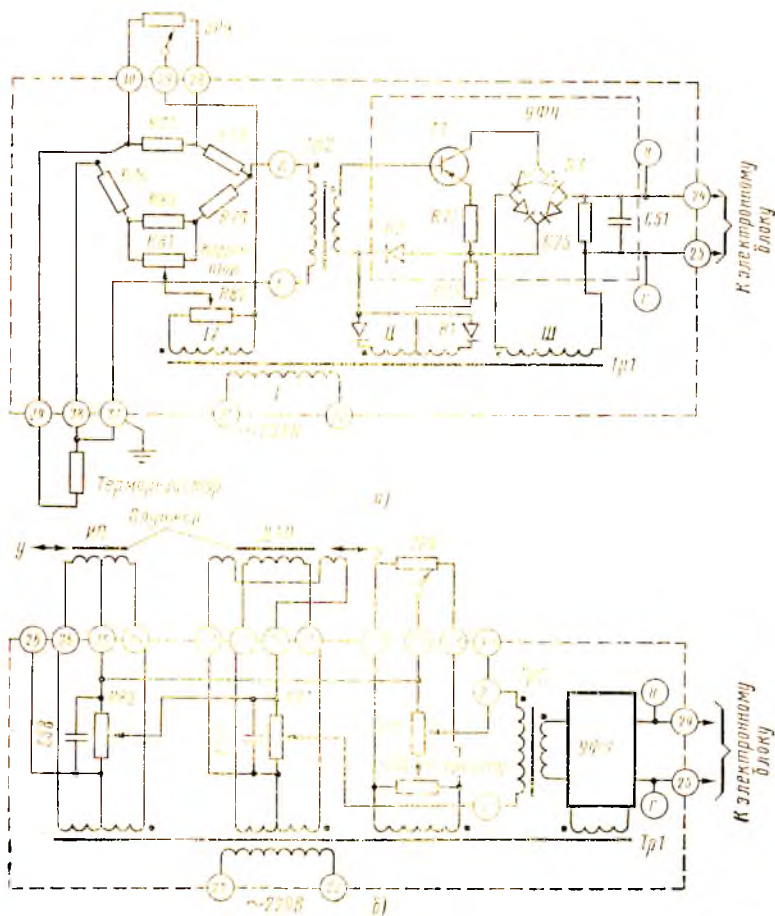


Рис. 3-7. Принципиальные электрические схемы измерительных блоков.

а — И-С-62; б — И-III-62

морезисторами, термopарами, магнитным кислородометром и др.

На рис. 3-7 приведены принципиальные электрические схемы двух измерительных блоков: И-С-62, предназначенного для работы в комплекте с одним терморезистором, и И-III-62, предназначенного для работы в комплекте с тремя датчиками переменного напряжения (на рисунке показаны два: *III* и *ДТII*).

Измерительный блок И-С-62 (рис. 3-7,а) представляет собой мост переменного тока, образованный терморезистором и резисторами *R76*, *R78*, *R79*, выход которого (гнезда *Д*, *Е*) подключен к полупроводниковому фазочувствительному усилителю УФЧ через разделительный трансформатор *Tr2*. В две противоположные входные вершины моста включены соответственно задатчик регулируемой величины ручного управления ЗРУ с шунтом *R77* и корректор *R81* с шунтом *R80*. Питание моста осуществляется через потенциометр *R82*.

При заданном значении температуры напряжение на выходе моста (гнезда *Д*, *Е*) равно нулю. Отклонение температуры приводит к появлению напряжения, находящегося в зависимости от знака отклонения, либо в фазе с напряжением питания, либо в противофазе. Знак постоянной составляющей напряжения на выходе фазочувствительного усилителя (гнезда *В*, *Г*) соответствует знаку отклонения температуры, а значение пропорционально этому отклонению.

Во всех модификациях измерительных блоков используется один и тот же фазочувствительный усилитель.

При отсутствии сигнала на входе усилителя по коллекторной цепи транзистора *T1* (благодаря напряжению смещения с диода *B2*) проходит ток. Значение этого тока одинаково в каждый полупериод питающего напряжения, поэтому напряжение на нагрузке (*R75*, *C51*), включенной на стороне переменного тока выпрямителя *B3*, не содержит постоянной составляющей. При подаче переменного напряжения на вход усилителя ток коллектора в один полупериод увеличится, а в другой уменьшится. На нагрузке усилителя появится постоянная составляющая напряжения, пропорциональная разности токов коллектора в каждый полупериод. Знак постоянной составляющей зависит от того, в какой из полупериодов ток через нагрузку будет увеличиваться, что в свою очередь зависит от фазы входного сигнала.

Измерительный блок И-III-62 (рис. 3-7,б) предназначен для суммирования, компенсации и усиления сигналов, поступающих от первичных приборов, снабженных индукционными, дифференциально-трансформаторными

и реостатными преобразователями. Катушки индукционного преобразователя *ИП* образуют совместно со вторичной обмоткой *Тр1* мост переменного тока, в диагональ которого включен потенциометр *R82*. При среднем положении плунжера *ИП* индуктивные сопротивления катушек равны и мостовая схема находится в равновесии. Отклонение плунжера *у* выводит мост из равновесия, и на потенциометре *R82* (выход преобразователя) возникает пропорциональное этому отклонению переменное напряжение, фаза которого зависит от направления отклонения. Аналогично работает дифференциально-трансформаторный преобразователь *ДТП*. При отклонении плунжера от среднего положения нарушается компенсация напряжений вторичных обмоток *ДТП* и появляется напряжение на потенциометре *R81*. Каждый потенциометр шунтирован емкостью (*C57*, *C58*) для уменьшения угла сдвига фаз между напряжением питания и выходным напряжением.

Выходные напряжения с каждого потенциометра суммируются и сравниваются с напряжением на выходе датчика *ЗРУ* (*R85*). Если они равны, то равны нулю напряжения на зажимах *Д*, *Е* и постоянная составляющая напряжения на выходе *УФЧ* (зажимы *В*, *Г*). Отклонение измеряемой величины от заданного значения на величину σ приводит к появлению постоянного напряжения того или иного знака на выходе измерительного блока $U_{\text{ИБ}} = \gamma \sigma$, где γ — коэффициент пропорциональности.

Выход измерительного блока соединен с входом электронного блока.

Электронный блок регулирующего прибора служит для формирования совместно с интегрирующим исполнительным механизмом (например, двигателем) пропорционально-интегрального (изодромного) закона регулирования в пульсирующем режиме [54] и усиления сигнала, поступающего на вход от измерительного блока. Принципиальная схема электронного блока регулирующего прибора серии РПИБ и его упрощенная структурная схема показаны на рис. 3-8.

Суммирующий каскад выполнен на электронной лампе *Л1* (двойном триоде) и представляет собой балансный усилитель постоянного тока. Питание его осуществляется переменным током от трансформатора *Тр1*, первичная обмотка которого присоединена к источнику стабилизированного переменного напряжения 220 В.

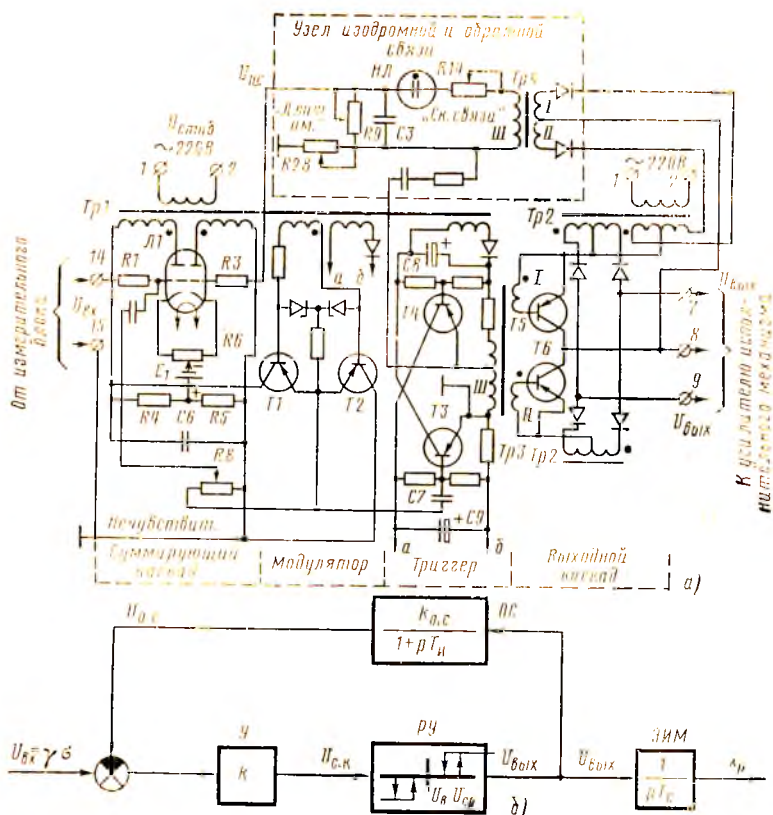


Рис. 3-8. Электронный блок регулирующего прибора серии РПИБ.
а — принципиальная схема; б — упрощенная структурная схема.

Рабочие точки обоих триодов задаются источником постоянного напряжения E_1 и корректируются переменным резистором $R6$ при закороченном входе (зажимы 14, 15) и отключенном резисторе скорости связи $R14$. Нагрузками триодов являются соответственно резисторы $R4$ и $R5$; конденсатор $C6$ служит для сглаживания пульсаций выходного напряжения суммирующего каскада.

При отсутствии входного сигнала токи в резисторах нагрузки в рабочий полупериод равны между собой и напряжение $U_{с.к}$ на выходе суммирующего каскада (конденсаторе $C6$) будет равно нулю. При появлении сигнала на входе суммирующего каскада $U_{вх} = U_{иБ} = \gamma \delta$ на $C6$ появится постоянное напряжение, полярность и значение которого будут зависеть от полярности и значения напряжения на входе.

Постоянное напряжение на конденсаторе $C6$ преобразуется в прямоугольные импульсы модулятором на транзисторах $T1, T2$.

Фаза импульсов на резисторе $R8$ по отношению к напряжению питания прибора зависит от полярности напряжения на конденсаторе $C6$. Транзисторы модулятора управляются напряжением в противофазах. В любой момент времени один из транзисторов модулятора закрыт. Импульсы с выхода модулятора подаются на дифференцирующую цепочку, образованную конденсатором $C7$ и входным сопротивлением триггера с двумя устойчивыми положениями, который имеет связь с выходным каскадом электронного блока через трансформатор $Tr3$. При амплитуде импульсов, достаточной для управления ($U_{c.k} \geq U_{cp}$), триггер будет «опрокидываться» 2 раза за период с фазой, зависящей от полярности напряжения входного сигнала. Прямоугольное напряжение, возникающее на вторичных обмотках I и II $Tr3$, управляет мощными транзисторами $T5$ и $T6$ выходного каскада, нагруженного входным устройством исполнительного механизма. Нагрузка прибора по постоянному напряжению подключается к зажимам 7, 8, 9. В зависимости от знака $U_{вх}$ напряжение $U_{вых}$ повышается на зажимах 8, 7 или 8, 9.

Источником питания выходного каскада и трансформатора обратной связи $Tr4$ является трансформатор $Tr2$. Ток по обмотке I или II трансформатора обратной связи $Tr4$ проходит только при открытом транзисторе $T5$. Прохождение тока по обмотке I или II зависит от фазы работы триггера. От этой фазы зависит полярность напряжения на обмотке III трансформатора $Tr4$. Неоновая лампа $НЛ$ будет пропускать ток в прямом или в обратном направлении. Полярность напряжения на конденсаторе $C3$, а следовательно, и напряжения обратной связи $U_{o.c}$ на сетке правого по схеме триода $Л1$ будет определяться полярностью напряжения на входе электронного блока (14, 15). Сопротивления динамической настройки регулятора объединены в узле обратной связи. Скорость обратной связи устанавливается резистором $R14$. Чем больше сопротивление резистора $R14$, тем меньше скорость обратной связи, и наоборот. Время изодрома устанавливается резистором $R9$. Чем больше сопротивление резистора $R9$, тем больше время изодрома, и наоборот.

Длительность импульсов регулируется резистором $R28$ за счет уменьшения зоны возврата прибора при введении отрицательной связи с выхода триггера.

Влияние настройки узла обратной связи электронного блока на формирование выходных импульсов $U_{вых}$ (на зажимах 8, 7 или 8, 9 в зависимости от знака $U_{вх}$) при неизменном напряжении на входе $U_{вх} = \gamma \sigma$ показано на рис. 3-9. Напряжение $U_{вых}$ появляется при $U_{c.k} \geq U_{cp}$ триггера (релейного усилителя $ПУ$, на рис. 3-8,б) и исчезает при $U_{c.k} \leq U_{в}$ триггера ($ПУ$). Величина $U_{c.k}$ пропорциональна разности напряжений входного $U_{вх}$ и обратной связи $U_{o.c}$. Напряжение $U_{o.c}$ возрастает, когда на выходе электронного блока есть напряжение (емкость $C3$ на рис. 3-8,а заряжается), и снижается, когда $U_{вых} = 0$ ($C3$ разряжается через $R9$).

«Скорость обратной связи» $v_{o.c}$ определяется скоростью нарастания напряжения $U_{o.c}$ в первый момент по-

сле срабатывания триггера, т. е. пропорциональна $\operatorname{tg} \beta$:

$$v_{0.c} = \operatorname{tg} \beta. \quad (3-4)$$

Время издрома $T_{и}$ подсчитывается по формуле

$$T_{и} = R_9 C_3, \quad (3-5)$$

где R_9 — в мегаомах; C_3 — в микрофарадах.

Параметры динамической настройки регулятора $T_{и}$, s , и $v_{0.c}$, мВ/с, определяют длину первого импульса, частоту и скважность последующих импульсов на выходе регулятора при появлении сигнала на входе.

Так, например, при увеличении $v_{0.c}$ и $T_{и}$ уменьшается длина импульса и увеличивается пауза между ними (ср. рис. 3-9, а и б).

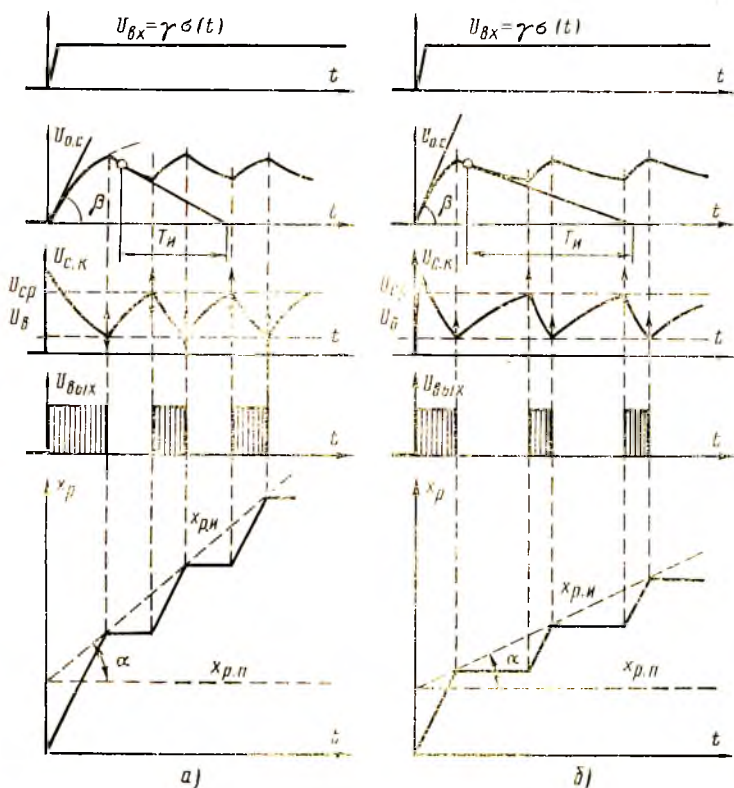


Рис. 3-9. Влияние параметров динамической настройки на формирование выходных импульсов и кривые разгона ПИ-регулятора.

В качестве исполнительного механизма используется сервопривод с постоянной скоростью перемещения регулирующего органа (ЭИМ на рис. 3-8,б). Во время импульса ЭИМ (например, асинхронный электродвигатель с редуктором) включается и перемещает регулирующий орган (клапан, заслонку, задвижку и т. п.) с постоянной скоростью $dx_p/dt=1/T_c$, где T_c — время, необходимое для перемещения регулирующего органа из одного крайнего положения в другое. Во время паузы ЭИМ остановлен. Кривые разгона регулятора, соответствующие выходным импульсам, приведены на рис. 3-9. Соединив вершины ступенчатой линии — перемещения сервопривода $x_p(t)$ прямой, получим идеализированную кривую разгона регулятора, работающего в пульсирующем режиме. Идеализированная кривая идентична кривой разгона линейного ПИ-регулятора:

$$x_p(t) = x_{p.н} + x_{p.н} = k_p \sigma(t) + \varepsilon_p \int_0^t \sigma(t) dt, \quad (3-6)$$

где $\sigma(t) = \sigma$ при $t > 0$ и $\sigma(t) = 0$ при $t < 0$; $\varepsilon_p = \text{tg } \alpha / \sigma$ — относительная скорость разгона; $k_p = x_{p.н} / \sigma$ — коэффициент пропорциональной составляющей.

С помощью электронных регулирующих приборов, помимо пропорционально-интегрального ПИ-закона регулирования, можно осуществлять пропорциональный П (регулирование с жесткой обратной связью с выхода ЭИМ) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон регулирования при работе в комплексе с дифференциатором. Название регулятора определяется реализуемым законом регулирования: ПИ-регулятор и т. п.

Автоматические системы регулирования могут включать в себя дополнительную аппаратуру, кроме той, которая рассмотрена выше:

электронный корректирующий прибор, служащий для автоматического изменения задания одновременно нескольким электронным регуливающим приборам. Корректирующий прибор состоит, так же как и регулирующие приборы, из измерительного и электронного блоков;

электронный дифференциатор, предназначенный для преобразования поступающего на его вход сигнала в производную по времени. Дифференциатор подключается непосредственно к индукционному, дифференциально-трансформаторному или реостатному преобразователю

или термопаре. Прибор состоит из измерительного устройства, усилителя и дифференцирующего контура (RC). Изменяя величину сопротивления, можно варьировать постоянной времени дифференцирования — параметром настройки дифференциатора;

устройство динамической связи, осуществляющее гибкую (исчезающую) связь между регуляторами различных контуров регулирования. Устройство представляет собой RC -цепочку из конденсатора и переменных резисторов. Вход устройства подключается к выходу командного регулятора, а выход — на вход ведомого регулятора.

3-4. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА

Автоматическое регулирование парогенератора осуществляется следующими самостоятельными системами регулирования:

- процесса горения;
- температуры перегрева пара;
- питания парогенератора водой;
- водного режима.

Принцип действия каждой из этих систем соответствует рассмотренному в § 3-3.

Рассмотрим некоторые варианты перечисленных систем регулирования барабанного парогенератора.

Регулирование процесса горения сводится к поддержанию на заданном уровне следующих параметров: дав-

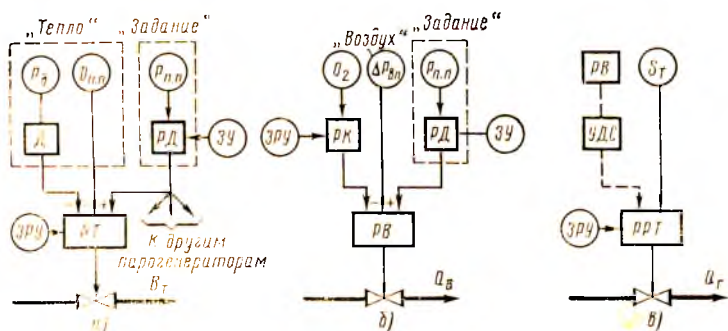


Рис. 3-10. Функциональные схемы АСР процесса горения.

а — давления перегретого пара; б — избытка воздуха; в — разрежения в верхней части топки.

ления перегретого пара $P_{п.п}$; коэффициента избытка воздуха α ; разрежения в верхней части топки S_T . Функциональные схемы соответствующих регуляторов показаны на рис. 3-10.

Количество сжигаемого топлива (тепловыделение) должно соответствовать количеству пара, потребляемому турбиной. Косвенным показателем этого соответствия является давление пара перед турбиной, которое по условиям экономичности и безопасности работы турбины должно быть стабилизировано с высокой точностью. Регулирование $P_{п.п}$ в соответствии с рис. 3-2 осуществляется путем управления подачей топлива B_T . Схема варианта АСР давления перегретого пара в общем паропроводе, известная под названием «задание — тепло», приведена на рис. 3-10,а. Управление подачей топлива в топку агрегата осуществляется ПИ-регулятором топлива PT , находящимся под воздействием входных сигналов: задающего (+) от корректирующего регулятора давления в общем паропроводе PD , выполняющего функции автоматического задатчика, *задание* и компенсирующих (—) по расходу пара и скорости изменения давления пара в барабане *тепло*. Суммарный компенсирующий сигнал пропорционален тепловой нагрузке парогенератора

$$Q = \gamma_2 D_{п.п} + \gamma_3 dP_6/dt. \quad (3-7)$$

Расход пара $D_{п.п}$ измеряется по перепаду давления на сужающем устройстве, а сигнал dP_6/dt формируется с помощью датчика давления пара P_6 в барабане парогенератора и дифференциатора D .

При изменении давления в паропроводе и тепловой нагрузки (тепловыделения в топке) на выходе измерительного блока PT появится сигнал

$$\sigma = \gamma_1 \Delta P_{п.п} + \gamma_2 \Delta D_{уст} - \left(\gamma_2 \Delta D_{п.п} + \gamma_3 \frac{dP_6}{dt} \right), \quad (3-8)$$

где $\Delta D_{п.п}$ — отклонение фактического расхода пара от начального; $\Delta D_{уст}$ — изменение задания; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ — коэффициенты пропорциональности.

В соответствии с ПИ-законом регулирования изменится и регулирующее воздействие на подачу топлива

$$x_p = s_1 \left(\sigma + \frac{s_2}{s_1} \int \sigma dt \right). \quad (3-9)$$

Регулирование прекратится после того, как станут равными нулю σ , $\Delta P_{п.п}$ (так как РД является ПИ-регулятором), а следовательно, $\Delta D_{п.п}$ станет равным $\Delta D_{уст}$.

Изменение «задания» всем параллельно работающим парогенераторам может осуществляться с помощью задающего устройства ЗУ вручную или от АСР ЧМ. Задатчик ручного управления ЗРУ служит для изменения доли участия каждого парогенератора в общей паровой нагрузке.

Величина коэффициента избытка воздуха α (содержание свободного кислорода в газах, покидающих топочную камеру) влияет на потери тепла с уходящими газами q_2 и потери тепла от химического недожога топлива q_3 , причем с увеличением α : q_2 возрастает, q_3 падает, а Σq имеет минимум. Оптимальное значение O_2 , соответствующее минимуму тепловых потерь и максимуму к. п. д. парогенератора, при сжигании пылевидного топлива лежит в пределах 3—4%.

При сжигании газообразного или жидкого топлива постоянного состава регулирование избытка воздуха для обеспечения наибольшей экономичности процесса горения осуществляется по схеме «топливо — воздух». Это значит, что с изменением расхода топлива пропорционально изменяется с помощью дутьевых вентиляторов расход воздуха (связь $Q_{в} \rightarrow \alpha$, рис. 3-2). Расход угольной пыли пока не может измеряться быстро и непрерывно, поэтому на пылеугольных парогенераторах применяется схема «задание — воздух» с дополнительным корректирующим сигналом по O_2 (рис. 3-10,б).

Регулятор подачи воздуха РВ изменяет его расход по задающему сигналу от регулятора давления РД. Компенсирующий сигнал (—), пропорциональный расходу воздуха, поступает от дифференциального тягомера, измеряющего расход по перепаду давления на воздухоподогревателе $\Delta P_{вп}$. Введение с помощью корректирующего регулятора кислорода РК дополнительного сигнала по содержанию O_2 , измеряемому магнитным кислородомером, повышает точность поддержания оптимального избытка воздуха.

Небольшое по величине разрежение в верхней части топки (до 20—30 Па) препятствует выбиванию газа из-под обмуровки топки, свидетельствует об устойчивости факела, является косвенным показателем баланса между нагнетаемым в топку воздухом и уходящими газами.

Регулирование разрежения осуществляется посредством изменения количества уходящих газов, отсасываемых дымососами (связь $Q_T \rightarrow S_T$, рис. 3-2). Наибольшее распространение получила схема, приведенная на рис. 3-10,в, с регулятором разрежения в топке РРТ ПИ-действия. Для увеличения быстродействия системы регулирования разрежения при работе парогенератора в регулирующем режиме на вход РРТ может подаваться помимо сигнала от датчика разрежения S_T дополнительное воздействие от регулятора подачи воздуха через устройство динамической связи УДС. Сигнал на вход РРТ через УДС поступает лишь в момент включения регулятора РВ.

Регулирование температуры перегрева пара. Температура перегрева пара на выходе парогенератора относится к его важнейшим параметрам, определяющим экономичность и надежность работы паровой турбины и парогенератора, и должна автоматически стабилизироваться с высокой точностью (при $t_{п.п}^{\circ} = 540^{\circ}\text{C}$, $\Delta t_{\text{доп}} = +5 \div -10^{\circ}\text{C}$).

Регулирование температуры пара осуществляется в настоящее время с помощью впрыскивающих пароохладителей. Изменение подачи воды (конденсата) $D_{\text{впр}}$, впрыскиваемой в паропровод, приводит к изменению количества тепла, отбираемого на испарение воды, а следовательно, и температуры пара (связь $D_{\text{впр}} \rightarrow t_{п.п}^{\circ}$, рис. 3-2). Система регулирования температуры пара с ПИ-регулятором РТП показана на рис. 3-11,а. Регулятор РТП получает основной сигнал по отклонению температуры пара от датчика температуры $t_{п.п}^{\circ}$, установленного на выходе пароперегревателя ПП, и дополнительный сигнал по скорости изменения температуры пара $dt^{\circ}_{\text{по}}/dt$ непосредственно за пароохладителем от дифференциатора Д, включенного на выходе датчика температуры $t^{\circ}_{\text{по}}$. Применение дополнительного сигнала улучшает качество процесса регулирования. На мощных парогенераторах применяется многоступенчатое регулирование температуры, т. е. по ходу пара устанавливается несколько впрыскивающих пароохладителей, управляемых независимыми регуляторами температуры.

Регулирование питания парогенератора водой необходимо для поддержания соответствия (баланса) между паропроизводительностью парогенератора и подачей питательной воды. Показателем этого соответствия служит

уровень воды в барабане H_6 . Максимально допустимые отклонения уровня воды в барабане составляют ± 100 мм. Снижение уровня («упуск») может привести к пережогу подъемных труб, а чрезмерное повышение уровня («перепитка») — к преждевременному заносу солями пароперегревателя, а также к забросу частиц воды в турбину и ее механическому повреждению.

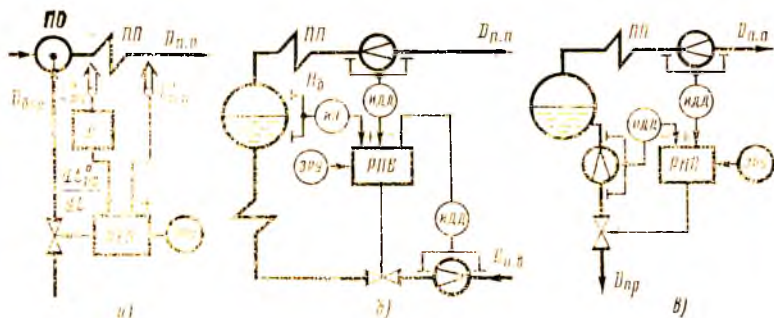


Рис. 3-11. Функциональные схемы АСР.

а — температуры перегретого пара; *б* — питания водой; *в* — водного режима барабанного парогенератора.

Функциональная схема АСР с трехимпульсным ПИ-регулятором питания водой $РПВ$ приведена на рис. 3-11,б. Регулятор $РПВ$ действует на перемещение регулирующего клапана питательной воды при появлении небаланса между расходом перегретого пара $D_{п.п}$ (задающий сигнал «+») и расходом питательной воды $D_{п.в}$ (компенсирующий сигнал «-»), контролируемые дифференциальными манометрами $ИДД$. Помимо того, $РПВ$ действует на изменение $D_{п.в}$ при отклонении уровня воды H_6 , контролируемого измерителем уровня $ИУ$, от заданного с помощью $ЗРУ$ значения (связь $D_{п.в} \rightarrow H_6$, рис. 3-2).

Регулирование водного режима заключается в стабилизации основных показателей качества котловой воды — общего солесодержания (концентрация $NaCl$, мг/кг) и избытка концентрации фосфатов (содержание ионов PO_4^{3-} , мг/кг). Повышение общего солесодержания может привести к уносу в недопустимых количествах солей котловой воды в пароперегреватель и турбину. Длительный недостаток концентрации фосфатов вызывает интенсивный процесс накипеобразования.

Поддержание общего солевого содержания в пределах нормы осуществляется с помощью непрерывной и периодической продувок из барабана в специальные расширители (связь $D_{пр} \rightarrow NaCl$, рис. 3-2). Величина непрерывной продувки колеблется в пределах 0,5—2% максимальной производительности парогенератора. Схема АСР непрерывной продувки с двухимпульсным ПИ-регулятором РНП изображена на рис. 3-11, в. Возрастание паровой нагрузки $D_{п.п}$ (задающий сигнал «+») вызывает открытие регулирующего клапана непрерывной продувки до тех пор, пока увеличение расхода продуваемой воды $D_{пр}$ не компенсирует сигнал по расходу пара. Требуемое соотношение между $D_{п.п}$ и $D_{пр}$ устанавливается лабораторным анализом качества котловой воды, который может проводиться 1—2 раза в сутки.

Регулирование концентрации PO_3 осуществляется также в зависимости от расхода перегретого пара $D_{п.п}$ путем ввода раствора фосфатов в чистый отсек барабана.

Вариант функциональной схемы автоматического регулирования барабанного парогенератора ТЭС с общим паропроводом, использующего рассмотренные АСР с электронными регуляторами РД, РТ, РВ, РРТ, РТП, РПВ, показан на рис. 3-12. В схеме используются следующие датчики: ИД — измеритель давления; ИДД — измеритель давления дифференциальный (дифференциальный манометр); ТД — тягомер дифференциальный; ИР — измеритель разрежения; O_2 — магнитный кислородомер; ДТ — датчик температуры. Каналы воздействия и задающих сигналов на рис. 3-12 показаны сплошными линиями компенсирующих и корректирующих сигналов — штриховыми.

В прямоточных парогенераторах давление и температура пара тесно связаны. Регулирование также осуществляется несколькими АСР, но с обязательной синхронизацией между регуляторами подачи топлива и воды. Так как у прямоточных парогенераторов практически любые возмущения отражаются на температуре перегретого пара, то на них устанавливается несколько регуляторов температуры по всему пароводяному тракту.

Автоматические системы регулирования вспомогательных установок в основном используют электронные ПИ-регуляторы (см. § 3-3) и функциональные схемы, анало-

гичные рассмотренным схемам АСР парогенератора. К ним относятся системы регулирования:

- производительности барабанных и шахтных мельниц,
- температуры аэросмеси за мельницей;
- давления и температуры редукционно-охладительных установок (РОУ);

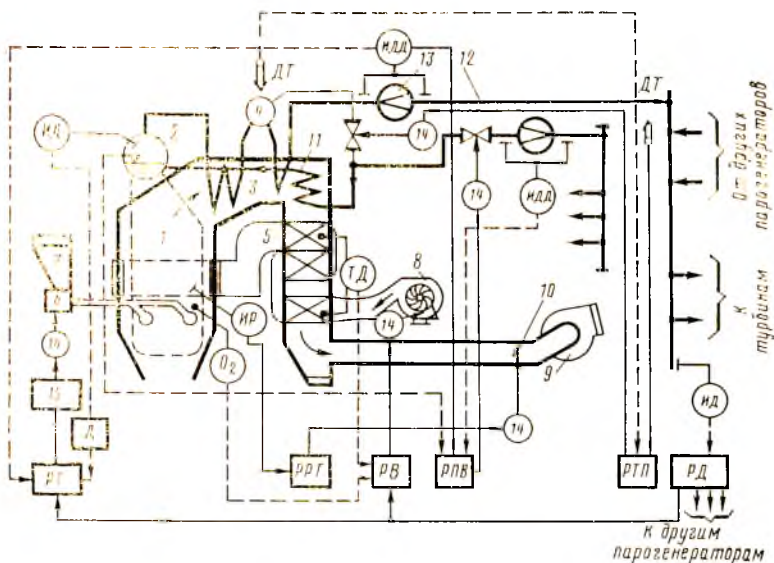


Рис. 3-12. Вариант функциональной схемы автоматического регулирования барабанного парогенератора.

1 — топка; 2 — барабан; 3 — пароперегреватель; 4 — пареохладитель; 5 — воздухоподогреватель; 6 — пылепитатели; 7 — бункер пыли; 8 — дутьевой вентилятор; 9 — дымосос; 10 — направляющий аппарат дымососа; 11 — водяной экономайзер; 12 — главный паропровод; 13 — дроссельная диафрагма; 14 — сервопривод; 15 — станция управления.

уровня конденсата и температуры воды подогревателей сетевой воды;

давления пара и уровня воды в деаэрационных установках;

подачи пара на лабиринтовые уплотнения турбины; уровня конденсата в конденсаторах паровых турбин; процессов химической подготовки воды и др.

3-5. КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

С увеличением мощности агрегатов ТЭС усложняются задачи управления как в связи с увеличением до нескольких сотен числа контролируемых технологических параметров и механизмов управления регулирующими или запорными органами, так и в связи с повышением требований к точности оптимизации технологических процессов и самих процессов управления.

Особенно сложны задачи управления блочными установками, являющимися по существу самостоятельными тепловыми станциями. Поэтому считается экономически целесообразным применение электронных информационно-вычислительных и управляющих машин УВМ для комплексной автоматизации блочных ТЭС мощностью выше 1200 МВт с блоками мощностью от 150 МВт и выше.

Использование УВМ в системе контроля и управления блочной установкой поясняется на рис. 3-13. Управление непосредственно от УВМ через исполнительные механизмы 4 сочетается со стабилизацией некоторых регулируемых параметров (выходных величин) независимыми и местными АСР 5 (см. § 3-3, 3-4). На УВМ возлагаются также следующие задачи:

непрерывный и периодический контроль технологических параметров с сигнализацией их отклонений на мнемосхеме объекта и регистрацией устройствами непрерывной и периодической печати 2;

подсчет технико-экономических показателей (ТЭП) с печатанием их устройством 3 и критериев оптимизации процессов управления;

управление автоматическим пуском. Соответствующие программы управления *III*, *II* вводятся в УВМ через устройство ввода 1.

В схеме предусмотрена возможность управления по вызову 6 и прямого дистанционного воздействия 7. Измерение небольшого количества наиболее важных параметров (мощность генератора, частота сети, давление, расход и температура перегретого пара и др.) производится приборами 9, не зависящими от УВМ. Независимыми выполнены также система аварийно-предупредительной сигнализации 10 и система защиты 11, 12, 13.

Устройства тепловой защиты предназначены для предотвращения возникновения и развития аварий и должны защищать теплоэнергетические установки от повреждений и разрушений в случае отказов или ложных действий систем регулирования, а также при ошибочных действиях оператора. Система защиты, как правило, имеет собственные датчики отклонений контролируемых технологических параметров, независимые каналы управляющих воздействий, а также собственные автоматически резервируемые источники питания.

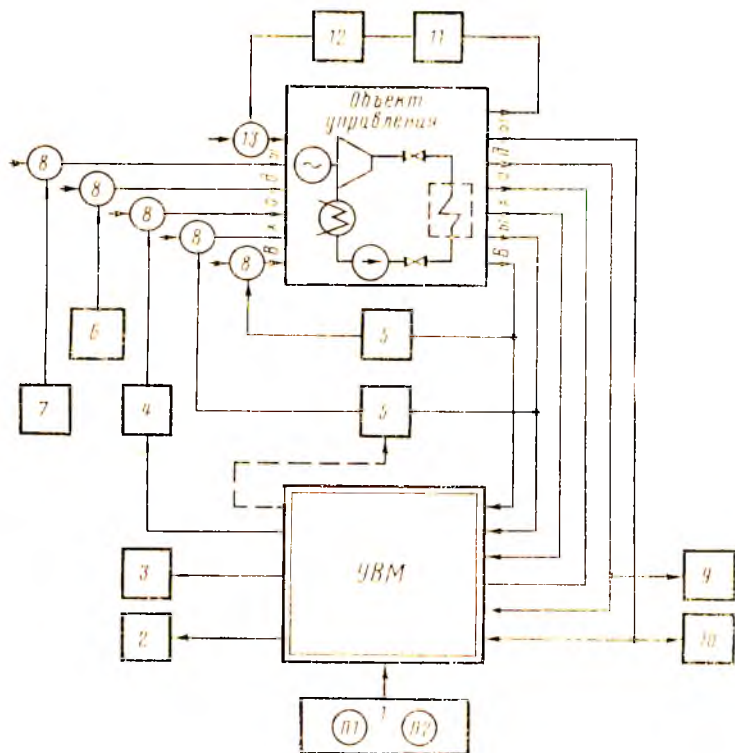


Рис. 3-13. Схема управления энергоблоком с помощью УВМ.

1 — устройство для ввода программ управления П1, П2; 2 — печатающие устройства отклонения параметров; 3 — устройство периодической печати технико-экономических показателей; 4 — исполнительные механизмы, действующие по сигналам от УВМ; 5 — независимые и местные АСР; 6 — система управления по вызову; 7 — система прямого дистанционного управления; 8 — регулирующие органы; 9 — измерительные приборы ответственных параметров; 10 — система аварийно-предупредительной сигнализации; 11 — датчики систем тепловой защиты; 12 — устройства защиты; 13 — исполнительные органы систем защиты.

Разработка и внедрение управляющих вычислительных машин на тепловых электростанциях проводятся с учетом перспективы создания автоматизированной системы управления производством и распределением электроэнергии в масштабе всей страны.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные направления автоматизации технологического процесса на ТЭС.

2. Назовите основные связи между входными и выходными (регулируемыми) величинами парогенератора.

3. Как определить передаточную функцию парогенератора по определенному каналу регулирования?

4. Назовите основные элементы электронного регулятора теплового процесса.

5. С помощью каких элементов формируется ПИ-закон регулирования?

6. Как изменить параметры динамической настройки регулятора РПИБ?

7. Постройте кривые разгона ПИ-регулятора для двух значений входного сигнала.

8. Назовите основные системы регулирования парогенератора.

9. Какое отличие в функциональных схемах регулирования барабанного и прямоточного парогенераторов?

10. Назначение УВМ в схеме управления энергоблоком.

Раздел II

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОПЕРАТИВНЫМИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ И ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ АВТОМАТИКА В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Для управления составом работающего оборудования в нормальных и аварийных режимах в схеме электро-энергетической системы должны выполняться различные оперативные переключения. В силу особенностей энерго-системы как объекта управления эти переключения долж-жны быть автоматизированы. Соответствующие автома-тические устройства согласно ПУЭ [16] предназначены для:

- включения синхронных генераторов и компенсаторов на параллельную работу (автоматическая синхрониза-ция);

- повторного включения линий, шин, трансформаторов после их автоматического отключения (автоматическое повторное включение — АПВ);

- включения резервного питания и оборудования (авто-матическое включение резерва — АВР);

- предотвращения длительного и недопустимого ава-рийного снижения частоты (автоматическая частотная разгрузка — АЧР);

- повышения устойчивости параллельной работы и вос-становления синхронизма после его нарушения (проти-воаварийная режимная автоматика — ПРА).

Эти устройства, как правило, состоят из электроме-ханических или бесконтактных реле.

Ниже рассматриваются принципы выполнения и схе-мы перечисленных автоматических устройств.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН

4-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Процесс включения синхронной машины на параллельную работу с энергосистемой называется *синхронизацией*.

Различают синхронизацию *автоматическую*, при которой все операции производятся без вмешательства персонала специальными автоматическими устройствами, и *полуавтоматическую*, при которой действия персонала сведены к минимуму и ограничиваются только выполнением части операций (например, регулирование скорости вращения синхронизируемого генератора), в то время как другие операции производятся автоматически.

Автоматизация всех операций при синхронизации и в особенности наиболее ответственной — включения синхронной машины позволяет исключить тяжелые последствия ошибочных действий персонала.

Для включения синхронных генераторов на параллельную работу в настоящее время применяются два способа: самосинхронизация и точная синхронизация.

При *самосинхронизации* невозбужденный генератор разворачивается турбиной до скорости, близкой к синхронной, и при определенном скольжении и ускорении его ротора по отношению к ротору эквивалентного генератора энергосистемы включается в сеть, после чего сразу же подается возбуждение и происходит втягивание ротора в синхронизм.

При *точной синхронизации* генератор разворачивается до подсинхронных оборотов и возбуждается. В момент его включения в сеть необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

примерное равенство частот синхронизируемого генератора и сети;

примерное равенство напряжений генератора и сети;
отсутствие сдвига фаз синхронизируемых напряжений.

Для выполнения указанных условий точной синхронизации даже в нормальных режимах требуется достаточно продолжительное время. В аварийных же ситуациях, когда необходим быстрый ввод дополнительной

мощности и возможны значительные изменения величины и частоты напряжения энергосистемы, включение генератора способом точной синхронизации может затянуться или же произойти в недопустимых условиях. Известны также случаи отказа в работе автоматических устройств точной синхронизации.

Возможность быстрого включения генераторов в аварийных условиях, а также значительное упрощение устройств автоматики, обусловленное отсутствием необходимости соблюдения условий точной синхронизации, являются главными преимуществами способа самосинхронизации по сравнению с точной синхронизацией. Недостаток же самосинхронизации состоит в возникновении значительных толчков уравнивающего тока и мощности.

4-2. САМОСИНХРОНИЗАЦИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

Включение невозбужденного генератора в сеть эквивалентно для энергосистемы внезапному трехфазному короткому замыканию за сопротивлением генератора. Величину периодической слагающей уравнивающего тока в первый момент включения можно определить, пользуясь схемой замещения на рис. 4-1 при $E''_{qr}=0$:

$$I''_y = \frac{E''_{ac}}{x''_d + x''_c}, \quad (4-1)$$

где E''_{qc} — эквивалентная сверхпереходная э. д. с. энергосистемы, равная напряжению сети в точке подключения генератора до его включения U_{co} ; x''_d , x''_c — сверхпереходные сопротивления синхронизируемого генератора и энергосистемы.

Если $x''_c=0$, что имеет место при включении генератора на шины энергосистемы бесконечной мощности, уравнивающий ток имеет наибольшее значение, которое равно:

$$I''_y = E''_{qc} / x''_d \approx I'', \quad (4-2)$$

где I'' — действующее значение сверхпереходного тока трехфазного к. з. на выводах генератора.

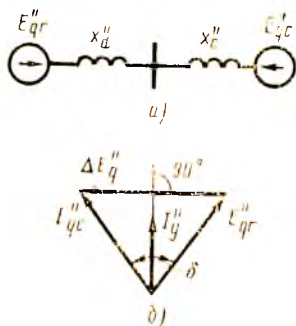


Рис. 4-1. Синхронизация генератора с энергосистемой. а — схема замещения; б — векторная диаграмма.

Поскольку $x''_c > 0$, то значения уравнивающих токов и электромагнитных моментов на валу генератора при самосинхронизации не превышают соответствующих значений при к. з. на выводах генератора, на которые он рассчитан.

Включение генераторов способом самосинхронизации сопровождается также снижением напряжения на шинах электростанции и в энергосистеме. Остаточное напряжение на зажимах генератора в первый момент времени

$$U_{\Gamma} = E''_{qc} x''_d / (x''_d + x''_c). \quad (4-3)$$

По мере удаления от генератора снижение напряжения в энергосистеме становится меньше. Как показал опыт применения самосинхронизации, кратковременное снижение напряжения, как правило, не влияет на работу потребителей и в большинстве случаев допустимо.

В настоящее время включение генераторов на параллельную работу способом самосинхронизации допускается применять:

- на синхронных компенсаторах любой мощности;
- на турбогенераторах мощностью до 3000 кВт;
- на всех генераторах в аварийных режимах без ограничений по току включения, а также во всех остальных случаях, когда действующее значение периодической слагающей уравнивающего тока

$$I_y = \frac{U_{c0}}{x'_d + x_c} \leq 3,5 I_{\Gamma.ном} \quad (4-4)$$

где U_{c0} — напряжение сети до включения, приведенное к ступени генератора, принимается равным $1,05 U_{\Gamma.ном} / \sqrt{3}$; x_c — сопротивление сети, приведенное к напряжению генератора; x'_d — переходное сопротивление генератора по продольной оси. По заводским рекомендациям для турбогенераторов с непосредственным охлаждением обмоток вместо 3,5 в (4-4) следует брать 2,8.

Условие (4-4), по существу, допускает самосинхронизацию турбогенераторов, работающих в блоке с трансформаторами, а также гидрогенераторов любой мощности. Однако следует отметить, что в нормальных условиях эксплуатации для турбогенераторов с непосредственным охлаждением обмоток и для гидрогенераторов большой мощности (более 100 МВт) применяется, как

правило, способ точной синхронизации, а включение генераторов способом самосинхронизации осуществляется в аварийных ситуациях.

Изменение частоты вращения агрегата в процессе самосинхронизации происходит под действием моментов, действующих на его ротор:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{рез}} = M_{\text{мех}} + M_{\text{ас}} + M_{\text{р}} + M_{\text{с}}, \quad (4-5)$$

где J — момент инерции вращающихся частей агрегата; $M_{\text{рез}}$ — результирующий момент; $M_{\text{мех}}$ — механический момент, $M_{\text{мех}} = M_{\text{т}} - M_{\text{сопр}}$; $M_{\text{т}}$ — движущий момент турбины; $M_{\text{сопр}}$ — момент сопротивления; $M_{\text{ас}}$, $M_{\text{р}}$, $M_{\text{с}}$ — асинхронный, реактивный и синхронный моменты генератора.

Асинхронный момент $M_{\text{ас}}$ обусловлен взаимодействием магнитного поля статора с токами, наведенными в бочке ротора, успокоительных (демпферных) обмотках и в обмотке возбуждения.

Знак асинхронного момента совпадает со знаком скольжения $s = \frac{\omega_{\text{с}} - \omega_{\text{р}}}{\omega_{\text{с}}} = 1 - \omega_{\text{гх}}$, $M_{\text{ас}} = 0$ при $s = 0$. Асин-

хронный момент подтягивает ротор к синхронной скорости тем ближе, чем больше отношение его максимального значения $M_{\text{ас.макс}}$ к $M_{\text{мех}}$. Значение $M_{\text{ас.макс}}$ наибольшее у турбогенераторов, а наименьшее у гидрогенераторов без успокоительных обмоток.

Чтобы ротор в процессе самосинхронизации не «проскакивал» синхронную скорость и знак скольжения не изменялся, необходимо изменить знак $M_{\text{мех}}$ при подсинхронных оборотах. Тогда $M_{\text{мех}} + M_{\text{ас}} < 0$ при $s > 0$. Это достигается, если пуск агрегата осуществляется по сниженной пусковой характеристике [при сниженной уставке МИЧВ $\omega_{\text{спик}} = (0,8 \div 0,9) \omega_{\text{ном}}$] с воздействием на МИЧВ (§ 2-4) в сторону «прибавить» после достижения $\omega_{\text{спик}}$. По сниженной характеристике рекомендуется пускать гидрогенераторы без успокоительных обмоток. Гидрогенераторы с успокоительными обмотками, у которых асинхронный момент значителен, пускаются по нормальной пусковой характеристике (уставка МИЧВ $\omega_{\text{ном}} \approx \omega_{\text{ном}}$), что упрощает схему автоматики.

Реактивный момент $M_{\text{р}}$ (момент явнополюсности) обусловлен взаимодействием поля статора с явно выраженными полюсами ротора. Под действием реак-

тивного момента гидрогенератор может втянуться в синхронизм при условиях малого скольжения и $M_p > M_{\text{мех}}$, даже при отсутствии тока возбуждения. При этом угол смещения оси полюсов ротора относительно оси поля статора может быть равен δ и $180^\circ + \delta$. В последнем случае после включения тока возбуждения произойдет проворот ротора, возникнут качания и процесс синхронизации затянется. Во избежание этого ток возбуждения должен подаваться сразу же после включения генератора в сеть, а вхождение в синхронизм происходить под действием синхронного момента M_c , обусловленного взаимодействием поля статора и тока возбуждения.

Анализ процесса втягивания в синхронизм и определение условий успешной синхронизации рассматриваются в курсе «Переходные электрохимические процессы в электрических системах».

В настоящее время на основании расчетов и опыта эксплуатации включение генераторов способом самосинхронизации в нормальных условиях производят при скольжении около $\pm 2 \div 3\%$. При этом для гидрогенераторов без успокоительных обмоток значение максимально допустимого ускорения не должно превышать 0,5—1 Гц/с. Для турбогенераторов и гидрогенераторов с успокоительными обмотками значение ускорения в момент включения практически не ограничивается.

Автоматические и полуавтоматические устройства самосинхронизации генераторов. На гидроэлектростанциях процессы пуска и остановки агрегатов полностью автоматизированы. Самосинхронизация при этом входит в цикл пуска как завершающая операция и осуществляется без вмешательства персонала [10].

На тепловых электростанциях с учетом специфики пуска турбогенераторов операция самосинхронизации осуществляется, как правило, полуавтоматически. Регулирование частоты вращения генератора и ее подгонка к подсинхронной возлагаются на персонал, а включение генератора в сеть производится автоматически устройством самосинхронизации при заданном значении скольжения. Поэтому устройства полуавтоматической самосинхронизации на ТЭС наиболее простые и выполняются общими для нескольких генераторов, а в схеме предусматриваются специальные ключи самосинхронизации, с помощью которых персонал подключает устройство к включаемому генератору [60].

В устройствах самосинхронизации может осуществляться либо контроль частоты остаточного напряжения синхронизируемого генератора, либо контроль разности частот генератора и сети (контроль скольжения).

Применение устройств, основанных на контроле частоты генератора, может привести к включению генератора в сеть при недопустимом скольжении, если частота сети будет отличаться от номинальной, что может иметь место в аварийных режимах. В связи с этим преимущественное распространение получили устройства самосинхронизации, основанные на контроле скольжения генератора относительно сети. Для контроля скольжения широко применяются индукционные реле разности частот ИРЧ-01. Разработаны также более совершенные полупроводниковые реле разности частот [61, 62].

На рис. 4-2 приведена упрощенная схема устройства автоматической самосинхронизации гидрогенератора с использованием реле разности частот ИРЧ-01, производящая пуск агрегата по нормальной пусковой характеристике.

Одна из обмоток реле *ИРЧ* включается на остаточное напряжение генератора $U_{всг}$, а вторая — на напряжение сети $U_{всс}$.

Пуск гидрогенератора разрешается, если замкнуты контакты реле остановки *РО*, датчика давления масла *РКД* (тормозная система агрегата в исправности), автомата гашения поля *АГП* (*АГП* отключен), ключа самосинхронизации *КС* и блок-контакт *В.1* генераторного выключателя (выключатель отключен).

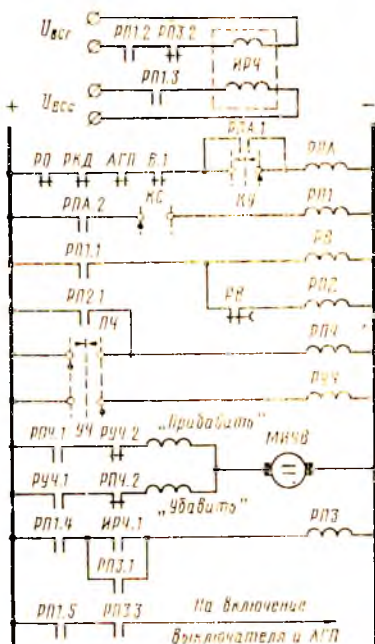


Рис. 4-2. Схема устройства автоматической самосинхронизации гидрогенератора.

При включении ключа управления КУ последовательно срабатывают реле РПА (реле автоматического пуска), РП1, РП2 и РВ, РПЧ (реле «прибавить» частоту вращения). Обмотки реле ИРЧ подключаются к напряжению генератора и сети. Двигатель МИЧВ действует в течение выдержки времени реле РВ, необходимой для вывода МИЧВ на уставку $\omega_{\text{ном}}$. Под действием регулятора частоты вращения увеличивается открытие направляющего аппарата и турбина разгоняется. При заданном скольжении срабатывает реле ИРЧ и по цепи РП1.4—ИРЧ.1 срабатывает реле РП3, которое подает сигнал на включение выключателя и АГП, а также отключает обмотку реле ИРЧ-01, включенную на остаточное напряжение генератора, во избежание ее повреждения. После включения выключателя схема возвращается в исходное состояние. В схеме предусмотрена возможность ручного управления двигателем МИЧВ с помощью ключей ПЧ («прибавить») и УЧ («убавить»), включенных в цепи соответствующих реле РПЧ и РУЧ.

4.3. ТОЧНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ

Точная синхронизация при включении генератора на параллельную работу с энергосистемой применяется, когда не допускается или не рекомендуется применение самосинхронизации.

В § 4-1 были приведены условия точной синхронизации, соблюдение которых обеспечивает включение генератора без толчка уравнивающего тока и мощности. Ввиду того что трудно добиться равенства частот синхронизируемого генератора и энергосистемы, включение производится при небольшом скольжении (не более 0,2—0,4%). Значение уравнивающего тока в этом случае зависит от угла сдвига фаз δ между э. д. с. генератора и энергосистемы (рис. 4-1,б) и равно в первый момент включения (при условии $E''_{qr}=E''_{qc}=E''_q$):

$$I''_y = \frac{2E''_q}{x''_d + x''_c} \sin \frac{\delta}{2}. \quad (4-6)$$

Наибольшее значение этого тока имеет место при включении генератора на шины энергосистемы бесконечной мощности, когда векторы э. д. с. находятся в противофазе ($\delta=180^\circ$). В этом случае

$$I''_y = 2E''_q / x''_d \approx 2I''. \quad (4-7)$$

Таким образом, уравнительный ток при несинхронном включении возбужденного генератора может превышать в 2 раза ток трехфазного к. з. на выводах генератора. Прохождение таких токов сопровождается возникновением значительных электромагнитных моментов и электродинамических сил в обмотках, способных вызвать повреждение генератора. В связи с этим при точной синхронизации предъявляются повышенные требования к выбору времени подачи сигнала на включение генератора. Значение уравнительного тока при точной синхронизации не нормируется, однако обычно допускается в пределах

$$I''_y = (1 \div 2) I_{г.ном}, \quad (4-8)$$

что обеспечивает допустимые значения электромагнитных моментов на валу генератора.

Поскольку в реальных условиях имеется некоторая разница частот генератора и сети, то разность мгновенных значений синхронизируемых напряжений определяется выражением

$$u_s = \sqrt{2} E''_{qc} \sin \omega_c t - \sqrt{2} E''_{qr} \sin \omega_r t; \quad (4-9)$$

при условии $\sqrt{2} E''_{qc} = \sqrt{2} E''_{qr} = U_m$

$$u_s = 2U_m \cos \frac{\omega_c + \omega_r}{2} t \sin \frac{\omega_c - \omega_r}{2} t, \quad (4-10)$$

где ω_r , ω_c — угловые скорости вращения синхронизируемого генератора и эквивалентного генератора энергосистемы.

Напряжение u_s принято называть напряжением биеений; график изменения этого напряжения показан на рис. 4-3. Огибающая действующих значений напряжения биеений, которую назовем *напряжением скольжения*, изменяется по закону

$$U_s = 2U \sin \frac{\omega_c - \omega_r}{2} t = 2U \sin \frac{\omega_s}{2} t, \quad (4-11)$$

где $\omega_s = \omega_c - \omega_r$ — угловая скорость скольжения.

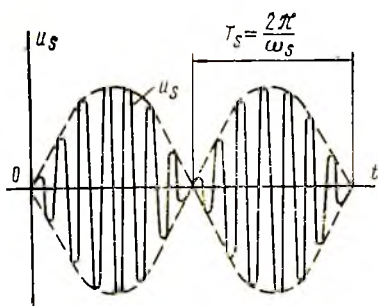


Рис. 4-3. График изменения напряжения биеений.

Поскольку $\omega_s t = \delta$, то

$$U_s = 2U \sin \delta / 2. \quad (4-12)$$

Значение напряжения скольжения U_s определяет значение уравнивающего тока в момент включения. Оптимальное включение генератора происходит при прохождении угла δ через нуль, когда $U_s = 0$ (момент оптимума). Следовательно, правильный выбор момента подачи импульса на включение выключателя обеспечит отсутствие толчка уравнивающего тока, что является главным преимуществом способа точной синхронизации по сравнению с самосинхронизацией.

Принципы получения заданного времени опережения. Основным элементом автоматических устройств для точной синхронизации, получивших название синхронизаторов, является орган выбора момента подачи сигнала на включение выключателя — *узел опережения*.

Ввиду того что каждый выключатель обладает собственным временем включения $t_{в.в.}$ для обеспечения замыкания его контактов в момент совпадения по фазе векторов синхронизируемых напряжений необходимо подавать сигнал на включение выключателя с определенным опережением по времени $t_{оп}$. Если $t_{оп} = t_{в.в.}$, то включение генератора произойдет в момент оптимума и не будет сопровождаться толчком уравнивающего тока.

Времени опережения $t_{оп}$ соответствует уменьшающийся *угол опережения* $\delta_{оп}$, или угол между векторами напряжений генератора и энергосистемы в момент замыкания цепи на включение выключателя,

$$\delta_{оп} = \omega_s t_{оп}. \quad (4-13)$$

Рассмотрим принципы получения необходимого опережения, обеспечивающего оптимальное включение генератора в сеть.

Уравнение движения ротора до включения генератора в сеть из (4-5)

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{рез} = M_T - M_{сопр.}$$

Первый случай:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{рез} = 0; \quad \omega_s = \omega_{ст.в.} \quad (4-14)$$

т. е. развиваемый турбиной момент полностью расходуется на преодоление момента сопротивления, но пред-

варительно генератору сообщена скорость, близкая к синхронной; угловая скорость скольжения постоянна и равна расчетной угловой скорости скольжения «точного включения» $\omega_{ст.в.}$.

Если синхронизатор обеспечивает подачу сигнала на включения» $\omega_{ст.в.}$ углом опережения

$$\delta_{оп.расч} = \omega_{расч} t_{в.в.}, \quad (4-15)$$

который определяется при условии, что $\omega_{расч} = \omega_{ст.в.}$, то время опережения также будет величиной постоянной и равной

$$t_{оп} = \frac{\delta_{оп.расч}}{\omega_{ст.в.}} = t_{в.в.}$$

Иначе говоря, если синхронизация всегда осуществляется при расчетной угловой скорости скольжения «точного включения», то $t_{оп} \sim \delta_{оп.}$

Таким образом, в рассматриваемом случае постоянное опережение по времени может быть заменено равнозначным ему опережением по углу. Для того чтобы контакты выключателя замыкались в момент оптимума ($\delta = 0$), достаточно подавать сигнал на его включение с заданным постоянным углом опережения. Устройства для точной синхронизации, реализующие этот принцип, называются *синхронизаторами с постоянным углом опережения*.

Ввиду сложности непосредственного измерения угла δ широкое распространение получил метод косвенного контроля с помощью напряжения скольжения U_s . Как следует из (4-12), каждому заданному значению напряжения U_s соответствует вполне определенное значение угла δ .

Второй случай:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{рез} = 0; \quad \omega_s \neq \omega_{ст.в.}, \quad (4-16)$$

т. е. скольжение постоянно, но отлично от скольжения «точного включения».

При заданном согласно условию (4-15) постоянном угле опережения $\delta_{оп.расч}$ в этом случае имеем:

$$t_{оп} = \delta_{оп.расч} / \omega_s \neq t_{в.в.}$$

Так как время опережения зависит от скольжения, то опережение по углу неравнозначно опережению по времени. Синхронизатор с постоянным углом опережения в этих условиях будет производить включение не в момент оптимума, а с ошибкой по углу

$$\begin{aligned}\delta_{\text{ош}} &= \delta_{\text{оп. расч}} - \delta_{\text{оп. факт}} = (\omega_{\text{с расч}} - \omega_s) t_{\text{в. в}} = \\ &= (\omega_{\text{ст. в}} - \omega_s) t_{\text{в. в}},\end{aligned}\quad (4-17)$$

где $\delta_{\text{оп. факт}}$ — фактическое изменение угла за время включения выключателя.

Наличие угла ошибки, а следовательно, и толчка уравнительного тока при скольжениях, отличных от скольжения «точного включения», является главным недостатком рассмотренного принципа.

В связи с этим для получения постоянного времени опережения, не зависящего от скольжения, необходимо, чтобы угол опережения изменялся пропорционально угловой скорости скольжения

$$\delta_{\text{оп}}(\delta') = k\omega_s = k \frac{d\delta}{dt}, \quad (4-18)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Действительно, в этом случае

$$t_{\text{оп}} = \frac{\delta_{\text{оп}}(\delta')}{\omega_s} = \frac{k\omega_s}{\omega_s} = k,$$

и если $k = t_{\text{в. в.}}$, то включение генератора будет обеспечено в момент оптимума.

На основании сказанного можно сделать вывод, что для получения постоянного времени опережения следует ввести контроль производной угла δ . Этот принцип реализуется в *синхронизаторах с постоянным временем опережения*, момент срабатывания которых определяется непосредственно заданным временем опережения.

Контроль производной угла можно также довольно просто осуществить косвенным методом при помощи производной напряжения скольжения. Из выражения (4-12) для малых углов

$$U_s = U\delta,$$

откуда

$$U'_s = U d\delta/dt = U\omega_s. \quad (4-19)$$

Однако синхронизаторы, построенные на основе косвенного контроля величины угла между векторами син-

хронизируемых напряжений и скорости скольжения, имеют следующие недостатки. Их время опережения практически постоянно только для таких углов опережения, синусы половин которых могут быть заменены аргументами. Неравенство напряжений вызывает заметные погрешности в работе вследствие искажения формы напряжения скольжения; по принципу действия эти синхронизаторы не работают при равенстве частот генератора и сети.

В настоящее время разработаны полупроводниковые импульсные синхронизаторы [63] с постоянным временем опережения, основанные на непосредственном измерении угла δ , что избавляет их от перечисленных недостатков. Ввиду сложности их конструкций они не нашли пока широкого применения.

Третий случай:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{рез}} = \text{const} \neq 0. \quad (4-20)$$

При наличии постоянного результирующего момента ротор генератора будет вращаться с постоянным угловым ускорением скольжения ϵ_s , обуславливающим наличие дополнительной ошибки:

$$\delta_{\text{ош.д}} = \epsilon_s t_{\text{в.в}}^2 / 2. \quad (4-21)$$

Включение генератора будет происходить с опережением или запаздыванием от момента оптимума в зависимости от знака и величины ускорения. Для получения постоянного времени опережения в этом случае необходимо, чтобы угол опережения, выбираемый синхронизатором, изменялся следующим образом:

$$\delta_{\text{оп}}(\delta', \delta'') = k_1 \omega_s + k_2 \epsilon_s, \quad (4-22)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты пропорциональности.

Поскольку теперь

$$t_{\text{оп}} = \frac{\delta_{\text{оп}}(\delta', \delta'')}{\omega_s + \frac{1}{2} \epsilon_s t_{\text{в.в}}} = \frac{k_1 \omega_s + k_2 \epsilon_s}{\omega_s + \frac{1}{2} \epsilon_s t_{\text{в.в}}},$$

то при условии, что

$$k_1 = t_{\text{в.в}}; \quad k_2 = \frac{1}{2} t_{\text{в.в}}^2, \quad (4-23)$$

обеспечивается постоянное время опережения, равное времени включения выключателя при условии постоянства углового ускорения скольжения ротора генератора, т. е.

$$t_{\text{оп}} = t_{\text{в.в}} \text{ при } \epsilon_s = \text{const.}$$

Следовательно, для учета углового ускорения скольжения необходимо контролировать вторую производную угла δ , так как $\epsilon_s = d^2\delta/dt^2$. Синхронизатор, работа которого основана на этом принципе, описан в [64].

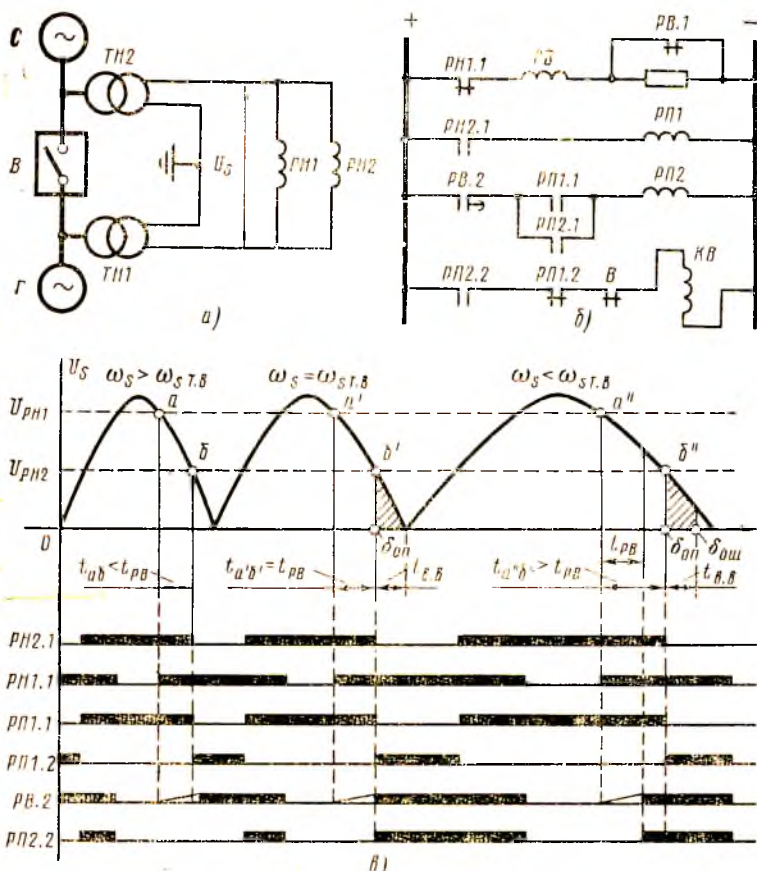


Рис. 4-4. Синхронизатор с постоянным углом опережения.

а — поясняющая схема; б — схема устройства; в — диаграмма, поясняющая принцип работы синхронизатора.

Синхронизатор с постоянным углом опережения. На рис. 4-4 приведена схема синхронизатора с постоянным углом опережения. Получение заданного постоянного угла опережения $\delta_{оп.расч}$ в схеме реализуется с помощью минимального реле напряжения $PH2$, напряжение срабатывания которого U_{PH2} равно заданному значению напряжения скольжения U_s :

$$\delta_{оп.расч} = 2 \arcsin U_{PH2} / 2U. \quad (4-24)$$

Контроль ω_s производится по скорости изменения напряжения скольжения и осуществляется взаимодействием минимальных реле напряжения $PH1$, $PH2$ и реле времени PB , возбуждаемого через контакт $PH1.1$.

При снижении напряжения скольжения U_s до величины напряжения срабатывания реле $PH1$ (точка a на рис. 4-4, a) последнее своим контактом $PH1.1$ пускает реле времени PB . Далее происходит сравнение интервала времени $t_{аб}$ с выдержкой времени реле времени PB .

В случае большого скольжения ($\omega_s > \omega_{ст.в}$) реле $PH2$ разомкнет свой контакт раньше, чем реле времени замкнет свой $PB.2$. Поэтому по истечении выдержки времени реле PB срабатывания реле $PP2$ не произойдет, так как контакт $PP1.1$ в его цепи разомкнут, и выключатель не включится.

Когда скольжение станет меньше скольжения «точного включения» ($\omega_s < \omega_{ст.в}$), реле времени срабатывает раньше, чем реле $PH2$. При этом срабатывает реле $PP2$, самоудерживается и подготавливает цепь на включение выключателя. В точке b'' в момент срабатывания реле $PH2$ возвращается в исходное состояние реле $PP1$ и замыкается цепь на включение выключателя.

Очевидно, если $\omega_s = \omega_{ст.в}$, то время $t_{a,b'} = t_{PB}$ и замыкание контакта $PB.2$ реле времени PB происходит в самый последний момент нахождения реле $PH2$ и $PP1$ в подтянутом состоянии, что также вызывает срабатывание реле $PP2$.

Таким образом, подача импульса на включение выключателя с постоянным углом опережения обеспечивается только тогда, когда скольжение $\omega_s \leq \omega_{ст.в}$.

К принципиальному недостатку синхронизатора с постоянным углом опережения, как отмечалось выше, относится наличие угла ошибки (см. третий цикл изменения U_s на диаграмме), которая определяется по выражению (4-17). В частности, в теоретически возможном

случае, когда $\omega_s=0$, угол ошибки $\delta_{\text{ош}}$ может быть равен заданному углу опережения $\delta_{\text{оп.расч}}$:

$$\delta_{\text{ош}} = (\omega_{\text{ст.в}} - 0) t_{\text{в.в}} = \delta_{\text{оп.расч}}. \quad (4-25)$$

Поэтому расчет параметров синхронизатора необходимо производить таким образом, чтобы значение заданного угла опережения не превышало допустимого угла ошибки $\delta_{\text{ош.д.}}$.

Следует отметить, что абсолютное значение угла ошибки может быть равно заданному углу опережения в другом теоретически возможном случае, который имеет место, если $\omega_s = 2\omega_{\text{ст.в}}$:

$$\delta_{\text{ош}} = (\omega_{\text{ст.в}} - 2\omega_{\text{ст.в}}) t_{\text{в.в}} = -\delta_{\text{оп.расч}}. \quad (4-26)$$

Отсюда следует, что максимальное значение скольжения, при котором допускается синхронизация, может быть увеличено в 2 раза по сравнению с расчетным $\omega_{\text{ср.расч}} = \omega_{\text{ст.в}}$.

Синхронизатор с постоянным временем опережения. В настоящее время наибольшее распространение получили автоматические синхронизаторы с постоянным временем опережения типа АСТ-4.

Автосинхронизатор АСТ-4, схема которого приведена на рис. 4-5, состоит из пяти основных частей:

узла опережения, создающего условия для прохождения импульса на включение выключателя с постоянным временем опережения момента оптимума;

узла контроля разности напряжений, разрешающего включение выключателя при разности синхронизируемых напряжений в допустимых пределах;

узла контроля разности частот, разрешающего включение выключателя только при допустимых значениях скольжения;

узла выравнивания частот, осуществляющего выравнивание частоты вращения генератора с эквивалентным генератором энергосистемы;

исполнительного органа.

Узел опережения состоит из трансреактора Tr и реле опережения PO . Первичная обмотка трансреактора включается на выпрямленное напряжение скольжения, ко вторичной подключается обмотка II поляризованного реле опережения PO . Ток, проходящий в течение одного

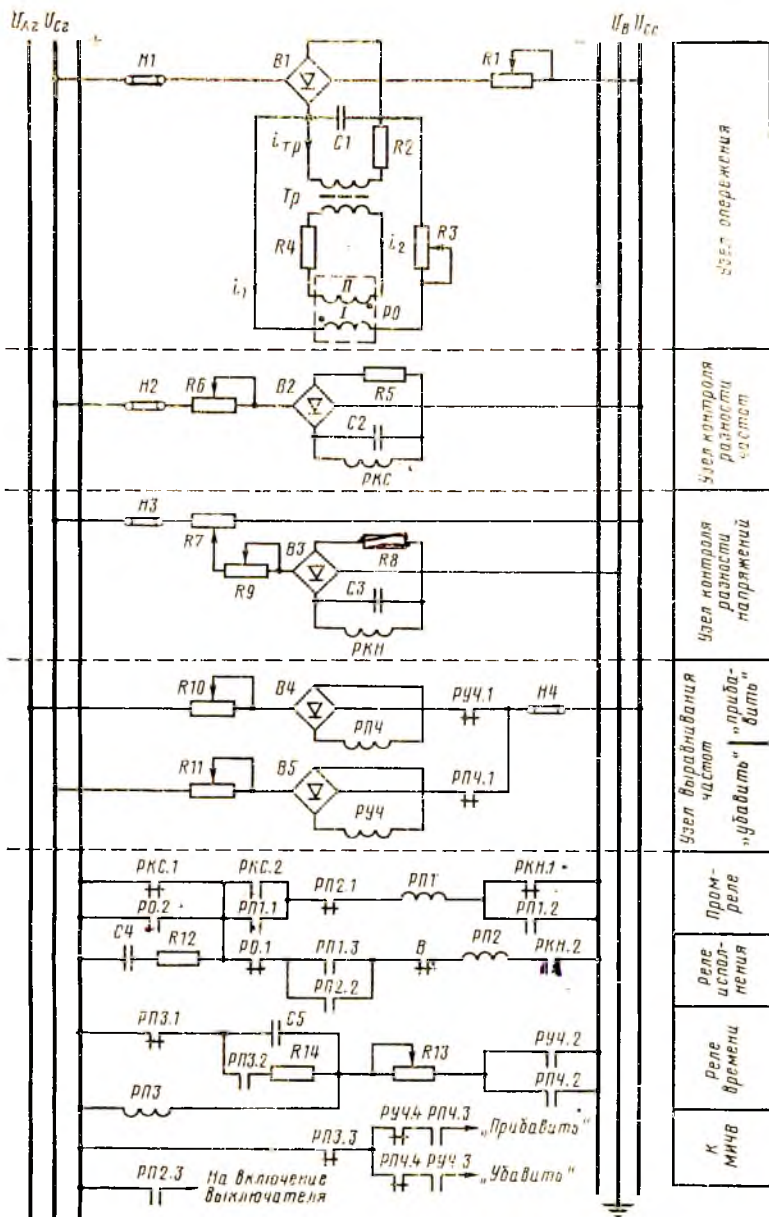


Рис. 4-5. Схема синхронизатора с постоянным временем опережения типа АСТ-4.

периода скольжения по обмотке *I* реле *PO*, если пренебречь ее сопротивлением, равен:

$$i_1 = \frac{U_s}{R_3} = \frac{2U}{R_2} \sin \frac{\omega_s}{2} t = k_1 2U \sin \frac{\omega_s}{2} t. \quad (4-27)$$

По обмотке *II* реле *PO* проходит вторичный ток трансреактора, пропорциональный производной выпрямленного напряжения скольжения:

$$i_2 = k_2 2U \frac{\omega_s}{2} \cos \frac{\omega_s}{2} t, \quad (4-28)$$

где k_2 — коэффициент пропорциональности.

Реле *PO* находится в сработавшем состоянии при $i_1 + i_2 > 0$. Условие возврата *PO* с учетом (4-27) и (4-28) можно записать как

$$k_1 2U \sin \frac{\omega_s}{2} t + k_2 2U \frac{\omega_s}{2} \cos \frac{\omega_s}{2} t = 0,$$

откуда

$$\operatorname{tg} \frac{\omega_s}{2} t = - \operatorname{tg} \frac{\omega_s}{2} t_{\text{оп}} = - \frac{k_2}{k_1} \frac{\omega_s}{2}.$$

При малых углах $\delta_{\text{оп}} = \omega_s t_{\text{оп}}$ имеем:

$$\operatorname{tg} \frac{\omega_s}{2} t_{\text{оп}} \approx \frac{\omega_s}{2} t_{\text{оп}},$$

следовательно,

$$t_{\text{оп}} \approx k_2 / k_1 = k. \quad (4-29)$$

Таким образом, реле *PO* будет возвращаться на время $t_{\text{оп}}$ раньше прохождения U_s через нуль (рис. 4-6). Если $k = t_{\text{в.в.}}$, синхронизатор обеспечивает включение генератора в момент оптимума независимо от значения скольжения. Значение времени опережения можно регулировать с помощью ре-

зистора R_3 . При увеличении его сопротивления уменьшается ток i_1 в обмотке *I* реле *PO*, следовательно, увеличивается время опережения (штриховая кривая на рис. 4-6).

Узел контроля разности напряжений состоит

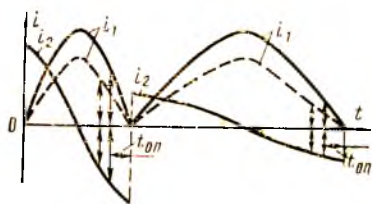


Рис. 4-6. Диаграмма, поясняющая работу узла опережения.

из реле PKN , включенного между фазой B , общей для сети и генератора, и средней точкой потенциометра $R7$, включенного между одноименными фазами сети и генератора. Векторные диаграммы напряжений на реле для углов $\delta=0$ и 180° при $U_r=U_c$ и $U_r < U_c$ показаны на рис. 4-7, а и б.

Если напряжения генератора и энергосистемы равны, то напряжение на реле PKN будет изменяться от максимального значения при $\delta=0$ до нуля при $\delta=180^\circ$

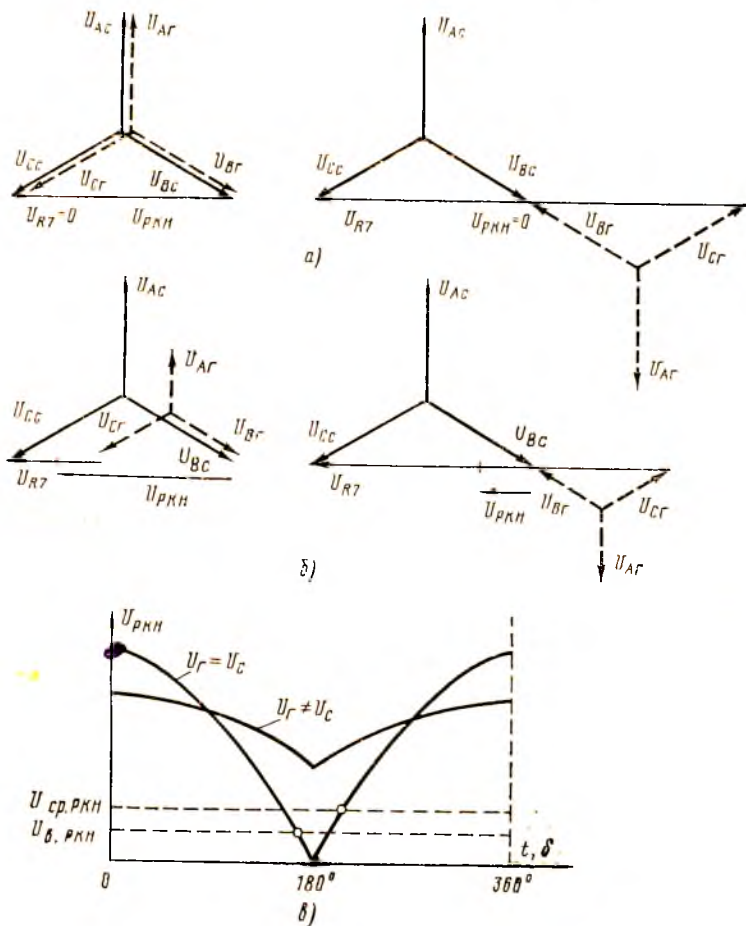


Рис. 4-7. Диаграммы, поясняющие работу узла контроля разности напряжений.

(рис. 4-7, а, в). Когда напряжения не равны между собой, реле будет находиться под напряжением при всех значениях угла и его якорь будет подтянут (рис. 4-7, б, в). Следовательно, если разность напряжений находится в допустимых пределах, то реле *РКН* будет возвращаться при прохождении напряжения скольжения вблизи максимума и тем самым подготавливать цепи выходных промежуточных реле. Уставка реле *РКН* регулируется резистором *R9*.

✓ Узел контроля разности частот состоит из реле контроля скольжения *РКС*, включенного на напряжение скольжения. В том случае, когда напряжение U_s максимально, якорь реле подтянут. Значение расчетного напряжения возврата реле *РКС* $U_{вРКС}$ зависит от максимально допустимого значения скольжения и заданного времени опережения:

$$U_{вРКС} = 2U \sin \frac{\omega_{сн.д.}}{2} \cdot t_{оп} \quad (4-30)$$

и регулируется резистором *R6*.

Заключение о значении скольжения делается на основании очередности возврата реле *РКС* и *РО* в исходное состояние. При скольжениях, меньших максимально допустимого, сначала возвращается реле *РКС*, а затем реле опережения *РО* (рис. 4-8, а).

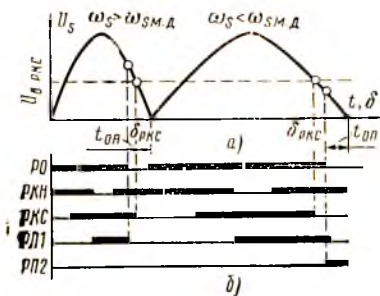


Рис. 4-8. Диаграммы, поясняющие работу узла контроля разности частот (жирные линии соответствуют подтянутому состоянию якоря реле).

Для предотвращения ложной работы синхронизатора при большом скольжении (значительно большем максимально допустимого) параллельно реле *РКС* включается конденсатор *C2*. Емкость его выбирается с таким расчетом, чтобы при разности частот, большей

0,5—1 Гц, реле *РКС* не возвращалось и блокировало работу синхронизатора.

✓ Работа синхронизатора происходит следующим образом (рис. 4-8, б). Когда угол $\delta = 180^\circ$, контакты *РО.2*, *РКС.2* и *РКН.1* замкнуты. Последнее имеет место при условии $U_r \approx U_c$. Реле *РЛ1* находится в сработавшем

состоянии и самоудерживается с помощью контактов $РП1.1$ и $РП1.2$, а контактом $РП1.3$ подготавливает цепь реле $РП2$. С увеличением угла δ реле $РКН$ замыкает свой контакт $РКН.2$ и размыкает $РКН.1$.

При допустимом скольжении $\omega_s < \omega_{с.д.}$ первым отпускает якорь реле $РКС$ и замыкает контакт $РКС.1$. Реле $РП1$ остается подтянутым. Выходное реле $РП2$ срабатывает, когда вернется в исходное состояние реле опережения и замкнет контакт $РО.1$. Контактom $РП2.3$ оно подает сигнал на включение выключателя, а контактом $РП2.1$ разрывает цепь обмотки реле $РП1$, которое возвращается в исходное состояние.

В том случае, когда скольжение велико, сначала возвращается реле $РО$, размыкая контактом $РО.2$ цепь обмотки реле $РП1$. Последнее размыкает свой контакт $РП1.3$ в цепи реле $РП2$, поэтому импульс на включение выключателя не проходит.

Конденсатор $С4$ и резистор $Р12$ предусмотрены в схеме для облегчения условий работы контактов.

Узел выравнивания частот включает в себя реле «прибавить» и «убавить» ($РПЧ$ и $РУЧ$) и реле времени. Реле $РУЧ$ (рис. 4-9,а) включено на разность напряже-

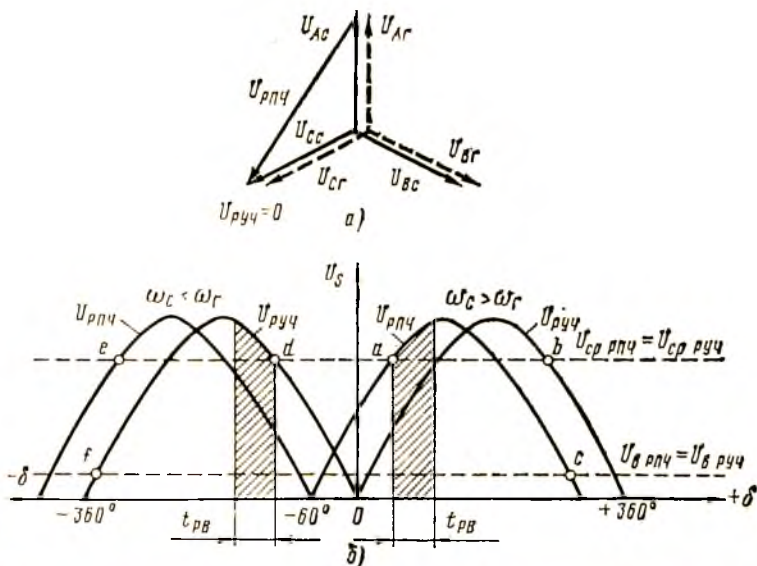


Рис. 4-9. Диаграммы, поясняющие работу узла выравнивания частот.

ний фазы C генератора (U_{Cr}) и сети (U_{Cc}); реле $РПЧ$ — на разность напряжений фазы A генератора (U_{Ar}) и фазы C сети (U_{Cc}). Благодаря такому включению напряжения скольжения на обмотках двух реле сдвинуты относительно друг друга на угол 60° .

График изменения напряжений на обмотках реле в зависимости от абсолютного значения и знака угла δ показан на рис. 4-9,б. Как видно из графика, при угле $\delta=0^\circ$ напряжение на реле $РУЧ$ равно нулю, а при угле $\delta=-60^\circ$, — на реле $РПЧ$.

Уставки срабатывания реле $РПЧ$ и $РУЧ$ выбираются одинаковыми и регулируются резисторами $R10$ и $R11$.

Если частота вращения синхронизируемого генератора меньше частоты вращения эквивалентного генератора сети, т. е. вектор напряжения генератора отстает от вектора напряжения сети, угол δ изменяется в положительной полуплоскости (рис. 4-9,б). В течение каждого периода напряжения скольжения первым срабатывает реле $РПЧ$ (точка a), подавая сигнал на «прибавить» частоту.

В том случае, когда частота вращения синхронизируемого генератора больше частоты вращения эквивалентного генератора сети, угол δ изменяется в отрицательной полуплоскости. Первым срабатывает реле $РУЧ$ (точка d) и подает сигнал на «убавить» частоту.

Схема построена так, что при срабатывании одного реле другое блокируется. Для этой цели служат контакты $РПЧ.1$ и $РУЧ.1$. Возврат реле $РПЧ$ и $РУЧ$ должен происходить после снижения напряжения на другом реле до значения, меньшего напряжения его срабатывания (точки c и b , f и e соответственно).

Таким образом, в течение одного периода напряжения скольжения подается один командный импульс двигателю МИЧВ. Для ограничения длительности импульсов на «прибавить» и «убавить» служит реле времени, которое состоит из реле $РПЗ$, конденсатора $C5$ и резистора $R13$.

При срабатывании реле $РПЧ$ (или $РУЧ$) контактом $РПЧ.2$ ($РУЧ.2$) пускается реле времени, а контактом $РПЧ.3$ ($РУЧ.3$) подается сигнал на МИЧВ. После замыкания контакта $РПЧ.2$ ($РУЧ.2$) напряжение на конденсаторе $C5$, а следовательно, и на обмотке реле $РПЗ$ нарастает с постоянной времени цепи заряда конденсатора.

При увеличении напряжения до уставки реле РПЗ оно срабатывает. Выдержка времени на срабатывание реле РПЗ принимается обычно в пределах 0,2—0,3 с и регулируется резистором R13. Контакт РПЗ.3 реле РПЗ разрывает цепь питания МИЧВ, контактом РПЗ.1 размыкает цепь заряда конденсатора С5, а контактом РПЗ.2 подключает его к разрядному резистору R14. После разряда конденсатора С5 и возврата реле РПЧ (РУЧ) реле времени вновь готово к повторному действию.

Расчет параметров точной синхронизации производится в следующем порядке.

Определяется максимально допустимый угол ошибки $\delta_{\text{ош.д.}}$.

Допустимое значение угла ошибки определяется на основании выражения (4-6) с учетом заданного значения максимального толчка уравнительного тока

$$\delta_{\text{ош.д.}} = 2 \arcsin \frac{I''_{\text{у}} (x''_d + x''_c)}{2E''_q}, \quad (4-31)$$

где $I''_{\text{у}} = (1 \div 2) I_{\text{г.ном}}$ — допустимое значение толчка уравнительного тока.

Для малых значений угла δ выражение (4-31) можно упростить

$$\delta_{\text{ош.д.}} = \frac{(1 \div 2) I_{\text{г.ном}} (x''_d + x''_c)}{E''_q}, \quad (4-32)$$

Определяется максимально допустимое скольжение.

Максимально допустимая угловая скорость скольжения для синхронизаторов с постоянным углом опережения

$$\omega_{\text{см.д.}} = 2\omega_{\text{спасч}} = 2\omega_{\text{ст.в}} = 2\delta_{\text{оп.расч}}/t_{\text{в.в}} = 2\delta_{\text{ош.д.}}/t_{\text{в.в.}} \quad (4-33)$$

У синхронизаторов с постоянным временем опережения угол ошибки зависит от погрешностей в работе самого синхронизатора ($\Delta t_{\text{с}}$) и от разброса во времени включения выключателя ($\Delta t_{\text{в.в}}$)

$$\delta_{\text{ош}} = \omega_s (\Delta t_{\text{с}} + \Delta t_{\text{в.в}}),$$

откуда можно определить максимально допустимую угловую скорость скольжения

$$\omega_{\text{см.д.}} = \frac{\delta_{\text{ош.д.}}}{\Delta t_{\text{с}} + \Delta t_{\text{в.в}}}. \quad (4-34)$$

Проверяется устойчивость синхронизации.

При необходимости (синхронизация нагруженного генератора) устойчивость процесса точной синхрониза-

ции может быть проверена по правилу площадей [11]. Синхронизация генератора с энергосистемой производится, как правило, на холостом ходу (генератор не нагружен). При этом механическая мощность турбины весьма мала ($P_T \approx 0$), скольжение ограничено допустимой величиной $\delta_{\text{ош.д}}$ и специальной проверки устойчивости обычно не требуется.

Рассчитываются уставки синхронизаторов.

Для синхронизатора с постоянным углом опережения (см. рис. 4-4) напряжение срабатывания реле $PH2$, определяющее необходимый угол опережения, рассчитывается по выражению

$$U_{PH2} = 2U \sin \delta_{\text{оп.расч}}/2 = 2U \sin \delta_{\text{ош.д}}/2, \quad (4-35)$$

где $\delta_{\text{ош.д}}$ — максимально допустимый угол ошибки, найденный по выражению (4-31).

Для оптимального включения необходимо, чтобы при скольжениях $\omega_s = \omega_{\text{см.д}}$ реле $PH1$ срабатывало (якорь отпадал) раньше, чем реле $PH2$, на выдержку времени реле времени $PВ$, которая для синхронизатора принимается обычно в пределах 0,3—0,5 с. Поэтому напряжение срабатывания минимального реле $PH1$ должно находиться по формуле:

$$U_{PH1} = 2U \sin \frac{\delta_{\text{ош.д}} + \delta_{PВ}}{2}, \quad (4-36)$$

где $\delta_{PВ} = \omega_{\text{см.д}} t_{PВ}$, откуда с учетом (4-33)

$$U_{PH1} = 2U \sin \frac{\omega_{\text{см.д}} (t_{в.в} + 2t_{PВ})}{4}. \quad (4-37)$$

Для синхронизатора с постоянным временем опережения типа АСТ-4 расчет производится следующим образом.

Момент замыкания цепи на включение выключателя определяется моментом срабатывания реле опережения PO . Следовательно, для оптимального включения генератора необходимо установить такое значение сопротивления R_3 , чтобы $t_{\text{оп}} = t_{в.в} + t_{PP2}$, где t_{PP2} — время срабатывания реле $PP2$.

Необходимо отметить, что при неравенстве напряжений генератора и сети кривая напряжения скольжения заметно искажается при малых значениях угла δ . Это вызывает погрешности или даже отказы в работе реле

опережения. В связи с этим предъявляются повышенные требования к уравниванию напряжений при малых скольжениях и времени включения выключателя. Данное обстоятельство необходимо учитывать при выборе уставок синхронизатора.

Пример 4-1. Рассчитать параметры точной синхронизации для турбогенератора мощностью 60 МВт, $x''_d=0,146$.

Исходные данные:

допустимое значение толчка уравнительного тока $I''_{y*}=1$;

время включения выключателя $t_{в.в}=0,5$ с, разброс по времени включения $\Delta t_{в.в}=0,05$ с;

выдержка времени реле РВ синхронизатора с постоянным углом опережения (см. рис. 4-4) $t_{РВ}=0,5$ с;

погрешность в действии синхронизатора с постоянным временем опережения типа АСТ-4 (рис. 4-5) $\Delta t_c=0,05$ с;

сопротивление энергосистемы, приведенное к мощности генератора, $x''_c=0,3$.

Расчет. Определяем допустимый угол ошибки по выражению (4-32), считая $E''_{q*}=1,05$:

$$\delta_{\text{ош.л}} = \frac{1(0,146 + 0,3)}{1,05} = 0,425 \text{ рад} = 24,3^\circ.$$

Определяем максимально допустимое скольжение:

для синхронизатора с постоянным углом опережения

$$\omega_{\text{см.л}} = \frac{2\delta_{\text{ош.л}}}{t_{в.в}} = \frac{2 \cdot 0,425}{0,5} = 1,7 \text{ рад/с},$$

тогда

$$s_{\text{м.л}} = \frac{\omega_{\text{см.л}}}{\omega_c} 100 = \frac{1,7}{314} \cdot 100 = 0,542\%;$$

для синхронизатора с постоянным временем опережения

$$\omega_{\text{см.л}} = \frac{\delta_{\text{ош.л}}}{\Delta t_c + \Delta t_{в.в}} = \frac{0,425}{0,05 + 0,05} = 4,25 \text{ рад/с},$$

откуда

$$s_{\text{м.л}} = \frac{4,25}{314} \cdot 100 = 1,35\%.$$

Определяем уставки синхронизатора с постоянным углом опережения:

напряжение срабатывания реле РН2

$$U_{\text{РН2}} = 2U \sin \frac{\delta_{\text{ош.л}}}{2} = 2 \cdot 105 \cdot \sin \frac{24,3}{2} = 44 \text{ В};$$

напряжение срабатывания реле РН1

$$\begin{aligned} U_{\text{РН1}} &= 2U \sin \frac{\omega_{\text{см.л}}(t_{в.в} + 2t_{\text{РВ}})}{4} = \\ &= 2 \cdot 105 \sin \frac{1,7(0,5 + 2 \cdot 0,5)}{4} = 125 \text{ В}, \end{aligned}$$

где $U = 1,05U_{\text{ном}} = 105 \text{ В}$.

4-4. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И КОМПЕНСАТОРОВ

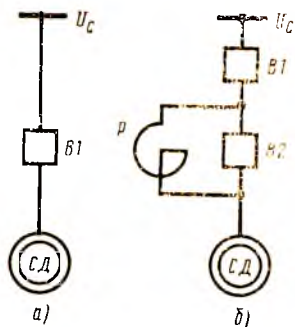
Основным способом пуска синхронных электродвигателей является *асинхронный пуск*, для осуществления которого они снабжаются специальной пусковой обмоткой. При асинхронном пуске двигатель сначала подключается к сети невозбужденным. При этом обмотка возбуждения во избежание выхода ее из строя (пробоя изоляции) должна быть замкнута накоротко либо на активное сопротивление $R = (5 \div 10)R_f$,

где R_f — сопротивление обмотки возбуждения.

Наиболее распространен *прямой пуск* (рис. 4-10, а), т. е. пуск при непосредственном включении двигателя в сеть. К преимуществам прямого пуска следует отнести отсутствие дополнительных пусковых устройств, простоту схемы, сокращение времени разворота двигателя до нормальных оборотов.

Если выполнение прямого пуска невозможно по условиям недопустимого снижения напряжения из-за значительных пусковых токов, что имеет место, например, при пуске мощных синхронных двигателей, то осуществляют *реакторный пуск* (рис. 4-10, б). В начале пуска включается выключатель $B1$ и двигатель подключается к сети через реактор. После разворота двигателя до определенной скорости включается выключатель $B2$, шунтирующий реактор, и на двигатель подается полное напряжение сети. Следует иметь в виду, что включение реактора приводит к уменьшению напряжения на двигателе при пуске и как следствие к уменьшению вращающего момента пропорционально квадрату напряжения. Поэтому параметры пускового реактора выбираются с учетом минимального значения пускового вращающего момента двигателя, способного преодолеть момент сопротивления на его валу.

Рис. 4-10. Схемы пуска синхронных двигателей. а — прямой; б — реакторный.



Контроль разворота двигателя при пуске может производиться автоматическими устройствами следующими способами:

по току; устройства осуществляют контроль тока в цепях статора;

по времени; устройства осуществляют контроль времени разворота;

по частоте; устройства осуществляют косвенный контроль частоты вращения по частоте тока ротора.

Весь процесс пуска можно разбить на два этапа. На первом этапе, который начинается после подачи полного или пониженного напряжения к статору, синхронный двигатель разгоняется главным образом за счет среднего асинхронного момента до подсинхронной скорости. На втором этапе происходит втягивание двигателя в синхронизм за счет синхронного момента, обусловленного возбуждением, и реактивного момента (момента явноплюсности). Второй этап обычно начинается с момента подачи тока возбуждения, однако явноплюсные двигатели при малом моменте сопротивления могут втянуться в синхронизм под действием одного реактивного момента даже при отсутствии тока возбуждения.

Втягивание ротора двигателя в синхронизм после включения тока возбуждения обеспечивается практически всегда при соблюдении следующего условия [9]:

$$s_{уст} \leq 0,0564 \sqrt{M_{с.макс} / J \omega_c}, \quad (4-38)$$

где $s_{уст}$ — скольжение в установившемся асинхронном режиме; $M_{с.макс}$ — максимальный синхронный момент при данном токе возбуждения, Н·м; J — момент инерции, кг·м²; ω_c — синхронная угловая скорость вращения, рад/с.

Особенностью асинхронного пуска синхронного двигателя является проявление эффекта одноосного включения, обусловленного замкнутой обмоткой возбуждения. Наличие обмотки возбуждения приводит к появлению на валу двигателя дополнительного момента $M_{о.в.}$, который при скольжении $s < 0.5$ носит тормозной харак-

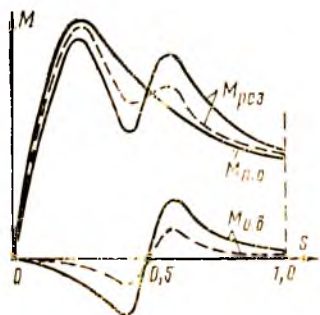


Рис. 4-11. Кривые вращающих моментов синхронного двигателя при асинхронном пуске.

тер (рис. 4-11). Поэтому результирующий момент $M_{рез}$ пусковой обмотки и обмотки возбуждения ($M_{рез} = M_{п.о} + M_{о.в}$) имеет провал при $s < 0,5$. Провал максимален при замкнутой накоротко обмотке возбуждения и уменьшается при замыкании обмотки возбуждения на резистор (соответственно сплошные и пунктирные кривые моментов на рис. 4-11).

Искажение кривой результирующего момента может привести к тому, что при пуске двигателя со значительной нагрузкой он не сможет развить скорость большую, чем половина синхронной, т. е. двигатель «застрянет».

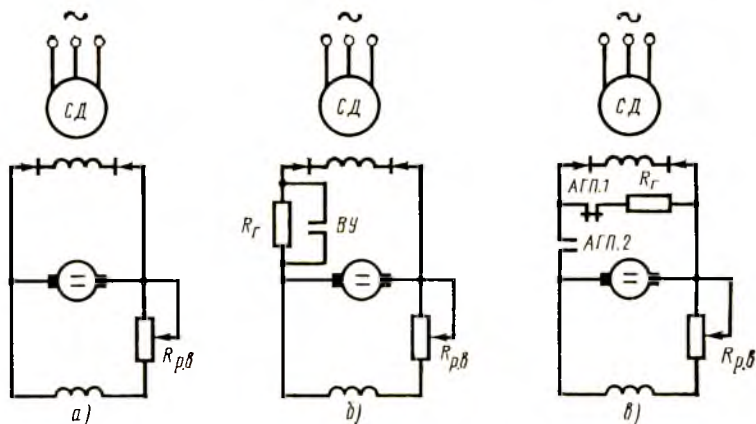


Рис. 4-12. Схемы подключения обмотки возбуждения синхронных двигателей.

В связи с этим для синхронных двигателей с наиболее распространенными электромашинными системами возбуждения в зависимости от условий пуска применяются следующие основные способы подключения обмотки возбуждения и подачи в нее тока возбуждения.

При моменте сопротивления $M_{сопр} < 0,4M_{ном}$ обмотка возбуждения двигателя подключается к якору возбудителя (рис. 4-12,а). По мере увеличения частоты вращения двигателя увеличиваются напряжение и ток возбудителя, который при достижении подсинхронной скорости оказывается достаточным для входа двигателя в синхронизм.

При моменте сопротивления $M_{\text{сопр}} > 0,4M_{\text{ном}}$ обмотка ротора двигателя замыкается на якорь возбудителя через гасительный резистор, который в конце пуска автоматически шунтируется контактами вспомогательного устройства ВУ (рис. 4-12,б). На рис. 4-12,в приведена другая схема пуска, при которой обмотка возбуждения замкнута на гасительный резистор R_r . В конце пуска включается автомат гашения поля АГП, переключает обмотку возбуждения с резистора на возбудитель и синхронный двигатель втягивается в синхронизм.

При нарушении синхронизма, например, вследствие перерыва питания для облегчения условий ресинхронизации производится включение гасительного резистора и гашение поля, т. е. перевод двигателя в асинхронный режим. После восстановления напряжения и разворота двигателя под действием асинхронного момента до подсинхронных оборотов резистор отключается, двигатель возбуждается и втягивается в синхронизм, как при пуске.

Схемы, аналогичные рис. 4-12,б и в, применяются также с полупроводниковыми системами возбуждения.

Реакторный пуск синхронного двигателя подразделяют на *легкий* и *тяжелый*. Если втягивание синхронного двигателя в синхронизм возможно при пониженном напряжении (незашунтированном реакторе), то осуществляется легкий пуск, который производится в следующей последовательности: на обмотку статора через реактор подается пониженное напряжение, после достижения двигателем подсинхронной скорости подается ток возбуждения в обмотку ротора, затем по истечении определенного времени, необходимого для втягивания в синхронизм, автоматически шунтируется реактор и на статор подается полное напряжение сети. Следует отметить, что легкий пуск более благоприятен с точки зрения бросков тока в сети, обусловленных синхронизацией.

При большом моменте сопротивления на валу двигателя требуется значительный вращающий момент синхронного двигателя и его ротор может не войти в синхронизм при пониженном напряжении. В таких случаях применяют тяжелый пуск, отличие которого от легкого заключается в том, что после разворота до подсинхронных оборотов сначала автоматически шунтируется реактор и на статор подается полное напряжение сети, а затем включается возбуждение.

Для пуска синхронных компенсаторов применяются те же способы, что и для синхронных двигателей. Отличительная особенность пуска синхронных компенсаторов заключается в практическом отсутствии момента сопротивления на его валу. Поэтому для них в большинстве случаев допускается пуск с присоединением обмотки возбуждения к якорию возбудителя как в процессе прямого, так и реакторного пуска.

Согласно ГОСТ прямой асинхронный пуск компенсаторов допускается, если напряжение на его выводах в процессе пуска не превышает 60% номинального. В противном случае значение пускового тока превышает допустимое по условиям нагрева обмотки компенсатора. В случае реакторного пуска параметры реактора выбирают таким образом, чтобы пусковой ток не превышал 2,5-кратного номинальному, а пусковой момент был не ниже 1,4—1,8 момента сопротивления.

На рис. 4-13,а, б приведена схема устройства автоматического управления тяжелым пуском синхронного двигателя с контролем разворота по току статора. Дистанционное управление пуском и остановкой двигателя осуществляется ключом управления КУ, автоматический пуск — с помощью реле автоматики РПА1 (контакт РПА1.1). Контроль пускового тока производится минимальным реле тока РТ, которое срабатывает при пуске двигателя и подает плюс на обмотку реле РП1. Последнее, сработав, размыкает цепь обмотки контактора включения В2 (КП_{В2}). После разворота двигателя уменьшается ток в обмотке статора, размыкается контакт РТ.1 и замыкается РП1.2, после чего происходит включение выключателя В2. Затем с небольшим замедлением замыкается контакт замедленного на возврат промежуточного реле РП2.2 и включается АГП двигателя.

В схеме предусмотрена блокировка, исключающая включение выключателя В1 при включенном АГП и выключателе В2 (блок-контакты АГП.3 и В2.4).

Отключение выключателя В1 и остановка двигателя производятся контактами ключа управления КУ.2, реле автоматики РПА2.1 или релейной защиты РЗ.1.

При отключении выключателя В1 отключаются выключатель В2 и АГП. Схема возвращается в исходное состояние.

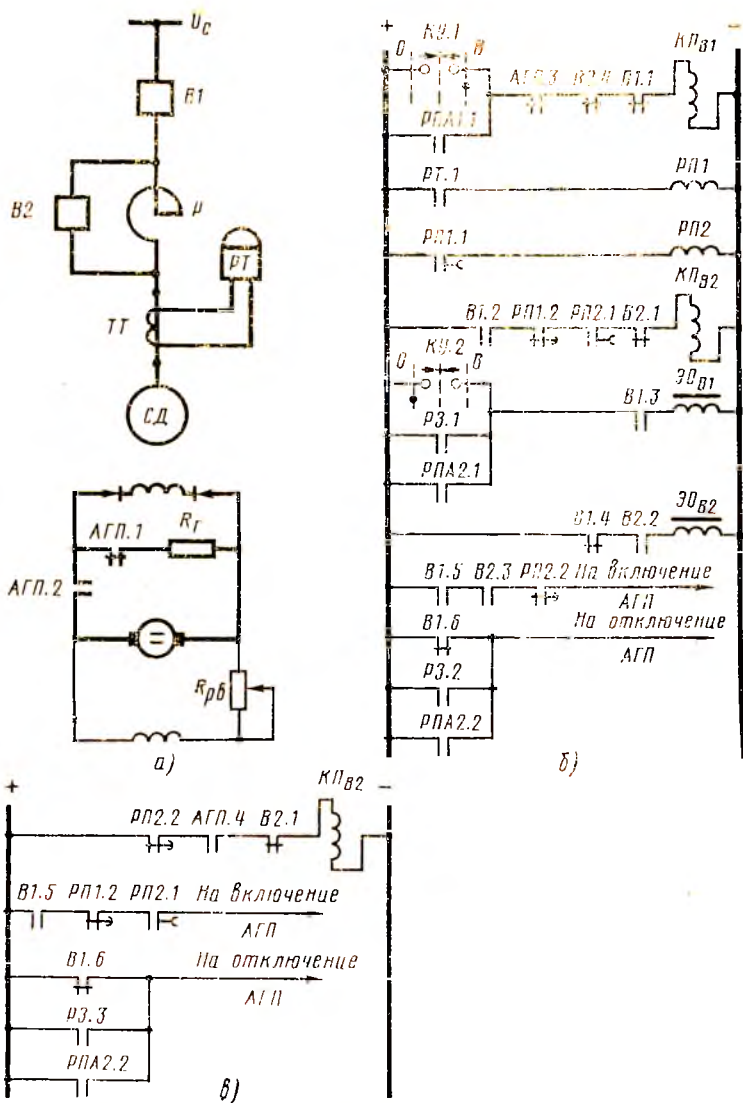


Рис. 4-13. Автоматическое управление реакторным пуском синхронного двигателя в функции тока.

а — поясняющая схема; б — схема цепей управления тяжелым пуском; в — узел схемы для легкого пуска.

Рассмотренная схема может применяться и для легкого пуска синхронного двигателя. Необходимая последовательность операций обеспечивается изменением схем управления контактором включения выключателя В2 и АГП (рис. 4-13, в). При этом сначала включается АГП при пониженном напряжении, а затем шунтирующий выключатель В2.

Если устройство осуществляет пуск синхронного двигателя с контролем разворота по времени, то используется реле времени. В этом случае все операции по шунтированию реактора и включению возбуждения производятся спустя заданное время (при помощи реле времени).

Из всех принципов пуска, основанных на косвенном контроле частоты вращения двигателя, наиболее совершенным является принцип пуска с контролем разворота по частоте тока ротора, который позволяет обеспечить включение тока возбуждения при заданном скольжении.

Как известно, при развороте синхронного двигателя в асинхронном режиме частота тока, наводимого полем статора в роторе, пропорциональна скольжению ротора. Этот факт используется при построении схем автоматических устройств пуска, основанных на контроле частоты тока в цепи ротора.

На рис. 4-14 приведены наиболее распространенные способы контроля скольжения. В первом варианте

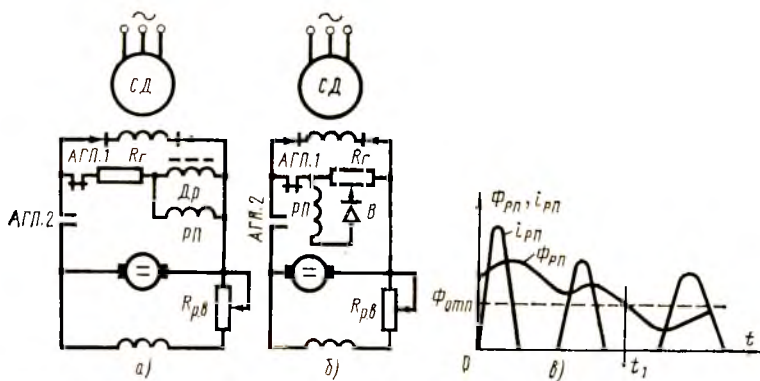


Рис. 4-14. К принципу пуска синхронного двигателя в функции частоты.

а — схема подключения реле параллельно дросселю; б — схема подключения реле с замедлением на возврат; в — диаграмма, поясняющая работу схемы по рисунку б; t_1 — момент возврата якоря РП.

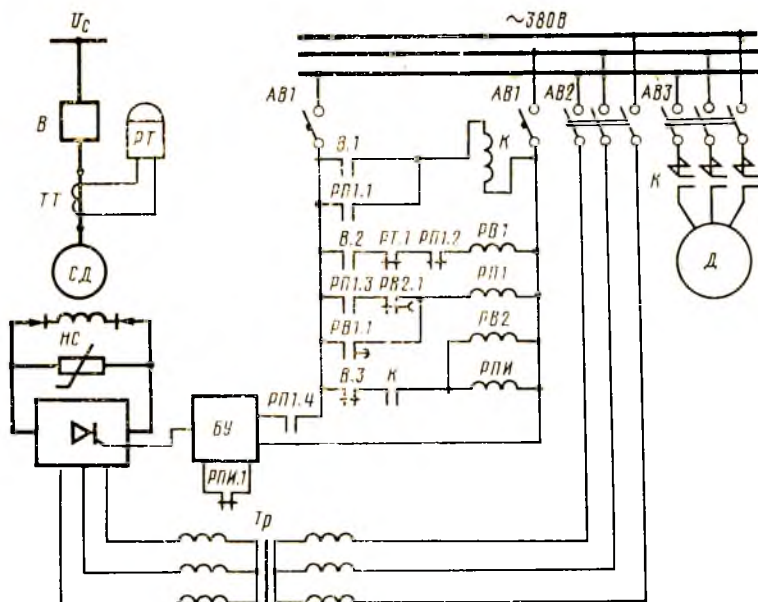


Рис. 4-15. Схема устройства автоматического управления пуском синхронного двигателя с тиристорной системой возбуждения.

(рис. 4-14,а) это осуществляется с помощью реле $РП$, подключенного параллельно дросселю $Др$ в цепи гасительного резистора. Падение напряжения на дросселе пропорционально переменной составляющей тока ротора и тем больше, чем больше скольжение. По мере разворота двигателя напряжение на дросселе снижается и якорь реле $РП$ отпадает.

Во втором варианте применяется промежуточное реле $РП$ с медной гильзой, создающей замедление на возврат. Реле $РП$ включается через выпрямитель к гасительному резистору (рис. 4-14,б). При большом скольжении, а следовательно, и частоте тока магнитный поток в сердечнике реле $РП$ поддерживается выше потока отпадания его якоря $\Phi_{отп}$ (рис. 4-14,в). С уменьшением скольжения интервалы между полуволнами тока в реле увеличиваются, магнитный поток успевает снизиться до значения $\Phi_{отп}$, что приводит к отпаданию якоря реле

РП. Контакты реле *РП* используются для включения *АГП* и подачи тока возбуждения.

На рис. 4-15 приведена схема устройства автоматического управления прямым пуском синхронного двигателя с тиристорной системой возбуждения. Обмотка возбуждения замкнута на резистор с нелинейным сопротивлением *НС* (вилитовым или тервитовым), которое изменяется от $(1 \div 2)R_f$ в начале пуска до $(30 \div 50)R_f$ в нормальном режиме. Резистор *НС* обеспечивает также защиту тиристорного преобразователя от перенапряжений. Вместо такого резистора может использоваться обычный резистор с тиристорным ключом, включающим его на время пуска [14].

Перед пуском двигателя включаются автоматические выключатели *АВ1*, *АВ2*, *АВ3*. После включения выключателя *В* подтягивается якорь реле тока *РТ*, затем срабатывает контактор *К*, подключающий к сети собственных нужд асинхронный двигатель *Д* вентилятора воздушного охлаждения тиристорного преобразователя.

При достижении двигателем подсинхронной скорости минимальное реле *РТ* срабатывает и замыкает контакт *РТ.1*. Срабатывает реле времени *РВ1*, которое с заданной выдержкой времени замыкает цепь реле *РП1*. Последнее срабатывает и самоудерживается, шунтирует блок-контакт *В.1* выключателя в цепи обмотки контактора, размыкает цепь реле времени *РВ1* и подает питание в блок управления *БУ* тиристорами. Блок управления открывает тиристоры и в обмотку возбуждения подается ток.

При отключении выключателя срабатывают реле инвертирования *РПИ* и реле времени *РВ2*. Реле инвертирования воздействует контактом *РПИ.1* на блок управления, и тиристорный преобразователь переводится в инверторный режим, чем обеспечивается гашение поля двигателя. Реле времени *РВ2* с выдержкой времени, необходимой для гашения поля, разрывает цепь обмотки реле *РП1*, которое отключает контактор *К* и питание блока управления. Схема возвращается в исходное состояние.

На рис. 4-16 приведена схема устройства автоматического управления реакторным пуском синхронного компенсатора с контролем разворота по току, которое применяется для синхронных компенсаторов мощностью 3,5—30 МВ·А.

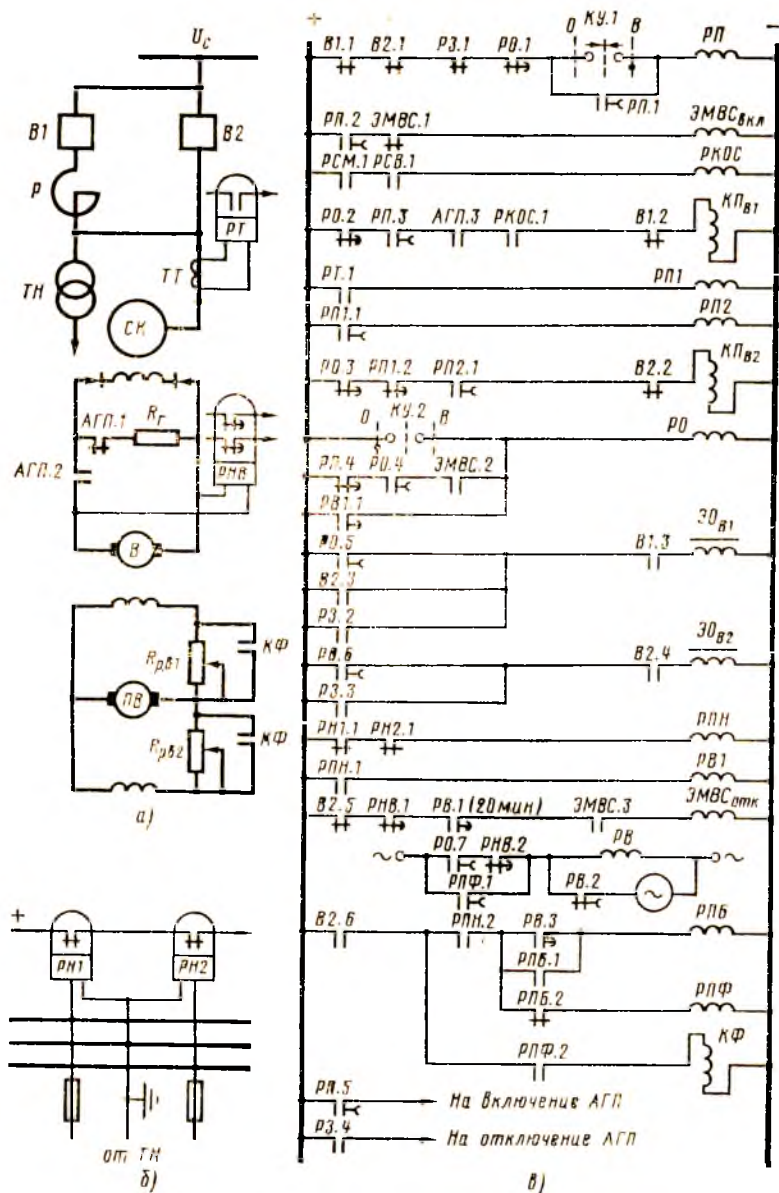


Рис. 4-16. Схема устройства автоматического управления реакторным пуском синхронного компенсатора в функции тока.

а — схема главных цепей; б — схема цепей переменного напряжения; в — схема оперативных цепей.

Пуск осуществляется при непосредственном подключении обмотки возбуждения к якору возбуждателя. Автомат гашения поля отключается только при аварийных остановках компенсатора действием релейной защиты от внутренних повреждений. Во время нормальной работы, при пуске и нормальной остановке АГП остается включенным, т. е. резистор R_r выведен.

Пуск компенсатора. Готовность синхронного компенсатора к включению контролируется блок-контактами $B1.1$ и $B2.1$ выключателей $B1$ и $B2$, контактом реле остановки $PO.1$ и контактом $P3.1$ релейной защиты от внутренних повреждений (замкнут при отсутствии повреждения).

Пуск компенсатора осуществляется подачей плюса на реле пуска $РП$ от устройств автоматики, телемеханики или дистанционно (на схеме для простоты показана только цепь дистанционного управления от ключа управления $KУ$). Реле $РП$ срабатывает, самоудерживается, контактом $РП.2$ замыкает цепь включающей обмотки электромагнита вентиля смазки $ЭМВС_{вкл.}$, контактом $РП.3$ подготавливает цепь обмотки контактора включения выключателя $B1$, контактом $РП.4$ размыкает цепь реле остановки PO , контактом $РП.5$ включает АГП или дополнительно для страховки проверяет его включенное состояние. Кроме того, реле $РП$ производит включение системы охлаждения компенсатора (на схеме не показано).

После того, как установится нормальная циркуляция охлаждающей воды и масла в системе смазки подшипников, замыкаются контакты $PCB.1$ и $PCM.1$ струйных реле движения воды и масла. Срабатывает промежуточное реле контроля охлаждения и смазки $PKOC$ и замыкает цепь включения выключателя $B1$. Выключатель включается и блок-контактом $B1.1$ разрывает цепь обмотки реле пуска $РП$, якорь которого отпадает с некоторой выдержкой времени. Включение шунтирующего выключателя $B2$ обеспечивается, как и в схеме рис. 4-13, при снижении тока до уставки реле PT (примерно $2I_{ном}$). После включения выключателя $B2$ от его блок-контакта $B2.3$ отключается выключатель $B1$.

Форсировка возбуждения компенсатора осуществляется контактором форсировки $KФ$. При снижении напряжения на шинах компенсатора срабатывают: минимальные реле напряжения $RН1$ и $RН2$, промежуточные

реле *РПН* и *РПФ*, контактор *КФ*. Последний своими контактами шунтирует резисторы $R_{p.v1}$ и $R_{p.v2}$ в цепи возбуждения возбудителя и подвозбудителя. Форсировка прекращается после восстановления напряжения, а также по истечении нормального времени пуска или допустимого времени форсировки, что фиксируется замыканием с выдержкой времени около 1 мин контакта *PВ.3* реле времени с микродвигателем *PВ*, после чего срабатывает реле блокировки *РПБ*.

Остановка компенсатора. Остановка компенсатора может быть нормальной и аварийной. В случае нормальной остановки командный сигнал подается на реле остановки *РО* от ключа управления либо от минимальных реле напряжения *РН1* и *РН2* с выдержкой времени реле времени *PВ1* около 10 с. Реле *РО* срабатывает, самоудерживается, разрывает цепи включения и замыкает цепи отключения выключателей *В1* и *В2*, а контактом *РО.7* подготавливает цепь питания обмотки микродвигателя реле времени. По мере снижения частоты вращения компенсатора уменьшается напряжение на возбудителе, срабатывает минимальное реле напряжения возбуждения *РНВ*, замыкает контактом *РНВ.2* цепь питания микродвигателя реле времени *PВ*, контактом *РНВ.1* подготавливает цепь обмотки отключения электромагнита вентилля смазки $\text{ЭМВС}_{\text{отк}}$.

По истечении выдержки времени (20 мин) реле времени с микродвигателем *PВ* через контакт *PВ.1* подает питание на обмотку $\text{ЭМВС}_{\text{отк}}$ и смазка маслом подшипников прекращается. Нормальная остановка компенсатора на этом заканчивается.

В аварийных условиях срабатывает релейная защита, отключая сразу выключатели и *АГП*.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите преимущества и недостатки самосинхронизации и точной синхронизации синхронных генераторов. В каких условиях применяется самосинхронизация и точная синхронизация?

2. Какие моменты действуют в генераторе при самосинхронизации? Почему необходимо подавать ток возбуждения сразу после включения генератора в сеть?

3. Нарисуйте диаграмму работы устройства автоматической самосинхронизации (рис. 4-2), используя рекомендации приложения П2.

4. Назовите преимущества и недостатки синхронизаторов с постоянным углом опережения и постоянным временем опережения.

5. Как осуществляется контроль скольжения в синхронизаторах с постоянным углом опережения и временем опережения?

6. Произведите расчет параметров точной синхронизации по данным примера 4-1 для $t_{в.в.}=0,08$, $t_{рв.}=0,3$ с, $x''_c=0,2$.

7. Назовите основные способы подачи тока возбуждения при пуске синхронного двигателя. В каких случаях и почему они применяются?

Глава пятая

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ (АПВ)

5-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Преобладающая часть аварийных отключений воздушных линий электропередачи является следствием неустойчивых повреждений. Неустойчивыми называют такие повреждения, которые самоустраиваются после снятия напряжения, т. е. после отключения линии. Обычно подобные нарушения возникают при перекрытиях изоляции из-за атмосферных перенапряжений, при «набросах» на провода, схлестывании и по другим причинам. В этом случае после обратного включения под напряжение линии, на которой произошло неустойчивое повреждение, восстанавливается нормальный режим работы энергосистемы и потребителей. Такое включение называется повторным включением, а специальные автоматические устройства, выполняющие данную операцию, — *устройствами автоматического повторного включения (АПВ)*. АПВ, после которого восстанавливается нормальный режим работы, называется *успешным*.

Устойчивые повреждения происходят на воздушных линиях значительно реже и не устраняются после ее отключения. В таких случаях повторное включение оказывается *неуспешным* и линия вновь отключается.

Автоматическое повторное включение позволяет быстро ликвидировать аварию и восстановить нормаль-

ную схему сети не только при самоустраниющихся повреждениях, но и после ложного действия релейных защит, самопроизвольного отключения выключателей или ошибочных действий персонала.

Опыт эксплуатации устройств АПВ показал, что повторное включение является одним из эффективных средств повышения надежности работы энергосистем и потребителей. Так, например, успешное действие устройств АПВ на одиночных питающих линиях позволяет быстро ликвидировать перерывы в электроснабжении и предотвратить тем самым полное нарушение питания, а следовательно, и технологического процесса потребителей. Эффективность применения АПВ также высока на линиях с двусторонним питанием, в особенности на мощных межсистемных связях, отключение которых может привести к серьезной аварии в энергосистеме. Поэтому согласно ПУЭ [16] применение АПВ является обязательным для линий всех напряжений выше 1000 В.

Успешность действия устройств АПВ воздушных линий характеризуется статистическими данными, приведенными в табл. 5-1.

Таблица 5-1

Вид АПВ	Напряжение линий, кВ	Успешность действия АПВ, %
Однократное	2—10	53,5
Двукратное	2—10	56,2
Однократное	110—330	75
Двукратное	110—330	77—80
Однократное	400—500	50

Наибольшее распространение получило однократное повторное включение. Двукратное АПВ применяется значительно реже, обычно на тупиковых линиях, когда его применение диктуется требованиями повышенной надежности электроснабжения потребителей.

Самоустраниющиеся повреждения помимо линий электропередачи часто имеют место на сборных шинах электростанций и подстанций, на трансформаторах и электрических аппаратах. В связи с этим широкое распространение получили устройства АПВ шин и трансформаторов [8], успешность действия которых также высока и составляет 60—75% [71].

Требования, предъявляемые к устройствам АПВ. Все устройства автоматического повторного включения независимо от места их установки в соответствии с ПУЭ должны удовлетворять следующим основным техническим требованиям:

1. АПВ должно происходить при всех возможных аварийных отключениях выключателя. Исключение составляет случай, когда производится включение выключателя на к. з. с последующим его отключением релейной защитой.

Пуск АПВ осуществляется одним из двух способов: *от релейной защиты*, выполняющей отключение выключателя. Ограниченность применения этого метода состоит в том, что он обеспечивает повторное включение только при аварийных отключениях от релейной защиты;

от несоответствия положения выключателя («отключен») предшествующей оперативной команде («включить»). Этот способ наиболее прост и универсален, поскольку он обеспечивает работу АПВ при любом отключении выключателя, кроме оперативного.

2. Устройства АПВ не должны работать при оперативных отключениях выключателя персоналом как вручную, так и дистанционно.

3. Схемы АПВ должны допускать возможность блокировки или «запрета» их действия в отдельных случаях. К таким случаям относится, например, запрет АПВ при действии дифференциальной или газовой защиты трансформатора, когда необходимо быстрое отключение трансформатора во избежание развития повреждения.

4. Устройства АПВ должны обеспечивать заданную кратность действия, т. е. количество последовательных повторных включений (циклов).

5. Устройства АПВ должны обеспечивать необходимое время бестоковой паузы между моментом погасания дуги в отключившемся выключателе и моментом замыкания его контактов.

С целью повышения надежности работы энергосистемы и потребителей желательно уменьшать время бестоковой паузы, что, однако, ограничивается необходимостью: деионизации среды в месте повреждения; восстановления готовности привода выключателя к работе; восстановления отключающей способности выключателя.

6. Минимальная длительность команды на включение должна быть достаточной для надежного включения выключателя.

7. Устройства АПВ, как правило, должны выполняться с автоматическим возвратом в исходное состояние по истечении определенной выдержки времени. Временем автоматического возврата устройства АПВ называется интервал времени от момента его пуска до возвращения в исходное состояние.

8. При неисправностях в устройствах АПВ последние не должны допускать многократные включения на к. з., представляющие опасность для выключателей, так как могут привести к их повреждению или даже взрыву.

Классификация устройств АПВ. Устройства АПВ можно классифицировать по основным признакам:

- по количеству циклов — АПВ однократного и многократного действия;

- по числу фаз, включаемых при АПВ, — трехфазные (ТАПВ) и однофазные (ОАПВ);

- по виду включаемого оборудования — АПВ линий, шин, трансформаторов, двигателей;

- по способу воздействия на привод выключателя — механические, встраиваемые в пружинный или грузовой привод, и электрические релейные.

Трехфазные АПВ линий с двусторонним питанием выполняются нескольких типов:

- несинхронное АПВ (НАПВ);

- быстродействующее АПВ (БАПВ);

- АПВ с ожиданием синхронизма (АПВОС);

- АПВ с улавливанием синхронизма (АПВУС);

- АПВ с самосинхронизацией синхронных генераторов, компенсаторов и двигателей (АПВС).

Особую группу составляют устройства АПВ, действующие после отключения выключателей устройствами автоматической частотной разгрузки (АЧР) и восстановления частоты — частотные АПВ (ЧАПВ). Этот вид автоматики рассматривается в гл. 7.

5-2. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УСТРОЙСТВ АПВ И РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Ускорение действия защиты при АПВ. Совместное использование устройств АПВ и релейной защиты позволяет сократить время отключения к. з. и тем самым

повысить надежность работы энергосистемы и потребителей. Достигается это путем автоматического ускорения действия релейной защиты, т. е. путем уменьшения или же полного исключения выдержки времени защиты.

В эксплуатации применяются два способа ускорения действия релейной защиты: до АПВ и после АПВ.

Ускорение до АПВ применяется для сети, состоящей из нескольких последовательно включенных участков и при наличии одностороннего питания (рис. 5-1,а). Каждый участок сети имеет селективную защиту (СЗ), например максимальную токовую. Неселективная токовая защита (НЗ) дополнительно установлена на главном участке, выключатель которого оборудован устройством АПВ однократного действия. Уставка срабатывания неселективной защиты выбирается из условия надежного охвата всех участков сети и надежной отстройки от к. з. за трансформаторами подстанций (точки К1, К2, К3).

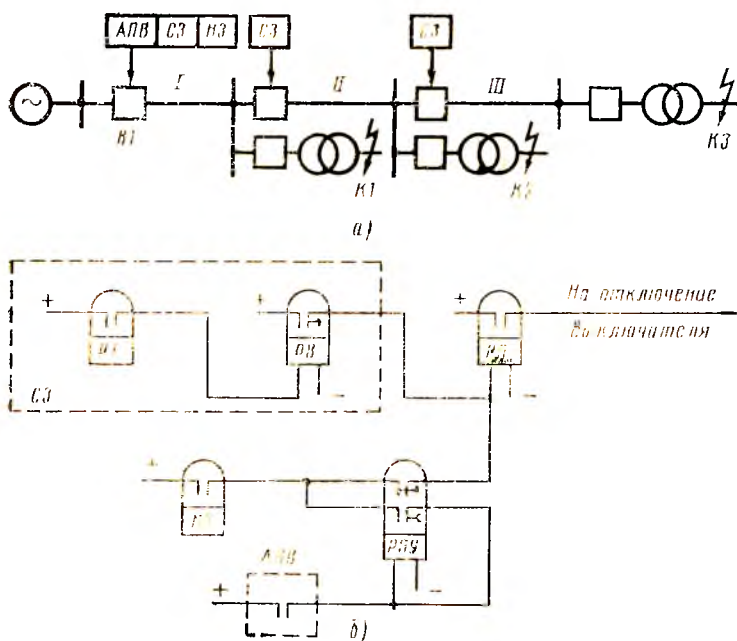


Рис. 5-1. Ускорение защиты до АПВ.

а — поясняющая схема сети; б — схема ускорения

При повреждении на любом участке действует быстродействующая неселективная защита и через размыкающий контакт промежуточного реле ускорения защиты *РПУ* (рис. 5-1,б) производит отключение выключателя *В1* головного участка. Затем при срабатывании устройства АПВ подаются команды на повторное включение выключателя и на срабатывание реле *РПУ*, которое переключает свои контакты, блокируя действия неселективной защиты.

Таким образом, повреждения, возникающие на любом участке, отключаются без выдержки времени, а неселективное действие защиты «исправляется» с помощью устройства АПВ.

После включения выключателя питание обмотки реле *РПУ* от устройства АПВ прекращается. Если повреждение устойчивое, то благодаря задержке на возврат якоря реле импульс от неселективной защиты подается через замыкающий контакт только на самодерживание реле *РПУ* до отключения поврежденного участка селективной защитой. В случае успешного АПВ через время возврата реле *РПУ* отсечка вновь вводится в работу.

Недостатком рассмотренного способа является то, что отказ устройства АПВ головного выключателя приводит к потере нагрузки всей линии.

Ускорение после АПВ заключается в том, что вначале (перед АПВ) действует селективная защита и производит отключение поврежденного участка сети, а к моменту повторного включения выключателя ее выдержка времени автоматически устраняется на некоторое время или же вводится в работу быстродействующая защита, например токовая отсечка. В случае неуспешного АПВ защита действует без выдержки времени, сохраняя при этом свою селективность. Если АПВ успешное, то через определенное время ускорение автоматически выводится и новое повреждение будет отключаться селективно.

Ускорение действия защиты после АПВ целесообразно применять во всех случаях, особенно когда на линии отсутствует быстродействующая защита или когда она защищает только часть линии.

На рис. 5-2 приведены два варианта осуществления ускорения защиты: после срабатывания устройства АПВ с использованием реле ускорения *РПУ* и после

каждого включения выключателя с использованием реле положения «отключено» РПО.

Второй способ получил преимущественное распространение.

Поочередное АПВ позволяет осуществить быстродействующую селективную защиту сети с использованием неселективных защит. Это достигается совместным поочередным действием устройств АПВ смежных участков сети и действием неселективных защит, имеющих ускорение как до АПВ, так и после АПВ.

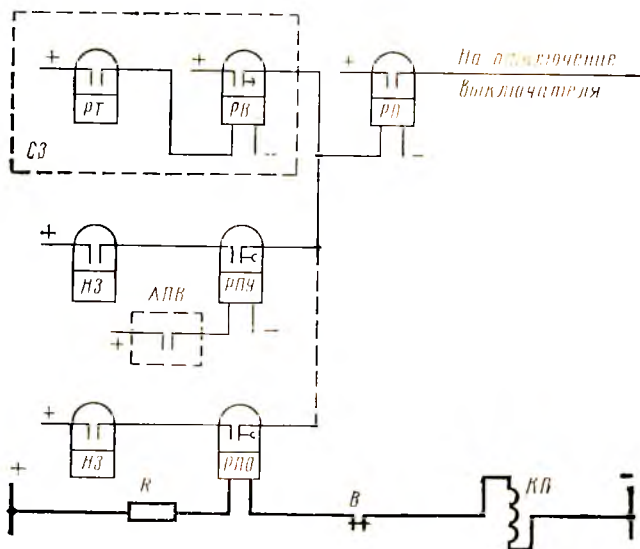


Рис. 5-2. Схемы ускорения защиты после АПВ.

Принцип поочередного АПВ рассмотрим на примере радиальной сети (рис. 5-3,а). На каждом участке сети устанавливаются: устройство АПВ однократного действия, быстродействующая неселективная (основная) защита, в зону действия которой входит защищаемый участок и часть смежного, а также селективная (резервная) защита, обеспечивающая избирательное отключение повреждения.

В качестве неселективной защиты используется обычно либо токовая отсечка, либо одноступенчатая дистанционная защита.

Выдержки времени устройств АПВ выбираются возрастающими на ступень селективности Δt по мере удаления от источника питания

$$t_{\text{IIАПВ}} = t_{\text{IАПВ}} + \Delta t = t_{\text{IАПВ}} + 2\Delta t. \quad (5-1)$$

Ступень селективности Δt должна быть достаточной для отключения выключателя неселективной защитой при неуспешном АПВ.

При к. з. в зоне действия неселективных защит смежных участков (например, в точке $K1$) кроме поврежденного участка II неселективно отключается участок I . Первым срабатывает устройство АПВ участка I , имею-

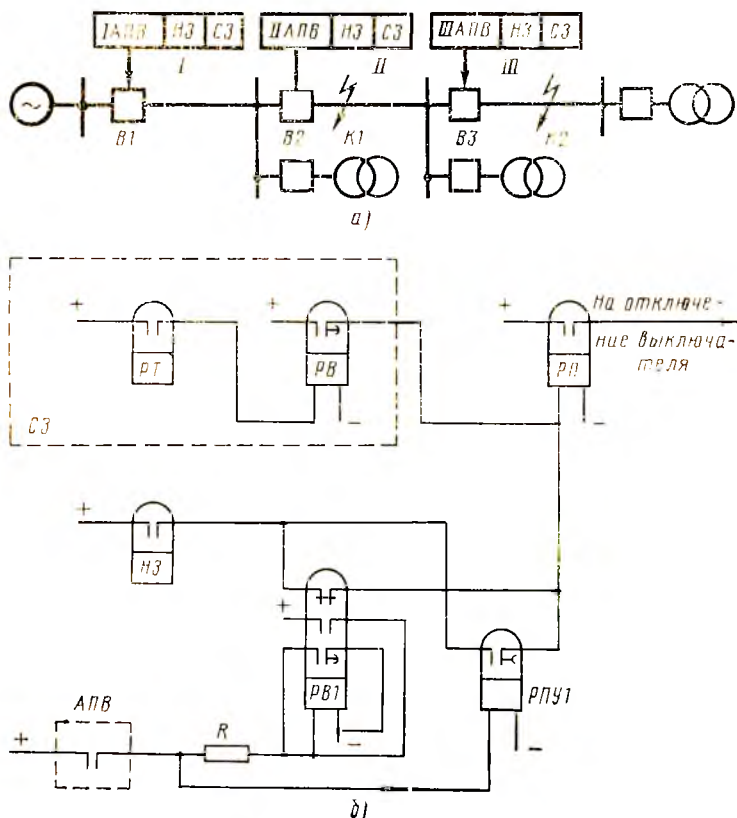


Рис. 5-3. Принцип действия поочередного АПВ.

а — схема сети; б — схема управления неселективными защитами.

шее меньшую выдержку времени, и повторно включает выключатель *B1*. В рассматриваемом случае участок *I* исправен, поэтому неселективная защита не действует, а спустя время, достаточное для отключения выключателя *B1* (в случае к. з. на участке *I*), автоматически выводится из работы. После этого срабатывает устройство АПВ участка *II*.

Обратный ввод неселективной защиты участка *I* осуществляется через время, достаточное для АПВ и последующего отключения участка *II* собственной неселективной защитой в случае устойчивого повреждения.

Таким образом, если к моменту включения выключателя *B2* устройством *II* АПВ повреждение не устранилось, то оно будет отключено селективно и без выдержки времени.

Необходимая последовательность срабатывания устройств АПВ может быть обеспечена без введения дополнительных выдержек времени по факту появления напряжения на шинах подстанции, что свидетельствует об исправности включенного участка. Благодаря этому обеспечивается сокращение длительности перерыва питания потребителей.

На рис. 5-3 приведена схема управления неселективными защитами с использованием одного реле ускорения *РПУ1* и одного реле времени *РВ1*.

В этой схеме для ускорения защиты после АПВ служит реле *РПУ1*, а для ускорения до АПВ — реле времени *РВ1*, возврат которого в исходное положение при замыкании унорного контакта определяет момент ввода в работу неселективной защиты.

АПВ с возрастающей кратностью. Совместное использование неселективных защит в сочетании с устройствами АПВ различной кратности позволяет так же, как и при поочередном АПВ, осуществить быстрое селективное отключение повреждения. С этой целью наиболее удаленный от источника питания участок *III* (рис. 5-3,а) оборудуется устройством АПВ однократного действия, участок *II* — двукратного и участок *I* — трехкратного действия.

Выбор защит производится так же, как и для поочередного АПВ. Выдержки времени одноименных циклов устройств АПВ разных участков принимаются одинаковыми.

При повреждении в зоне действия неселективных защит двух смежных участков (точка $K2$, рис. 5-3,а) происходит их отключение и одновременное повторное включение от устройств АПВ. Если повреждение устранилось, то питание участков II и III восстанавливается. Если же повреждение устойчивое, то оба участка отключаются вторично действием неселективных защит, после чего питание неповрежденного участка II восстанавливается за счет того, что кратность действия устройства АПВ этого участка больше, чем АПВ участка III.

Таким образом, по сравнению с поочередным АПВ рассмотренный способ позволяет сократить длительность перерывов питания потребителей в случае неустойчивых повреждений, но они существенно увеличиваются при устойчивых повреждениях, так как длительность второго и особенно третьего циклов АПВ значительна. Это является существенным недостатком данного способа. Кроме того, к недостаткам следует отнести также большое число операций включения выключателей на к. з., в результате чего увеличивается вероятность развития аварии при отказе какого-либо выключателя или устройства АПВ.

В связи с этим в эксплуатации рассмотренный способ применяется, как правило, с устройствами АПВ одно- и двукратного действия для защиты электропередачи из двух последовательных участков.

АПВ линий с ответвлениями. С целью удешевления строительства в энергосистемах широко практикуется сооружение понижающих подстанций с автоматическими отделителями (АО) и короткозамыкателями (КЗ) на стороне высшего напряжения вместо дорогостоящих высоковольтных выключателей. На таких подстанциях обычно применяется переменный оперативный ток [69]. Характерная схема сети с подстанциями на ответвлениях приведена на рис. 5-4.

Для ликвидации повреждений трансформаторов целесообразно использовать релейную защиту в сочетании с АПВ при определенной последовательности в работе отделителей и короткозамыкателей.

При возникновении повреждения в силовом трансформаторе его релейная защита $P3T$ действует на отключение выключателя на стороне низшего напряжения и на включение короткозамыкателя $K3$. Последняя операция необходима, потому что защита линии $P3Л$ мо-

жет оказаться нечувствительной к повреждениям в силовом трансформаторе. Включение короткозамыкателя приводит к созданию искусственного к. з. на выводах высшего напряжения трансформатора и вызывает срабатывание защиты линии, если ток повреждения был недостаточен для ее срабатывания до включения короткозамыкателя.

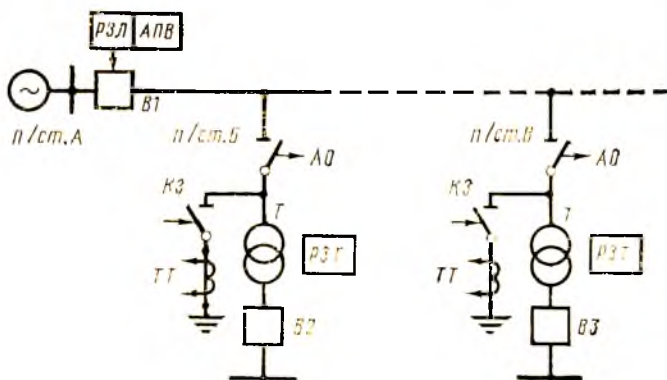


Рис. 5-4. Схема сети с подстанциями на ответвлениях.

Для передачи отключающего импульса от защиты трансформатора на питающую подстанцию могут использоваться специальные каналы связи, например контрольные или телефонные кабели, а также высокочастотные каналы устройств телеотключения (ВЧТО).

После отключения выключателя В1 на питающей подстанции А запускается установленное на нем устройство АПВ однократного действия. В период бестоковой паузы до АПВ производится отключение отделителя поврежденного присоединения с контролем отсутствия тока в цепи включенного короткозамыкателя. С этой целью обычно используется минимальное реле тока, подключаемое к трансформатору тока ТТ в цепи короткозамыкателя. После отключения отделителя устройство АПВ восстанавливает питание других потребителей.

Дополнительно повысить надежность электроснабжения потребителей можно, применяя секционирование линии, которое осуществляется либо выключателем, либо отделителем. Секционирование линии позволяет сохранить питание части подстанций при устойчивых повреждениях на линии.

5-3. ТРЕХФАЗНОЕ АПВ ЛИНИЙ С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Для осуществления повторного включения преимущество получили устройства АПВ с пуском от несоответствия положения выключателя («отключен») предшествующей оперативной команде («включить»).

Как правило, устройства АПВ выполняются на основе комплектных реле типов РПВ-58, РПВ-258 и РПВ-358 [70]. Реле типов РПВ-58 и РПВ-258 применяются в установках с постоянным оперативным током и обеспечивают соответственно однократное и двукратное повторное включение. Реле типа РПВ-358 применяется для осуществления однократного АПВ в установках с переменным оперативным током.

Для комплектных распределительных установок (КРУ) 3—10,5 кВ разработан на основе выпускаемых логических элементов серии «Логика Т» комплекс полупроводниковых устройств защиты и автоматики, включающий в себя также устройство АПВ.

Устройство АПВ на логических элементах. Функциональная схема устройства однократного АПВ на логических элементах (модуля АПВ) приведена на рис. 5-5. Следует отметить, что данная функциональная схема справедлива в принципе для любого устройства АПВ.

Подготовка устройства АПВ к работе происходит следующим образом. После включения выключателя от реле положения «включено» РПВ подается сигнал на

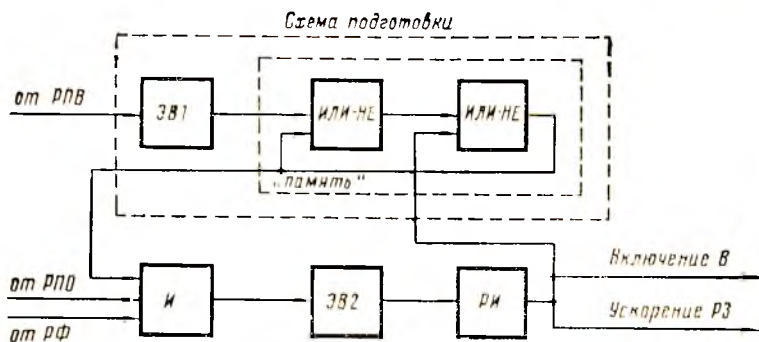


Рис. 5-5. Функциональная схема устройства однократного АПВ на логических элементах.

вход элемента времени $\mathcal{B}1$, определяющего время готовности АПВ к действию. С выхода элемента времени $\mathcal{B}1$ сигнал поступает на вход элемента «память», запоминается им и подается далее на вход схемы $\mathcal{H}$.

Пуск АПВ от «несоответствия» осуществляется при совпадении на входе элемента $\mathcal{H}$ трех сигналов: от реле положения выключателя «отключено» РПО, от реле фиксации РФ команды «включить» и от схемы подготовки устройства АПВ к работе, что имеет место при аварийных или самопроизвольных отключениях выключателя. В этом случае сигнал с выхода схемы $\mathcal{H}$ с выдержкой времени, определяющей время срабатывания устройства АПВ (элемент времени $\mathcal{B}2$), подается через расширитель импульсов РИ в цепь включения выключателя $\mathcal{B}$ и последний включается. Этот же сигнал производит сброс «памяти». В модуле АПВ предусмотрен также выход в схему ускорения действия защиты РЗ.

С помощью расширителя импульсов РИ задерживается исчезновение сигнала на выходе модуля после сброса «памяти» узла подготовки АПВ на время, необходимое для надежного включения выключателя и работы схемы ускорения защиты.

В случае успешного АПВ схема автоматически возвращается в исходное состояние. При неуспешном АПВ устройство обеспечивает однократность действия, так как время, в течение которого выключатель находится во включенном состоянии, недостаточно для срабатывания элемента $\mathcal{B}1$ и подготовки устройства к повторному действию.

Отметим, что с помощью описанного выше модуля АПВ может быть осуществлено также и двукратное АПВ. Это достигается применением двух модулей однократного АПВ.

Устройство однократного АПВ с реле РПВ-58. Принцип работы устройства рассмотрим на примере АПВ линии с масляным выключателем. Схема устройства АПВ и цепей управления выключателем приведена на рис. 5-6.

Дистанционное управление выключателем осуществляется ключом управления КУ типа КВФ или КСВФ с фиксацией положения. Положения ключа управления обозначаются следующим образом: $\mathcal{B}_2$ — включить, $\mathcal{B}$ — включено, $\mathcal{O}_2$ — отключить, $\mathcal{O}$ — отключено. В схему

При замыкании контакта *РПО* срабатывает реле времени *РВ1*, подключающее контактом *РВ1.2* конденсатор *С* к обмотке промежуточного реле *РП1*. Последнее, сработав, замыкает цепь обмотки контактора *КП*, включающего выключатель *В*. В случае успешного АПВ работа схемы прекращается и схема подготавливается к новому действию.

Если АПВ неуспешно, то выключатель вновь отключается релейной защитой и последующего его включения не происходит ввиду того, что к моменту вторичного отключения *В* конденсатор не успевает зарядиться до напряжения срабатывания реле *РП1*. Этим обеспечивается однократность действия АПВ. Время автоматического возврата устройства АПВ определяется временем заряда конденсатора

$$t_{\text{зар}} = R_3 C \ln \frac{U}{U - U_{\text{ср}}}, \quad (5-2)$$

где *U* — напряжение питания; *U_{ср}* — напряжение срабатывания реле *РП1*.

При оперативном отключении АПВ не работает, так как не образуется цепи «несоответствия» вследствие размыкания контакта *КУ.1* ключа управления. Конденсатор разряжается постепенно через резистор *R_з*, контакт *РПО* и обмотку реле времени *РВ1*. Поэтому во время последующего включения выключателя на к. з. АПВ не происходит.

Кроме того, с целью быстрого разряда конденсатора при оперативном отключении выключателя контакты ключа управления, замкнутые в положении «отключить» и «отключено», могут быть включены в цепь его разряда (между зажимом 8 реле РПВ-58 и минусом источника оперативного тока). Аналогично осуществляется запрет действия АПВ в необходимых случаях.

Устройство однократного АПВ с реле РПВ-358 применяется на подстанциях с переменным оперативным током и выключателями, оборудованными электромагнитными приводами. Получение оперативного тока на таких подстанциях обеспечивается при помощи специальной аппаратуры: блоков питания, выпрямительных установок и т. п., питающихся от основной сети через трансформаторы напряжения, тока или собственных нужд [69].

Реле РПВ-358 отличается от реле РПВ-58 наличием диода в цепи заряда конденсатора *С* (между зажимом 7

и резистором R_3). Диод предназначен для предотвращения разряда конденсатора C при аварийном снижении напряжения на выходе блока питания, что имеет место при близких к. з.

Чтобы не происходило АПВ при оперативном включении выключателя на к. з. в результате длительного сохранения заряда конденсатора C , необходимо производить его разряд при оперативном отключении выключателя.

Устройство двукратного АПВ с реле РПВ-258. Схема устройства двукратного АПВ и цепей управления масляным выключателем, для которого предусмотрено телеуправление, приведена на рис. 5-7.

На подстанциях с телеуправлением применяются ключи управления типа КВ или МКВ без фиксации положения и имеющие автоматический возврат в нейтральное положение после подачи команды «включить» и «отключить». При этом в цепи пуска устройства АПВ предусматривается специальное двухпозиционное реле фиксации команд РФ. Контакт этого реле РФ.3, включенный в цепь «несоответствия», замыкается после включения выключателя и срабатывания реле положения «включено» РПВ, а размыкается при отключении выключателя от ключа управления, или от устройства телеуправления.

Отличие реле РПВ-258 от ранее рассмотренного реле РПВ-58 состоит в том, что оно содержит два RC-кон-

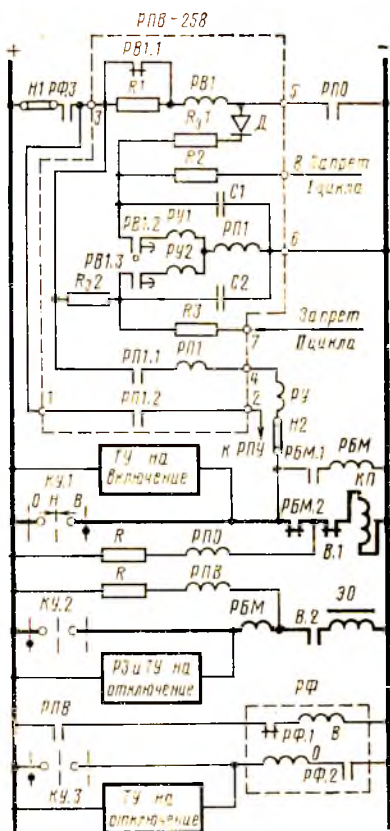


Рис. 5-7. Схема устройства двукратного АПВ с реле РПВ-258.

тура, обеспечивающих двукратность действия, и дополнительный проскальзывающий контакт у реле времени.

Повторное включение в первом цикле происходит при замыкании временно замыкающего контакта *PВ1.2* реле времени. Реле *РП1* в этом случае срабатывает за счет разряда конденсатора *С1*. Автоматическое повторное включение во втором цикле (при неуспешном первом) происходит лишь при замыкании упорного контакта *PВ1.3* реле времени и разряде конденсатора *С2* на обмотку реле *РП1*.

Особенности выполнения устройств АПВ воздушными выключателями. Нормальная работа воздушного выключателя обеспечивается при определенном давлении сжатого воздуха в его резервуарах. Поэтому в устройстве АПВ дополнительно вводится контроль давления, осуществляемый с помощью электроконтактных манометров. При давлении, недостаточном для выполнения операций наиболее тяжелого случая — неуспешного АПВ, производится запрет действия устройства АПВ.

Воздушные выключатели нормального исполнения снабжаются резервуарами, емкость которых достаточна для работы в цикле неуспешного однократного АПВ. При осуществлении двукратного АПВ необходимо увеличивать запас воздуха путем установки дополнительных резервуаров. Если дополнительные резервуары отсутствуют, то двукратное АПВ выполняется с ожиданием восстановления давления до необходимого значения после неуспешного повторного включения в первом цикле.

На рис. 5-8 приведены варианты схем пуска устройств АПВ воздушных выключателей с контролем давления.

В схеме, выполненной по первому варианту (рис. 5-8,а), пуск устройства АПВ обеспечивается в том случае, если при первом отключении выключателя (перед АПВ) давление было выше уставки электроконтактного манометра *КМ*. При замыкании блок-контакта электромагнита отключения *ЭО* срабатывает промежуточное реле *РПД*, самоудерживается через блок-контакт электромагнита включения *ЭВ* и разрешает устройству АПВ произвести одно включение выключателя. При включении выключателя реле *РПД* возвращается в исходное состояние, так как размыкается блок-контакт электромагнита включения *ЭВ*.

В схеме по второму варианту (рис. 5-8,б) пуск устройства АПВ обеспечивается не только при наличии в данный момент необходимого давления, но и после восстановления давления, что является основным преимуществом рассматриваемой схемы по сравнению с предыдущей.

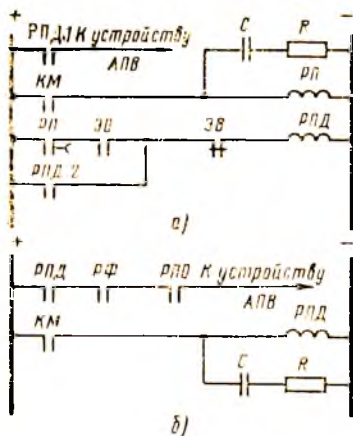


Рис. 5-8. Схемы пуска устройств АПВ с контролем давления для воздушных выключателей.

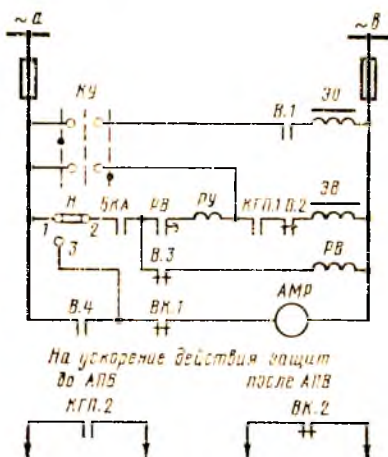


Рис. 5-9. Схема электрического устройства однократного АПВ для выключателя с пружинным или грузовым приводом.

Устройства АПВ выключателями с пружинными и грузовыми приводами. Повторное включение выключателей с пружинными и грузовыми приводами производится за счет использования механической энергии предварительно заведенной пружины или поднятого груза. Подъем груза или завод пружины осуществляется вручную при включении выключателя или же автоматически с помощью специального электродвигателя с редуктором (автоматическим моторным редуктором — АМР). В первом случае для возврата устройства АПВ в исходное состояние необходимо после включения выключателя вновь вручную завести пружину или поднять груз. Готовность к действию устройства АПВ во втором случае определяется временем автоматического завода пружины или подъема груза.

Электрические устройства АПВ выключателями с пружинными и грузовыми приводами выполняются на переменном оперативном токе. Применявшиеся ранее механические устройства АПВ, встраиваемые в привод выключателя, ввиду своей малой надежности в настоящее время заменяются электрическими.

На рис. 5-9 приведена схема электрического устройства АПВ однократного действия с автоматическим возвратом в исходное состояние для выключателя с пружинным или грузовым приводом.

Повторное включение выключателя произойдет только тогда, когда будут замкнуты: контакт «готовности привода» *КГП.1* (пружины заведены, груз поднят) и аварийный блок-контакт *БКА*, который замыкается вслед за любым включением выключателя, а размыкается только при его отключении вручную или через электромагнит отключения ЭО. При аварийном отключении выключателя вследствие срабатывания встроенных в его привод реле защиты блок-контакт *БКА* остается замкнутым, поэтому срабатывает реле времени и спустя установленную выдержку времени производит повторное включение выключателя.

Для обеспечения однократности действия устройства АПВ в цепь автоматического моторного редуктора *АМР* включен замыкающий блок-контакт выключателя *В.4*, разрешающий завод пружин или поднятие груза только после включения выключателя. Подготовка привода к работе после неуспешного АПВ производится переключением накладки *Н* в положение 1—3.

Для ускорения действия защиты могут быть использованы специальные контакты привода. Так, например, для ускорения защиты до АПВ используется контакт «готовности привода» *КГП.2*, замкнутый при заведенных пружинах или поднятом грузе, а для ускорения после АПВ — контакт конечного выключателя *ВК.2*, который так же, как и *ВК.1*, замыкается при включении выключателя и размыкается после завода пружины или поднятия груза.

Расчет уставок устройств трехфазного АПВ линий с односторонним питанием

Расчет времени срабатывания устройств однократного АПВ. Ввиду того что современные выключатели допускают в первом цикле АПВ немедленное включение

на к. з., время срабатывания устройств однократного АПВ определяется, как правило, только по двум условиям (см. § 5-1).

Согласование с временем, необходимым для деионизации среды в месте повреждения,

$$t_{\text{АПВ}} \geq k_n (t_{\text{д.с}} - t_{\text{в.в}}), \quad (5-3)$$

где $t_{\text{в.в}}$ — время включения выключателя; $k_n = 1,2 \div 1,3$ — коэффициент надежности.

Время деионизации среды $t_{\text{д.с}}$ зависит от рабочего напряжения, абсолютного значения и длительности протекания тока к. з., а также от метеорологических условий и составляет ориентировочно: 0,07—0,08 с для линий напряжением до 35 кВ, 0,15—0,3 с для линий 110—220 кВ и 0,35—0,4 с для линий 330—500 кВ [76].

Согласование с временем готовности привода к включению выключателя

$$t_{\text{АПВ}} \geq k_n t_{\text{г.п}} \quad (5-4)$$

Время готовности привода к включению выключателя $t_{\text{г.п}}$ зависит от конструкции привода и изменяется в пределах 0,2—1,0 с для разных типов [7]. Коэффициент надежности k_n принимается так же, как и в (5-3), равным 1,2—1,3.

Из двух полученных значений $t_{\text{АПВ}}$ к установке принимается наибольшее. В отдельных случаях, например на линиях распределительной сети, время срабатывания устройств АПВ может быть увеличено до 2—3 с, а иногда до 5 с, что повышает успешность действия АПВ.

Расчет времени срабатывания устройств двукратного АПВ. Время срабатывания устройства АПВ в первом цикле $t_{1\text{АПВ}}$ определяется по условиям (5-3) и (5-4).

Поскольку условия работы выключателей при многократных отключениях токов к. з. утяжеляются, сохранение их отключающей способности гарантируется в тех случаях, когда продолжительность интервалов между отключениями к. з. больше допустимых для данного выключателя. Поэтому выдержка времени второго цикла АПВ определяется требованиями испытательных циклов и согласуется с временем восстановления отключающей способности выключателя $t_{\text{в.о.с}}$ после отключения к. з. в предшествующем первом цикле

$$t_{2\text{АПВ}} \geq t_{\text{в.о.с}} \quad (5-5)$$

Расчет времени возврата АПВ. Выдержка времени на возврат устройства АПВ $t_{\text{в}}$ также выбирается с учетом восстановления отключающей способности выключателя и определяется допустимостью работы выключателя в последующих циклах после успешного АПВ. Так, для однократного АПВ

$$t_{\text{в}} \geq t_{\text{в.о.с.}} \quad (5-6)$$

5-4. ТРЕХФАЗНОЕ АПВ ЛИНИЙ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Общие сведения. Выполнение трехфазного АПВ линий с двусторонним питанием имеет ряд особенностей, обусловленных наличием двух источников питания по концам линии и возможностью нарушения их синхронной параллельной работы после отключения линии.

Для ликвидации неустойчивого повреждения и деионизации среды в месте повреждения на линии с двусторонним питанием необходимо отключать ее с обеих сторон. Следовательно, устройства АПВ должны устанавливаться по обоим концам линии.

Считается, что синхронизм не нарушается при наличии между рассматриваемыми источниками питания трех и более связей, имеющих достаточную пропускную способность, одновременное отключение которых маловероятно. Отключение одной линии связи не вызывает существенного нарушения режима работы энергосистемы, а повторное включение сопровождается незначительными толчками уравнительного тока и мощности. Поэтому в таких случаях допускается применение устройств АПВ тех же типов, что и для линий с односторонним питанием.

При этом время срабатывания устройств АПВ выбирается дополнительно с учетом времени отключения к. з. с противоположного конца линии

$$t_{\text{АПВ}} = t_{\text{р.з2}} + t_{\text{о.в2}} - t_{\text{р.з1}} - t_{\text{о.в1}} - t_{\text{в.в1}} + t_{\text{д.с}} + t_{\text{зап}}, \quad (5-7)$$

где $t_{\text{р.з1}}$, $t_{\text{р.з2}}$ — соответственно минимальное и максимальное времена действия защит на рассматриваемом и противоположном концах линии; $t_{\text{о.в1}}$, $t_{\text{о.в2}}$ — времена отключения выключателей на обоих концах линии; $t_{\text{в.в1}}$ — время включения выключателя на рассматриваемом конце линии; $t_{\text{д.с}}$ — время деионизации среды; $t_{\text{зап}}$ — время запаса.

Обычно во избежание двукратного включения на устойчивое к. з. от двух устройств АПВ, расположенных по концам линии, производится сначала ее опробование путем включения с одной стороны (*АПВ с контролем отсутствия напряжения*). Если напряжение на линии восстановилось, т. е. повреждение устранено, действует второй комплект АПВ (*АПВ с контролем наличия напряжения*). С этой целью в цепи пуска устройств АПВ дополнительно вводятся контакты соответствующих реле напряжения, уставки которых выбираются по условиям:

для минимального реле напряжения, контролирующего отсутствие напряжения на линии,

$$U_{\text{ср}} \leq (0,4 \div 0,5) U_{\text{ном}}; \quad (5-8)$$

для максимального реле напряжения, контролирующего наличие напряжения на линии,

$$U_{\text{ср}} \geq (0,7 \div 0,8) U_{\text{ном}}. \quad (5-9)$$

Для устройств АПВ, использующих контроль наличия напряжения на линии, условие (5-7) принимает вид:

$$t_{\text{АПВ}} = t_{\text{р.з2}} + t_{\text{о.в2}} - t_{\text{р.з1}} - t_{\text{о.в1}} + t_{\text{зам}} \quad (5-10)$$

В тех случаях, когда синхронизм нарушается, например при отключении одиночных транзитных линий либо при отключении транзитных линий, имеющих параллельные связи, но недостаточной пропускной способности, повторное включение происходит несинхронно, а в генераторах возникают значительные токи и электромагнитные моменты, представляющие опасность для их механической прочности. Кроме того, после несинхронного включения может возникнуть в зависимости от скольжения более или менее длительный асинхронный режим, сопровождающийся резким снижением напряжения (особенно вблизи электрического центра качаний), что может привести к серьезному расстройству в работе отдельных потребителей и энергосистемы в целом.

На таких линиях применяются в зависимости от конкретных условий различные типы устройств АПВ (см. § 5-1): несинхронное (НАПВ), быстродействующее (БАПВ), с ожиданием синхронизма (АПВОС), с улавливанием синхронизма (АПВУС), с самосинхронизацией синхронных генераторов, компенсаторов и двигателей (АПВС). Возможность применения устройства того или

ного типа должна проверяться в каждом конкретном случае по специальным расчетным критериям допустимости, а также с учетом технико-экономической целесообразности.

Рассмотрим основные принципы построения устройств АПВ линий с двусторонним питанием и способы их реализации.

Несинхронное АПВ. Повторное включение линии электропередачи при НАПВ осуществляется без предварительной проверки синхронизма и происходит с произвольными углами между э. д. с. разделившихся источников питания. В таких условиях в синхронных машинах и трансформаторах могут возникать значительные электродинамические усилия, превышающие предельно допустимые.

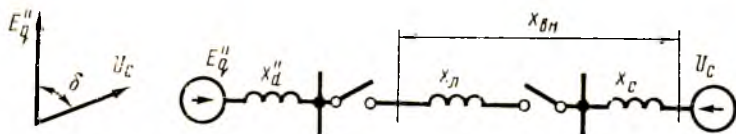


Рис. 5-10. Схема замещения и векторная диаграмма простой электропередачи.

В соответствии с ГОСТ конструкции всех синхронных машин рассчитываются таким образом, чтобы они выдерживали трехфазные к. з. на выводах при номинальной частоте вращения и напряжении, равном 1,05 номинального. Исходя из этого, допустимость применения НАПВ для синхронных машин определяется следующими условиями:

$$I_{нс} / I_{к.з.} \leq 1; \quad (5-11)$$

$$M_{нс} / M_{к.з.} \leq 1, \quad (5-12)$$

где $I_{нс}$, $I_{к.з.}$, $M_{нс}$, $M_{к.з.}$ — максимальные значения токов и электромагнитных моментов при несинхронном включении в наиболее неблагоприятный момент времени и при к. з. в указанных выше условиях соответственно.

Рассмотрим в качестве примера простую схему, приведенную на рис. 5-10.

Максимальный ток несинхронного включения имеет место при угле между э. д. с. генератора и напряжением системы $\delta=180^\circ$ и равен:

$$I_{нс} = \frac{E''_q + U_c}{x''_d + x_{вн}}, \quad (5-13)$$

где $x_{вн} = x_d + x_c$.

Значение тока трехфазного к. з. на выводах генератора

$$I_{к.з.} = E''_q / x''_d. \quad (5-14)$$

Расчет токов и моментов при несинхронном включении проводится для наиболее тяжелого случая, имеющего место при НАПВ, а именно: значение E''_q , приведенное к номинальной частоте, принимается равным 1,5 для гидрогенераторов и 1,2 для турбогенераторов. Это обусловлено тем, что при отключении линии происходит сброс нагрузки генератора и как следствие увеличение частоты вращения ротора. Значение напряжения на шинах энергосистемы принимается равным $U_c=1$.

В связи с вышеизложенным условие допустимости НАПВ по току (5-11):

для турбогенераторов

$$x_{вн} / x''_d \geq 1,1; \quad (5-15)$$

для гидрогенераторов

$$x_{вн} / x''_d \geq 1,38. \quad (5-16)$$

Значения моментов $M_{нс}$ и $M_{к.з.}$ могут быть вычислены по методике, приведенной в [72]. Расчеты показывают, что максимум электромагнитного момента имеет место при несинхронном включении с углом $\delta \approx 120^\circ$ для турбогенераторов и $\delta \approx 135^\circ$ для гидрогенераторов. При указанных значениях углов δ условие допустимости применения НАПВ по моменту на валу (5-12) можно записать в следующем виде:

для турбогенераторов

$$x_{вн} / x''_d \geq 1,6; \quad (5-17)$$

для гидрогенераторов

$$x_{вн} / x''_d \geq 2,4. \quad (5-18)$$

Сопоставление двух условий допустимости НАПВ показывает, что определяющим является ограничение по моменту.

Поскольку существует однозначная зависимость между током несинхронного включения с углом $\delta=180^\circ$ и значением максимального электромагнитного момента, а также ввиду сложности расчета моментов при разветвленной сети, его заменяют расчетами по току несинхронного включения.

Приняты следующие предельные кратности тока несинхронного включения [74, 75]:

для турбогенераторов с косвенным охлаждением и гидрогенераторов с успокоительными контурами

$$I_{нс}/I_{ном} \leq 0,625/x''_d; \quad (5-19)$$

для турбогенераторов с непосредственным охлаждением и гидрогенераторов без успокоительных контуров

$$I_{нс}/I_{ном} \leq 3; \quad (5-20)$$

для синхронных компенсаторов

$$I_{нс}/I_{ном} \leq 0,84/x''_d, \quad (5-21)$$

где периодическая составляющая тока несинхронного включения $I_{нс}$ определяется для всех генераторов и компенсаторов при $E''_q=1,05$.

Если отклонения напряжения и частоты от номинального значения заведомо не превышают $\pm 5\%$, то значения допустимых токов при НАПВ могут быть увеличены на 35% для гидрогенераторов с успокоительными контурами и на 13% для турбогенераторов с косвенным охлаждением.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы рассчитываются на ток трехфазного к. з. на выводах с учетом реактивного сопротивления питающей сети, заданного согласно ГОСТ 11667-75 мощностями к. з. $S_{к.з}$ этой сети, приведенными в табл. 5-2.

Тогда допустимый ток несинхронного включения для трансформаторов определяется по условию:

$$I_{нс} \leq k_T I_{к.з} = k_T \frac{I_{ном}}{u_k + \frac{S_{ном}}{S_{к.з}}} \frac{U_{ном}}{U_{ном.отв}}, \quad (5-22)$$

где u_k — напряжение к. з. трансформатора, отн. ед.; $S_{ном}$, $I_{ном}$, $U_{ном}$ — номинальные мощность трансформатора, МВ·А, ток, кА, напряжение, кВ; $U_{ном.отв}$ — номинальное напряжение установленного ответвления обмотки, кВ; $S_{к.з}$ — мощность к. з. питающей сети, МВ·А;

k_T — коэффициент, учитывающий возможность повышения э. д. с. в условиях НАПВ, принимает следующие значения:

E''	...	1,05	1,2	1,5
k_T	...	1	0,95	0,85

Отметим, что условие (5-22) справедливо и для трех-обмоточных трансформаторов и автотрансформаторов. В этом случае расчет допустимого тока несинхронного включения выполняется для соответствующей обмотки.

На значения токов, проходящих при НАПВ в генераторах отделившейся электростанции или части энергосистемы, оказывает влияние местная нагрузка. Если ее не учитывать, это приведет к получению завышенных кратностей тока несинхронного включения, которые могут превысить предельно допустимые.

Таблица 5-2

U , кВ	6—10	35	110	150	220	330	500	750
$S_{к.з.}$, МВ·А	500	2500	15 000	20 000	25 000	35 000	50 000	75 000

Порядок расчета допустимости применения НАПВ дается в приведенном ниже примере 5-1.

Другим важным вопросом, определяющим целесообразность применения НАПВ, является обеспечение результирующей динамической устойчивости. Возникающий в результате большого возмущения в энергосистеме асинхронный режим должен завершиться быстрой ресинхронизацией (восстановлением синхронизма); при этом предполагается, что сохраняется также устойчивость основных нагрузок.

Опыт применения НАПВ показывает, что в большинстве случаев ресинхронизация происходит успешно и практически без асинхронного режима или же через несколько циклов асинхронного хода. При этом условия ресинхронизации наиболее благоприятны для энергосистем с преобладанием турбогенераторов ввиду значительных асинхронных моментов и большого быстродействия регуляторов частоты вращения паровых турбин. Наименее благоприятные условия для восстановления синхронизма имеют место при НАПВ слабых связей между источниками, не имеющими вращающегося резерва мощности.

Если же после НАПВ ресинхронизация не может быть обеспечена или недопустимо затягивается, необходимо предусматривать специальные мероприятия, в противном случае применение НАПВ нецелесообразно.

Поскольку повторное включение при НАПВ производится без проверки синхронизма, то устройства НАПВ наиболее просты и надежны в эксплуатации, благодаря чему получили широкое распространение. Выполняются они аналогично устройствам АПВ линий с односторонним питанием.

Применение НАПВ требует принятия специальных мер для предотвращения неправильной работы устройств релейной защиты под влиянием толчка тока несинхронного включения и в процессе асинхронного хода [77].

Пример 5-1. Определить допустимость применения НАПВ на линии связи между ТЭС и ГЭС напряжением 110 кВ, длиной 40 км (рис. 5-11).

Турбогенератор ТЭС имеет косвенное охлаждение обмоток статора, гидрогенераторы ГЭС с успокоительными контурами. Напряжение короткого замыкания трансформатора связи ТС

$$u_{к\text{ в с}}=17\%, \quad u_{к\text{ в н}}=10,5\%, \quad u_{к\text{ с н}}=6\%,$$

откуда $u_{к\text{ в}}=10,75\%$, $u_{к\text{ с}}=6,25\%$, $u_{к\text{ н}}\approx 0$. Остальные параметры сети указаны на рис. 5-11,а.

Составляем схему замещения в сверхпереходном режиме (рис. 5-11,б). За базисную мощность принята $S_б=100\text{ МВ}\cdot\text{А}$, коэффициенты трансформации учтены приближенно.

Электродвижущие силы всех генераторов и синхронных компенсаторов, расположенных по одну сторону линии, принимаются одинаковыми, совпадающими по фазе и равными 1,05, а э. д. с. эквивалентных источников по концам линии сдвинуты друг относительно друга на угол 180° . Электродвижущая сила эквивалентной нагрузки $E''_{\text{н}}=0,9$, а ее сопротивление $x''_{\text{н}}=0,35$ [12].

Расчет без учета нагрузки (контакт К на рис. 5-11,б разомкнут).

Приводим схему замещения к виду, показанному на рис. 5-11,в, где

$$E''_{\text{э1}}=E''_{\text{э2}}=1,05; \quad x_{\text{э1}}=0,482; \quad x_{\text{э2}}=0,147.$$

Определяем периодическую слагающую максимального тока несинхронного включения (без учета нагрузки):

$$I_{\text{нс.л}} = \frac{E''_{\text{э1}} + E''_{\text{э2}}}{x_{\text{э1}} + x_{\text{л}} + x_{\text{э2}}}; \quad (5-25)$$

$$I_{\text{нс.л}} = \frac{2,1}{x_{\Sigma}} = \frac{2,1}{0,75} = 2,8.$$

Распределяем токи по ветвям, приводя к номинальной мощности генераторов, трансформаторов и синхронного компенсатора, и

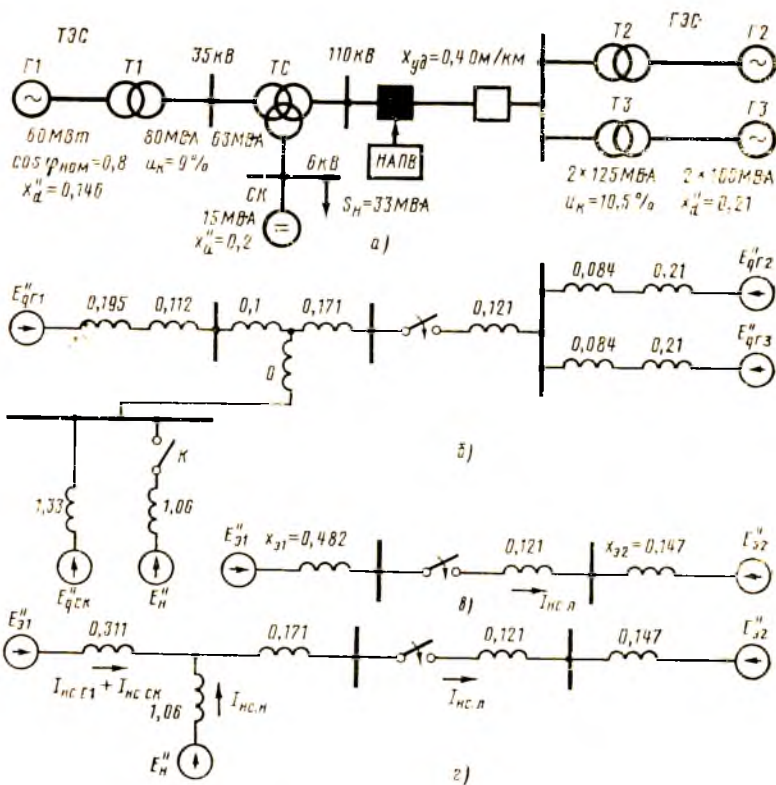


Рис. 5-11. К расчету допустимости применения НАПВ.
а — схема системы; б, в, г — схемы замещения.

сравниваем с допустимыми значениями, которые определяются по критериям (5-19) — (5-22).

Ток генератора Г1

$$\frac{I_{нс Г1}}{I_{ном}} = I_{нс.л} \frac{x_{СК}}{(x_{Г1} + x_{Т1} + x_{ТC}) + x_{СК}} \frac{S_6}{S_{нГ1}}; \quad (5-24)$$

$$\frac{I_{нс Г1}}{I_{ном}} = 2,8 \frac{1,33}{0,407 + 1,33} \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{60} = 2,7 < \frac{0,625}{0,146} = 4,28.$$

Ток синхронного компенсатора СК

$$\frac{I_{нс СК}}{I_{ном}} = 2,8 \cdot \frac{0,407}{1,33 + 0,407} \cdot \frac{100}{15} = 4,38 > \frac{0,84}{x_{dСК}''} = \frac{0,84}{0,2} = 4,2.$$

Ток гидрогенераторов Г2 и Г3

$$\frac{I_{нс Г2}}{I_{ном}} = \frac{I_{нс Г3}}{I_{ном}} = \frac{1}{2} \cdot 2,8 = 1,4 < \frac{0,625}{x''_{дГ2}} = \frac{0,625}{0,21} = 2,98$$

Ток трансформатора связи ТС

$$\frac{I_{нс ТС}}{I_{ном}} = 2,8 \cdot \frac{100}{63} = 4,44.$$

Для трансформатора связи, у которого $u_{кн}=0$, допустимый ток при НАПВ ограничивается только сопротивлением обмотки высшего напряжения, имеющей $u_{кв}=10,75\%$. При $k_T=1$, $S_{к.з}=15000$ МВ·А, $U_{ном.отв}=U_{ном}$ определяем:

$$\frac{I_{нс ТС}}{I_{ном}} = \frac{k_T}{\frac{u_{кв}}{100} + \frac{S_{н ТС}}{S_{к.з}}} = \frac{1}{0,1075 + \frac{63}{15000}} = 9 > 4,44.$$

Расчетную проверку трансформаторов, работающих в блоке с генераторами, удовлетворяющими условиям (5-19), (5-20), можно не производить, так как по ним проходят те же токи, что и в генераторах, и условие (5-22) удовлетворяется.

Таким образом, при несинхронном включении только ток в синхронном компенсаторе превышает допустимое значение. Проведем дополнительный уточненный расчет с учетом нагрузки на шинах низшего напряжения трансформатора связи ТС.

Расчет с учетом нагрузки (контакт К замкнут).

Эквивалентная э. д. с. генератора Г1, синхронного компенсатора СК и нагрузки (рис. 5-11,з)

$$\begin{aligned} E''_{э1} &= \frac{E''_{э1} x''_н + E''_н (x_{э1} - x_{ТСВ})}{x''_н + x_{э1} - x_{ТСВ}} = \\ &= \frac{1,05 \cdot 1,06 + 0,9 \cdot 0,311}{1,06 + 0,311} = 1,02. \end{aligned}$$

Сопротивление эквивалентного источника

$$x_{э1} = \frac{x''_н (x_{э1} - x_{ТСВ})}{x''_н + (x_{э1} - x_{ТСВ})} + x_{ТСВ} = \frac{1,06 \cdot 0,311}{1,06 + 0,311} + 0,171 = 0,411.$$

Ток несинхронного включения с учетом нагрузки

$$I_{нс.л} = \frac{E''_{э1} + E''_{э2}}{x_{э1} + x_л + x_{э2}} = \frac{1,02 + 1,05}{0,411 + 0,121 + 0,147} = 3,05.$$

Суммарный ток в ветви генератора Г1 и синхронного компенсатора СК

$$I_{нс Г1} + I_{нс СК} = \frac{I_{нс.л} x''_н + \Delta E}{x''_н + (x_{э1} - x_{ТСВ})} = \frac{3,05 \cdot 1,06 + 0,15}{1,06 + 0,311} = 2,46,$$

где $\Delta E = E''_{э1} - E''_н = 1,05 - 0,9 = 0,15$.

Ток синхронного компенсатора

$$\frac{I_{нс\text{ СК}}}{I_{ном}} = 2,46 \frac{0,407}{0,407 + 1,33} \frac{100}{15} = 3,86 < 4,2.$$

Ток в гидрогенераторах увеличится до $1,53 I_{ном}$, что меньше допустимого. Ток турбогенератора уменьшится за счет нагрузки.

Таким образом, допустимость применения НАПВ была доказана только при учете нагрузки.

Быстродействующее АПВ (БАПВ). При осуществлении БАПВ используется принцип предотвращения расхождения векторов э. д. с. по концам линии на значительные углы за счет сокращения времени бестоковой паузы. Повторное включение линии в отличие от НАПВ происходит с минимальной выдержкой времени, необходимой только для деионизации среды в месте повреждения. Обычно полное время цикла БАПВ не превышает 0,3—0,5 с, и угол включения ограничен относительно небольшим значением ($\delta_{вкл} < 70^\circ \div 90^\circ$). В таких условиях не возникает значительных толчков уравнительного тока и обеспечиваются более легкие условия восстановления установившегося режима. При этом определяющим ограничением, как и при НАПВ, является значение электромагнитного момента на валу генератора.

Угол включения, градус, при БАПВ можно определить из выражения [71]

$$\delta_{вкл} = \delta_{нач} + 9000 t_{БАПВ}^* \left(\frac{P_{л}}{P_{Г\Sigma 1} T_{J1} + P_{Г\Sigma 2} T_{J2}} \right), \quad (5-25)$$

где $\delta_{нач}$ — начальный угол, обусловленный нагрузкой, эл. град; $t_{БАПВ}$ — время цикла БАПВ, с; $P_{Г\Sigma 1}$, $P_{Г\Sigma 2}$ — суммарные номинальные мощности генераторов в разделившихся частях энергосистемы, МВт; T_{J1} , T_{J2} — суммарные постоянные инерции разделившихся частей, с; $P_{л}$ — мощность, передаваемая по линии до ее отключения, МВт.

Время полного цикла БАПВ определяется выражением:

$$t_{БАПВ} = t_{р.з} + t_{о.в} + t_{б.п}, \quad (5-26)$$

где $t_{р.з}$ — время действия релейной защиты; $t_{о.в}$ — время отключения выключателя; $t_{б.п}$ — время бестоковой паузы, которое, как уже отмечалось, согласуется только с временем деионизации среды.

Допустимость применения БАПВ определяется по двум условиям.

Условие сохранения динамической устойчивости

$$\delta_{\text{вкл}} \leq \delta_{\text{доп.д}}, \quad (5-27)$$

где $\delta_{\text{доп.д}}$ — допустимое значение угла по условию сохранения динамической устойчивости.

Успешное БАПВ в этом случае будет сопровождаться только затухающими синхронными качаниями.

Условие допустимости БАПВ по моменту на валу генератора:

$$\delta_{\text{вкл}} \leq \delta_{\text{доп.м}}, \quad (5-28)$$

где $\delta_{\text{доп.м}}$ — предельно допустимый угол, при котором электромагнитный момент, возникающий в генераторе, не превышает значения, соответствующего к. з. на его выводах.

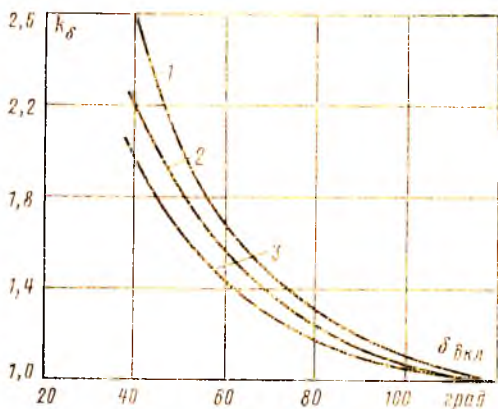


Рис. 5-12. Зависимости $k_\delta = f(\delta_{\text{вкл}})$.

1 — для турбогенераторов с косвенным охлаждением; 2 — для турбогенераторов с непосредственным охлаждением; 3 — для гидрогенераторов.

Значение предельно допустимого угла $\delta_{\text{доп.м}}$ может быть определено по специальным расчетным кривым [72, 73]. Однако в практических расчетах более удобно пользоваться уже известными основными критериями (5-19) — (5-21) и расчетными кривыми ВНИИЭ, приведенными на рис. 5-12. Для этого правая часть этих выражений умножается на коэффициент k_δ , определяемый по кривым для данного значения $\delta_{\text{вкл}}$.

Коэффициент k_δ учитывает возможность увеличения допустимой кратности тока включения для обеспечения допустимых значений электромагнитных моментов при включениях с ограниченными углами. Как видно из гра-

фика, значение k_s становится равным единице при включениях с углами $\delta=120^\circ-125^\circ$, так как при этом возникают наибольшие электромагнитные моменты, которые и являются определяющими.

Получение в цикле БАПВ малой выдержки времени становится возможным при использовании быстродействующих защит (как правило, высокочастотных) и быстродействующих воздушных выключателей на обоих концах линии. Последние благодаря особенностям своей конструкции позволяют производить быстрое отключение и повторное включение поврежденной линии либо только с помощью контактов гасительных камер (выключатели с наружным пожевым отделителем), либо с помощью быстродействия воздушнонаполненных отделителей в цикле «отключение — включение».

Время срабатывания устройств БАПВ обоих концов линии принимается одинаковым.

Ввиду малой продолжительности цикла БАПВ оно наиболее эффективно только в случае быстропроходящих неустойчивых повреждений, таких как грозовые перекрытия изоляции и т. п. Вследствие этого целесообразно использовать устройства БАПВ в сочетании с другими видами устройств АПВ.

Так, на параллельных линиях может применяться сочетание БАПВ с другим видом трехфазного АПВ. При возникновении аварии в ремонтном режиме, когда отключена одна и аварийно отключается оставшаяся в работе вторая линия, происходит полное нарушение транзитной связи и действует устройство БАПВ. Если в работе находятся обе линии, то при повреждении на одной из них действует другое устройство трехфазного АПВ.

Кроме того, применение БАПВ целесообразно на однопольных транзитных линиях, например, в сочетании с однофазным АПВ (см. § 5-5), а также на сильно загруженных транзитных линиях, имеющих слабые параллельные связи. Отключение таких линий сопровождается нарушением устойчивости и возникновением асинхронного хода по оставшимся в работе слабым связям вследствие их перегрузки. Быстрое повторное включение в этом случае предотвратит нарушение устойчивости и обеспечит восстановление параллельной работы.

АПВ с ожиданием синхронизма АПВОС осуществляет повторное включение линии либо при условии син-

хронности встречных напряжений и допустимых углов сдвига между ними, либо в условиях, близких к синхронизму. При этом устройство АПВОС дополнительно контролирует скольжение и допускает включение линии лишь при незначительной разности частот (обычно 0,1—0,2 Гц). Вследствие этого повторное включение при АПВОС не сопровождается большими возмущениями в энергосистеме.

Устройства АПВОС применяются в тех случаях, когда необходима автоматическая проверка допустимости повторного включения по условию сохранения синхронизма. Обычно данный тип устройств устанавливается на линиях, имеющих параллельные связи достаточной пропускной способности. В этих случаях АПВОС обеспечивает повторное включение отключившейся линии лишь при включенных других связях, когда возможно сохранение синхронной работы источников питания, и запрещает АПВ при возникновении аварий в ремонтном режиме (отключены параллельные связи), когда происходит нарушение синхронизма.

На рис. 5-13 приведена схема устройства АПВОС, выполненная на основе комплектного реле РПВ-58. Обычно устройства АПВОС обоих концов линии имеют одинаковые схемы, а необходимая последовательность в работе устройств обеспечивается соответствующим переключением накладок в схеме.

Включение линии с одного конца производится сначала устройством АПВ с контролем отсутствия напряжения на линии (накладка *Н* установлена). При исчезновении напряжения размыкающий контакт реле контроля напряжения на линии *РНЛ* замыкает цепь «несоответствия» и разрешает действие АПВ.

Устройство АПВ противоположного конца линии выполняется с контролем наличия напряжения на линии и его синхронности по отношению к напряжению шин (накладка *Н* должна быть снята). Контроль синхронизма встречных напряжений осуществляется с помощью специального реле контроля синхронизма *РКС* (типа РН-55 [70]), реагирующего на геометрическую разность между напряжениями линии и шин, т. е. на угол δ между ними.

В случае синхронных напряжений действие этого устройства оказывается возможным при наличии напряжения на линии (повреждение устранилось) и если угол

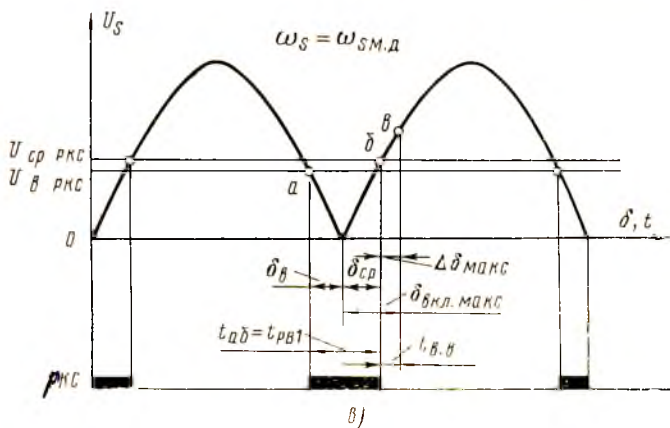
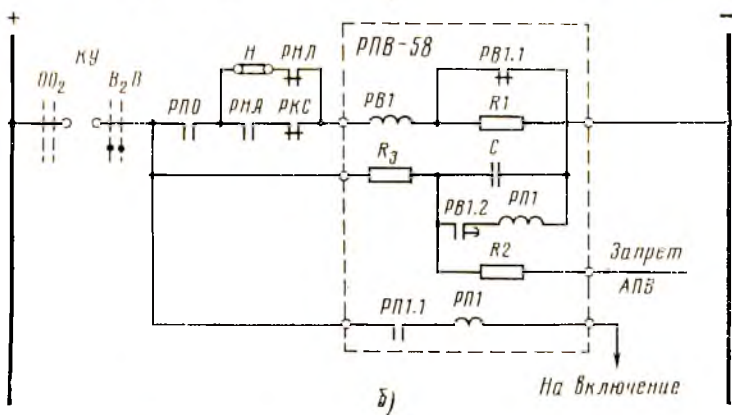
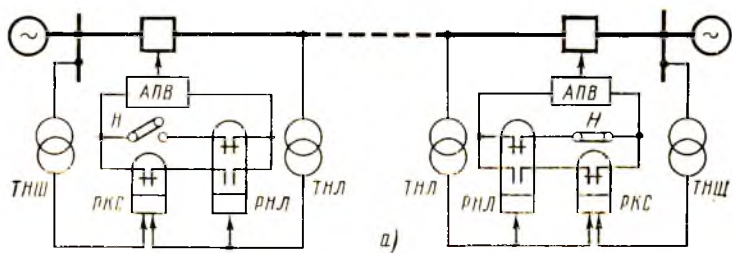


Рис. 5-13. Устройство АВВОС.

а — поясняющая схема; б — схема АВВ; в — диаграмма работы реле контроля синхронизма.

между напряжениями на линии и шинах не превышает уставки срабатывания реле $PКС$. При этом замыкаются контакты $PКС$ и $PНЛ$ в цепи несоответствия и разрешают повторное включение выключателя.

Работа устройства при наличии скольжения поясняется диаграммой рис. 5-13, в. Реле $PКС$, реагируя на угол δ между напряжениями, будет попеременно возвращаться в исходное состояние и срабатывать в точках a и b соответственно. Поэтому контакт $PКС$ замкнут на протяжении времени $t_{аб}$, когда угол δ изменяется от δ_b до $\delta_{ср}$.

Контроль скольжения осуществляется сравнением времени $t_{аб}$ с уставкой реле времени $t_{рв1}$. При больших скольжениях контакт $PКС$ будет замкнут непродолжительное время и реле времени не успеет набрать заданную выдержку времени. В отдельных случаях во избежание многократных пусков и возвратов реле времени при длительном отсутствии синхронизма может предусматриваться вывод из работы устройства АПВОС по истечении определенной выдержки времени.

Команда на включение выключателя подается тогда, когда угловая скорость скольжения не превышает максимально допустимого значения $\omega_{с.м.д.}$, при котором становится возможным срабатывание реле времени.

Если $\omega_s = \omega_{с.м.д.}$, то импульс на включение выключателя будет подан в самый последний момент нахождения контакта $PКС$ в замкнутом состоянии, т. е. при угле $\delta_{ср}$. За время включения выключателя $t_{в.в}$ угол δ изменится дополнительно на величину $\Delta\delta_{макс} = \omega_{с.м.д.} t_{в.в}$, в результате чего включение произойдет при наибольшем угле

$$\delta_{вкл.макс} = \delta_{ср} + \Delta\delta_{макс} = \delta_{ср} + \omega_{с.м.д.} t_{в.в}. \quad (5-29)$$

Если $\omega_s < \omega_{с.м.д.}$, то включение выключателя будет производиться с меньшими углами.

В связи с этим расчет параметров схемы необходимо производить таким образом, чтобы максимальный угол включения $\delta_{вкл.макс}$ не превышал допустимого значения.

Очевидно, что при угловой скорости скольжения «точного включения», равной

$$\omega_{ст.в} = \frac{\delta_b}{t_{рв1} + t_{в.в}}, \quad (5-30)$$

включение происходит при отсутствии ускорения скольжения в тот момент, когда векторы напряжений по концам линии совпадают по фазе.

Проверка допустимости применения АПВОС проводится, как и для БАПВ, по условиям (5-27) и (5-28). Учитывая, однако, специфику работы устройств АПВОС, на практике максимально допустимый угол включения принимают обычно равным $\delta_{м.л.} \leq 70 \div 75^\circ$ без предварительной проверки.

Учитывая, что $\delta_{м.л.} = \delta_{вкл. макс.}$, из (5-29) определяют значение максимально допустимой угловой скорости скольжения:

$$\omega_{м.л.} = \frac{\delta_{вкл. макс.} - \delta_{ср}}{t_{в.в.}}, \quad (5-31)$$

где $\delta_{ср}$ — угол срабатывания реле РКС.

Значение угла срабатывания $\delta_{ср}$ реле РКС должно быть больше максимального угла сдвига фаз, обусловленного нагрузкой по параллельным связям, после отключения рассматриваемой линии

$$\delta_{ср} = k_n \delta_{нагр. макс.}, \quad (5-32)$$

где k_n — коэффициент надежности, принимаемый равным 1,2—1,3.

Время срабатывания устройства АПВ с контролем отсутствия напряжения выбирается по условию (5-7). Условия (5-3) и (5-4), как правило, не являются определяющими.

Уставка срабатывания реле времени в устройстве АПВОС, обеспечивающая запрет его действия при $\omega_s > \omega_{с.м.л.}$, определяется по выражению

$$t_{РВ1} = \frac{\delta_v + \delta_{ср}}{\omega_{с.м.л.}} = \frac{\delta_v + \delta_{ср}}{\delta_{вкл. макс.} - \delta_{ср}} t_{в.в.}, \quad (5-33)$$

где δ_v — угол возврата реле РКС, $\delta_v = k_n \delta_{ср}$ (k_n — коэффициент возврата реле РКС, равный 0,8—0,85).

Напряжения срабатывания реле, контролирующих отсутствие или наличие напряжения на линии, выбираются по условиям (5-8) и (5-9).

АПВ с улавливанием синхронизма (АПВУС). Принцип действия устройства АПВ с улавливанием синхронизма заключается в том, что импульс на повторное включение линии подается в определенном диапазоне разности частот с опережением момента совпадения

напряжений по фазе, как в автоматических синхронизаторах (см. гл. 4). Благодаря этому при АПВУС осуществляется выбор или «улавливание» благоприятного момента для включения выключателя при несинхронных напряжениях по концам линии.

В отличие от АПВОС применение устройства АПВУС позволяет существенно увеличить значение допустимого скольжения и производить повторное включение при разности частот до 1,5—2,0 Гц. При этом АПВУС не сопровождается значительными толчками уравнивающего тока и происходит без последующего асинхронного режима.

Устройства АПВУС предназначены для повторного включения одиночных транзитных линий, а также линий, имеющих параллельные связи недостаточной пропускной способности.

В эксплуатации наибольшее распространение получили устройства АПВУС, действующие по принципу синхронизатора с постоянным углом опережения. Разработаны более совершенные схемы АПВУС с двумя и тремя углами опережения [8, 9, 13, 78], у которых в зависимости от скольжения изменяется уставка по углу опережения. Благодаря этому возрастает эффективность применения АПВУС.

На рис. 5-14 приведена схема устройства АПВУС с постоянным углом опережения, выполненная на основе комплектного реле типа РПВ-58. В качестве синхронизатора с постоянным углом опережения используются два минимальные реле напряжения *РН1* и *РН2*, включенные на напряжение скольжения, и реле времени *РВ1*.

Аналогично устройству АПВОС включение линии производится сначала с одного конца устройством АПВ с контролем отсутствия напряжения. Работа АПВ в этом случае осуществляется с помощью реле напряжения *РНЛ*, контролирующего отсутствие напряжения на линии, и дополнительного реле времени *РВ2* (накладка *Н* при этом установлена). После образования цепи «несоответствия» (замкнуты контакты *РПО* и *РНЛ*) пускается реле времени *РВ2* и через установленную выдержку времени замыкает свой контакт *РВ2* в цепи разряда конденсатора *С* на обмотку выходного промежуточного реле *РП1*.

Повторное включение выключателя на другом конце линии (накладка *Н* снята) разрешается органами улав-

ливания синхронизма, которые производят контроль скольжения и выбор момента для посылки импульса на включение. Принцип работы синхронизатора с постоянным углом опережения описан в гл. 4.

Сигнал на включение выключателя подается в точке δ (рис. 5-14, в), а его включение происходит через время $t_{в.в}$ при угле $\delta_{вкл}$ (точка в). Очевидно, что угол $\delta_{вкл}$ максимален при максимально допустимом скольжении, т. е. когда $\omega_s = \omega_{с.м.д.}$. В этом случае

$$\delta_{вкл.макс} = \omega_{с.м.д.} t_{в.в} - \delta_{РН2}. \quad (5-34)$$

Поэтому аналогично устройству АПВОС расчет параметров схемы АПВУС производится таким образом, чтобы максимальное значение угла включения $\delta_{вкл.макс}$ не превышало максимально допустимого значения $\delta_{м.д.}$.

Угловая скорость скольжения «точного включения», при котором обеспечивается включение выключателя при угле $\delta = 0$ (в случае отсутствия ускорения скольжения), равна для рассматриваемой схемы

$$\omega_{с.т.в} = \delta_{РН2} / t_{в.в}. \quad (5-35)$$

Расчетная проверка допустимости применения АПВУС производится, как и для БАПВ, по условиям (5-27) и (5-28). При этом принимается, что $\delta_{вкл.макс} = \delta_{м.д.}$.

Значение максимально допустимой угловой скорости скольжения определяется, исходя из диаграммы, по выражению

$$\omega_{с.м.д.} = \frac{\delta_{м.д.} + \delta_{РН2}}{t_{з.в}}, \quad (5-36)$$

где $\delta_{РН2}$ — угол срабатывания реле $РН2$, принимается обычно равным 30° .

Выдержка времени реле времени $РВ2$ в устройстве АПВ с контролем отсутствия напряжения выбирается по условию (5-10).

Выдержка времени реле $РВ1$ в устройстве АПВУС, обеспечивающая запрет его действия при $\omega_s > \omega_{с.м.д.}$, определяется по выражению

$$t_{РВ1} = \frac{\delta_{РН1} - \delta_{РН2}}{\delta_{м.д.} + \delta_{РН2}} t_{з.в.} \quad (5-37)$$

где $\delta_{РН1}$ — угол срабатывания реле $РН1$, принимаемый в пределах $60 - 90^\circ$.

Напряжение срабатывания реле, контролирующего отсутствие напряжения на линии, выбирается по условию (5-8).

АПВ с самосинхронизацией синхронных генераторов, компенсаторов и двигателей (АПВС). Последовательность действия АПВ с самосинхронизацией синхронных генераторов заключается в следующем [5, 13].

При повреждении на линии связи между энергосистемой и электростанцией действием релейной защиты отключаются:

линия со стороны энергосистемы;

генераторы на электростанции с одновременным гашением их поля (в некоторых случаях гидрогенераторы остаются включенными, а отключаются только АГП).

По истечении заданной выдержки времени устройство АПВ с контролем отсутствия напряжения выполняет повторное включение линии со стороны энергосистемы.

Если АПВ линии успешное и на шинах станции восстанавливается напряжение, производится поочередное повторное включение генераторов по способу самосинхронизации. С этой целью включаются генераторные выключатели (если они были отключены) и после снижения частоты вращения генераторов до значения, при котором скольжение не превышает 3—5%, включаются АГП.

Устройства АПВС применяются на одиночных линиях связи с гидроэлектростанциями, не имеющими значительной местной нагрузки. Однако ввиду достаточной сложности этих устройств и большой продолжительности процесса восстановления нормального режима АПВС применяются довольно редко и в тех случаях, когда не допускается применение более простого НАПВ.

Кроме того, рассматриваемый тип АПВ может применяться также на одиночных линиях, питающих подстанции с синхронными компенсаторами или двигателями [8], если для них не допускается несинхронное включение либо не обеспечивается ресинхронизация. В этих случаях гашение поля синхронных компенсаторов или двигателей после отключения линии со стороны питающей подстанции осуществляется обычно по факту снижения частоты напряжения, поддерживаемого синхронными компенсаторами или двигателями на шинах приемной подстанции при их выбеге, или по факту исчезновения активной мощности в линии.

5-5. ОДНОФАЗНОЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ

Общие сведения. В сетях высокого напряжения, работающих с глухозаземленной нейтралью, помимо трехфазного применяется также однофазное автоматическое повторное включение (ОАПВ). Применение ОАПВ в таких сетях обусловлено тем, что доля однофазных к. з. значительно выше, чем других видов повреждений (в среднем 70—90% общего числа к. з.), поэтому для ликвидации неустойчивого повреждения на линии достаточно отключить с обеих сторон только одну поврежденную фазу с последующим ее автоматическим повторным включением. При этом две другие неповрежденные фазы в цикле ОАПВ остаются в работе.

Однофазное АПВ по сравнению с трехфазным имеет следующие преимущества.

При отключении одной фазы в цикле ОАПВ электрическая связь между энергосистемами полностью не нарушается, а сохраняется по двум оставшимся неповрежденными фазам, что позволяет сохранить устойчивость электропередачи. Благодаря этому ОАПВ особенно эффективно на дальних и одиночных транзитных линиях. Кроме того, поскольку в цикле ОАПВ синхронизм не нарушается, то повторное включение отключившейся фазы происходит с меньшим возмущением в энергосистеме, т. е. практически без значительных толчков уравнительного тока и длительных качаний.

В случае применения ОАПВ на линиях с односторонним питанием обеспечивается непрерывное электроснабжение ответственных потребителей в цикле ОАПВ. При допустимости длительного неполнофазного режима ОАПВ позволяет сохранить линию в работе, когда имеет место устойчивое к. з., путем перевода ее в режим работы по схеме две фазы — земля.

К достоинствам ОАПВ следует отнести также меньшее количество операций, осуществляемых каждым выключателем.

К основным недостаткам однофазного АПВ следует отнести:

сложность устройств ОАПВ, вызванную наличием избирательных органов поврежденной фазы и пофазным управлением выключателями;

перевод линии на длительную работу по схеме две фазы — земля требует решения комплекса весьма сложных вопросов, связанных с возникающим неполнофазным режимом, приводит к дополнительному усложнению релейной защиты и автоматики сети;

влияние несимметрии на работу генераторов, двигателей и линий связи, а также необходимость установки дополнительного трехфазного АПВ или же выполнения комбинированного АПВ, поскольку устройства ОАПВ по принципу действия не работают при междуфазных повреждениях.

Устройства ОАПВ применяются, как правило, на одиночных линиях сверхвысокого напряжения, отключение которых может повлечь за собой нарушение электроснабжения большой группы потребителей или разрыв межсистемных линий связи.

Кроме выявления, отключения и последующего повторного включения поврежденной фазы при однофазных к. з., на устройства ОАПВ возлагаются следующие функции:

в случае неуспешного однократного ОАПВ производить либо отключение всех трех фаз без последующего повторного включения, либо перевод линии в режим длительной работы двумя фазами, если такой режим допускается;

производить отключение трех фаз и запрещать повторное включение при междуфазных к. з. при возникновении повреждения в неполнофазном режиме, а также в случае отказа в работе избирательных органов поврежденной фазы;

осуществлять вывод из работы релейных защит, не отстроенных от неполнофазных режимов, которые могут ложно сработать в цикле ОАПВ из-за возникающей при отключении одной фазы несимметрии токов и напряжений.

Следует отметить, что условия деионизации среды в месте повреждения при ОАПВ существенно ухудшаются за счет емкостной связи отключившейся фазы с оставшимися в работе. Это приводит к увеличению времени деионизации среды по сравнению с трехфазным АПВ [76], что следует учитывать при определении времени действия устройств ОАПВ.

Избирательные органы устройств ОАПВ. Выбор поврежденной фазы при однофазных к.з. осуществ-

ляется в устройствах ОАПВ с помощью специальных избирательных органов реле-избирателей поврежденной фазы. Отключение поврежденной фазы может производиться либо непосредственно избирательным органом данной фазы, либо релейной защитой, действие которой избирательным органом переводится на отключение только поврежденной фазы.

В качестве избирательных органов устройства ОАПВ со стороны питающей подстанции для линий с односторонним питанием, как правило, применяются токовые реле, включенные на фазные токи.

Уставка срабатывания токовых реле-избирателей выбирается по условию отстройки от максимального тока нагрузки:

$$I_{\text{ср}} = k_n I_{\text{н.макс}}, \quad (5-38)$$

где $k_n = 1,3 \div 1,4$ — коэффициент надежности.

Для устройства ОАПВ со стороны приемной подстанции избирательные органы при наличии трансформаторов напряжения или устройств емкостного отбора на шинах высшего напряжения выполняются с помощью минимальных реле напряжения, включенных на фазные напряжения (рис. 5-15,б).

Уставка срабатывания реле напряжения принимается равной

$$U_{\text{ср}} = (0,6 \div 0,7) U_{\text{ном}}. \quad (5-39)$$

При однофазном к.з. на линии напряжение поврежденной фазы уменьшается, что приводит к срабатыванию соответствующего реле напряжения и одного из отключающих реле $РП_A$, $РП_B$ или $РП_C$.

С целью исключения ложной работы избирательного органа при к.з. на линиях, отходящих от шин питающей подстанции (например, на линии Л2), в схему введены реле тока $РТ_0$, включенное на ток нулевой последовательности, и реле времени $РВ$. Ток срабатывания реле $РТ_0$ выбирается из условия обеспечения надежной его работы при повреждениях на защищаемой линии Л1. Реле времени служит для отстройки по времени от быстродействующих защит других линий, отходящих от шин питающей подстанции.

Блок-контакты выключателя в схеме ОАПВ необходимы для вывода из работы избирательного органа после неуспешного цикла ОАПВ в том случае, если допускается работа линии в режиме две фазы — земля.

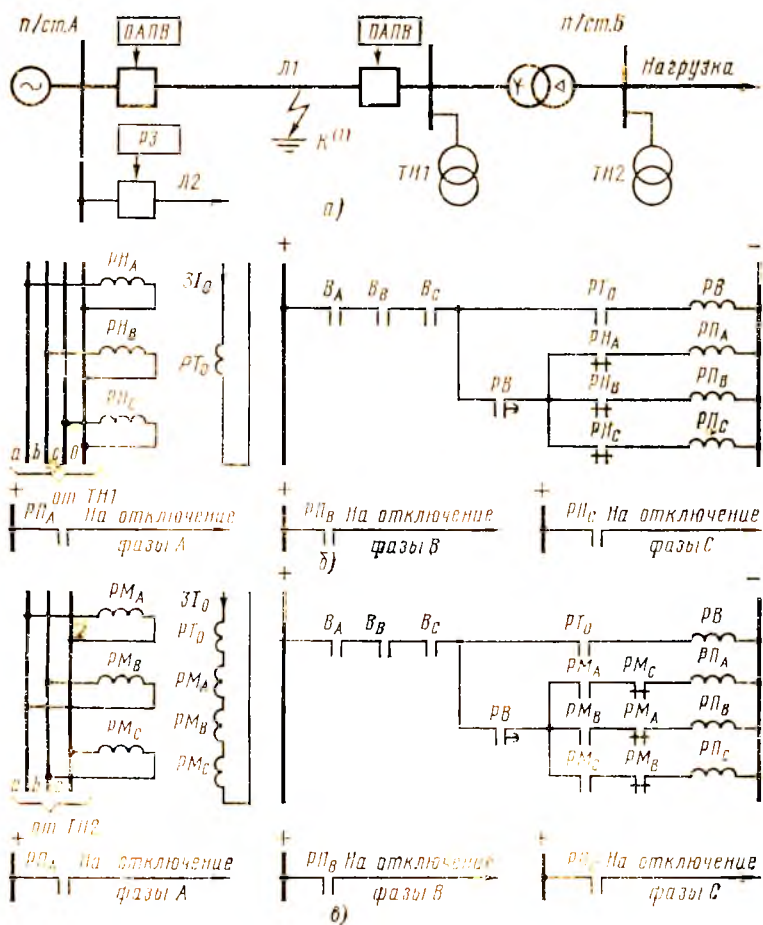


Рис. 5-15. Избирательные органы ОАПВ для линий с односторонним питанием.

а — поясняющая схема; б — схема избирательного органа с минимальными реле напряжения; в — с реле мощности.

Если отсутствуют трансформаторы напряжения или устройства емкостного отбора на шинах высшего напряжения, то в качестве реле-избирателей применяются реле направления мощности косинусного типа (рис. 5-15, в). Применение последних позволяет обеспечить требуемую чувствительность и избирательность при их питании от трансформаторов напряжения, установ-

ленных на стороне низшего напряжения приемной подстанции. Токовые обмотки реле мощности включаются на ток нулевой последовательности $3I_0$. Назначение остальных элементов схемы аналогично рассмотренному ранее варианту.

Для предотвращения неправильной работы устройства контакты реле направления мощности включены попарно. Вызвано это тем, что при к.з. на землю, например, фазы *A* реле мощности этой фазы срабатывает, реле мощности фазы *C* надежно тормозится (вращающий момент действует на заклинивание), а реле мощности фазы *B* работает нечетко и возможна его ложная работа.

Рассмотренный избирательный орган может применяться и при наличии трансформаторов напряжения на шинах высшего напряжения приемной подстанции. В этом случае обмотки напряжения реле мощности необходимо включать на фазные напряжения.

Для осуществления ОАПВ на линиях с двусторонним питанием применяются дистанционные избирательные органы, в качестве которых, как правило, используются направленные реле сопротивления.

На рис. 5-16 приведены схемы избирательных органов с использованием направленных реле сопротивления типа КРС-142 (КРС-143). Схемы показаны для случая установки трансформаторов напряжения на шинах. Токовые цепи реле сопротивления *РС* показаны первичными обмотками трансреакторов *ТР1* и *ТР2*.

Реле сопротивления включаются (рис. 5-16,б) на фазное напряжение и фазный ток, компенсированный током нулевой последовательности:

$$I_p = I_\phi + k3I_0, \quad (5-40)$$

где *k* — коэффициент компенсации, выражающий зависимость между сопротивлениями прямой и нулевой последовательностей линии:

$$k = \frac{z_{0л} - z_{1л}}{3z_{1л}}.$$

С этой целью одна из двух первичных обмоток трансреактора *ТР1* или *ТР2* включается на фазный ток, а другая — через специальный автотрансформатор *ВУ* на ток нулевой последовательности. Введение компенсации обеспечивает правильное измерение сопротивления от места установки реле до точки однофазного к.з.

На реле сопротивления могут быть установлены углы максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}=65; 75$ и 85° , а характеристики могут смещаться в I и III квадранты комплексной плоскости на 7,5 и 15% сопротивления срабатывания при угле максимальной чувствительности [70].

Если характеристика реле сопротивления охватывает всю защищаемую линию и шины подстанции с необходимым запасом, то в качестве избирательного органа достаточно использовать только три реле сопротивления (рис. 5-16, в).

Если же характеристика с целью обеспечения селективности действия реле вынесена за начало линии (смещена полностью в I квадрант) или проходит через него, то необходимо дополнительно устанавливать либо три токовых реле PT_A, PT_B и PT_C , включенных на фазный ток линии, либо три минимальных реле напряжения RN_A, RN_B, RN_C , включенных на фазное напряжение, которые обеспечивают охват повреждения в начале линии и на ее незащищенном участке. Контакты избирательного органа в этом случае включаются по одной из схем, приведенных на рис. 5-16, г.

Схема устройства ОАПВ. Рассмотрим схему устройства ОАПВ питающего конца линии с односторонним питанием, на которой предусмотрена длительная работа в режиме две фазы — земля после неуспешного цикла ОАПВ. Устройство выполнено на основе комплектного реле повторного включения типа РПВ-58 (рис. 5-17). В качестве реле-избирателей в схеме применяются токовые реле PT_A, PT_B, PT_C .

При возникновении однофазного к.з. срабатывает релейная защита, одно из токовых реле-избирателей (PT_A, PT_B или PT_C) и соответствующее отключающее реле ($РП_A, РП_B$ или $РП_C$), которое производит отключение поврежденной фазы.

Для отключения трех фаз линии при междуфазных к.з. служит реле $РП2$, срабатывающее при действии двух любых токовых реле-избирателей.

Если по какой-либо причине не срабатывает реле-избиратель поврежденной фазы, то устройство также производит отключение всех трех фаз. Это достигается с помощью реле $РП1$, которое срабатывает после замыкания контакта релейной защиты в случае отказа токовых реле (контакты PT_A, PT_B и PT_C замкнуты) и замыкает цепь реле $РП2$.

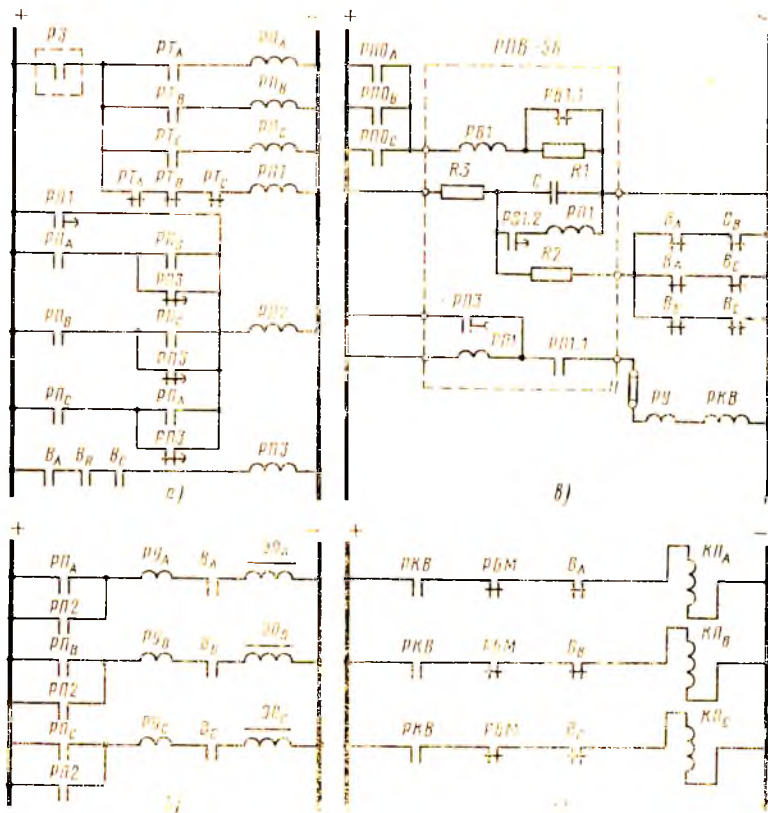


Рис. 5-17. Устройство ОАПВ для линий с односторонним питанием. а — схема избирательного органа; б — цепи отключения; в — схема устройства АПВ; г — цепи включения.

Реле $PПЗ$ предусмотрено для отключения оставшихся в работе фаз при возникновении повреждения в неполнофазном режиме. Реле $PПЗ$ замыкает контакты, параллельные контактам реле $PП_A$, $PП_B$, $PП_C$ в цепи обмотки реле $PП2$ (рис. 5-17,а), благодаря чему при действии любого из реле тока последнее срабатывает и отключает все фазы.

Пуск схемы АПВ осуществляется контактами реле положения «отключено» трех фаз выключателя $PПО_A$, $PПО_B$ и $PПО_C$ (рис. 5-17,в). Действие АПВ при отключении выключателей двух любых фаз предотвращается

разрядом конденсатора C через попарно соединенные блок-контакты выключателей.

Реле $РП1$, сработав, удерживается с помощью своей последовательной обмотки. Возврат реле $РП1$ в исходное состояние обеспечивается шунтированием его последовательной обмотки контактом реле $РП3$ после включения выключателя отключившейся фазы.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите особенности устройств АПВ линий с двусторонним питанием.
2. В каких случаях на линиях с двусторонним питанием допускается применение устройств АПВ тех же типов, что и для линий с односторонним питанием и почему?
3. Назовите преимущества и недостатки, а также области применения различных типов устройств АПВ линий с двусторонним питанием.
4. В чем состоят преимущества ОАПВ по сравнению с ТАПВ?
5. Почему нельзя применять токовые избирательные органы для устройства ОАПВ линии с односторонним питанием со стороны приемной подстанции?
6. Поясните, почему реле сопротивления избирательных органов устройств ОАПВ линий с двусторонним питанием включаются на фазный ток, компенсированный током нулевой последовательности (5-40).

Глава шестая

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЯ (АВР)

6-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для электроснабжения потребителей при наличии нескольких источников может применяться многостороннее и одностороннее питание. Многостороннее питание одновременно от двух и более источников осуществляется путем кольцевания электрических сетей. Основным преимуществом многостороннего питания является высокая надежность электроснабжения потребителей, так как аварийное отключение одного из питающих источ-

инков не приводит к нарушению электроснабжения потребителей и расстройству их технологического процесса.

Одностороннее питание при наличии нескольких источников выполняется по так называемому радиально-секционированному принципу. Электроснабжение потребителей в этом случае осуществляется по рабочей цепи (одиночный трансформатор, одиночная линия или секция шин), а при ее отключении — по резервной. Преимущество одностороннего питания заключается в снижении токов к.з., удешевлении схем электроснабжения и оборудования, упрощении релейной защиты. Поэтому оно широко используется в распределительных сетях 6—35 кВ и в схемах собственных нужд электростанций.

Применение *автоматического включения резервного питания* (АВР) в случае аварийного или ошибочного отключения рабочего устраняет основной недостаток одностороннего питания — меньшую надежность электроснабжения потребителей.

Многолетний опыт эксплуатации показал высокую эффективность раздельной работы элементов сети в сочетании с устройствами АВР, успешность действия которых по статистическим данным составляет 90% и более.

В соответствии с Правилами устройства электроустановок АВР необходимо предусматривать во всех случаях, когда отключение рабочего источника приводит к полному прекращению электроснабжения или ограничению мощности потребителей. В связи с этим устройства АВР широко применяются на подстанциях основных и распределительных сетей. Выполнение АВР является обязательным также для собственных нужд электростанций.

Требования, предъявляемые к устройствам АВР. Несмотря на большое разнообразие устройств АВР, все они должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Устройства АВР должны приходить в действие при потере питания от рабочего источника по любой причине, включая к.з. на шинах потребителя. Исключение составляет тот случай, когда нагрузка отключается действием устройств автоматической частотной разгрузки — АЧР (см. гл. 7) и необходим запрет действия устройств АВР.

2. Включение резервного источника питания должно осуществляться только после отключения выключателя на вводе от рабочего источника питания.

Выполнение этого требования позволяет исключить: неуспешное включение резервного источника на повреждение, самоустраняющееся после снятия напряжения;

включение резервного источника на к. з. в неотключившемся рабочем источнике;

возможное несинхронное включение двух источников питания.

3. С целью уменьшения длительности перерыва питания потребителей устройства АВР должны производить включение резервного источника сразу же вслед за отключением рабочего.

4. Во избежание многократного включения резервного источника на неустранившееся к.з. действие устройств АВР должно быть однократным.

5. При осуществлении АВР необходимо предусматривать ускорение действия релейной защиты резервного источника при его включении на неустранившееся к.з., что особенно важно в том случае, когда имеется неявный резерв.

6. При выполнении АВР должны обеспечиваться нормальные условия самозапуска электродвигателей [66]. Если же самозапуск не обеспечивается или недопустимо затягивается, то необходимо предусматривать автоматическую разгрузку за счет отключения неответственных потребителей с последующим их АПВ.

Классификация устройств АВР. В энергосистемах применяется большое количество устройств АВР, отличающихся друг от друга в зависимости от конкретных условий работы и схем первичной коммутации. Устройства АВР можно классифицировать по следующим основным признакам:

по типу оборудования, на которое действуют устройства автоматики — АВР трансформаторов, линий, секций шин, агрегатов собственных нужд электростанций и подстанций;

по направленности действия — АВР одностороннего и двустороннего действия.

Если устройство АВР одностороннего действия (рис. 6-1), то первый источник *С1* всегда рабочий и выключатель *В1* нормально включен, а второй источник

С2 — резервный и выключатель В2 нормально отключен. При потере питания нагрузки устройство АВР действует на включение выключателя В2. Возврат к нормальной схеме может осуществляться как автоматически, так и неавтоматически оперативным персоналом.

Если устройство АВР двустороннего действия, то любой из источников может быть как рабочим, так и резервным.

Устройства АВР классифицируются также:

по виду источника питания устройств — АВР на постоянном или переменном оперативном токе;

по виду резерва, включаемого действием устройства АВР, — АВР при наличии явного и неявного резерва.

При наличии явного резерва резервный источник может находиться либо в отключенном состоянии, либо под напряжением, но без нагрузки. В случае неявного резерва нагрузка распределена между всеми источниками, которые осуществляют взаимное резервирование при отключении одного из них. При этом мощность каждого из источников должна быть достаточной для покрытия собственной нагрузки, а также всей или части нагрузки резервируемого источника.

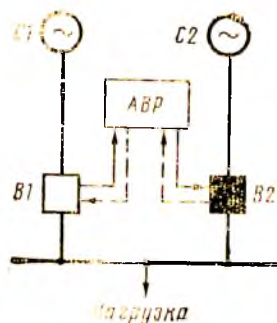


Рис. 6-1. Схема действия устройства АВР.

6-2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ УСТРОЙСТВ АВР

Пуск устройств АВР. В соответствии с требованиями § 6-1 пуск устройств АВР и подача команды на включение резервного источника производится от блок-контактов выключателя рабочей цепи или соответственно от контактов реле положения «отключено» этого выключателя.

Однако питание потребителей может исчезнуть и при включенном выключателе на вводе от рабочего источника. Это происходит при повреждениях в питающей сети за пределами резервируемого объекта. Для того чтобы обеспечить действие устройства АВР в этих слу-

при отсутствии напряжения на резервном источнике либо при его снижении до величины, не допустимой по условию обеспечения самозапуска электродвигателей. Этим исключается ненужное действие устройства АВР. Обычно блокирование пускового органа осуществляется с помощью реле напряжения, подключаемого через трансформатор напряжения к источнику резервного питания.

Варианты схем минимальных пусковых органов напряжения приведены на рис. 6-3.

В первом варианте (рис. 6-3,а) во избежание ложного действия ПОН и отключения рабочего источника питания при повреждениях во вторичных цепях трансформатора напряжения $TН1$, например при перегорании одного из предохранителей, устанавливаются два минимальных реле напряжения $RН1$ и $RН2$, контакты которых включаются последовательно.

Блокировка ПОН по напряжению резервного источника осуществляется с помощью реле напряжения $RНБ$, контролирующего напряжение $U_{рез}$ резервного источника. Реле времени $PВ$ необходимо для отстройки по времени ПОН от внешних к.з., не приводящих к потере рабочего источника питания.

Пусковой орган можно выполнить и с помощью одного минимального реле напряжения, включенного через трехфазный выпрямительный мост $ВУ$ (рис. 6-3,б). При перегорании одного из предохранителей реле не срабатывает, так как выпрямитель при этом работает в двухфазном режиме и напряжение, подводимое к реле, превышает напряжение его срабатывания. Однако приведенные схемы ПОН будут работать ложно при повреждении трансформатора напряжения $TН1$ или перегорании одновременно обоих предохранителей.

При наличии двух трансформаторов напряжения $TН1$ и $TН2$ применяют более надежную схему ПОН (рис. 6-3,в), в которой используются два минимальных реле напряжения, подключенные к разным трансформаторам напряжения.

С целью упрощения схемы пускового органа в некоторых случаях применяются реле времени переменного напряжения типа ЭВ-235, которые осуществляют одновременно функции минимальных реле напряжения и реле времени (рис. 6-3,г).

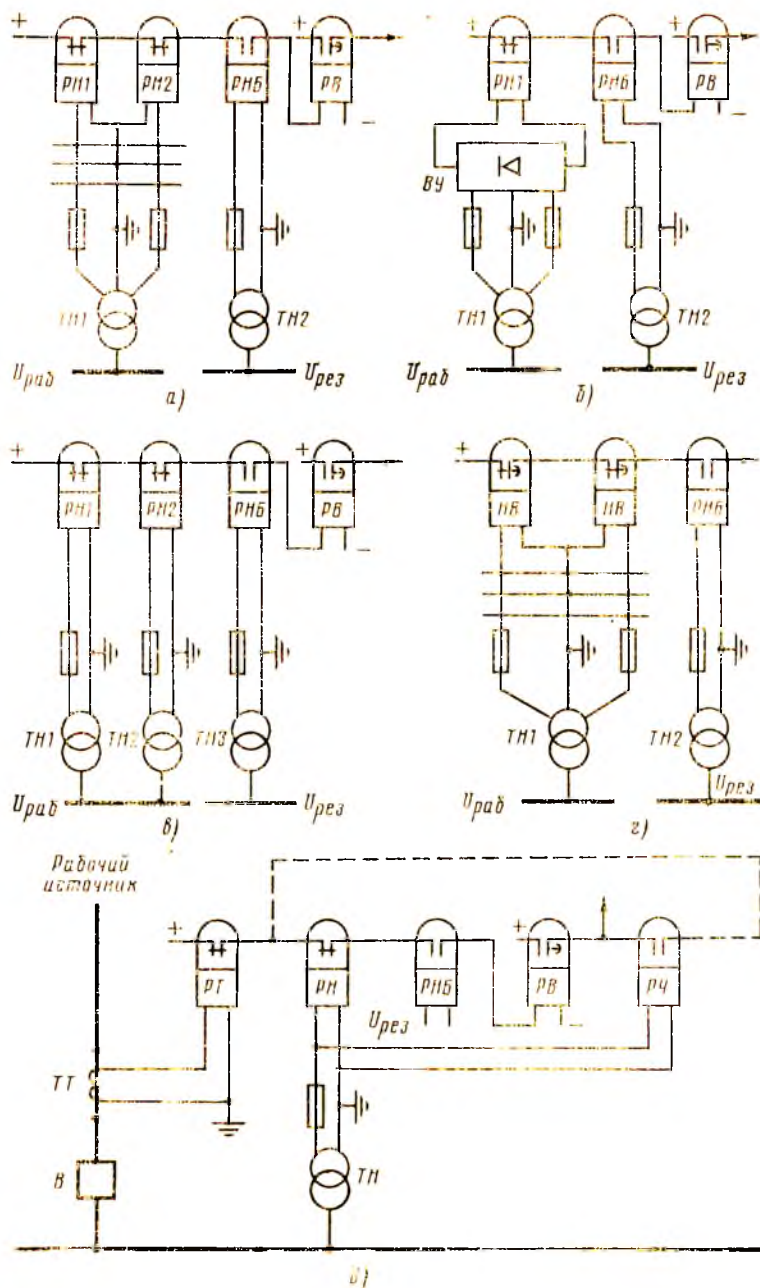


Рис. 6-3. Схемы пусковых органов АВР.

Кроме описанных выше минимальных пусковых органов напряжения, в устройствах АВР широко применяются также комбинированные пусковые органы, один из которых приведен на рис. 6-3,д. Пусковой орган выполнен с одним минимальным реле напряжения и одним минимальным реле тока. Наличие реле тока предотвращает ложную работу устройства при перегорании предохранителя в цепях трансформатора напряжения. Пусковой орган срабатывает лишь тогда, когда одновременно исчезает ток в цепи рабочего источника и напряжение на шинах потребителей.

Наряду с реле тока пусковой орган иногда дополняется реле понижения частоты *РЧ* (штриховая линия на рис. 6-3,д). Вызвано это следующим. При отключении питания синхронные и асинхронные электродвигатели некоторое время могут поддерживать остаточное напряжение, что задерживает работу минимального пускового органа напряжения, особенно при наличии крупных синхронных двигателей и компенсаторов. Снижение частоты остаточного напряжения происходит быстрее, поэтому установка реле частоты позволяет ускорить действие устройства АВР.

Для предотвращения ложной работы пускового органа при общесистемных снижениях частоты и срабатывании реле частоты контакт последнего включается последовательно с контактом реле тока. В качестве реле частоты может использоваться индукционное реле типа ИВЧ-3 (ИВЧ-011А). В устройствах АВР на логических элементах для этой цели применяется модуль понижения частоты, представляющий собой полупроводниковое реле частоты РЧ-1 (см. гл. 7).

На рис. 6-4 приведена функциональная схема модуля контроля напряжения, который выполняет функции минимального пускового органа напряжения в устройствах АВР на логических элементах. Модуль выполнен симметричным по отношению к двум входам и имеет два одинаковых канала (*I* и *II*), которые действуют на отключение источника *I* и *II* соответственно. На вход релейных элементов *РЭ1* и *РЭ2* подаются через входные цепи (рис. 6-4,а) контролируемые напряжения соответственно рабочего U_1 и резервного U_2 источников. Входные цепи каждого канала содержат по два разделительных трансформатора, включенных на разные линейные напряжения, и по два выпрямительных моста, включен-

ных параллельно. Такое включение повышает надежность работы модуля и исключает его ложное действие при обрыве одной фазы во вторичных цепях трансформатора напряжения. Поэтому релейный элемент будет находиться в сработавшем состоянии и на его выходе будет иметься сигнал «единица», когда хотя бы одно из контролируемых линейных напряжений превышает его уставку.

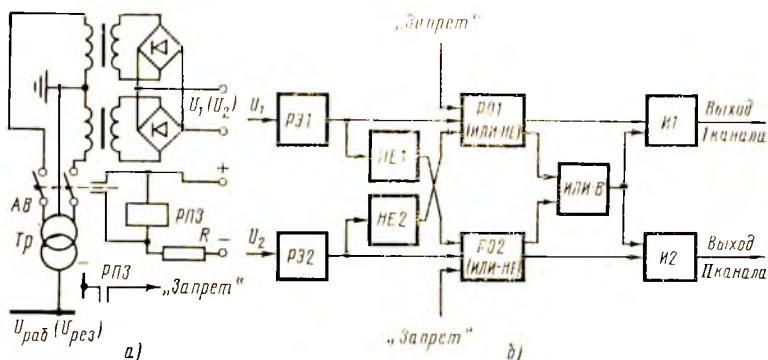


Рис. 6-4. Схема модуля контроля напряжения устройства АВР на логических элементах.

а — схема цепей переменного напряжения и включения реле запрета; б — функциональная схема модуля.

Выход релейного элемента $РЭ1$ ($РЭ2$) подключен через элемент логического «отрицания» $НЕ1$ ($НЕ2$) ко входу реагирующего органа другого канала $РО2$ ($РО1$), представляющего собой элемент ИЛИ-НЕ, а также ко входу реагирующего органа $РО1$ ($РО2$) своего канала. Реагирующий орган $РО1$ ($РО2$) срабатывает в том случае, если на всех его входах отсутствуют сигналы, что имеет место при наличии контролируемого напряжения $U_2 (U_1)$ и при отсутствии напряжения $U_1 (U_2)$. При этом сигнал с выхода $РО1$ ($РО2$) поступает на вход элемента $И1$ ($И2$) и через элемент ИЛИ на вход элемента времени $В$, определяющего время срабатывания модуля. После срабатывания элемента времени $В$ сигнал поступает через элемент $И1$ ($И2$) на выход $И1$ ($И2$) канала.

Если имеет место одновременное снижение контролируемых напряжений U_1 и U_2 , то модуль не работает, так как на один из входов элементов $РО1$ и $РО2$ (с выходов $НЕ2$ и $НЕ1$) поступает сигнал «единица» и бло-

кирует его действие. Аналогично осуществляется «запрет» действия модуля, для чего предусмотрен дополнительный вход у элементов *PO1* и *PO2*. В частности, для исключения ложной работы при отключении автомата в цепях трансформатора напряжения в модуле предусмотрено реле «запрета» (рис. 6-4,а) *РПЗ*, обмотка которого при включенном автомате шунтируется его блок-контактом. При отключении автомата реле *РПЗ* срабатывает и подаст блокирующий сигнал на вход соответствующего реагирующего органа.

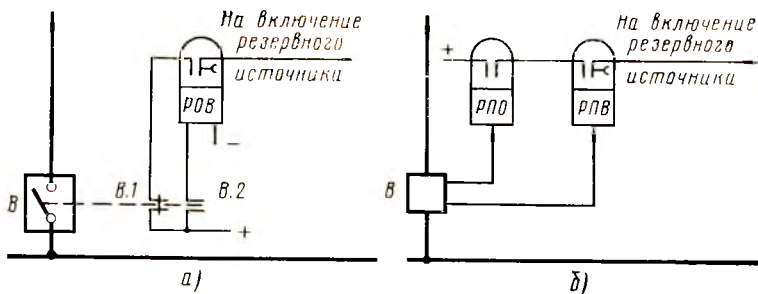


Рис. 6-5. Принципы обеспечения однократности действия при выполнении схемы АВР на постоянном оперативном токе.

Однократность действия устройств АВР обеспечивается различными способами построения схем, исходя из конкретных условий работы, вида оперативного тока и конструкции привода выключателя.

При наличии постоянного оперативного тока для обеспечения однократности АВР применяется реле «однократности включения» *РОВ* (рис. 6-5,а), в качестве которого используется промежуточное реле с задержкой на возврат. При отключении выключателя *В* рабочего источника обмотка реле *РОВ* теряет питание, но через замкнувшийся блок-контакт выключателя и временно замкнутый контакт реле *РОВ* подается сигнал на включение выключателя резервного источника. Выдержка времени на возврат реле *РОВ* должна быть достаточной для надежного включения выключателя резервной цепи, но в то же время обеспечивать однократность его включения.

На рис. 6-5,б показан другой вариант обеспечения однократности действия устройств АВР, в котором в ка-

честве реле однократности включения используется реле положения «включено» *РПВ* выключателя рабочей цепи, также имеющее замедление на возврат. При отключении выключателя *В* срабатывает реле положения «отключено» *РПО* и подает сигнал через временно замкнутый контакт реле *РПВ* на включение резервного источника.

6-3. СХЕМЫ УСТРОЙСТВ АВР

Схема устройства АВР одностороннего действия на постоянном оперативном токе для радиальной линии приведена на рис. 6-6. В нормальном режиме подстанция *В* питается по одной рабочей линии *Л1* от подстанции *А*. Резервная линия *Л2* нормально отключена выключателем *В2*. Со стороны подстанции *Б* линия *Л2* должна быть постоянно включена и находиться под напряжением.

Устройство АВР выполнено с использованием в качестве реле однократности включения *РОВ* промежуточного реле с задержкой на возврат. При отключении выключателя *В1* по любой причине происходит включение выключателя *В2* резервной линии по цепи *В1.3—РОВ.2*, так как контакт *РОВ.2* остается еще некоторое время замкнут.

Для обеспечения работы устройства АВР при потере питания шин потребителей, не сопровождающейся отключением выключателя *В1* (например, при отключении

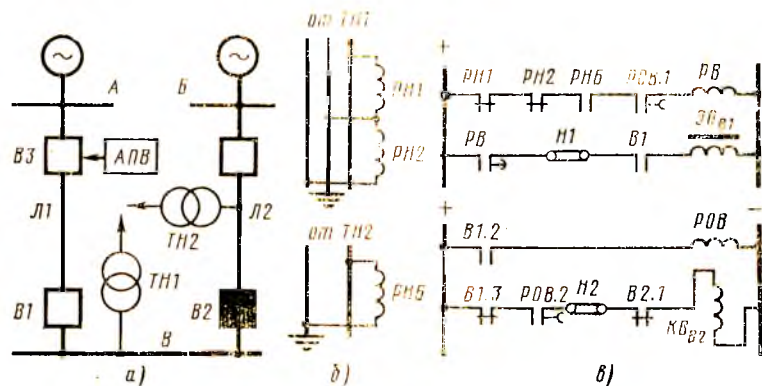


Рис. 6-6. Устройство АВР линии на постоянном оперативном токе.
а — поясняющая схема; *б* — схема цепей переменного напряжения; *в* — схема цепей постоянного оперативного тока.

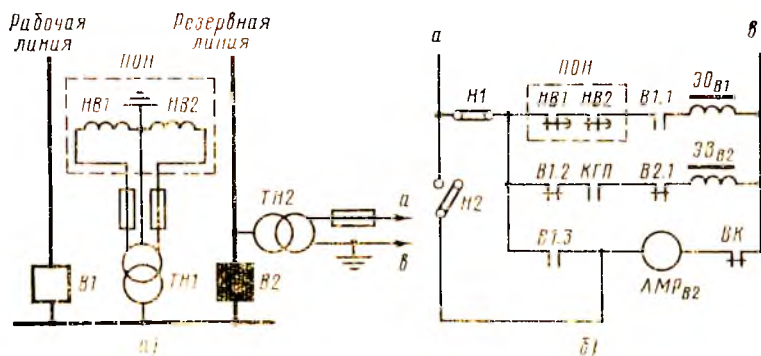


Рис. 6-7. Устройство АВР линии на переменном оперативном токе.
а — поясняющая схема; б — схема цепей оперативного тока.

выключателя $B3$), установлен минимальный пусковой орган напряжения с блокировкой по напряжению на резервной линии $L2$. Вместо трансформатора напряжения $ТН2$ для целей контроля напряжения на резервной линии часто применяются устройства емкостного отбора напряжения (например, от вводов выключателей, конденсаторов связи).

При исчезновении напряжения на шинах подстанции B срабатывают минимальные реле напряжения $РН1$ и $РН2$ и при наличии напряжения на линии $L2$ (контакт реле $РНБ$ замкнут) пускают реле времени $РВ$, которое через заданную выдержку времени производит отключение выключателя $B1$. Далее схема работает, как рассмотрено выше.

При наличии на питающей линии устройств АПВ выдержку времени ПОН следует согласовывать с временем действия АПВ, т. е. необходимо, чтобы устройство АВР действовало только после неуспешного АПВ.

На подстанциях с выключателями, имеющими пружинные или грузовые приводы, устройства АВР выполняются на переменном оперативном токе. На рис. 6-7 приведена схема такого устройства для случая, когда выключатели снабжены автоматическим моторным редуктором (АМР) для автоматического завода пружины или поднятия груза.

В устройстве используется ПОН, который состоит из двух реле времени переменного напряжения $НВ1$ и $НВ2$ типа ЭВ-235, подключенных к трансформатору напряже-

ния *ТН1* шин подстанции. Контроль наличия напряжения на резервной линии осуществляется за счет питания оперативных цепей устройства АВР от трансформатора напряжения *ТН2*.

При исчезновении напряжения на шинах подстанции срабатывает ПОН и с выдержкой времени отключает выключатель *В1*, который своим блок-контактом *В1.2* замыкает цепь электромагнита включения *ЭВ_{В2}* выключателя *В2* резервной линии. Последний включается в том случае, если замкнут блок-контакт готовности привода *КГП* (заведена пружина или поднят груз).

Однократность действия устройства обеспечивается тем, что для повторного включения выключателя *В2* необходимо вновь завести пружину или поднять груз, что может осуществляться автоматически при включенном выключателе *В1* (блок-контакт *В1.3* замкнут) либо после замыкания накладки *Н2*. При полном заводе пружины или поднятом грузе цепь электродвигателя *АМР* размыкается контактом *ВК* концевого выключателя.

Если на резервной линии отсутствует трансформатор напряжения, для отключения выключателя *В1* и включения *В2* используется энергия предварительно заряженных конденсаторов. Заряд конденсаторов при этом осуществляется от трансформатора напряжения рабочей линии *ТН1* через специальное зарядное устройство [69]. Питание электродвигателя *АМР* также осуществляется от трансформатора напряжения *ТН1*.

Схема устройства АВР трансформатора, характерная для установок собственных нужд электростанций, приведена на рис. 6-8. Два рабочих трансформатора *Тр1* и *Тр2* нормально включены на соответствующие секции шин собственных нужд. Резервный трансформатор *Тр3* нормально отключен. Питание трансформаторов осуществляется от разных источников.

В случае отключения любого из рабочих трансформаторов устройство АВР обеспечивает включение резервного трансформатора. При этом включаются выключатель *В5* и один из выключателей *В6* или *В7* в зависимости от того, какой трансформатор отключился.

Функцию реле однократности включения в рассматриваемой схеме выполняют реле положения «включено» выключателей *В1* и *В3* (*РПВ1* и *РПВ3*), имеющие замедление на возврат. Пуск устройства АВР осуществля-

ется от реле положения «отключено» указанных выключателей (*РПО1* и *РПО3*).

Для сокращения времени перерыва питания при отключении выключателей на стороне высшего напряжения рабочих трансформаторов блок-контакты выключателей *В2* и *В4* включены в цепи отключения выключателей *В1* и *В3* соответственно.

На каждой из секций шин низшего напряжения установлен минимальный пусковой орган напряжения (*ПОН1* и *ПОН2*). Каждый *ПОН*, как и в предыдущей схеме, состоит из двух реле времени *НВ* переменного напряжения типа ЭВ-235, подключенных к трансформа-

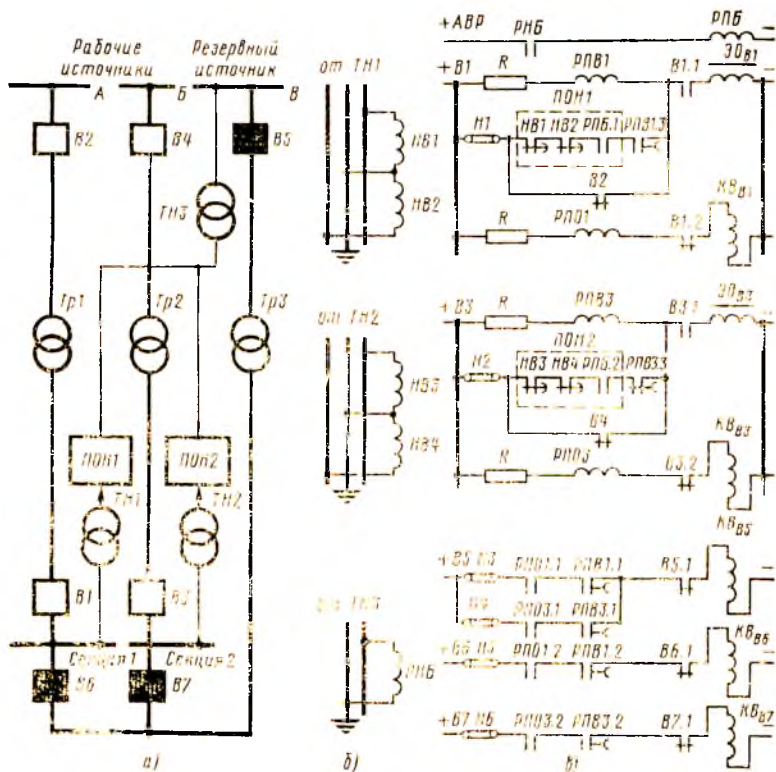


Рис. 6-8. Устройство АВР трансформатора на постоянном оперативном токе.

а — поясняющая схема; б — схема цепей переменного напряжения; в — схема оперативных цепей.

тору напряжения соответствующей секции. Кроме того, **ПОН** включает в себя промежуточное реле блокировки **РПБ**, работающее от реле напряжения **РНБ**, подключенного к трансформатору напряжения **ТНЗ** шин резервного источника. Накладки **Н1—Н6** служат для вывода устройства АВР из работы. В частности, когда рабочий трансформатор **Тр1** выводится из работы, необходимо снять накладки **Н1, Н3 и Н5**. При этом устройство АВР будет обеспечивать резервирование оставшегося в работе трансформатора **Тр2**.

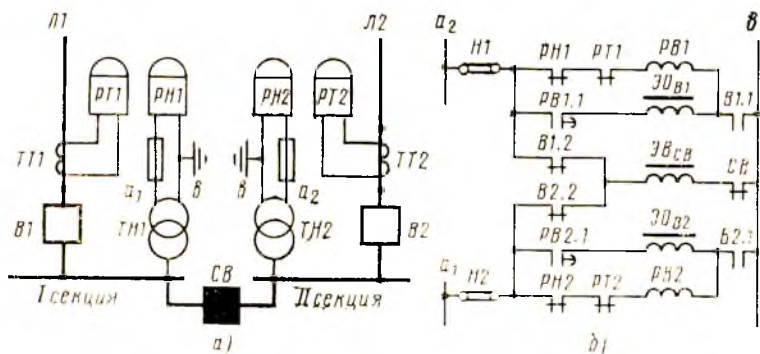


Рис. 6-9. Устройство АВР секции.

а — поясняющая схема; б — схема оперативных цепей.

На рис. 6-9 приведена схема устройства АВР секции шин секционным выключателем с пружинным или грузовым приводом для подстанций с переменным оперативным током.

Пуск схемы происходит как при отключении одного из выключателей **В1** или **В2**, так и от одного из пусковых органов, представляющих собой комбинированные минимальные пусковые органы тока и напряжения. Для согласования с действием устройств АПВ питающих линий в пусковых органах имеются реле времени **РВ1** и **РВ2**, выдержка времени которых выбирается такой, чтобы АВР действовало только в случае неуспешного АПВ.

Устройство работает следующим образом. Нормальное исходное состояние: выключатели **В1** и **В2** включены, а секционный выключатель **СВ** отключен, его груз или пружины заведены (блок-контакт **СВ** замкнут).

При исчезновении тока в линии *Л1* и напряжения на I секции шин срабатывает комбинированный пусковой орган (реле *PT1* и *PH1*) и пускает реле времени *PВ1*, которое с установленной выдержкой времени производит отключение выключателя *В1*. Замыкается его блок-контакт *В1.2* в цепи включающей катушки выключателя *СВ*; последняя освобождает механизм зацепления, и за счет энергии груза или пружины происходит включение выключателя. Контроль напряжения на II секции осуществляется автоматически, так как оперативные цепи питаются от трансформатора напряжения *ТН2*.

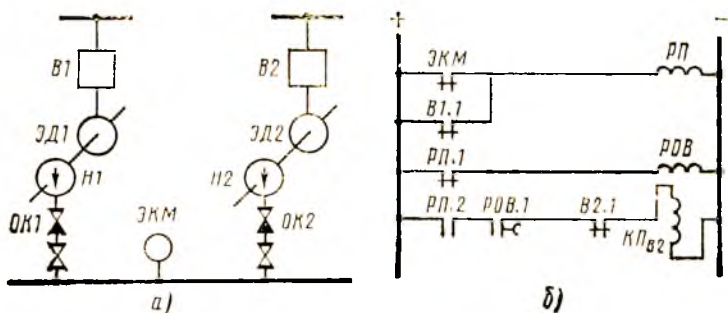


Рис. 6-10. Устройство АВР резервного насоса.
 а — поясняющая схема; б — схема оперативных цепей.

Устройство работает аналогично и при срабатывании пускового органа II секции шин. Однократность действия АВР достигается тем, что для повторного включения выключателя *СВ* необходимо вновь завести пружину или груз.

Для обеспечения надежной работы собственных нужд электростанций широко применяются АВР электродвигателей ответственных механизмов, например АВР питательных насосов, маслососов и т. д. В качестве пусковых органов в этих схемах АВР применяются специальные реле, реагирующие на неэлектрические величины (электроконтактные манометры, датчики давления, уровня и т. д.).

На рис. 6-10 приведена схема АВР насоса. В нормальном режиме включен рабочий электронасос *H1*, а резервный насос *H2* отключен и находится в резерве.

Наличие обратных клапанов *ОК1* и *ОК2* позволяет включать резервный насос без предварительного отключения рабочего.

При снижении давления в магистрали срабатывает от электроконтактного манометра *ЭКМ* промежуточное реле *РП* и производит включение выключателя *В2* электродвигателя *ЭД2* резервного насоса. Однократность включения обеспечивается промежуточным реле *РОВ* с замедлением на возврат. В целях ускорения включения резервного насоса при отключении выключателя *В1* блок-контакт последнего включен параллельно контакту электроконтактного манометра *ЭКМ* в цепи реле *РП*.

6.4. РАСЧЕТ УСТАВОК УСТРОЙСТВ АВР

Реле однократности включения. Выдержка времени на отпадание якоря реле однократности включения выбирается из условия обеспечения надежного однократного включения выключателя резервного источника

$$t_{\text{РОВ}} \geq t_{\text{в.в}} + \Delta t, \quad (6-1)$$

где $t_{\text{в.в}}$ — время включения выключателя; Δt — запас надежности, принимаемый равным 0,2—0,3 с.

Минимальный пусковой орган напряжения. Напряжение срабатывания минимального реле напряжения ПОН выбирается по следующим двум условиям:

отстройка от минимального остаточного напряжения при трехфазных к. з. за реакторами и за трансформаторами (точки *К1*, *К5*, *К7* на рис. 6-11)

$$U_{\text{ср}} \leq U_{\text{ост.мин}} / k_{\text{н}}, \quad (6-2)$$

где $k_{\text{н}} = 1,2 \div 1,3$ — коэффициент надежности;

отстройка от минимального напряжения при самозапуске электродвигателей после отключения к. з.

$$U_{\text{ср}} \leq U_{\text{с.з.мин}} / k_{\text{н}}, \quad (6-3)$$

где $k_{\text{н}} = 1,2 \div 1,3$.

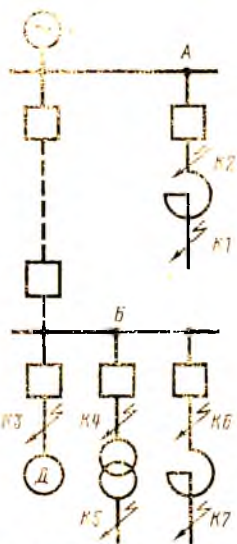


Рис. 6-11. К расчету уставок устройств АВР.

Из полученных по формулам (6-2) и (6-3) значений принимается меньшее. Обычно условиям (6-2) и (6-3) удовлетворяет напряжение срабатывания

$$U_{ср} = (0,25 \div 0,4) U_{ном}. \quad (6-4)$$

Выдержка времени реле времени ПОН выбирается на ступень селективности $\Delta t = 0,5$ с больше максимальной выдержки времени защиты, действующей при к. з. в точке К2 (рис. 6-11) на присоединениях, отходящих от шин А:

$$t_{PB} \geq t_{p.z1} + \Delta t, \quad (6-5)$$

а также на ступень селективности больше максимальной выдержки времени защиты, действующей при к. з. в точках К3, К4, К6 (рис. 6-11) на присоединениях, отходящих от шин Б:

$$t_{PB} \geq t_{p.z2} + \Delta t. \quad (6-6)$$

При необходимости выдержка времени ПОН должна согласовываться с временем действия устройства АПВ рабочего источника. К установке принимается наибольшая выдержка времени.

Минимальный пусковой орган тока и напряжения. Напряжение срабатывания минимального реле напряжения выбирается аналогично напряжению срабатывания ПОН. Особенность расчета заключается в том, что при отстройке от остаточного напряжения при к. з. расчетной является только точка К1 (рис. 6-11).

Ток срабатывания минимального реле тока отстраивается от минимально возможного тока нагрузки рабочей цепи

$$I_{ср} \leq I_{н.мин} / k_n, \quad (6-7)$$

где $I_{н.мин}$ — минимальный ток нагрузки; k_n — коэффициент надежности, принимается равным 1,5.

Выдержка времени пускового органа выбирается по условию (6-5), т. е. согласуется только с защитами присоединений, отходящих от шин А (рис. 6-11).

Блокировка по напряжению на резервном источнике. Напряжение срабатывания блокирующего реле, контролирующего напряжение на резервном источнике, выбирается из условия возврата при минимальном рабочем напряжении

$$U_{ср} = U_{раб.мин} / k_v k_n, \quad (6-8)$$

где $U_{\text{раб.мин}}$ — минимальное рабочее напряжение; k_v — коэффициент возврата реле; k_n — коэффициент надежности, принимается равным 1,1—1,2.

6-5. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УСТРОЙСТВ АВР С РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТОЙ И ДРУГИМИ ВИДАМИ АВТОМАТИКИ

Ускорение действия защиты после АВР выполняется так же, как и после АПВ. Ускоренная защита может действовать либо без выдержки времени, либо с уменьшенной выдержкой времени.

Следует иметь в виду, что в установках с большим количеством электродвигателей ускорение действия защиты должно осуществляться не до нуля, а до выдержки времени 0,5 с. Это предотвращает ложную работу ускоренной после АВР защиты от бросков тока, которые возникают вследствие несинхронности напряжения резервного источника и остаточной э. д. с. электродвигателей и могут превышать ток самозапуска.

На рис. 6-12 приведена схема ускорения действия защиты секционного выключателя с использованием ре-

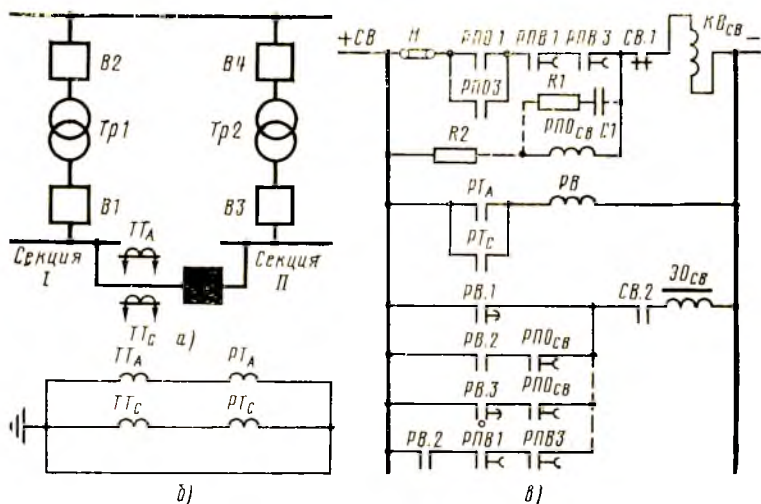


Рис. 6-12. Ускорение действия защиты после АВР.

а — поясняющая схема; б — схема цепей переменного тока; в — схема оперативных цепей.

ле положения «отключено» $РПО_{св}$ с замедлением на возврат.

В нормальном режиме питание потребителей каждой секции шин осуществляется от своего трансформатора, а секционный выключатель $СВ$ отключен. При потере питания любой из секций шин и отключении выключателя $В1$ или $В3$ происходит включение секционного выключателя $СВ$.

Если ускорение защиты производится до 0 с, то отключение $СВ$ после АВР в случае устойчивого повреждения происходит по цепи, состоящей из мгновенно замыкающего контакта $РВ2$ реле времени защиты и контакта $РПО_{св}$. При ускорении защиты до 0,5 с используется временно замыкающий контакт $РВ.3$, причем задержка на возврат у реле $РПО_{св}$ должна быть больше суммарного времени включения выключателя и срабатывания защиты $СВ$.

Ускорение защиты может осуществляться также с использованием реле положения «включено» $РПВ1$ и $РПВ3$ выключателей $В1$ и $В3$ соответственно, контакты которых в схеме рис. 6-12,в включаются последовательно с мгновенно замыкающим контактом $РВ.2$ реле времени защиты $СВ$.

Таким образом, ускорение защиты после АВР в рассмотренном случае при наличии неявного резерва позволяет быстро отключить повреждение и предотвратить тем самым нарушение нормальной работы потребителей, подключенных к резервирующей секции.

Совместная работа устройств АВР и автоматики трансформаторов подстанций. На рис. 6-13 приведена схема автоматики двухтрансформаторной подстанции для случая, когда нагрузка между секциями шин низшего напряжения распределяется поровну [81]. С помощью автоматики поддерживается наиболее экономичный с точки зрения потерь в трансформаторах режим, а именно: в зависимости от нагрузки, подключенной к шинам низшего напряжения, в работе находится либо один трансформатор, либо два. При этом в последнем случае, когда работают оба трансформатора, с целью ограничения токов к. з. секционный выключатель $СВ$ отключается.

В состав автоматики входят: измерительный орган (рис. 6-13,б), два электронных реле времени (на схеме не показаны), исполнительные цепи (рис. 6-13,в) и це-

пи управления включением и отключением выключателей (рис. 6-13,г).

В измерительном органе сравнивается суммарный ток нагрузки с уставкой поляризованного реле *РП*, которая регулируется резистором *Р1*. Уставка срабатывания реле *РП* определяется из условия равенства потерь при работе одного и двух трансформаторов.

Если в работе находится один трансформатор, например *Тр1*, то секционный выключатель *СВ* включен и ключ управления *КУ* находится в положении *Тр2*, соответствующем номеру резервного трансформатора. С уве-

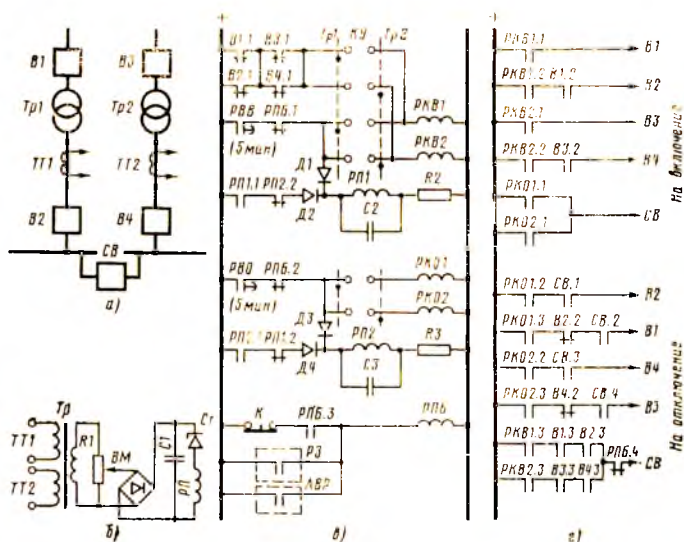


Рис. 6-13. Совместная работа устройства АВР и автоматики трансформаторов подстанции.

а — поясняющая схема; б — схема измерительного органа; в — исполнительные цепи; г — цепи управления выключателями.

личением тока нагрузки до величины уставки реле *РП* последнее срабатывает и пускает электронное реле времени включения. Реле времени с выдержкой времени около 5 мин, которая необходима для отстройки от кратковременных отклонений нагрузки, замыкает своим контактом *РВВ* цепь реле включения *РКВ2* и реле *РП1*. Реле *РКВ2* производит включение выключателей резервного трансформатора *Тр2* и отключение *СВ*. Необ-

ходимая последовательность в переключениях достигается использованием соответствующих блок-контактов выключателей в цепях управления. Так, в рассматриваемом случае сначала включается *B3*, затем *B4* и далее отключается *CB*. Реле *РП1* при срабатывании отключает питающее напряжение от реле времени включения, и контакт *PBB* размыкается. Этим обеспечивается однократность включения.

При уменьшении тока нагрузки реле *РП* возвращается в исходное состояние и пускает реле времени отключения, которое с выдержкой времени 5 мин замыкает контактом *PBO* цепь реле отключения *РКО2* и реле *РП2*. Реле *РКО2* сначала включает *CB*, а затем отключает *B4* и *B3* (т. е. отключение резервного трансформатора происходит в обратной последовательности). Реле *РП2* аналогично *РП1* обеспечивает однократность отключения.

Если теперь аварийно отключится единственный рабочий трансформатор *Tr1*, то автоматика включит резервный трансформатор *Tr2*. Реле *РКВ2* срабатывает в этом случае по цепи, состоящей из размыкающих блок-контактов выключателей *B1—B4*.

Для блокирования действия автоматики при работе устройства релейной защиты (*РЗ*) и *АВР*, например *АВР CB*, в режиме, когда включены оба трансформатора, в схеме предусмотрено реле блокировки *РПБ*, которое своими контактами размыкает цепи реле включения, отключения, а также цепь на отключение *CB*. Деблокируется реле *РПБ* вручную нажатием кнопки *K*.

Таким образом совместная работа устройства *АВР* и автоматики позволяет автоматизировать все переключения трансформаторов в нормальных режимах и обеспечить их взаиморезервирование в аварийных условиях.

Совместная работа устройств *АВР* и *АЧР*. Наличие устройств автоматической частотной разгрузки *АЧР* (гл. 7) накладывает определенные ограничения на применение устройств *АВР*. Нельзя допускать восстановления питания нагрузки действием устройств *АВР* после ее отключения от устройств *АЧР*.

На рис. 6-14, *a* и *б* приведены примеры сочетания устройств *АЧР* с *АВР* одностороннего действия, которые применяются при наличии на подстанции выделенной ответственной нагрузки [82]. В первом случае неотчетственные нагрузки питаются по линии *Л1* от питающего

центра *А*, а ответственные — по линии *Л2* от питающего центра *Б*. Если действием АЧР отключается линия *Л1*, то АВР не происходит. При отключении линии *Л2* резервирование ответственных нагрузок обеспечивается действием устройства АВР. Недостатком такой схемы

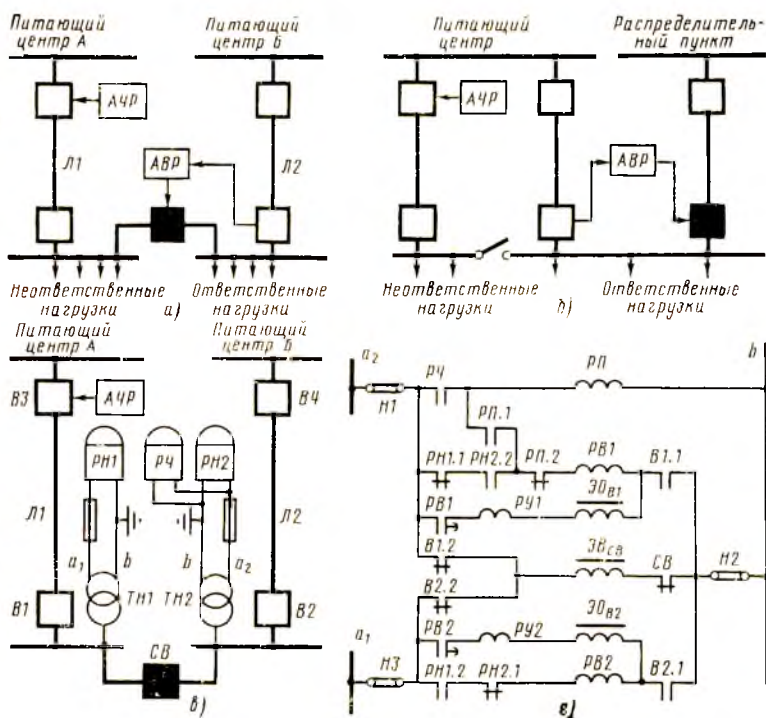


Рис. 6-14. Примеры сочетания устройств АЧР с АВР.

а, б — АВР одностороннего действия; в, г — АВР двустороннего действия с блокировкой при снижении частоты.

является то, что в случае повреждения линии *Л1* при нормальной частоте в энергосистеме не будет осуществляться резервирование неответственных потребителей.

Во втором варианте (рис. 6-14,б) питание неответственных и ответственных нагрузок осуществляется от одного питающего центра, но по разным линиям. Резервирование ответственных потребителей, подключенных к одной из секций, обеспечивается устройством АВР от

распределительного пункта сети. Неответственные нагрузки, также выделенные на отдельную секцию, могут отключаться устройствами АЧР.

Однако не всегда удается рассредоточить ответственных и неответственных потребителей на разные секции и разные линии. В таких случаях применяются устройства АВР двустороннего действия (рис. 6-14, а, з) с блокировкой при снижении частоты.

Если частота в энергосистеме нормальная, то устройство обеспечивает взаиморезервирование секций шин. Действие схемы в этом случае аналогично рассмотренному выше для секционного выключателя.

Блокирование устройства АВР при снижении частоты в энергосистеме и отключении линии Л1 действием АЧР осуществляется с помощью реле частоты РЧ, уставка которого должна быть выше уставки автоматики АЧР. Поэтому раньше, чем отключится выключатель ВЗ, срабатывает промежуточное реле РП и своим размыкающим контактом РП.2 выводит из работы ПОН I секции. После срабатывания РН1 реле РП самоудерживается через контакт РП.1 до появления напряжения на ТН1 и возврата РН1.

Совместная работа устройств АВР и АПВ. Некоторые вопросы согласования действия устройств АВР и АПВ линий были рассмотрены в предыдущих параграфах. Применяются как отдельные устройства АПВ и АВР, так и комбинированные устройства АПВ-АВР [13, 69]. АПВ осуществляется при срабатывании резервной защиты от внешних повреждений, например максимальной токовой, а АВР — при срабатывании дифференциальной или газовой защиты трансформатора.

Вопросы для самопроверки

1. Почему включение резервного источника должно происходить только после отключения рабочего?
2. С какой целью применяются пусковые органы в устройствах АВР и в каких случаях не требуется их установки?
3. Сравните различные варианты выполнения пусковых органов.
4. Какие изменения необходимо внести в схему устройства АВР трансформатора (см. рис. 6-8) в случае трех рабочих трансформаторов?
5. В каких случаях осуществляется ускорение действия защиты после АВР до 0 и до 0,5 с и почему?

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТНАЯ РАЗГРУЗКА ЭНЕРГОСИСТЕМ (АЧР)

7-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Поддержание заданного значения частоты энергосистемы в нормальных режимах обеспечивается регуляторами частоты вращения турбин и регуляторами частоты и мощности (см. гл. 2).

Некоторые аварии могут привести к возникновению такого дефицита мощности, который не ликвидируется даже при полном использовании вращающегося резерва генераторной мощности (мощности турбин). Тогда под действием некомпенсированного дефицита мощности частота будет снижаться и достигнет определенного значения, при котором в энергосистеме вновь установится баланс мощностей. Это обусловлено наличием *регулирующего эффекта нагрузки по частоте*, заключающегося в том, что с изменением частоты меняется потребляемая мощность. Зависимость мощности нагрузки от частоты в установившемся режиме называется *статической частотной характеристикой нагрузки*. В общем случае при постоянном напряжении эта зависимость имеет вид:

$$P_n = \alpha_0 P_{n0} + \alpha_1 P_{n0} \frac{f}{f_0} + \alpha_2 P_{n0} \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 + \dots \\ \dots + \alpha_n P_{n0} \left(\frac{f}{f_0} \right)^n, \quad (7-1)$$

где P_{n0} — мощность нагрузки при частоте f_0 ; $\alpha_0, \dots, \alpha_n$ — доли общей нагрузки, имеющие соответствующую зависимость от частоты.

Регулирующий эффект нагрузки по частоте характеризуется *коэффициентом регулирующего эффекта*, определяющим снижение ее мощности при снижении частоты в энергосистеме,

$$k = \frac{\Delta P_n}{P_{n0}} \frac{f_0}{\Delta f_0} = \frac{\Delta P_{n*}}{\Delta f_{0*}}, \quad (7-2)$$

где ΔP_n — изменение нагрузки; Δf_0 — изменение частоты в установившемся режиме.

В диапазоне частот 45—50 Гц действительную частотную характеристику нагрузки можно приближенно

заменить линеаризованной характеристикой и считать коэффициент k постоянным. По опытным данным величина $k = 1 \div 3,5$ и увеличивается, если снижение частоты сопровождается снижением напряжения. Это означает, что при снижении частоты в энергосистеме на 1% (0,5 Гц) потребляемая нагрузкой мощность уменьшается на 1—3,5%.

Влияние регулирующего эффекта нагрузки на изменение частоты можно проанализировать с помощью характеристик, приведенных на рис. 7-1. Исходное состояние энергосистемы (точка a) характеризуется балансом мощностей турбин P_T и нагрузки P_N при частоте f_0 . Допустим, произошел «наброс нагрузки», т. е. включение дополнительных потребителей $\Delta P_{до}$. Статическая частотная характеристика энергосистемы сместится вверх и примет вид кривой 3. Для простоты анализа будем считать, что мощность турбин в рассматриваемом процессе практически не меняется (кривая 1). Тогда под действием возникшего дефицита мощности $\Delta P_{до} = P'_N - P_T$ частота в энергосистеме начнет снижаться, но при достижении значения f_1 равновесие в энергосистеме вновь восстановится (точка b). Таким образом произойдет переход от условий равновесия при частоте f_0 к условиям равновесия при другой частоте f_1 .

Значение отклонения частоты в энергосистеме Δf_0 , %, определяется на основании выражения (7-2) при условии $\Delta P_N = \Delta P_{до}$, где $\Delta P_{до}$ — значение начального дефицита мощности (при частоте f_0):

$$\Delta f_0 = \frac{\Delta P_{до}}{k}, \quad (7-3)$$

где $\Delta P_{до}$ — в процентах.

При $f_0 = 50$ Гц значение Δf_0 , Гц

$$\Delta f_0 = \frac{\Delta P_{до}}{2k}. \quad (7-4)$$

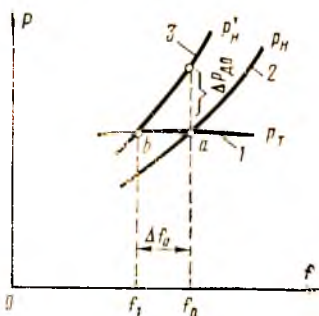


Рис. 7-1. Влияние регулирующего эффекта нагрузки на изменение частоты при набросе нагрузки.

1 — характеристика мощности турбин; 2 — характеристика нагрузки до наброса; 3 — после наброса.

Следовательно, новое значение частоты f_1 , при которой вновь устанавливается равновесие в энергосистеме,

$$f_1 = 50 - \Delta f_0 = 50 - \frac{\Delta P_{\text{до}}}{2k}. \quad (7-5)$$

где $\Delta P_{\text{до}}$ — в процентах.

Динамическая характеристика энергосистемы определяет характер протекания переходного процесса изменения частоты вследствие возникновения дефицита мощности. При отсутствии резерва генераторной мощности имеем:

$$T_J \frac{d}{dt} \Delta f_* + k P_{\text{но}} \Delta f_* + \Delta P_{\text{до}} = 0, \quad (7-6)$$

где T_J — постоянная инерции вращающихся масс энергосистемы.

Из (7-6) следует:

$$\Delta f_* = - \frac{\Delta P_{\text{до}}}{k P_{\text{но}}} (1 - e^{-t/T_q}), \quad (7-7)$$

где $T_q = T_J / k P_{\text{но}}$ — частотная постоянная времени энергосистемы ($T_q = 5 \div 8$ с).

Таким образом, динамическая характеристика энергосистемы, т. е. изменение частоты во времени при отсутствии вращающегося резерва, имеет экспоненциальный характер (рис. 7-2):

$$f = f_0 - \Delta f = f_0 - \Delta f_0 (1 - e^{-t/T_q}). \quad (7-8)$$

Допустимые аварийные понижения частоты и мероприятия, направленные на ее восстановление. Аварийное понижение частоты ограничивается не только требованиями нормальной работы потребителей, но и условиями работы основного и вспомогательного оборудования электростанций. Уменьшение частоты вращения генераторов и двигателей влияет на работу собственных нужд тепловых электростанций, в первую очередь питательных и циркуляционных па-

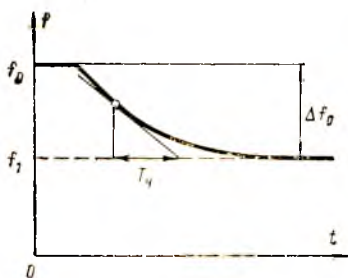


Рис. 7-2. Динамическая характеристика энергосистемы.

сосов. При частоте около 45—46 Гц первые снижают производительность до нуля, а вторые — на 25—40%. Это в свою очередь влечет за собой резкое уменьшение вырабатываемой генераторами мощности и дальнейшее снижение частоты. В результате возникает *«лавина частоты»*.

Процесс уменьшения частоты вызывает также уменьшение выработки реактивной мощности и в то же время увеличение ее потребления нагрузкой, что приводит к понижению напряжения в энергосистеме. При частоте 43—45 Гц напряжение может снизиться до такого значения, при котором возникает *«лавина напряжения»*.

Явления «лавины частоты и напряжения» протекают довольно быстро (от десятков секунд до нескольких секунд) и могут привести не только к полному сбросу нагрузки, но и к остановке всех или части электростанций энергосистемы.

Для предотвращения таких аварий применяется специальный комплекс мероприятий:

- использование вращающегося резерва генераторной мощности;

- перевод гидроагрегатов из режима синхронного компенсатора в генераторный режим и пуск резервных агрегатов;

- отключение части потребителей.

С целью ликвидации возникшего дефицита мощности следует в первую очередь обеспечивать быстрый ввод резервной мощности за счет ТЭС. Благодаря малой инерционности систем регулирования паровых турбин, они могут быстро набирать дополнительную нагрузку. Инерционность регулирования гидротурбин значительно больше и позволяет получить от них полную мощность только через 15—20 с, что не всегда может предотвратить аварию. Для уменьшения инерционности регулирования гидротурбин на многих ГЭС успешно применяются специальные автоматические устройства ускорения набора нагрузки при снижении частоты.

Время перевода гидрогенератора из режима синхронного компенсатора в генераторный режим обычно составляет 10—30 с, а время пуска резервного агрегата — 50—90 с. Пуск резервных агрегатов ГЭС при понижении частоты (частотный пуск), как правило, не может предотвратить аварии с возникновением «лавины напряжения и частоты».

Величина вращающегося резерва в ряде случаев бывает незначительна, а иногда и вообще отсутствует, например в часы максимумов нагрузки. К тому же при крупных авариях, связанных с отключением генераторов, электростанций или разделением энергосистемы на районы, дефицит мощности может достигать большой величины. В таких условиях наиболее надежным и, что особенно важно, быстродействующим средством является автоматическое отключение нагрузки, называемое *автоматической частотной разгрузкой (АЧР)*.

Хотя частотная разгрузка связана с некоторым ущербом, она позволяет предотвратить значительно больший ущерб, вызванный нарушением нормальной работы или полным развалом энергосистемы. Опыт эксплуатации АЧР подтвердил высокую эффективность этих устройств, вследствие чего автоматическая частотная разгрузка является одним из основных технических средств повышения надежности работы энергосистем.

Требования, предъявляемые к устройствам АЧР. При осуществлении частотной разгрузки необходимо выполнять следующие основные требования:

1. Мощность, отключаемая устройствами АЧР, должна быть достаточной для ликвидации максимального реально возможного дефицита мощности. Для этого при анализе схем и режимов работы энергосистемы необходимо выявлять наиболее тяжелые по величине дефицита мощности аварийные ситуации (отключение значительной генерирующей мощности, сильно загруженных и ответственных связей, разделение энергосистем и т. д.)

2. Устройства АЧР должны выполняться таким образом, чтобы полностью исключить возможность возникновения лавины частоты и напряжения. Согласно [83] не допускается даже кратковременное снижение частоты ниже 45 Гц, а время работы с частотой ниже 47 Гц не должно превышать 20 с.

3. Устройства АЧР должны размещаться таким образом, чтобы обеспечить ликвидацию любого дефицита мощности независимо от места возникновения и характера развития аварии (местные и общесистемные дефициты мощности, каскадное развитие аварии и т. д.).

4. Устройства АЧР должны обеспечивать отключение нагрузки в соответствии с величиной возникшего дефицита мощности (самонастраивающаяся разгрузка).

5. После действия АЧР частота должна восстанавливаться, как правило, до 49—49,5 Гц. Дальнейший ее подъем осуществляется автоматическим включением резервных гидрогенераторов или же мероприятиями, проводимыми диспетчером энергосистемы.

6. Частотная разгрузка должна выполняться после максимального использования имеющегося в энергосистеме вращающегося резерва на тепловых электростанциях.

7. Необходимо предусматривать специальные мероприятия для того, чтобы не допускать ложной работы устройств АЧР в случаях кратковременного снижения частоты при к. з. или в циклах АПВ и АВР.

Расчеты показывают, что значительное снижение частоты и ложное действие устройств АЧР вследствие наброса активной мощности при к. з. может произойти в энергосистемах небольшой мощности (до 200—300 МВт). Снижение частоты и ложное действие устройств АЧР возможно также при перерывах питания в циклах АПВ и АВР подстанций с синхронными компенсаторами или электродвигателями.

Ложная работа устройств АЧР в указанных случаях исключается:

- определенным выбором категорий (см. ниже) и уставок срабатывания устройств АЧР;

- применением специальных блокировок, запрещающих действие устройств АЧР при потере питания, например по исчезновению тока (мощности) в питающей линии или трансформаторе;

- отключением или гашением поля синхронных электродвигателей и компенсаторов;

- применением частотного АПВ—ЧАПВ (см. § 7-3).

8. Действия устройств АЧР должны быть согласованы с действием устройств АПВ и АВР с тем, чтобы исключить возможность восстановления питания потребителей, отключенных разгрузкой, от тех же дефицитных источников питания.

7-2. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ АЧР

Новый порядок организации автоматической частотной разгрузки [83] разработан в соответствии с требованиями объединенных энергосистем и учитывает специфику, разнообразие, возможное распространение ава-

рий, а также вероятностный характер дефицитов мощности в масштабах целых энергосистем.

По своему назначению устройства автоматической разгрузки подразделяются на три основные категории:

АЧР I — быстродействующая категория разгрузки, предназначенная для предотвращения значительного снижения частоты. Выполняется в виде нескольких очередей разгрузки, имеющих различные уставки по частоте.

АЧР II — категория разгрузки, предназначенная для подъема частоты после действия устройств **АЧР I**, а также для предотвращения «зависания» частоты на недопустимом уровне и снижения ее при сравнительно медленном аварийном увеличении дефицита мощности. Выполняется в виде нескольких очередей разгрузки с общей уставкой по частоте и различными уставками по времени.

Дополнительная разгрузка — действующая по возможности селективно (только при возникновении местных дефицитов мощности) и предназначенная для ускорения разгрузки и увеличения ее объема при особо значительных (45% и более) дефицитах мощности, например при аварийном отделении района или узла нагрузки от главного источника питания (подробнее — см. § 7-5).

Уставки устройств АЧР I и АЧР II по частоте. Опыт эксплуатации энергосистем показывает, что при снижении частоты ниже 49 Гц вращающийся резерв мощности на тепловых электростанциях практически полностью мобилизуется. Поэтому верхний предел уставок по частоте для устройств **АЧР I** устанавливается 48,5 Гц. В дальнейшем этот предел предполагается приблизить к 49 Гц, что осуществляется уже в настоящее время в отдельных частях энергосистем с целью облегчения условий ресинхронизации. Нижний предел по частоте устройств **АЧР I** должен быть не ниже 46,5 Гц.

В указанном диапазоне частот очереди **АЧР I** распределяются равномерно с минимальным интервалом по частоте $\Delta f = 0,1$ Гц, который принят, исходя из точности приборов и генераторов частоты, используемых при настройке реле частоты.

Для всех очередей устройств **АЧР II** принимается единая уставка по частоте, равная верхнему пределу уставок устройств **АЧР I** или несколько больше (до 0,5 Гц),

но не выше 48,8 Гц. При необходимости подъема частоты до значений выше уставки срабатывания устройств АЧРП по условиям ресинхронизации районов или энергосистем, а также для облегчения и ускорения действия устройств повторного включения (АПВУС) целесообразно обеспечить автоматическое повышение частоты возврата устройств АЧРП после их пуска.

Допускается неселективное действие смежных очередей АЧРП за счет погрешности реле частоты, а также отдельных очередей АЧРП, например, при медленном снижении частоты в энергосистеме до значения, близкого к уставке АЧРП.

Уставки устройств АЧРП и АЧРП по времени. Выдержка времени устройств быстродействующей категории разгрузки (АЧРП) выбирается минимальной по условиям предотвращения ложной работы реле частоты.

Для исключения ложных действий индукционного реле частоты типа ИВЧ-011 при резких изменениях контролируемого напряжения достаточна выдержка времени 0,25—0,3 с. Полупроводниковые реле частоты типа РЧ-1 в таких условиях ложно не работают, поэтому они позволяют выполнять частотную разгрузку с меньшими выдержками времени. В случае синхронных качаний устройства АЧРП с уставками по частоте 46,5—47,5 Гц практически не действуют, а для предотвращения ложной работы устройств АЧРП с уставками 47,5—49,0 Гц достаточна выдержка времени 0,25—0,3 с, а в большинстве случаев 0,1—0,15 с.

Минимальная начальная уставка по времени устройств АЧРП составляет 5—10 с, а максимальная — 60 с. При наличии существенной резервной мощности на ГЭС и возможности ее мобилизации конечная уставка по времени устройств АЧРП может быть повышена до 70—90 с. Минимальные интервалы выдержки времени между смежными очередями АЧРП принимаются равными $\Delta t=3$ с.

Мощность нагрузки, отключаемая устройствами АЧРП и АЧРП. На основании требований, предъявляемых к устройствам АЧР (§ 7-1), суммарная мощность отключаемой нагрузки должна быть достаточной для ликвидации любых реально возможных дефицитов мощности, при определении которых рассматриваются:

для изолированных электростанций — отключение наиболее мощного генератора или блока;

для энергосистем — отключение наиболее мощной электростанции;

для энергосистем, входящих в объединенную энергосистему, — отключение питающих линий с последующей перегрузкой, потерей устойчивости и отключением слабых связей;

для объединенных энергосистем в целом — возможность их разделения из-за отключения межсистемных связей или отключения генерирующей мощности с последующим отключением слабых связей.

Мощность нагрузки, отключаемой устройствами АЧРІ, определяется по максимальному дефициту мощности с учетом некоторого запаса. Величина запаса принимается равной 5% мощности нагрузки энергосистемы и учитывает вероятностный характер возникновения аварий. Вращающийся резерв на тепловых электростанциях, как правило, не учитывается и относится в запас. Исключения составляют случаи, когда имеется гарантированный вращающийся резерв, обеспечиваемый производительностью парогенераторов.

Учитывая изложенное, объем нагрузки, отключаемой устройствами АЧРІ, определяют по формуле

$$P_{\text{АЧРІ}} \geq \Delta P_{\text{д.макс}} + 0,05P_{\text{н0}} - \Delta P_{\text{г.р}}, \quad (7-9)$$

где $\Delta P_{\text{д.макс}}$ — максимальный дефицит мощности; $P_{\text{н0}}$ — мощность нагрузки в исходном режиме до возникновения дефицита мощности; $\Delta P_{\text{г.р}}$ — величина учитываемой части гарантированного резерва мощности на ТЭС.

Мощность нагрузки, отключаемой устройствами АЧРІІ с учетом запасов, рекомендуемых директивными материалами, принимается:

$$P_{\text{АЧРІІ}} \geq 0,4P_{\text{АЧРІ}}, \quad (7-10)$$

но не менее $0,1P_{\text{н0}}$. Возможность мобилизации мощности на ГЭС, как правило, не учитывается и идет в запас. Исключения составляют случаи, когда имеется гарантированный запас мощности на ГЭС, который принимается во внимание с учетом фактического времени его мобилизации.

Выбранные объемы мощности нагрузки распределяются равномерно по очередям в принятых диапазонах уставок по частоте (для АЧРІ) и времени (для АЧРІІ).

При этом учитывается степень ответственности потребителей, т. е. по мере возрастания ответственности потребителей их следует подключать к очередям АЧРІ с более низкими уставками по частоте и к очередям АЧРІІ с более высокими уставками по времени. Следует отметить, что неселективное действие смежных очередей АЧР не приводит к излишнему отключению нагрузки ввиду значительного числа очередей и небольших отключаемых ими мощностей.

Характер изменения частоты в энергосистеме при возникновении дефицита мощности и действии устройств АЧР показан на рис. 7-3 кривой 2. При отсутствии АЧР частота изменяется в соответствии с кривой 1.

В момент времени t_0 в энергосистеме происходит авария, сопровождающаяся возникновением значительного дефицита мощности. Имеющийся вращающийся резерв генераторной мощности на ТЭС полностью исчерпан, и частота в энергосистеме снижается. В точке a в момент времени t_1 частота достигает уставок срабатывания первой очереди АЧРІ и всех очередей АЧРІІ. Срабатывание устройств АЧРІ первой очереди приводит к отключению части нагрузки и замедлению снижения частоты. Далее срабатывают устройства АЧРІ второй, третьей и т. д. очередей до тех пор, пока снижение частоты не приостановится. В момент времени t_2 по истечении выдержки времени $t_{\text{АЧРІІ}}$ срабатывает устройство АЧРІІ первой очереди, через интервал Δt — второй очереди и так до тех пор, пока частота в энергосистеме не поднимется выше уставки устройств АЧРІІ.

Таким образом, по мере аварийного снижения частоты срабатывают устройства АЧРІ со все более низкими уставками по частоте, а при восстановлении частоты срабатывают устройства АЧРІІ со все более высокими уставками по времени. Подобное деление час-

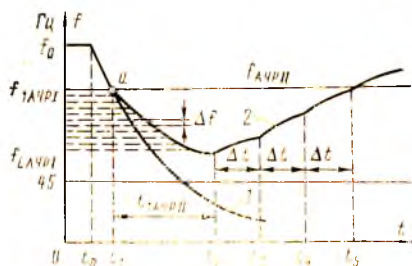


Рис. 7-3. Изменение частоты при возникновении дефицита мощности.

1 — при отсутствии АЧР; 2 — при наличии АЧР.

тотной разгрузки на категории, большое число очередей при минимальных интервалах между ними позволяет создать гибкую и самонастраивающуюся систему АЧР в масштабах энергосистем, обеспечивающую практически во всех случаях соответствие суммарной мощности отключенных потребителей и возникшего дефицита.

Кривая изменения частоты в энергосистеме (кривая 2, рис. 7-3) может быть построена по интервалам, в каждом из которых справедливы выражения (7-7) и (7-8), где под f_0 , $\Delta P_{до}$, $P_{но}$ следует понимать начальные значения частоты, дефицита мощности и мощности нагрузки для данного интервала Δf . Поскольку АЧРІ выполняется с большим числом очередей и с малой степенью по частоте при расчете процесса изменения частоты, смежные очереди группируются в одну укрупненную, что упрощает расчет, не внося при этом значительной погрешности. Частотная постоянная времени энергосистемы определяется:

при небольших дефицитах мощности приближенно

$$T_{\text{ч}} = T_J / k; \quad (7-11)$$

при больших дефицитах мощности более точно

$$T_{\text{ч}} = \frac{T_{\text{тг}} (1 + \Delta P_{\text{г}}) + T_{\text{н}} (1 + \Delta P_{\text{н}})}{k (1 + \Delta P_{\text{н}})}, \quad (7-12)$$

где $T_{\text{тг}}$, $T_{\text{н}}$ — постоянные инерции турбогенераторов и нагрузки соответственно; $\Delta P_{\text{г}}$, $\Delta P_{\text{н}}$ — изменения генерирующей мощности и мощности нагрузки соответственно (со знаком плюс — при увеличении мощности, со знаком минус — при уменьшении), корректируются на каждом интервале Δf .

Совмещенная частотная разгрузка. Более эффективное использование системы АЧР может быть достигнуто совмещением действия устройств АЧРІ и АЧРІІ, при котором одна и та же нагрузка подключается как к очередям АЧРІ, так и к АЧРІІ. Совмещенное выполнение категорий АЧР обладает следующими преимуществами по сравнению с несовмещенным:

обеспечивается необходимая последовательность в отключении потребителей с точки зрения их ответственности при различных по характеру авариях: сопровождающихся возникновением либо незначительных дефицитов мощности или медленным их нарастанием, либо значительных дефицитов мощности, возникающих практически мгновенно;

уменьшается суммарная мощность нагрузки, подключаемой к устройствам АЧР.

Таким образом, переход на совмещенную частотную разгрузку особенно важен в тех случаях, когда имеются трудности в обеспечении необходимых запасов в разгрузке при раздельном выполнении категорий АЧР I и АЧР II. Согласно [83] рекомендуется в дальнейшем охватить вторым пуском (пуском от АЧР II) все 100% очередей категории АЧР I.

При выполнении совмещенной частотной разгрузки следует иметь в виду, что для сокращения длительности подъема частоты после действия устройств АЧР I при более частых (немаксимальных) дефицитах мощности необходимо выполнять ряд несовмещенных очередей с пуском только от устройств АЧР II, суммарная отключаемая мощность которых должна составлять:

$$P_{\text{АЧР II несовм}} \geq 0,1 P_{\text{но}}. \quad (7-13)$$

Для несовмещенных очередей принимаются начальные уставки по времени устройств АЧР II.

Применение частотной разгрузки для облегчения условий ресинхронизации (обеспечения результирующей устойчивости). При нарушении устойчивости параллельной работы энергосистем и возникновении асинхронного режима АЧР может применяться как один из способов прекращения асинхронного режима, ускорения ресинхронизации и действия устройств АПВУС. С этой целью необходимо отключить часть потребителей в дефицитной энергосистеме для уменьшения скольжения до значения, необходимого по условиям восстановления синхронизма. Поэтому в некоторых случаях требуется корректировка параметров настройки устройств АЧР, методика которой приведена в [83].

В тех случаях, когда ресинхронизация обеспечивается без применения АЧР, корректировка параметров настройки и размещение устройств частотной разгрузки выполняются таким образом, чтобы исключалась их излишняя работа. При необходимости применяется ЧАПВ (см. § 7-4).

Некоторые пути развития и совершенствования частотной разгрузки. Представляет интерес способ выполнения частотной разгрузки с зависимой выдержкой времени [87]. Он поясняется на рис. 7-4.

При снижении частоты в энергосистеме до уставки пуска $f_{\text{п}}$ происходит пуск устройств АЧР и с момента времени t_0 начинается изменение их уставок срабатывания в соответствии с характеристиками $a-a'$, $b-b'$, $c-c'$, $d-d'$ и $e-e'$, представляющими собой экспоненты.

Устройства срабатывают в точках пересечения их характеристик с кривой изменения частоты. При этом устройствам с более низкими уставками срабатывания соответствуют большие выдержки времени. В рассматриваемом случае после действия устройства АЧР с характеристикой $d-d'$ частота в энергосистеме начинает подниматься. Если кривая повышения частоты (1—3) не пересекается с характеристикой устройства АЧР следующей очереди $e-e'$, то

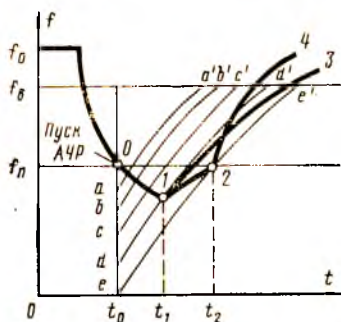


Рис. 7-4. К выполнению АЧР с зависимой выдержкой времени.

дальнейшего отключения нагрузки не происходит. В противном случае (дефицит не ликвидирован или частота зависла) в точке 2 срабатывает устройство АЧР следующей очереди и отключает дополнительно нагрузку, после чего частота устанавливается выше частоты возврата $f_{\text{в}}$ устройства пуска АЧР.

Таким образом, АЧР с зависимой выдержкой времени позволяет органически совместить одновременно

функции категорий АЧР I и АЧР II. При этом в отличие от совмещенной АЧР уменьшается снижение частоты после действия быстродействующих очередей и сокращается время ее подъема, а в отличие от несовмещенной дополнительно обеспечивается строгая последовательность в отключении нагрузки и, следовательно, учитывается степень ответственности потребителей при любом характере аварии. Последнее обусловлено тем, что каждая последующая очередь АЧР имеет более низкую уставку по частоте в одинаковый момент времени, например точки a и b при $t=t_0$, и большее время срабатывания при одинаковой частоте.

Рассмотренные выше системы частотной разгрузки основаны на применении устройств АЧР, реагирующих на абсолютное значение частоты. Как известно, принци-

принципиальным недостатком таких систем является то, что устройства АЧР начинают действовать только при снижении частоты до определенного уровня, соответствующего их уставке. С другой стороны, современные энергосистемы с турбогенераторами большой мощности, парогенераторами высокого и сверхвысокого давления, а также некоторые потребители предъявляют все более жесткие требования к величине и длительности снижения частоты в энергосистеме.

Более совершенна система АЧР, реагирующая на производную частоты. Основным ее преимуществом является то, что она начинает разгружать энергосистему раньше, чем частота успеет снизиться до определенного значения, соответствующего данному дефициту мощности. Однако из (7-8) с учетом (7-4) следует:

$$\frac{df}{dt} = -\frac{\Delta P_{до}}{2kT_{ч}} e^{-t/T_{ч}}, \quad (7-14)$$

где $\Delta P_{до}$ — в процентах.

Таким образом, скорость изменения частоты в различных режимах работы энергосистемы неоднозначно определяет величину возникшего дефицита мощности и зависит дополнительно от частотной постоянной $T_{ч}$ и коэффициента регулирующего эффекта нагрузки k . Исходя из этого, система АЧР, реагирующая только на производную частоты, не может быть выполнена самонастраивающейся; кроме того, она принципиально не действует при зависании частоты. В некоторой степени эти недостатки устраняются применением комбинированного пуска как по абсолютному значению, так и по скорости снижения частоты. В связи с этим устройства, действие которых основано на указанных принципах, могут применяться ограниченно и главным образом для осуществления дополнительной разгрузки. Скорость снижения частоты при значительных местных дефицитах мощности существенно больше, чем при общесистемных, что легко может быть зафиксировано.

В [86] дается описание устройства ускоренной разгрузки, не имеющего упомянутых недостатков. Отключение нагрузки производится по следующим параметрам: абсолютному значению частоты, скорости снижения (производной) частоты, знаку производной и времени. Принцип действия этого устройства АЧР рассмотрим на основе упрощенной функциональной схемы, приведенной на рис. 7-5.

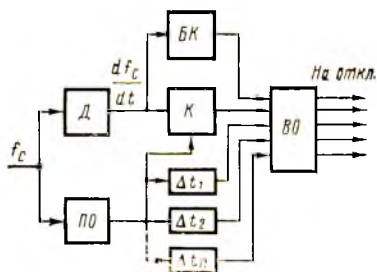


Рис. 7-5. Функциональная схема устройства ускоренной разгрузки энергосистемы.

Сигнал, пропорциональный частоте сети f_c , подается на дифференцирующий элемент D и пусковой орган $ПО$. Пусковой орган осуществляет пуск устройства при снижении частоты до уставки его срабатывания (пуск по абсолютному значению частоты). При этом он открывает ключ K и сигнал, пропорциональный производной частоты,

поступает в выходной орган $ВО$, который производит в соответствии со значением этого сигнала отключение нагрузки. При этом возможны следующие случаи:

мощность отключенной нагрузки недостаточна и частота продолжает снижаться, но со значительно меньшей скоростью;

частота в энергосистеме зависает на недопустимом уровне.

В первом случае действует блок контроля $БК$ — орган, реагирующий на знак производной частоты. Через время контроля блок $БК$ производит отключение нагрузки следующих очередей до тех пор, пока не изменится знак производной частоты.

Таким образом, с помощью блока контроля уточняется значение разгрузки, чем достигается самонастройка устройства.

Во втором случае подъем частоты в энергосистеме осуществляется дополнительными очередями, отключение которых обеспечивается пусковым органом $ПО$. Сигналы на отключение поступают с возрастающими выдержками времени $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ до тех пор, пока частота не станет выше уставки срабатывания $ПО$.

7-3. ЧАСТОТНОЕ АПВ (ЧАПВ)

Задачей частотного АПВ (ЧАПВ) является быстрое восстановление питания потребителей, отключенных действием устройств АЧР, путем повторного включения выключателей после восстановления частоты в энергоси-

стеме. Целесообразность применения устройств ЧАПВ обусловлена возможностью ликвидации дефицитов мощности при авариях за счет мобилизации резервной мощности на ГЭС и других электростанциях.

Установку устройств ЧАПВ рекомендуется предусматривать на всех объектах, где имеются устройства АЧР, в первую очередь в следующих условиях:

при высокой степени ответственности потребителей, отключаемых последними очередями устройств АЧР;

при необходимости затраты значительного времени для восстановления питания потребителей, отключенных действием устройств АЧР (подстанции без постоянного дежурного персонала и телеуправления, расположенные далеко от пункта размещения оперативных выездных бригад и т. д.);

при необходимости исправления ложных действий устройств АЧР при кратковременных снижениях частоты в случае к. з. или в циклах АПВ и АВР.

Частотное АПВ выполняется несколькими очередями как с единой уставкой по частоте, так и с различными, в диапазоне 49,2—50 Гц [83]. При этом, если частотная разгрузка используется для обеспечения результирующей устойчивости, частота срабатывания устройств ЧАПВ принимается ближе к 50 Гц, т. е. выше частоты ресинхронизации и включения межсистемных связей действием устройств АПВУС. В случае различных уставок устройств ЧАПВ по частоте более высоким уставкам должны соответствовать большие выдержки времени.

Минимальная начальная уставка устройств ЧАПВ по времени 10—20 с. Максимальная конечная уставка выбирается, исходя из конкретных условий работы энергосистемы и возможности ликвидации дефицита мощности за счет восстановления параллельной работы. Минимальный интервал по времени смежных очередей ЧАПВ в пределах энергосистемы или отдельного узла принимается равным 5 с.

Нагрузка распределяется между очередями ЧАПВ по возможности равномерно. Для обеспечения первоочередного повторного включения более ответственных потребителей очередность их подключения обратна очередности подключения к устройствам АЧР.

Учитывая возможность развития аварии, например повторного снижения частоты или увеличения времени,

необходимого для ее восстановления, вследствие действия устройств ЧАПВ, последнее выполняют однократным.

7-4. СХЕМЫ УСТРОЙСТВ АЧР И ЧАПВ

В качестве пускового органа устройств АЧР применяется индукционное реле частоты типа ИВЧ-011. Главный недостаток этого реле состоит в том, что частота его срабатывания зависит от контролируемого напряжения, причем в случае снижения напряжения более чем на 40—50% индукционное реле перестает работать. Поэтому при возникновении значительных дефицитов мощности, когда наряду с изменением частоты происходит резкое снижение напряжения, возможен отказ в работе устройств АЧР. Для предотвращения отказов при снижении частоты, сопровождающихся глубоким снижением напряжения, применяются схемы подключения реле частоты через стабилизатор напряжения либо через специальный промежуточный трансформатор с изменяющимся коэффициентом трансформации [5].

Разработаны новые полупроводниковые реле частоты типа РЧ-1 [84] и импульсное реле частоты [85], не

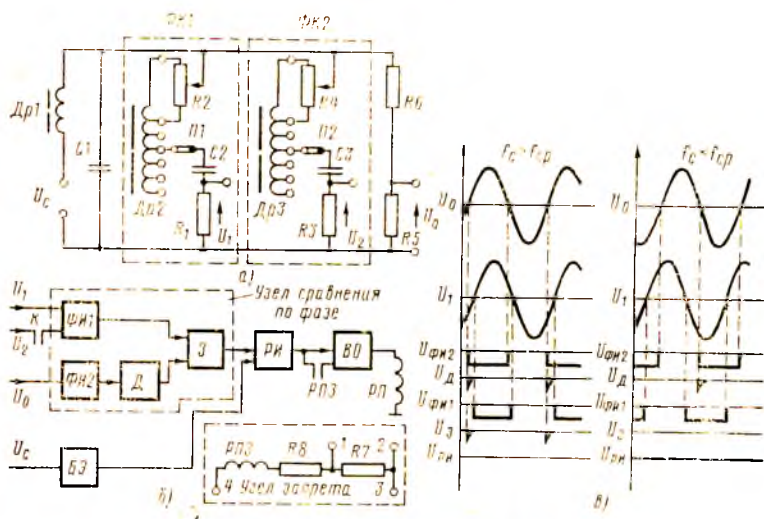


Рис. 7-6. Модуль понижения частоты.

а — схема входных цепей; б — функциональная схема; в — диаграммы работы модуля.

имеющие указанных недостатков. Реле типа РЧ-1 выпускается промышленностью. В модульных устройствах защиты и автоматики (см. также § 5-3 и 6-2) комплектных распределительных устройств (КРУ) 3—10,5 кВ реле РЧ-1 выполняется в виде модуля понижения частоты (рис. 7-6).

Рассмотрим принцип его работы. Напряжение сети через входной разделительный трансформатор (на схеме не показан) и фильтр $Dp1, C1$ (рис. 7-6,а), устраняющий влияние высших гармоник в кривой напряжения на работу модуля, подается на фазосдвигающую схему. Эта схема включает в себя два фазосдвигающих контура $\Phi K1$ и $\Phi K2$ и делитель напряжения $R5, R6$.

Резонансная частота фазосдвигающего контура $\Phi K1$ выбирается равной частоте срабатывания модуля, а контура $\Phi K2$ — частоте возврата. Уставки по частоте регулируют ступенчато через 1 Гц переключателями $П1$ и $П2$ и плавно в пределах 1 Гц резисторами $R2, R4$. Диапазон уставок срабатывания 45—50 Гц, возврата — 46—51 Гц.

Принцип работы модуля основан на том, что при изменении частоты контролируемого напряжения сети U_c изменяется угол сдвига между напряжением сети (опорным напряжением U_0) и током в фазосдвигающем контуре (напряжением U_1, U_2).

Напряжение U_1 фазосдвигающего контура $\Phi K1$ и опорное напряжение U_0 (рис. 7-6,б) подаются на входы формирователей импульсов $\Phi И1$ и $\Phi И2$ узла сравнения по фазе, служащих для преобразования синусоидальных напряжений в прямоугольные импульсы длительностью, близкой к половине периода входного напряжения. Кроме формирователей импульсов в состав узла сравнения по фазе входит дифференцирующий элемент D , который формирует короткие рабочие (тормозные) импульсы, соответствующие переднему фронту прямоугольных импульсов опорного напряжения, и логический элемент «запрет» — $З$, который разрешает прохождение тормозного импульса только при отсутствии на другом входе прямоугольного импульса от формирователя $\Phi И1$.

При частоте сети выше частоты уставки срабатывания модуля, т. е. больше резонансной частоты контура $\Phi K1$, опорное напряжение U_0 опережает по фазе напряжение U_1 (рис. 7-6,в). В этом случае на выходе элемента «запрет» появляются тормозные импульсы, поступаю-

щие на вход расширителя импульсов *РИ*. Расширитель импульсов выполнен таким образом, что при наличии на его входе тормозных импульсов сигнал на выходе отсутствует и модуль не срабатывает.

Если частота сети меньше уставки срабатывания, то импульсы на выходе элемента «запрет» отсутствуют и на выходе расширителя импульсов появляется непрерывный сигнал, который поступает в выходной орган *ВО* и вызывает срабатывание выходного реле *РП*.

Для получения плавной и независимой шкалы уставок возврата предусмотрен фазосдвигающий контур *ФК2*. Выход контура *ФК2* при необходимости может подключаться к входу формирователя *ФИ1* внешним контактом *К* при срабатывании модуля (схема управления контактом на рис. 7-6 не показана). При этом частота возврата модуля будет определяться уставкой частоты возврата, являющейся резонансной частотой контура *ФК2*.

В модуле предусмотрена блокировка от ложного срабатывания при исчезновении контролируемого напряжения сети. Для этой цели служит блокирующий элемент *БЭ*, разрешающий срабатывание расширителя импульсов только при наличии напряжения сети. Запрет действия модуля при действии автоматики или релейной защиты осуществляется с помощью реле запрета *РПЗ*, которое закорачивает своим контактом вход выходного органа, предотвращая его срабатывание.

Схемы АЧР с ЧАПВ выполняются в виде центральных устройств, общих для секции шин, нескольких секций, отдельных подстанций, и индивидуальных устройств, устанавливаемых на отдельных присоединениях. Выходные цепи центральных устройств АЧР с ЧАПВ выполняются в виде центральных шинок *ШАЧР* и *ШЧАПВ*, к которым подключаются индивидуальные реле устройств АЧР с ЧАПВ присоединений.

На основе полупроводникового реле частоты типа РЧ-1 институтом «Энергосетьпроект» разработаны типовые схемы центральных устройств АЧР с ЧАПВ с использованием одного и двух реле частоты. Устройства первого типа позволяют осуществлять одну очередь АЧР I или АЧР II, устройства второго типа — одну очередь АЧР I и две очереди АЧР II или одну совмещенную очередь, действующую по признаку АЧР I и АЧР II, и одну самостоятельную очередь АЧР II.

На рис. 7-7 приведена схема устройства АЧР с ЧАПВ на постоянном оперативном токе с одним реле частоты.

Для создания выдержки времени очереди АЧРП и ЧАПВ в схеме используется программное реле времени — реле с микродвигателем *PВ* с питанием от сети собственных нужд через стабилизатор напряжения *СН*. С целью повышения надежности работы устройства в схеме питания реле времени *PВ* предусмотрено АВР секции шин собственных нужд (реле *РПП*). Контроль напряжения питания осуществляется с помощью реле *РКН*.

При снижении частоты до уставки срабатывания реле частоты *РЧ* замыкается его контакт *РЧ.1* и срабатывает реле *РП*. В дальнейшем действие схемы зависит от выбора категории разгрузки. Если накладка *Н* снята, то выходное двухпозиционное реле *РП1* срабатывает через выдержку времени реле *PВ* (контакт *PВ.1*), т. е. осуществляется действие разгрузки АЧРП. При установленной накладке *Н* реле *РП1* срабатывает после реле *РП* и подает контактом *РП1.4* напряжение на шину *ШАЧР*. Устройство работает, как АЧРП.

После срабатывания реле *РП1* контактом *РП1.3* изменяется уставка реле частоты (увеличивается частота возврата) и реле *РЧ* переключается на уставку ЧАПВ; контактом *РП1.6* разрывается цепь питания микродвигателя реле времени *PВ*, которое возвращается в исходное состояние.

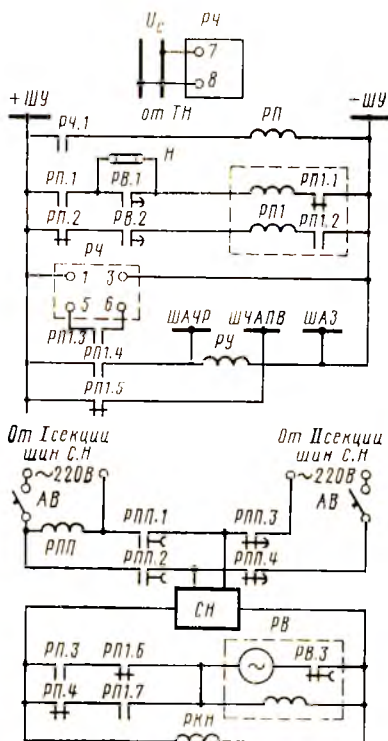


Рис. 7-7. Схема центрального устройства АЧР с ЧАПВ.

При увеличении частоты до уставки ЧАПВ отпадает реле $PЧ$ и $PП$. Последнее контактом $PП.4$ пускает реле времени через выдержку времени ЧАПВ (контакт $PВ.2$) срабатывает реле $PП1$ и подает питание на шинку $ШЧАПВ$.

На подстанциях с переменным оперативным током питание реле времени устройства осуществляется от общих оперативных цепей стабилизированного напряжения, а питание реле частоты — через выпрямительное

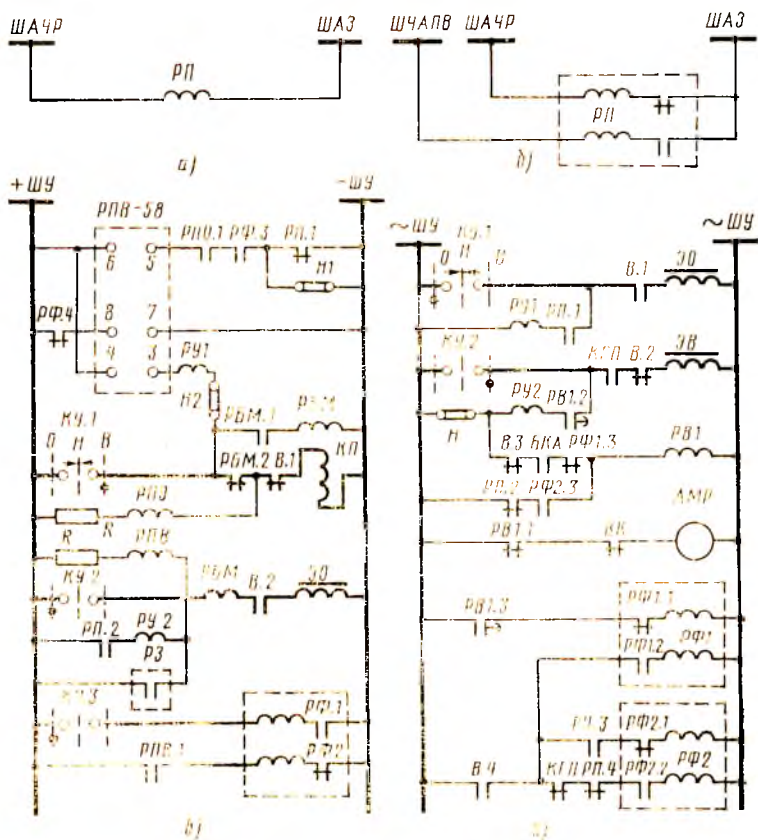


Рис. 7-8. Выполнение индивидуальных устройств АЧР с ЧАПВ на присоединениях.

a и $б$ — схемы подключения обычного и двухпозиционного промежуточного реле соответственно; $в$ — схема устройства АЧР с ЧАПВ для присоединения, имеющего типовое устройство ЛПВ (РПВ-58); $г$ — схема устройства АЧР с ЧАПВ для выключателей с пружинными и грузовыми приводами.

устройство. В остальном схема аналогична рассмотренной выше.

На рис. 7-8 приведены схемы индивидуальных устройств АЧР с ЧАПВ присоединений, имеющих типовое устройство АПВ типа РПВ-58, и присоединений с выключателями с пружинными или грузовыми приводами.

Схемы устройств предусматривают применение в качестве индивидуального реле промежуточных — обычного серии РП (рис. 7-8,а) и двухпозиционного (рис. 7-8,б). Если в схемах индивидуальных устройств предусмотрено обычное реле РП, то шинки ШЧАПВ не используются. В этом случае ЧАПВ выполняется при снятии напряжения с шинок ШАЧР и возврате реле РП. Если же применяется двухпозиционное реле, то повторное включение осуществляется лишь после подачи напряжения на шинку ШЧАПВ и возврата реле РП в исходное состояние. Этим исключается ложное действие устройства ЧАПВ после действия АЧР при исчезновении оперативного тока.

Рассмотрим работу устройства АЧР с ЧАПВ выключателями, имеющими типовое реле РПВ-58 (рис. 7-8,а или б и в). При появлении напряжения на шинке ШАЧР срабатывает индивидуальное реле РП, контактом РП.2 производится отключение выключателя, контактом РП.1 разрывается цепь пуска реле РПВ-58 (накладка И1 разомкнута). После возврата реле РП в исходное состояние контактом РП.1 подается сигнал на включение комплектного реле РПВ-58.

Действие устройства АЧР с ЧАПВ выключателями с пружинными или грузовыми приводами (рис. 7-8,а или б и в) происходит следующим образом. При срабатывании реле РП контактом РП.1 производится отключение выключателя от катушки дистанционного управления. Аварийный блок-контакт БКА остается разомкнутым, и повторного включения не происходит. Замыкание контакта РП.3 приводит к срабатыванию реле РФ2 фиксации работы АЧР, которое контактом РФ2.3 подготавливает цепь реле времени РВ1, создающего выдержку времени ЧАПВ.

После возврата реле РП контактом РП.2 пускается реле времени РВ1. Последнее срабатывает и производит повторное включение выключателя, отключенного действием АЧР.

7-5. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ РАЗГРУЗКА

Некоторые аварии могут привести к возникновению значительных дефицитов мощности в отдельных энергосистемах, районах или узлах нагрузки, сопровождающихся быстрым и глубоким снижением частоты и напряжения. В таких условиях действие АЧР может оказаться неэффективным. Кроме того, объем нагрузки, отключаемый устройствами АЧР и выбранный по условиям ликвидации общесистемных дефицитов мощности, в отдельных случаях может оказаться недостаточным для ликвидации местного дефицита мощности.

В связи с этим в энергосистемах или отдельных районах, где возможно возникновение особо больших дефицитов активной мощности и глубокого снижения частоты (ниже 45 Гц), помимо устройств АЧР предусматривается установка устройств дополнительной категории разгрузки. Дополнительную разгрузку необходимо предусматривать также и в тех случаях, когда наряду с дефицитом активной мощности возможно возникновение значительного дефицита реактивной мощности и как следствие «лавины напряжения». При выполнении дополнительной разгрузки необходимо стремиться к обеспечению срабатывания устройств дополнительной разгрузки в самом начале снижения частоты.

Пуск устройств дополнительной разгрузки осуществляется в первую очередь по факторам, характеризующим возникновение местного дефицита мощности независимо от характера изменения частоты. В качестве таких факторов рекомендуются:

- отключение линии или трансформатора (с контролем или без контроля абсолютного значения и направления мощности в предшествующем режиме);

- изменение абсолютного значения тока, абсолютного значения и направления потока мощности в линии или трансформаторе;

- аварийные отключения агрегатов или их перегрузка.

Допускается также пуск устройств дополнительной разгрузки по скорости снижения частоты, по снижению напряжения, а также комбинированный пуск по скорости снижения и абсолютному значению частоты, по одновременному снижению частоты и напряжения или по одному из местных факторов и снижению напряжения.

Рассмотрим в качестве примера возможность выполнения дополнительной разгрузки в схеме, приведенной

на рис. 7-9. Предположим, что мощность электростанции ЭС недостаточна для покрытия мощности нагрузки $P_{н1}$ и $P_{н2}$ на генераторном напряжении. Тогда в нормальном режиме недостающая мощность передается по линиям Л1 и Л2 со стороны подстанции А.

Проанализируем наиболее характерный аварийный режим с точки зрения установки дополнительной разгрузки: отключение автотрансформаторов $Tr3$ и $Tr4$ на подстанции А и отделение электростанции от энергосистемы с нагрузкой $P_{н1} + P_{н2} + P_{н3}$, вследствие чего возникает значительный дефицит мощности (более 45%).

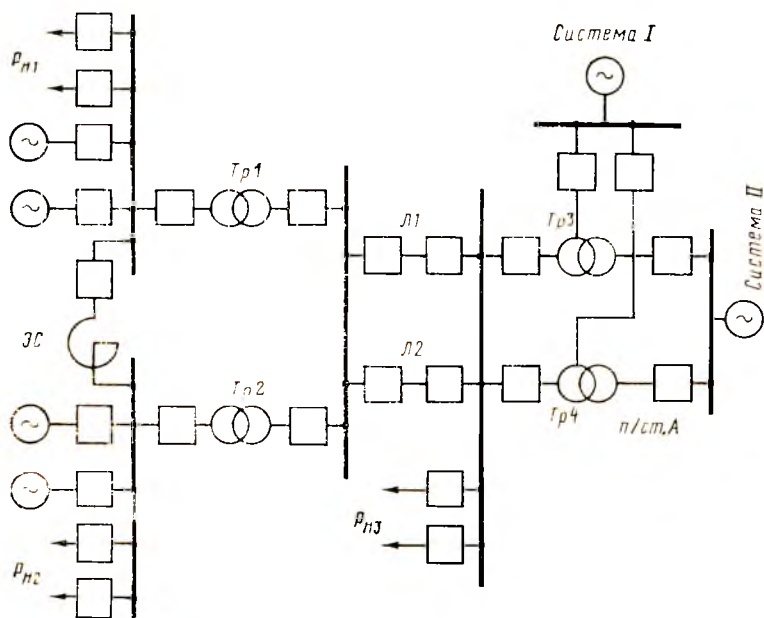


Рис. 7-9. Схема энергосистемы.

Рассматриваемый аварийный режим характеризуется изменением направления и величины потока мощности в трансформаторах $Tr1$, $Tr2$ и линиях $Л1$, $Л2$. Этот фактор может использоваться для пуска дополнительной разгрузки, которую целесообразно разместить на электростанции и подстанции А. В качестве пусковых органов может быть применено реле направления мощности. Кроме того, для пуска дополнительной разгрузки

на электростанции может использоваться факт отключения трансформаторов $Tr1$ и $Tr2$ или линий $Л1$ и $Л2$. Для этого подача сигнала на отключение нагрузки производится от выходных реле защит или от блок-контактов выключателей.

Расчет дополнительной категории разгрузки производится по двум условиям:

1. По условию предотвращения снижения частоты ниже 45 Гц (при больших местных дефицитах активной мощности) расчет дополнительной разгрузки производится исходя из сочетания последней с быстродействующей категорией АЧР1.

Таблица 7-1

Постоянная инерции T_J	$\Delta P_{пр}, \%$ при $t_{АЧР1}, c$		
	0,3	0,5	0,7
10—12	65—75	55—65	45—55
13—14	75—80	65—70	55—60
15—16	80—85	70—75	60—65

В табл. 7-1 [83] приведены предельно допустимые значения дефицитов мощности $\Delta P_{пр}$ (в процентах от мощности нагрузки до возникновения дефицита), при превышении которых частота снижается до 45 Гц и ниже, и поэтому следует осуществлять дополнительную разгрузку. Значения $\Delta P_{пр}$ даны в зависимости от эквивалентных постоянных инерции энергосистемы T_J и времени действия очередей АЧР1 $t_{АЧР1}$.

Минимальный объем дополнительной разгрузки рассчитывается по формуле

$$P_d \geq 1,1 \left(\Delta P_{до} - P_{но} \frac{\Delta P_{пр}}{100} \right), \quad (7-15)$$

где $\Delta P_{пр}, \%$ определяется из табл. 7-1, а при отсутствии данных о постоянной инерции T_J принимается приближенно равным 45%.

2. По условию предотвращения «лавины напряжения» необходимость установки дополнительной разгрузки проверяется расчетом уровней напряжения в узлах нагрузки для двух режимов: для режима непосредственно в момент возникновения дефицита мощности и для режима при минимальной частоте. Расчеты проводятся либо на моделях переменного тока, либо с использова-

нием ЭВМ. Если установлено, что при возникновении дефицита мощности во всех узлах $U \geq 0,8U_{\text{ном}}$, то считают опасность «лавины напряжения» исключенной и необходимости в дополнительной разгрузке нет.

При $U < 0,8U_{\text{ном}}$ проводится детальный анализ и расчеты устойчивости ответственных потребителей. Следует иметь в виду, что во многих случаях при снижении напряжения до $0,6-0,7U_{\text{ном}}$ наблюдается массовое отключение потребителей, т. е. в результате действия защит минимального напряжения и отпадания магнитных пускателей происходит саморазгрузка неответственных потребителей. Если же при этом нарушения устойчивости ответственной нагрузки не происходит, то дополнительная разгрузка не устанавливается. В противном случае необходима дополнительная разгрузка по напряжению.

Вопросы для самопроверки

1. Сравните различные принципы выполнения устройств АЧР.
2. Назначение АЧР I и АЧР II, выбор уставок.
3. В каких случаях и почему предусматривается дополнительная разгрузка? Принципы выполнения дополнительной разгрузки.
4. Назначение ЧАПВ и выбор уставок.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ РЕЖИМНАЯ АВТОМАТИКА (ПРА)

8-1. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ РЕЖИМНОЙ АВТОМАТИКИ

Оснащение энергосистем устройствами автоматического регулирования и управления, рассмотренными в разд. I и предыдущих параграфах разд. II, существенно повысило надежность работы энергосистем в аварийных режимах. Устройства АРВ способствуют демпфированию качаний генераторов и сохранению статической устойчивости в послеаварийном режиме; устройства автоматического ограничения перетоков активной мощности по межсистемным связям, входящие в состав си-

системы автоматического регулирования частоты и активной мощности, способствуют сохранению статической устойчивости и подавлению колебаний передаваемой мощности; устройства АПВ и АВР обеспечивают восстановление питания потребителей, электроснабжение которых было нарушено; устройства АЧР способствуют ликвидации дефицита мощности в аварийных ситуациях.

Однако в настоящее время в связи с объединением энергосистем, строительством мощных электростанций и протяженных сильно загруженных электропередач этих устройств автоматики недостаточно для обеспечения надежной работы энергообъединений. Уже при проектировании первой дальней электропередачи 400 кВ Куйбышев — Москва, а затем в процессе ее эксплуатации выявилась необходимость создания специальных автоматических устройств, действующих при аварийном нарушении нормального режима и предназначенных для предотвращения, локализации и ликвидации системных аварий. Эти устройства получили общее название противоаварийной режимной автоматики (ПРА). С тех пор разработкой принципов выполнения и аппаратуры ПРА успешно занимаются многие научно-исследовательские, проектные и эксплуатационные организации.

Устройства противоаварийной режимной автоматики должны обеспечивать:

автоматическое управление мощностью электростанций с целью сохранения устойчивости параллельной работы энергосистем (АУМСУ);

автоматическое прекращение асинхронного режима (АПАР);

автоматическое ограничение отклонений частоты и напряжения сверх допустимых пределов (АОЧ и АОН).

В соответствии с приведенными назначениями различают и виды противоаварийной режимной автоматики: АУМСУ, АПАР, АОЧ и АОН.

Устройства ПРА могут воздействовать на:

отключение части генераторов гидроэлектростанций и при необходимости, если это технологически возможно, турбогенераторов или блоков тепловых электростанций (ОГ);

регуляторы паровых турбин с целью быстрого изменения их нагрузки («сильное регулирование мощности») в пределах возможностей теплосилового оборудования (разгрузка турбин — РТ);

кратковременное включение нагрузочных резисторов (электрическое торможение — ЭТ);

деление энергосистемы (ДС), если указанные выше мероприятия недостаточны;

кратковременную форсировку возбуждения генераторов (ФВ), если устройства АРВ недостаточно эффективны при определенных возмущениях;

управление устройствами продольной или поперечной емкостной компенсации (форсировка компенсации — ФК), а также шунтирующими реакторами (отключение реакторов — ОР);

отключение части нагрузки потребителей (ОН) с восстановлением после стабилизации режима, если указанные выше мероприятия недостаточны.

Выбор оптимального сочетания управляющих воздействий представляет весьма сложную задачу, решаемую путем многократных расчетов электромеханических переходных процессов в электрических системах и сопоставления суммарных ежегодных затрат при различных вариантах. Этот выбор зависит от назначения автоматики, вида возмущения, схемы сети, режима ее работы и других факторов. Влияние аварийных возмущений и указанных воздействий на режим энергосистемы рассматривается в курсе «Переходные электромеханические процессы в электрических системах» [11].

Основные требования, предъявляемые к противоаварийной автоматике, такие же, как и в релейной защите. Они сводятся к обеспечению быстродействия, чувствительности, селективности, надежности. Требование быстродействия вызвано тем, что задержка управляющего воздействия приводит к необходимости увеличения его интенсивности и, более того, может сделать его бесполезным. Для удовлетворения требований чувствительности и селективности желательно, чтобы интенсивность управляющего воздействия была минимально необходимой для выполнения функционального назначения автоматики.

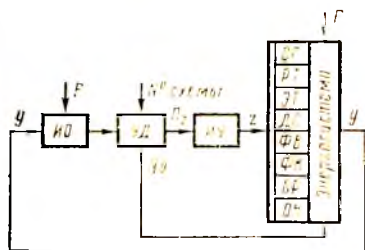


Рис. 8-1. Функциональная схема устройства ПРА.

Функциональная схема устройства ПРА (рис. 8-1) в общем случае содержит следующие элементы:

ИО — измерительные органы (пусковые, выявительные), которые дают информацию об аварийном возмущении F или параметрах переходного процесса y ;

УД — устройства дозировки управляющих воздействий, в которых по информации об исходном режиме (схема сети — № схемы, параметры исходного режима — y_0), о возмущении и переходном процессе определяется интенсивность управляющих воздействий I_z ;

ИУ — исполнительные устройства, которые реализуют управляющие воздействия z , осуществляя *ОГ*, *РТ* и т. д.

Информация от измерительных органов к устройствам дозировки или команды от устройств дозировки к исполнительным устройствам могут передаваться с помощью устройств телепередачи сигналов автоматики, а параметры режима могут измеряться с помощью устройств телеизмерения. Принцип действия и конструкции телемеханических устройств здесь не рассматриваются.

8-2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ РЕЖИМНОЙ АВТОМАТИКИ

Перечисленные в предыдущем параграфе управляющие воздействия осуществляются исполнительными устройствами. Эти устройства аналогичны в различных видах ПРА, поэтому мы их рассмотрим вначале.

Исполнительные устройства выполняют следующие операции:

отключение или включение каких-либо коммутационных аппаратов;

разомкнутые (без обратной связи) воздействия на системы управления мощностью турбин (импульсная разгрузка паровых турбин) и возбуждения генераторов (форсировка), дозированные по значению и по времени;

замкнутые (имеющие обратную связь по одному или нескольким регулируемым параметрам), дозированные по значению воздействия на системы управления мощностью турбин и возбуждения генераторов.

Схемы исполнительных устройств в настоящее время выполняются, как правило, с помощью электромеханических реле. Упрощение устройств, повышение быстродействия, точности и надежности их работы может быть достигнуто за счет применения полупроводниковой техники.

Из всего многообразия исполнительных устройств рассмотрим как наиболее характерные устройство отключения генераторов и устройство автоматического ограничения мощности турбогенераторов.

Устройство отключения генераторов. Отключение генераторов (ОГ) в аварийных условиях предназначается для сохранения устойчивости параллельной работы и прекращения асинхронного режима путем ресинхронизации. В частности, отключение генераторов способствует сохранению устойчивости параллельной работы двух энергосистем при снижении пропускной способности электропередачи или набросе мощности на нее в послеаварийном режиме. При ОГ осуществляется разгрузка электропередачи путем снижения суммарной мощности турбин части энергосистемы, где имеется избыток мощности. Одновременно увеличивается эквивалентное сопротивление этой части энергосистемы и уменьшается ее постоянная инерции. Это, однако, не снижает эффективности ОГ, если применяются регуляторы возбуждения сильного действия [89].

Для повышения эффективности ПРА отключение генераторов должно сопровождаться другими воздействиями: ОН или ДС.

Отключение генераторов применяется в основном на гидростанциях благодаря возможности быстрого (за 10—60 с) включения в сеть отключенного генератора и набора нагрузки. На тепловых электростанциях, отличающихся более сложным технологическим процессом, отключение генераторов может привести к расстройству работы отдельных агрегатов и поэтому должно применяться лишь в том случае, если не может быть осуществлена автоматическая разгрузка турбин (РТ).

В первых системах противоаварийной автоматики, примененных на ряде крупных ГЭС, каждое пусковое устройство автоматики и даже каждая его ступень имели собственные промежуточные выходные реле, контакты которых через оперативные накладные заходились на отключение всех генераторов, которые предполагалось

отключать в том или ином режиме. Изменение положения накладок при изменении нагрузки генераторов и очередности их отключения разными ступенями автоматики производилось дежурным персоналом. Из-за обилия накладок и возможности ошибок в процессе эксплуатации эта схема применима только для самых простых случаев.

Институтом «Энергосетьпроект» разработано устройство ОГ, осуществляющее определение числа отключаемых генераторов по заданному устройством ПРА значению необходимого снижения мощности. Решение вопроса об очередности отключения генераторов, зависящее от их технического состояния, предоставлено дежурному персоналу.

Схема устройства ОГ, управляющего шестью генераторами станции, приведена на рис. 8-2,а.

Сигнал от устройства ПРА на снижение мощности электростанции приходит на шинки $\Delta P_{0.r}$. Появление напряжения на какой-либо i -й шинке является командой на отключение части генераторов, имеющих в исходном режиме соответствующую мощность $\Delta P_{0.ri}$. Число шин $\Delta P_{0.r}$ равно числу ступеней разгрузки. Большому номеру шинки разгрузки соответствует большая отключаемая мощность.

Для разгрузки на заданное значение мощности $\Delta P_{0.ri}$ необходимо отключить Δn генераторов, так чтобы $\sum_{j=1}^{\Delta n} P_{r0j} \approx \Delta P_{0.ri}$. Если нагрузка между генераторами распределяется в исходном режиме равномерно, то

$$\Delta n \geq \Delta P_{0.ri} / P_{r0}, \quad (8-1)$$

где P_{r0} — мощность в исходном режиме одного из равномерно загруженных генераторов.

Так же, как $\Delta P_{0.r}$, величина P_{r0} фиксируется дискретно с помощью нескольких реле мощности с различными уставками. Таким образом, каждому сочетанию $\Delta P_{0.r}$ и P_{r0} соответствует определенное число отключаемых генераторов. Команда на отключение требуемого числа генераторов Δn в зависимости от сочетания $\Delta P_{0.r}$ и P_{r0} подается на соответствующую шинку Δn Устройством определения Δn . Это устройство состоит из органов фиксации предшествующей мощности генератора (см. § 8-3) и реле-повторителей, которые на рис. 8-2

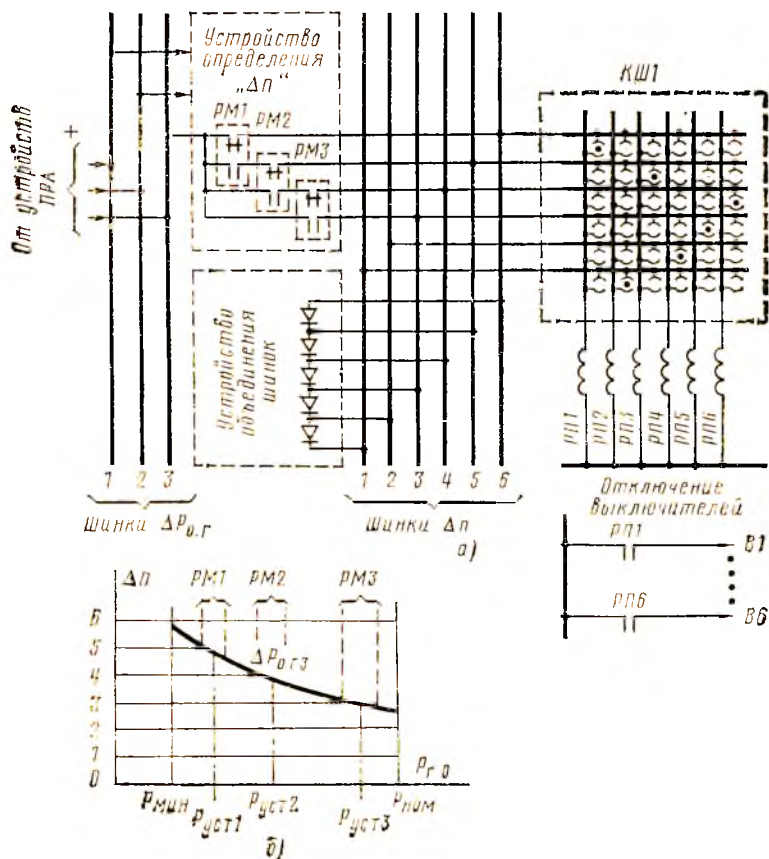


Рис. 8-2. Устройство отключения генераторов.

а — схема устройства; б — характеристика для определения числа отключаемых генераторов.

обозначены так же, как и соответствующие реле мощности. Реле-повторители ($PM1$, $PM2$, $PM3$ и др.), замыкая свои контакты, создают электрические цепи между шинками $\Delta P_{0.Г}$ и шинками Δn .

Выбор числа реле мощности и их уставок поясняется на рис. 8-2,б для одной ступени $\Delta P_{0.Г} = \Delta P_{0.Г3}$. Величина $\Delta n = \Delta P_{0.Г3} / P_{Г0}$ в пределах регулировочного диапазона генератора ($P_{мин} \leq P_{Г0} \leq P_{ном}$) принимает три целых значения $\Delta n = 5; 4; 3$. Соответствующие им значения $P_{Г0}$

равны мощности срабатывания реле при максимальной отрицательной погрешности $P_{срMi}$. Уставка каждого реле определяется с учетом коэффициента погрешности $k_{пМ} \approx 0,95$, учитывающего возможное понижение мощности срабатывания реле:

$$P_{устi} = P_{срMi} / k_{пМ}.$$

На основании рис. 8-2,б можно заключить, что для выполнения условия (8-1) при $\Delta P_{0.1} = \Delta P_{0.гз}$ число отключаемых генераторов Δn должно быть равно шести, если ни одно реле мощности не сработало, пяти, если сработало $PM1$, четырем, если сработало $PM2$, и трем, если сработало $PM3$. Это требование реализуется *Устройством определения « Δn »* на схеме рис. 8-2,а.

При подаче напряжения на любую из промежуточных шин Δn через *Устройство объединения шин* (диоды на рис. 8-2,а или контакты специально устанавливаемых промежуточных реле) напряжение одновременно подается на все шинки с меньшими порядковыми номерами. Если устройство объединения шин релейное, то оно одновременно служит для фиксации команды на отключение и ограничения ее длительности. К шинкам Δn через коммутатор $KШ1$ присоединяются установкой штекеров реле $РП1—РП6$, подающие команду на отключение генераторов $Г1—Г6$. С помощью коммутатора $KШ1$ персонал устанавливает необходимую очередность отключения генераторов при увеличении Δn (на рис. 8-2,а: $Г2, Г4, Г5, Г6, Г3, Г1$). Реле $РП$ каждого генератора может быть присоединено только к одной шинке Δn , чтобы один генератор не вошел несколько раз в требуемое число Δn . К каждой шинке Δn может быть присоединено несколько реле.

В настоящее время разрабатываются предложения о передаче функций выбора очередности отключения генераторов автооператору, располагающему достаточно полной информацией о состоянии гидроагрегатов. Такое объединение устройства ОГ с автооператором исключает вмешательство персонала во всех режимах, когда автооператор в работе.

Автоматический ограничитель мощности турбогенераторов. Автоматический ограничитель мощности, разработанный в ВТИ, применяется в качестве исполнительного устройства ПРА для осуществления одnorазовой разгрузки паровых турбин (РТ) с целью повышения ста-

тической и динамической устойчивости и улучшения условий ресинхронизации станции или энергосистемы. Одноразовость хотя несколько и снижает эффективность РТ, но позволяет до накопления необходимого опыта эксплуатации исключить возможность ложной повторной работы. Разгрузка гидротурбины не приме-

няется в настоящее время из-за недостаточного быстрогодействия их систем регулирования, ограниченного возможностью возникновения гидроудара.

Автоматический ограничитель мощности АОМ-67(О) ВТИ (О — одноразового действия) позволяет реализовать различные виды РТ, иллюстрируемые кривыми на рис. 8-3:

ограничение мощности турбогенератора до заданной, предварительно выбранной уставки (устройство имеет две уставки с независимым заданием уровня разгрузки, кривые 1 на рис. 8-3);

кратковременное ограничение мощности турбогенератора до нуля с последующим восстановлением ее до исходного значения по экспоненциальному закону для предотвращения нарушения устойчивости в сторону ускорения (количество уставок по длительности разгрузки принято равным двум, кривые 2 на рис. 8-3);

кратковременное ограничение мощности турбогенератора до нуля с последующим восстановлением ее по экспоненциальному закону до значения одной из двух уставок, кривые 3 на рис. 8-3).

Время запаздывания в изменении мощности турбогенератора после начала работы устройства разгрузки турбины составляет 0,2—0,3 с и обусловлено в основном наличием промежуточных объемов пара в тракте его поступления на лопатки турбины.

Функциональная схема АОМ-67(О) ВТИ представлена на рис. 8-4. Устройства ПРА (на рис. 8-4 не показаны) выявляют характер аварии и формируют соответствующий релейный импульс на запуск АОМ (при срабатывании пусковых реле РП7 или РП8 реализуется

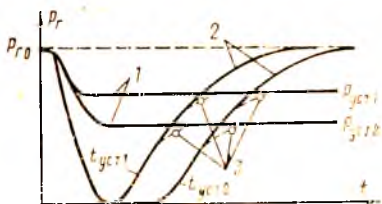


Рис. 8-3. Характер изменения мощности турбогенератора под действием АОМ при различных видах РТ.

Рассмотрим работу схемы, приведенной на рис. 8-4.

На вход суммирующего элемента ($МУ$) блока формирования сигналов ограничения ($БФСО$) подаются следующие сигналы:

h — величина, соответствующая мощности турбогенератора, фиксируемая датчиком положения ($ДП$) механизма изменения частоты вращения ($h \leq 1$, так как $P_{г.ном.} = 1$);

Δf — отклонение частоты от номинального значения, которое фиксируется блоком коррекции по частоте ($БКЧ$) и служит для компенсации действия регулятора частоты вращения турбины на изменение ее мощности;

ΔP — отклонение относительной мощности генератора от величины h , имеющее место из-за нелинейной связи между ними, которое фиксируется блоком коррекции по мощности $БКМ$, состоящим из суммирующего СЭ и интегрирующего ИЭ элементов;

y — величина, пропорциональная относительному значению мощности, до которой следует разгрузить турбогенератор ($P_{уст1}$, $P_{уст2}$ на рис. 8-3); $1-y$ — отклонение этой мощности от номинального значения.

Если сигнал x с выхода $МУ$ имеет положительное значение, то он поступает через диод $Д1$ в управляющую обмотку $ЭГП$ и одновременно вызывает срабатывание нуля-индикатора $НИ$. На отрицательные значения x $НИ$ не реагирует.

В доаварийном установившемся режиме контакты пусковых реле разомкнуты, следовательно, сигнал $1-y=0$. Сигнал ΔP с выхода $ИЭ$ не изменяется, что имеет место при равенстве нулю сигнала на входе $ИЭ$ и $СЭ$:

$$-1 + P_{г0} - x = 0.$$

где $P_{г0}$ — фактическая мощность турбогенератора в доаварийном режиме, измеряемая датчиком мощности. Сигнал $\Delta f=0$, следовательно, на выходе $МУ$ $x = -1 + \Delta P + h$ и условие установившегося режима имеет вид:

$$-1 + P_{г0} - (-1 + \Delta P + h) = P_{г0} - \Delta P - h = 0.$$

Отсюда $\Delta P = P_{г0} - h$, $x = -1 + P_{г0} \leq 0$, т. е. нуль-индикатор и $ЭГП$ не работают.

При возникновении аварийной ситуации и срабатывании ПРА на ограничение мощности до заданной уставки на вход $МУ$ через контакт $РП7.1$ или $РП8.1$ от потенциометра задания уставки $ПЗУ$ проходит сигнал $1-y$. Сигналы ΔP и h мгновенно измениться не могут, поэтому при $\Delta f=0$

$$x = -1 + P_{г0} + (1-y) = P_{г0} - y > 0.$$

Под действием этого сигнала $ЭГП$ начинает снижать мощность турбогенератора, а сработавший $НИ$ отключает $БКМ$ ($НИ.3$, $НИ.4$), на выходе которого сохраняется исходный сигнал. Через $t_{РВ1} = 3 \div 5$ с после срабатывания пусковых реле срабатывает реле $РП9$ (релейная схема запуска на рис. 8-4 не показана) и контактом $РП9.2$ подключает $ИЭ$ к $СЭ$. Сигнал на выходе $СЭ$ (сигнал рассогласования)

$$\Delta P = P_r - y$$

действует через $ИЭ$ и $МУ$ на снижение мощности турбогенератора P_r до величины y .

С выдержкой времени $t_{PR2}=15\div 20$ с после срабатывания пусковых реле через контакт *НН* сработает реле *РП10* и контактом *РП10.2* включает электродвигатель *МНЧВ* в сторону «убавить».

После замещения сигнала от *ЭГП* изменением положения *МНЧВ* и соответствующего уменьшения h напряжение на входе нуля-индикатора становится меньше напряжения возврата и *НН* отпадает. Это приводит к возврату реле *РП10* (остановке двигателя *МНЧВ*) и срабатыванию реле *РП11* (размыканию цепи от *АОМ* к *ЭГП* контактами *РП11.3*). Автоматический ограничитель мощности выключается из работы. Для подготовки релейной схемы запуска к работе ее необходимо разблокировать вручную нажатием кнопки.

При действии *ПРА* на ограничение мощности до нуля срабатывает реле *РП2* или *РП5* в зависимости от требуемой длительности разгрузки. Контакт *РП2.1* (*РП5.1*) через резистор *R1* (*R2*) кратковременно (до срабатывания *РП6* через заданное время $t_{уст1}$ или $t_{уст2}$) замыкает цепь постоянного тока на управляющую обмотку *ЭГП*, формируя сигнал управления в 3—4 отн. ед. Этим обеспечивается форсированное движение исполнительного механизма на закрытие регулирующих клапанов. Контакт *РП2.2* (*РП5.2*) замыкает цепь от стабилизированного источника питания схемы задания уставок *Форсировка* к *МУ*. Этим обеспечивается сигнал разгрузки $1-y=1$ отн. ед., который снимается по экспоненциальному закону после срабатывания *РП6* (размыкания контакта *РП6.2*).

При $y=0$ ($1-y=1$) сигнал на выходе *МУ*

$$x=P_{г0}>0.$$

С увеличением y по экспоненциальному закону x уменьшается, а нагрузка турбогенератора увеличивается до первоначального значения, если не действовал пусковой орган ограничения мощности до заданной уставки. При этом виде *РТ МНЧВ* действовать не успевает.

8.3. АВТОМАТИКА УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НАРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ (АУМСУ)

Задача сохранения статической и динамической устойчивости возлагается на средства противоаварийной режимной автоматики при следующих возмущениях:

отключение линии без повреждения и в результате однофазных к. з. в возможных режимах повышенной загрузки электропередачи;

многофазное к. з. при нормальных и ремонтных схемах сети без учета редких режимов повышенной нагрузки;

полное отключение смежной электропередачи в нормальном режиме работы энергообъединения;

значительный аварийный дефицит или избыток мощности в одной из связанных частей энергообъединения;

работа устройств БАПВ или ОАПВ в режиме, когда электропередача не имеет сильных шунтирующих связей.

Устройства АУМСУ служат для фиксации интенсивности возмущающего фактора (например, сброса передаваемой мощности при возникновении к. з., длительности к. з. и пр.), фиксации тяжести неходного режима (схемы сети, передаваемой мощности) и выработки на основе этой информации дозированного управляющего воздействия на исполнительные устройства. В соответствии с перечисленными функциональными назначениями весь комплекс устройств АУМСУ может быть разделен на несколько частей (см. рис. 8-1). В этом параграфе рассмотрим принципы построения и схемы пусковых и измерительных органов, а также органов автоматической дозировки воздействий (АДВ).

Пусковые органы. В эксплуатации применяются пусковые органы разных типов. Их можно классифицировать по виду фиксируемых возмущений.

Фиксация аварийного отключения линии электропередачи. На мощных электропередачах, состоящих из двух параллельных линий, отключение одной из линий снижает предел передаваемой мощности в рассматриваемом сечении из-за увеличения сопротивления электропередачи, что при загрузке электропередачи, близкой к предельной, может привести к нарушению устойчивости.

Для фиксации факта отключения одной из линий используется цепочка параллельно включенных контактов реле РПО и РБМ из схемы управления выключателем. Фиксация отключения линии с противоположной стороны обеспечивается передачей сигнала по каналу ВЧТО (телеотключение по высокочастотному каналу).

В качестве резервного органа для фиксации отключения одной из параллельных линий электропередачи используется реле тока или активной мощности, включенное на разность токов параллельных линий. Этот орган действует как при двустороннем отключении линии, так и при одностороннем. Разрыв электропередачи (отключение обеих параллельных линий на одном участке) фиксируется с помощью тех же реле РПО и РБМ. Для той же цели могут использоваться минимальные реле активной мощности, срабатывающие при исчезновении мощности в электропередаче.

Схема устройства, фиксирующего отключение линии ВЛ по положению ее выключателя B типа ВВБ, приведена на рис. 8-5,а. В схему введены: контакты реле из схемы управления выключателем (см. рис. 5-6, 5-7) (PBM — реле блокировки от многократного включения, PPO и PPB — реле положения «отключено» и «вклю-

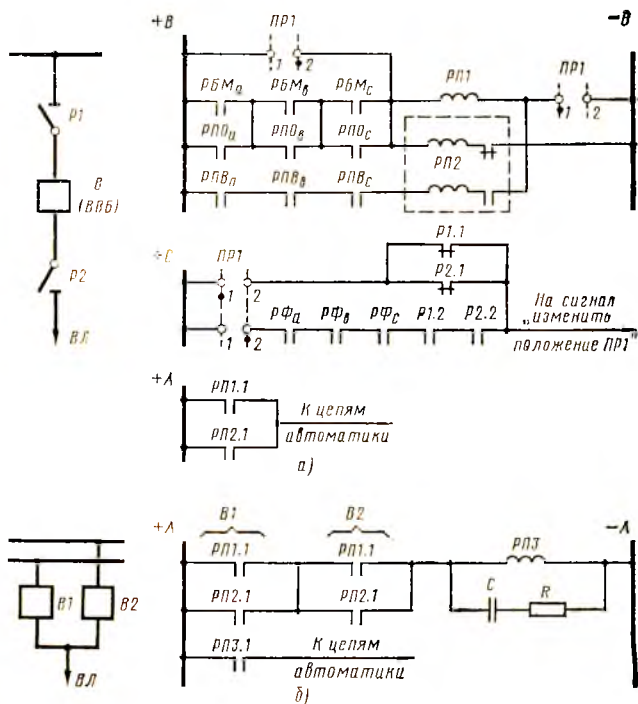


Рис. 8-5. Схема устройства, фиксирующего отключение линии по положению ее выключателя.

а — при одном выключателе на линии; б — при двух выключателях.

чено», $P\Phi$ — реле фиксации отключенного положения выключателя); блок-контакты разъединителей $P1$ и $P2$; выходные реле $PP1$ (быстродействующее промежуточное) и $PP2$ (двухпозиционное типа РП-8); переключатель режима $ПР1$, используемый при выводе линии в ремонт (режим 1 соответствует включенному положению разъединителей, режим 2 — отключенному). При несоответствии положения $ПР1$ режиму через блок-контакты разъединителей выдается сигнал *изменить поло-*

жение *РР1*. Использование переключателя режима вместо накладок снижает вероятность ошибки персонала, эксплуатирующего автоматику, при проведении ремонтов на линии.

Контакты *РБМ* замыкаются при подаче импульса на отключение выключателя по любой цепи и находятся в замкнутом состоянии до момента переключения блок-контактов, после чего реле *РП1* остается подтянутым по цепи замкнутых контактов *РПО*. Двухпозиционное реле *РП2* после переключения дублирует контакты *РП1* независимо от правильности действия блок-контактов выключателя.

При двух линейных выключателях (рис. 8-5,б) контакты реле *РП1* и *РП2* схем фиксации положения обоих выключателей включаются последовательно. В качестве выходного реле при этом используется реле *РП3*.

Для фиксации аварийного отключения линий могут быть использованы также контакты выходных реле защиты линий.

Автоматика, действующая при отключении линии, вводится в действие при определенном значении предшествующей мощности электропередачи, начиная с которого отключение одной из параллельных линий создает опасность нарушения устойчивости параллельной работы.

Фиксация нарушения параметров нормального режима. Основным возмущением, вызывающим нарушение нормального режима, является к. з. Тяжесть его можно фиксировать по сбросу активной мощности электропередачи ΔP в момент к. з. Для фиксации сброса мощности используются специальные реле сброса, входящие в состав комплекса мощности, разработанного ВНИИР.

Функциональная схема реле сброса мощности приведена на рис. 8-6. Однофазные датчики мощности *ДМ* представляют собой статические преобразователи мощности на диодах (см. § 2-6) и устанавливаются во всех трех фазах контролируемой цепи для правильного измерения значения сброса при несимметричных к. з. Их выходные сигналы суммируются полупроводниковым операционным усилителем *У1*. На выход операционного усилителя включаются релейные органы *Р*, дающие возможность фиксировать максимальную мощность в текущем или предшествующем режиме, сброс или наброс

мощности, а также производную мощности по времени. Реле выполнены на стандартных логических элементах серии «Логика Т».

При сбросе мощности электропередачи появляется импульс тока в дифференцирующей цепи $R1, C1$, амплитуда которого пропорциональна значению сброса ΔP . Реле P срабатывает, если значение ΔP превышает уставку, задаваемую резистором R_2 ($\Delta P \geq P_{\text{ср}}$).

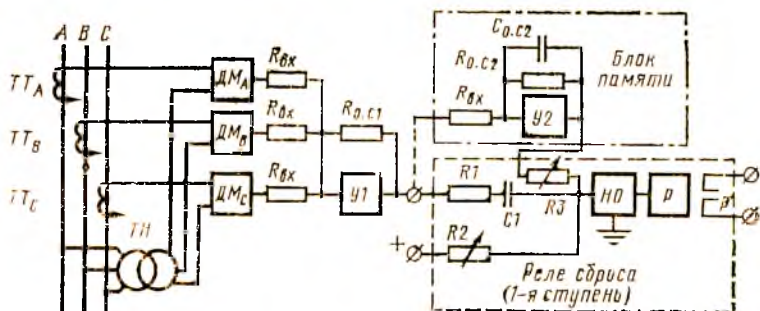


Рис. 8-6. Функциональная схема реле сброса мощности.

В том случае, когда реле сброса должно иметь характеристику, зависящую от исходной мощности P_0 , к реле сброса подключается блок памяти, представляющий собой операционный усилитель $Y2$ с постоянной времени обратной связи $T_y = R_{0, C2} C_{0, C2} \approx 4$ с. При этом условие срабатывания реле имеет вид:

$$\Delta P + kP_0 \geq P_{\text{ср}}. \quad (8-2)$$

Значение k задается резистором $R3$. В реле сброса предусмотрено по три ступени фиксации сброса мощности. Реле сброса мощности должно вводиться в действие на короткое время по факту возникновения несимметрии в сети, так как оно подвержено неправильному действию при качаниях.

Тяжесть к. з. может быть зафиксирована по величине и длительности снижения напряжения прямой последовательности на шинах электростанции, присоединенной к электропередаче (ΔU_1 и $t_{\text{к.з.}}$). Величина ΔU_1 измеряется с помощью нескольких реле напряжения, включенных через фильтры напряжения прямой последовательности. Длительность отключения к. з. фикси-

руется реле времени с проскальзывающим контактом. В зависимости от сочетания ΔU_1 и $t_{к.з}$ ступенчато оценивается интенсивность возмущения.

Фиксация перегрузки электропередачи, возникающей вследствие появления аварийного дефицита мощности в приемной энергосистеме, может осуществляться только по параметрам переходного процесса: изменению передаваемой мощности и угла δ_{12} между векторами напряжения отправной и приемной частей энергообъединения.

По значению передаваемой мощности перегрузку можно фиксировать с помощью реле активной мощности или комплекса мощности ВНИИР (рис. 8-6), в который должно входить максимальное реле напряжения на выходе У1 ($R1, C1$ не используется).

Мощность срабатывания реле должна выбираться по двум условиям. Во-первых, она должна быть отстроена от значения максимальной передаваемой мощности с учетом погрешности реле ($\pm 5\%$) и коэффициента надежности (не менее 1,05). Во-вторых, должен быть обеспечен коэффициент чувствительности, не меньший 1,1. По этим условиям применение пускового органа, реагирующего на значение передаваемой активной мощности, возможно только при условии, что

$$P_{\max} \leq \frac{0,95}{1,05 \cdot 1,05 \cdot 1,1} P_{\text{пред}} = 0,78 P_{\text{пред}}, \quad (8-3)$$

где $P_{\max}$ — максимальная передаваемая мощность; $P_{\text{пред}}$ — предельная мощность по условно статической устойчивости электропередачи при минимальном уровне напряжения по ее концам; 0,95 и 1,05 — коэффициенты, учитывающие возможное уменьшение и увеличение мощности срабатывания реле по сравнению с уставкой; 1,05 и 1,1 — коэффициенты надежности и чувствительности соответственно.

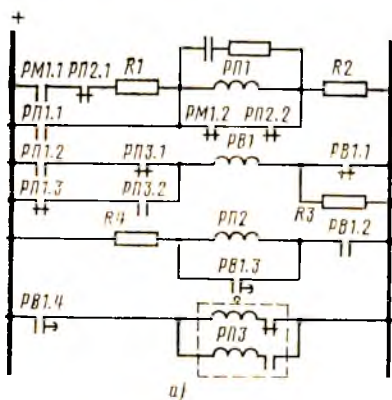
Следует отметить, что срабатывание реле активной мощности недостаточно точно характеризует близость предела передаваемой мощности, поскольку последний зависит от напряжения. Более точно перегрузку электропередачи можно фиксировать непосредственно по углу δ_{12} и его изменению. Для измерения значения и первой производной угла δ_{12} требуется аппаратура телепередачи фазы напряжения или в простых схемах передачи моделирующая (фантомная) схема, подобная устройству токовой компенсации (§ 1-13).

Предложено также в качестве выявительного органа перегрузки применять направленное реле сопротивления, которое реагирует на значение угла δ_{12} [8].

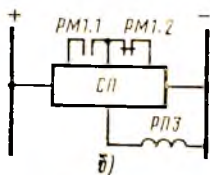
Устройство автоматической дозировки управляющих воздействий (АДВ) должно обеспечивать при каждом из возмущений, фиксируемых пусковыми органами, подачу на исполнительное устройство управляющего воздействия с интенсивностью, превышающей необходимую в наименьшей возможной степени. Необходимая интенсивность управляющего воздействия, обеспечиваемого устройством АДВ, рассчитывается по условиям сохранения устойчивости с учетом динамического перехода и послеаварийного установившегося режима после действия регуляторов скорости, изменяющих частоту в энергосистеме.

Устройства АДВ основаны обычно на использовании схемы фиксации мощности в режиме, предшествующем аварии.

Устройство фиксации мощности предшествующего режима предназначено для



а)



б)

ввода автоматик в действие при определенном значении мощности электропередачи, для дозировки управляющих воздействий, определения суммарной мощности и числа отключаемых генераторов.

Фиксация мощности электропередачи обычно производится дискретно несколькими ступенями с помощью комплекса мощности ВНИИР или схемы с индукционными реле мощности. В последнем случае каждой ступени соответствует свое реле активной мощности PM , включенное обычно на ток и напряжение одной фазы. В схему органа фиксации (рис. 8-7), кроме реле мощности с двумя контактами $PM1.1$ и $PM1.2$, входят реле-

Рис. 8-7. Фиксация мощности предшествующего режима.

а — схема одной ступени; б — упрощенное изображение схемы «памяти».

повторитель *РП1*, применение которого исключает возможность подгорания контактов реле мощности при колебаниях мощности вблизи его уставки, и электро-механическое реле времени *РВ1* с мгновенно размыкающим контактом *РВ1.1*, мгновенно замыкающим *РВ1.2*, временно замыкающим *РВ1.3* и упорным *РВ1.4*. Срабатывание и возврат органа фиксации осуществляются

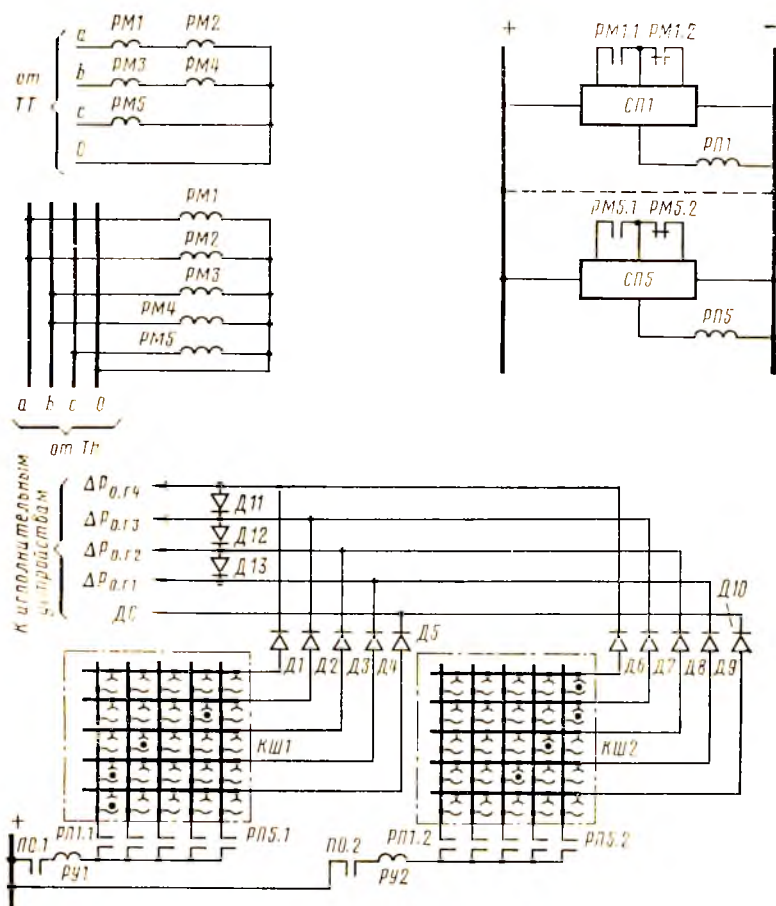


Рис. 8-8. Упрощенная принципиальная схема ступенчатой дозировки.

с выдержкой времени упорного контакта реле времени $PВ1$, которое приходит в действие при несоответствии положения реле-повторителя $РП1$ и выходного двух-позиционного реле $РПЗ$. После замыкания контакта $РВ1.4$ многократного срабатывания реле $РПЗ$ не происходит из-за возврата реле $РВ1$, цепь которого разрывается контактом $РПЗ.1$ или $РПЗ.2$. Выдержка времени при срабатывании предотвращает ввод автоматик в работу при увеличении мощности в контролируемой фазе вследствие к. з., качаний и т. п. Аналогично выдержка времени при возврате предотвращает вывод из работы автоматики. Промежуточное реле $РП2$ с двумя размыкающими контактами $РП2.1$ и $РП2.2$ служит для фиксации состояния реле $РП1$ в течение времени замыкания контакта $З$ реле $РВ1$ после запуска схемы независимо от колебаний мощности и положения реле $РМ$, что способствует снижению износа контактов реле мощности. Добавочный резистор с небольшим сопротивлением RI служит для перераспределения токов между контактами $РМ1.1$ и $РП1.1$.

Рассмотренную схему называют схемой памяти и изображают, как показано на рис. 8-7,б.

Устройство АДВ с аналого-релейным преобразователем. Наиболее распространены устройства АДВ с аналого-релейными преобразователями, состоящими из электромеханических максимальных реле активной мощности, реле времени, промежуточных реле и коммутаторов. На рис. 8-8 показан пример выполнения устройства дозирования, реализующего управление по характеристикам рис. 8-9,б (положение штекеров $KШ1$ и $KШ2$ соответствует ступенчатым характеристикам дозирования C_1 и C_2 на рис. 8-9,б). Характеристики дозирования построены в зависимости от исходной передаваемой мощности электростанции $P_{\Sigma(0)}$, соответствуют одной схеме (рис. 8-9,а) и возмущениям в виде отключения одной из параллельных линий электропередачи $ЭП1$ или $ЭП2$ (A_1, B_1, C_1 или A_2, B_2, C_2). Здесь $\Delta P_{0.1} \dots \Delta P_{0.4}$ — ступени суммарной мощности отключаемых генераторов ($\Delta P_{0.1} < 0$); $P_{ср1} \dots P_{ср5}$ — мощности срабатывания измерительных органов; $P_{\Sigma(0)}$ — мощность, передаваемая в доаварийном режиме.

Вместо электромеханических реле могут применяться полупроводниковые реле, включаемые через опера-

ционные усилители на выход датчиков активной мощности.

Использование ЭВМ для АДВ. Успехи вычислительной техники открывают новые возможности для выполнения АДВ. В связи с этим рассмотрим пути решения задачи дозировки управляющих воздействий с применением вычислительного устройства ВУ. На рис. 8-10 условно показаны четыре основных способа дозировки.

При использовании способов *До* расчет дозировки выполняется в течение 10—20 с после изменения исходного режима (до момента срабатывания пускового органа), при использовании способов *После* — после срабатывания пускового органа в течение 0,02—0,05 с. Следовательно, внезапный выход из действия устройства дозировки, выношенного по способам *До*, менее опасен, чем устройства по способам *После*, так как реле дозировки в любой момент времени находится в рабочем положении, соответствующем режиму работы.

В способах *I* расчет интенсивности управляющего воздействия ведется по программе 1, составляемой на основе уравнений, описывающих энергосистему в доаварийном, аварийном и послеаварийном режимах. В способах *II* — по программе 2, составляемой на основе аналитических формул или таблиц, получаемых вне устройства АДВ и описывающих границы устойчивости с учетом управляющих воздействий. Используемая в этих способах ЭВМ служит для расчета коэффициентов по уравнениям энергосистемы.

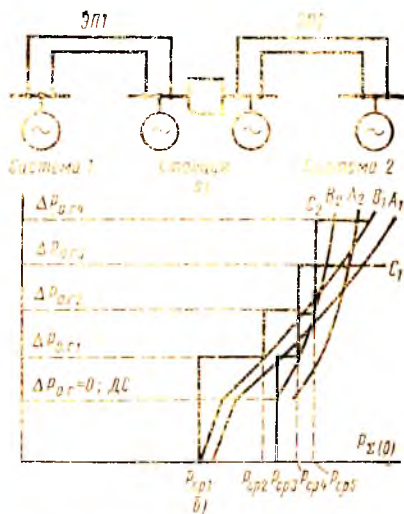


Рис. 8-9. Дозировка управляющих воздействий.

a — схема сети; *б* — характеристика дозировки ДС и ОГ при отключении одной из линий электропередач ЭП1 или ЭП2.

A — расчетные характеристики; *B* — настроенные, получаемые из *A* делением абсцисс на коэффициент запаса; *C* — ступенчатые аппроксимации.

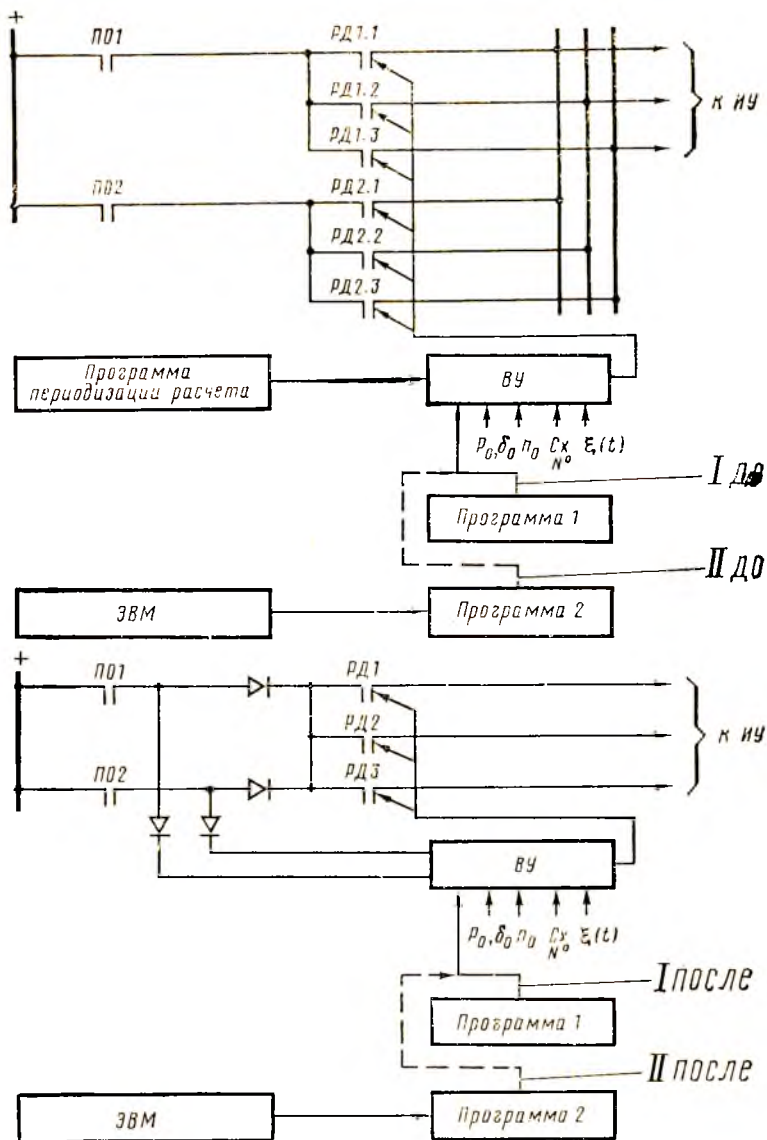


Рис. 8-10. Способы дозировки управляющих воздействий с использованием вычислительного устройства ВУ.

ПО — пусковые органы; РД — промежуточные реле дозировки; ИУ — исполнительные устройства; ВУ — вычислительное устройство; P_0, δ_0 — мощность и взаимный угол исходного режима; N_0 — число включенных в работу генераторов, парогенераторов, выключателей; Cx, N_0 — номер схемы сети в исходном режиме; $\xi(t)$ — суточный график эквивалентного статизма регуляторов частоты вращения, резерва мощности турбин и пр.

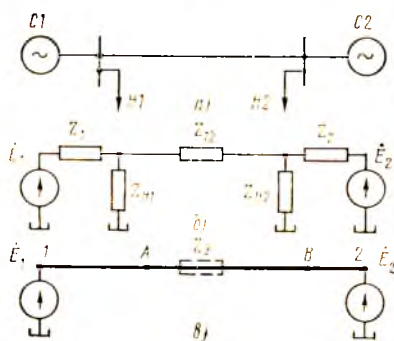
Устройство, выполненное по способу *II До*, использующее специализированную ЭВМ типа ТА-100, разработано институтом «Энергосетьпроект» для применения на Братской ГЭС и других объектах.

8-4. АВТОМАТИКА ДЛЯ ПРЕКРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА (АПАР)

Устройства автоматического прекращения асинхронного режима (АПАР) являются составной частью устройств противоаварийной режимной автоматики и предназначены для выявления и ликвидации асинхронного режима генераторов в энергосистеме.

Рис. 8-11. Двухмашинная схема.

а — схема сети; *б* — схема замещения; *в* — упрощенная схема замещения.



Асинхронный режим является следствием нарушения устойчивости параллельной работы генерирующих источников. Различают двухмашинный и многомашинный асинхронный режим. В первом случае он существует между двумя группами генераторов, внутри которых генераторы работают синхронно друг с другом; во втором — между тремя и более группами. При многомашинном асинхронном режиме должно автоматически выполняться отделение узлов, сохранивших синхронизм входящих в них генераторов, от остальных. После этого многомашинный асинхронный режим приводится к двухмашинному.

Далее будет рассматриваться двухмашинный асинхронный режим по упрощенной схеме замещения (рис. 8-11, в), к которой преобразуется схема замещения (рис. 8-11, б) путем приведения сопротивлений нагрузки Z_{H1} и Z_{H2} к зажимам э. д. с. и отбрасывания их как не влияющих на ток в электропередаче.

При двухмашинном асинхронном режиме происходит периодическое изменение угла δ_{12} между э. д. с. $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ несинхронных источников от нуля до 360° с частотой скольжения

$$f_s = f_1 - f_2. \quad (8-4)$$

При синхронных качаниях $\delta_{12} < 180^\circ$, а взаимное скольжение f_s периодически меняет знак, колеблясь около нуля.

Проявляется асинхронный режим изменениями режимных параметров: напряжений, токов, мощностей, углов. Эти изменения могут использоваться в качестве выявительных признаков, отличающих асинхронный режим от синхронных качаний, к. з. и других ненормальных режимов работы.

Характерными признаками асинхронного режима являются:

1. Периодические изменения действующего значения напряжения и угла между векторами напряжений в различных точках электропередачи (качания напряжений).

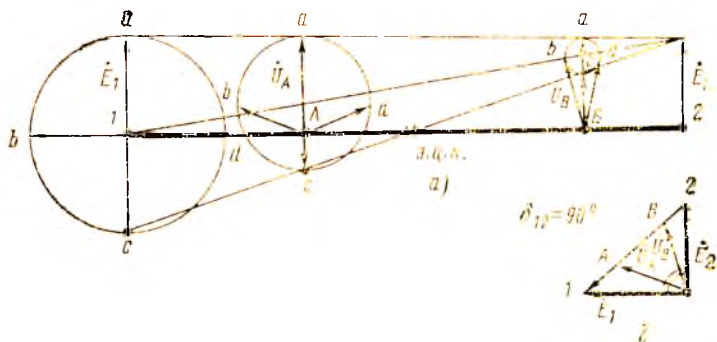


Рис. 8-12. Распределение напряжения по линии.

a — диаграмма при четырех значениях угла δ_{12} ; b — векторная диаграмма при $\delta_{12} = 90^\circ$.

При асинхронном режиме вектор $\dot{E}_1$ проворачивается относительно вектора $\dot{E}_2$, принятого неподвижным и постоянным по величине. На рис. 8-12, a для четырех значений $\delta_{12} = 0^\circ$ (a), 90° (b), 180° (c) и 270° (d) построены векторные диаграммы напряжений в произвольных точках A и B однородной электропередачи с сопротивлением $Z_{\text{ли}}$. Векторная диаграмма на рис. 8-12, b поясняет построение для одного значения угла $\delta_{12} = 90^\circ$.

Падение напряжения на участке электропередачи, например IA ,

$$\Delta \dot{U}_{IA} = (\dot{E}_1 - \dot{E}_2) \frac{Z_{IA}}{Z_2}, \quad (8-5)$$

где Z_{IA} и Z_2 — сопротивления участка IA и всей однородной электропередачи соответственно, а напряжение $\dot{U}_A = \dot{E}_1 - \Delta \dot{U}_{IA}$.

По диаграммам, приведенным на рис. 8-12, на рис. 8-13 построены кривые изменения величин и фаз напряжений в различных точках электропередачи $\alpha = A, B$, э. ц. к. (электрический центр качаний) за один цикл качаний (U_α — напряжение в соответствующей точке, $\delta_{1\alpha}$ — угол между $\dot{E}_1$ и $\dot{U}_\alpha$). В следующем цикле эти изменения повторяются.

Из приведенных рисунков следует, что при асинхронном режиме напряжение в любой точке электропередачи достигает минимального значения при $\delta_{12} = 180^\circ$, причем этот минимум тем меньше, чем ближе находится рассматриваемая точка к электрическому центру качаний э. ц. к., в котором напряжение снижается до нуля; электрическая удаленность э. ц. к. от E_1

$$Z_{\text{э. ц. к.}} = Z_2 \frac{E_1}{E_1 + E_2}; \quad (8-6)$$

векторы напряжений двух произвольных точек электропередачи совершают относительно друг друга полные повороты, если эти точки лежат по разные стороны от э. ц. к., и совершают качания, не превышающие $\pm 90^\circ$, если точки лежат по одну сторону от э. ц. к.; при $\delta_{12} = 0$ и 180° векторы напряжений всех точек электропередачи коллинеарны.

2. Периодические изменения (качания) тока во всех элементах, связывающих несинхронные э. д. с.

Ток асинхронного режима

$$I_{\text{а.р}} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{Z_2} = f(\delta_{12}). \quad (8-7)$$

Зависимость $I_{\text{а.р}} = f(\delta_{12})$ показана кривой I на рис. 8-14, где

$$I_{\text{а.р}180^\circ} = \frac{E_1 + E_2}{Z_2}; \quad I_{\text{а.р}90^\circ} = \frac{E_1 - E_2}{Z_2};$$

$I_{a.p.п}$ — переменная составляющая огибающей полного тока. При $E_1 = E_2$ ток $I_{a.p} = I_{a.p180^\circ} \sin \frac{\delta}{2}$ (кривая 2).

Зависимости $dI_{a.p}/d\delta_{12} = f(\delta_{12})$ при $E_1 \neq E_2$ и $E_1 = E_2$ показаны на рис. 8-14 соответственно кривыми 1' и 2'.

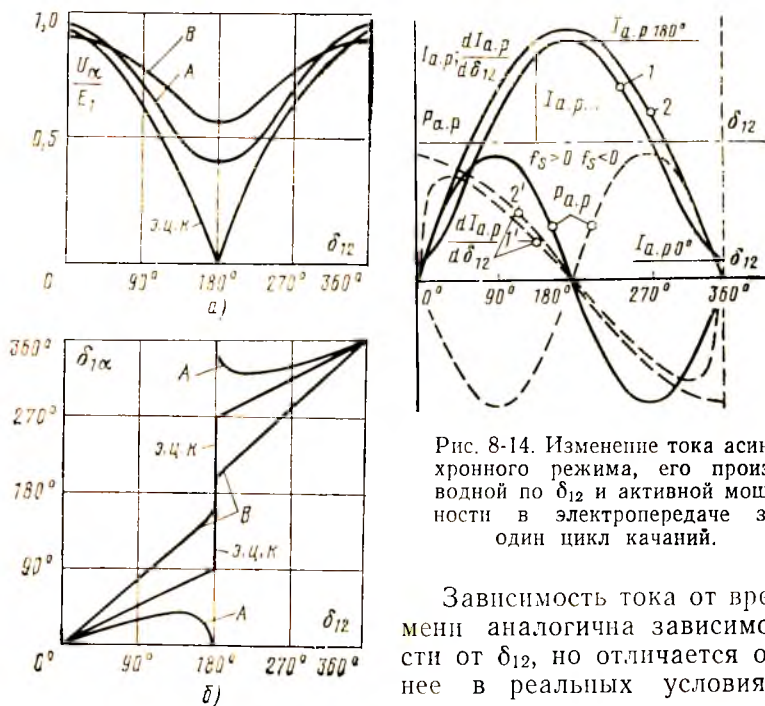


Рис. 8-14. Изменение тока асинхронного режима, его производной по δ_{12} и активной мощности в электропередаче за один цикл качаний.

Рис. 8-13. Изменение при асинхронном режиме напряжений в точках А, В и э. ц. к.

а — по абсолютной величине; б — по фазе.

Зависимость тока от времени аналогична зависимости от δ_{12} , но отличается от нее в реальных условиях из-за изменения скольжения в течение цикла асинхронного режима.

Угол сдвига фаз φ_α между током $I_{a.p}$ и напряжением

$\dot{U}_\alpha$ при переходе δ_{12} через 180° равен углу φ_Z сопротивления электропередачи Z , если точка α находится между $\dot{E}_1$ и э. ц. к., и $\varphi_\alpha = 180^\circ + \varphi_Z$, если точка α находится между $\dot{E}_2$ и э. ц. к.

3. Периодические изменения сопротивления на зажимах реле, установленных в различных точках электропередачи.

Сопротивление на зажимах реле в некоторой точке α электропередачи

$$Z_{pa} = \frac{\dot{U}_\alpha}{I_{a.p.}} = R + jX = f(\delta_{12}). \quad (8-8)$$

Зависимости $Z_{pa} = f(\delta_{12})$ для точек A , B и э. ц. к. электропередачи показаны на рис. 8-15. Они имеют вид окружностей, центр которых расположен на направлении вектора Z_3 . При $E_2/E_1=1,0$ окружности вырождаются в прямые. Сопротивление Z_{pa} принимает минимальное значение при $\delta_{12}=180^\circ$:

$$z_{pz} = U_{\alpha \text{ мин}} / I_{a.p. \text{ макс}},$$

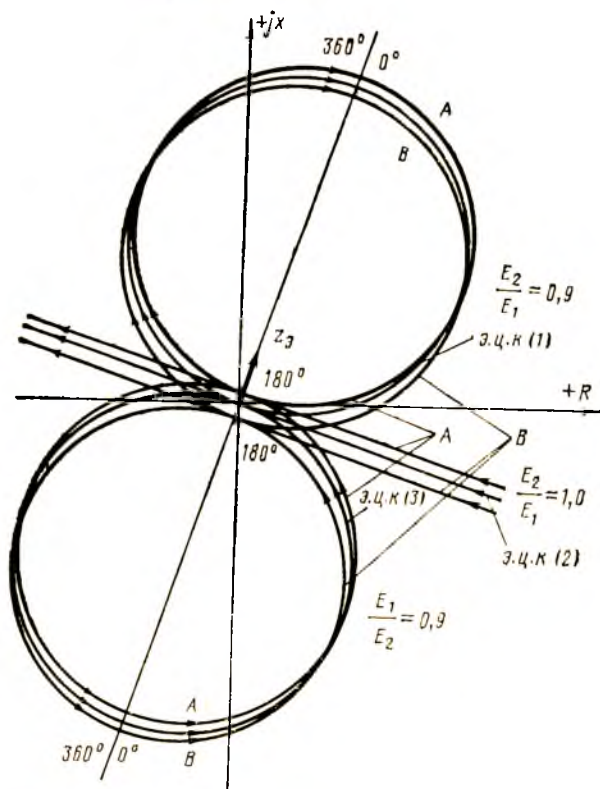


Рис. 8-15. Изменение сопротивления на зажимах реле в точках A , B и э. ц. к. электропередачи за один цикл качаний при различных соотношениях E_1 и E_2 .

когда вектор Z_{px} пересекает направление вектора Z_0 . Изменение величины Z_{px} за один цикл качаний значительно больше, чем изменение U_α .

4. Периодические изменения (качания) активной мощности в электропередаче.

Наличие активной составляющей R_0 в эквивалентном сопротивлении связи Z_0 приводит к потере активной мощности, т. е. значение активной мощности в электропередаче зависит от точки измерения α :

$$P_\alpha = \sqrt{3} U_\alpha I_{a.p} \cos \varphi_\alpha = f(\delta_{12}, \alpha). \quad (8-9)$$

Зависимости $P_\alpha = f(\delta_{12})$ в различных точках представляют собой синусоиды, смещенные относительно начала координат тем дальше, чем больше R_0/x_0 . Для электропередач высокого напряжения это отношение весьма мало ($R_0/x_0 < 0,1$) и

$$P_\alpha \approx P_{a.p} \approx \frac{E_1 E_2}{x_0} \sin \delta_{12}. \quad (8-10)$$

Зависимость $P_{a.p} = f(\delta_{12})$ показана на рис. 8-14. Первую половину цикла качаний источник I работает в генераторном режиме ($P_{a.p} > 0$), во вторую — в двигательном ($P_{a.p} < 0$). Средняя активная мощность за цикл асинхронного режима весьма мала.

Отличительной особенностью зависимости $P_{a.p} = f(\delta_{12})$ является изменение знака мощности при $\delta_{12} \approx 180^\circ$, когда ток достигает максимума, а напряжения — минимума. Таким образом, асинхронный режим может быть выявлен путем фиксации изменения знака активной мощности при выполнении какого-либо дополнительного условия ($I_{a.p} > I_{cp}$, $z_{px} < z_{cp}$ или $U_\alpha < U_{cp}$). Знак скольжения при этом определяется порядком чередования знаков активной мощности.

Опасность асинхронного режима для нормальной работы энергосистемы заключается в следующем:

периодические понижения напряжения могут вызвать опрокидывание двигателей и бессистемное отключение пускателей в сети 380 В, а также понижение устойчивости параллельной работы генераторов в синхронно работающих частях энергосистемы;

периодические увеличения токов и снижения напряжения могут привести к неселективной работе релейной защиты;

периодические колебания активной мощности приводят к появлению знакопеременного момента на валу турбины, т. е. к дополнительным механическим усилиям; возможно возникновение резонансных колебаний, опасных для оборудования и синхронной работы внутри частей энергосистемы;

при наличии между частями энергосистемы связи с большим активным сопротивлением асинхронный режим по ней увеличивает дефицит активной мощности в приемной части энергосистемы по сравнению со случаем отключения этой связи.

Синхронные качания представляют значительно меньшую опасность, чем асинхронный режим, так как существуют кратковременно и характеризуются менее глубокими колебаниями режимных параметров.

Устройства автоматического прекращения асинхронного режима рекомендуется выполнять таким образом, чтобы они в первую очередь способствовали ресинхронизации, т. е. осуществляли мероприятия, направленные на установление баланса мощностей в несинхронно работающих частях энергосистемы. К таким мероприятиям относятся:

быстрый набор нагрузки турбинами или частичное отключение потребителей в той части энергосистемы, в которой возник дефицит активной мощности;

уменьшение генерирующей мощности путем воздействия на регуляторы турбин или на отключение части генераторов в той части энергосистемы, в которой возник избыток активной мощности.

Устройства, решающие эту задачу, должны не только выявлять сам факт возникновения асинхронного режима, но и определять знак скольжения в той части энергосистемы, где они установлены.

Автоматическое разделение энергосистемы допускается в заранее намеченных точках, если проведенные мероприятия не приводят к ресинхронизации после прохождения заданного числа циклов качаний или заданного времени. В случае недопустимости асинхронного режима или малой эффективности ресинхронизации устройства автоматики должны действовать возможно быстрее на деление асинхронно работающих частей энергосистемы. В сложных объединенных энергосистемах, как правило, не допускается существование длительного асинхронного режима, который должен ликви-

дироваться быстродействующими устройствами делительной автоматики.

Способы выявления асинхронного режима и принципиальные схемы устройств АПАР. Чтобы обнаружить асинхронный режим на первом цикле, т. е. до выявления многократного циклического проворота двух э. д. с., нужно обеспечить недействие устройств АПАР при наиболее глубоких возможных синхронных качаниях. Значение наибольшего возможного критического угла между э. д. с. E_1 и E_2 , при превышении которого нарушается устойчивость и начинается асинхронный режим, для двухмашинной схемы с различными параметрами находится в пределах $140\text{--}160^\circ$. Фиксация указанного угла обычно осуществляется с помощью пусковых и выявительных органов, реагирующих на разные признаки асинхронного режима и включенных по схеме И.

Пусковые («грубые») органы фиксируют зону углов, в которую входит $\delta_{12} \approx 180^\circ$, выявительные («точные») органы — угол $\delta_{12} \approx 180^\circ$ в пределах этой зоны. Применение пусковых органов необходимо в связи с тем, что выявительные органы могут по принципу действия срабатывать и при $\delta_{12} \approx 0^\circ$.

В качестве пусковых органов (ПО) используются: минимальные реле напряжения, максимальные реле тока, реле полного сопротивления или направленные реле сопротивления. Уставка пускового органа выбирается по условиям надежной отстройки с учетом коэффициента возврата от режима $\delta_{12} = 0^\circ$ и обеспечения требуемой чувствительности при $\delta_{12} = 180^\circ$:

минимальное реле напряжения

$$U_{\text{ср}} \leq \frac{U_{\text{наб. мин}}}{k_{\text{II}} k_{\text{B}}}; \quad \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\alpha(180^\circ) \text{ макс}}} \geq k_{\text{q}}; \quad (8-11)$$

максимальное реле тока

$$I_{\text{ср}} \geq \frac{k_{\text{II}}}{k_{\text{q}}} I_{\text{а.р}(0^\circ) \text{ макс}} = \frac{k_{\text{II}}}{k_{\text{q}}} \frac{E_1 - E_2}{z_{\text{в. мин}}}; \quad \frac{I_{\text{а.р}(180^\circ) \text{ мин}}}{I_{\text{ср}}} = \frac{E_1 + E_2}{z_{\text{в. макс}} I_{\text{ср}}} \geq k_{\text{q}}, \quad (8-12)$$

реле полного сопротивления

$$z_{\text{ср}} \leq \frac{z_{\text{рз}(0^\circ) \text{ мин}}}{k_{\text{II}} k_{\text{B}}}; \quad \frac{z_{\text{ср}}}{z_{\text{рз}(180^\circ) \text{ макс}}} \geq k_{\text{q}}. \quad (8-13)$$

Здесь $U_{\text{ср}}$, $I_{\text{ср}}$, $z_{\text{ср}}$ — уставка соответствующего реле; k_n , k_v , $k_{\text{ч}}$ — коэффициенты надежности, возврата, чувствительности.

В наиболее часто встречающихся реальных режимах пусковой орган с реле полного сопротивления имеет большую чувствительность, чем пусковые органы с минимальными реле напряжения или максимальными реле тока; при размещении пускового органа вблизи э. ц. к. минимальное реле напряжения имеет большую чувствительность, чем максимальное реле тока. При выборе пускового органа прежде всего следует рассматривать возможность применения реле тока как самого простого и надежного. Если реле тока не проходит по чувствительности, проверяют возможность использования реле напряжения, а затем сопротивления.

Выявительные органы асинхронного режима (ВО) могут реагировать на:

коллинеарность векторов напряжения в двух произвольных точках электропередачи, которая имеет место при $\delta_{12}=0^\circ$ и 180° ;

равенство фазового угла φ_{Σ} между током и напряжением в произвольной точке электропередачи углу эквивалентного сопротивления передачи φ_Z и углу $180^\circ + \varphi_Z$, которое также имеет место при $\delta_{12}=0$ и 180° ;

изменение знака активной мощности, которое происходит при $\delta_{12} \approx 0$ и 180° .

Рассмотрим возможности реализации указанных способов выявления асинхронного режима.

При использовании первого способа необходимо иметь два вектора напряжения. Один из них получается непосредственным измерением в точке, где установлен выявительный орган, а второй — путем моделирования с помощью устройства, подобного устройству токовой компенсации (см. § 1-13) или путем телепередачи.

В качестве датчика перехода угла $\delta_{\alpha_1 \alpha_2}$ между векторами напряжения в точках α_1 и α_2 через 0 и 180° может быть использована фазочувствительная схема, фиксирующая две зоны углов $0^\circ < \delta_{\alpha_1 \alpha_2} < 180^\circ$ и $180^\circ < \delta_{\alpha_1 \alpha_2} < 360^\circ$.

Устройства по данному способу позволяют выявлять асинхронный режим двух частей энергосистемы, соединенных сложной сетью.

Второй способ может быть реализован с помощью реле направления мощности, у которого линия минимального момента (изменение знака контролируемой мощности) совпадает с углом φ_2 .

Третий способ реализуется с помощью реле направления активной мощности.

При всех трех способах диаграмма работы выявительного органа приблизительно одна и та же

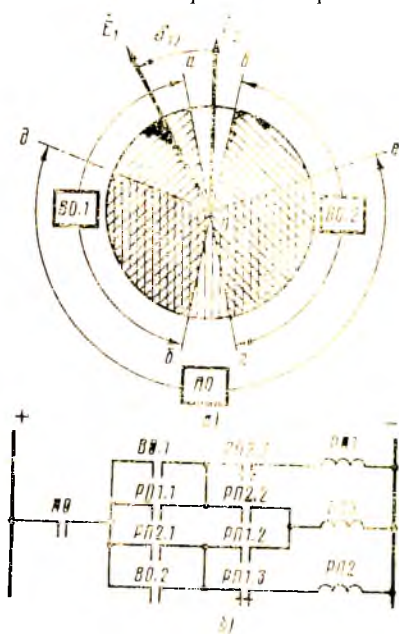


Рис. 8-16. Пусковое устройство АПАР.

a — диаграмма, поясняющая работу;
 b — схема пусковых цепей.

определяет выходной сигнал. В нормальном доаварийном режиме $\delta_{12} = \delta_{ном}$ (рис. 8-16, a), и ни одно из промежуточных реле не работает, так как цепь разомкнута на контактах $ПО$.

При асинхронном режиме после срабатывания пускового органа $ПО$ срабатывает промежуточное реле $РП1$, если $f_1 > f_2$ (замкнут контакт $ВО.1$), или $РП2$, если $f_1 < f_2$ (замкнут контакт $ВО.2$). Затем после прохождения угла 180° замыкаются контакты $ВО.2$ (при $f_1 > f_2$)

(рис. 8-16, a): контакт $ВО.1$ замкнут в секторе δ_{12} ($0^\circ < \delta_{12} < 180^\circ$), контакт $ВО.2$ — в секторе δ_{12} ($360^\circ > \delta_{12} > 180^\circ$). Сектор δ_{12} — $ПО$ соответствует замкнутому состоянию контакта пускового органа (коэффициент возврата принят равным единице).

Для выявления асинхронного режима и определения знака скольжения (ускорение или торможение вектора $\dot{E}_1$) используется схема рис. 8-16, b . Входными контактами устройства являются контакты пускового и выявительного органов: $ПО$, $ВО.1$, $ВО.2$, состояние которых определяет входной сигнал. Устройство состоит из трех промежуточных реле $РП1$, $РП2$, $РП3$, состояние которых

или $BO.1$ (при $f_1 < f_2$) соответственно, что в обоих случаях приводит к срабатыванию промежуточного реле $PP3$. В следующем цикле работа схемы повторится.

Таким образом, факт возникновения асинхронного режима выявляет реле $PP3$, которое срабатывает после перехода $\dot{E}_1$ за угол $\delta_{12} = \pm 180^\circ$. На синхронные качания $\dot{E}_1$ в пределах $0-180^\circ$ $PP3$ не реагирует. Характер асинхронного режима выявляют реле $PP1$ и $PP2$. Срабатывание реле $PP1$ фиксирует $i_s > 0$ и, следовательно, избыток мощности в первом источнике, срабатывание $PP2$ — $i_s < 0$ и дефицит мощности в первом источнике.

Устройства АПАР устанавливаются обычно на подстанциях, где предусматривается деление, чтобы отказаться от в. ч. аппаратуры и телеканалов. Обеспечение селективного действия устройств АПАР достигается согласованием их по значению параметра, на который реагирует пусковой орган, по числу контролируемых циклов или по времени действия. При согласовании по числу циклов в качестве счетчика циклов асинхронного режима обычно используется релейная схема, приведенная на рис. 8-17,а. Последовательность работы реле при большой частоте скольжения показана на диаграмме рис. 8-17,б. Здесь: $PP1$, $PP2$, $PP3$ — пусковые реле (см. рис. 8-16,б); $PP4-PP9$ — счетчик трех циклов; $H1$ — накладка, при включении которой отсчитывается только два цикла; $PP10$ — выходное реле счетчика. Вместо накладки $H2$ в цепи реле $PP10$ может быть включен контакт реле дополнительной выдержки времени. Реле $PPB2$ осуществляет возврат схемы после срабатывания реле $PP9$. Возврат схемы может произойти и до этого в случае замыкания контактов реле $PB1$, контролирующего длительность цикла асинхронного режима. При малой частоте скольжения, когда возможна ресинхронизация, реле $PB1$ успеет сработать за время одного цикла, пока на его обмотку подано напряжение.

Если не требуется определять знак скольжения и отстраиваться от синхронных качаний удастся по времени или абсолютному значению колебаний режимных параметров, применяется упрощенная схема АПАР, приведенная на рис. 8-18. Эта схема обычно используется в качестве резервного устройства. В схему входит пусковой орган с двумя реле — грубым $ПО1$ и чувствительным — $ПО2$ (реле напряжения, тока или сопротивления) и выявительный орган (реле времени $PB1$, $PB2$),

осуществляющий контроль времени существования колебаний режимных параметров с частотой, превышающей заданную.

В нормальном режиме работы энергосистемы одно реле времени (*PВ1*) подтянуто и его контактами зашунтировано промежуточное реле *РПЗ*. При возникновении качаний *ПО1* и *ПО2* будут срабатывать с частотой, оп-

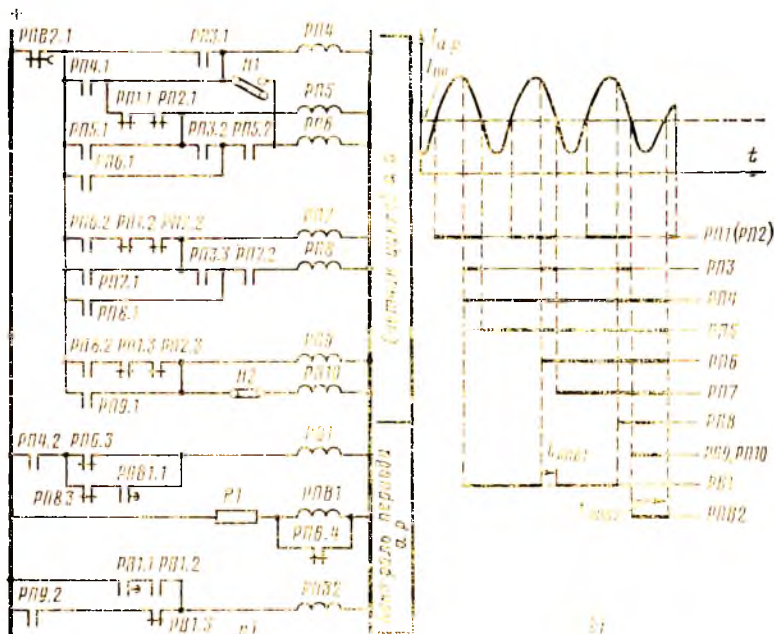


Рис. 8-17. Счетчик циклов асинхронного режима с контролем длительности цикла.

а — схема счетчика; б — временная диаграмма.

ределяемой частотой скольжения, что приведет к отпаданию и срабатыванию реле времени *PВ1* и *PВ2* (*PВ1* работает при значениях параметра, меньших уставки *ПО1*, а *PВ2* — при значениях параметра, больших уставки *ПО2*). Размыкающие контакты *ПО1.2* и *ПО2.2* используются для облегчения работы контактов *ПО1.1* и *ПО2.1*.

Если при последовательных колебаниях контролируемого параметра ни одно из указанных реле времени не будет успевать замыкать свой контакт, обмотка реле

РПЗ будет расшунтирована, а реле дополнительной выдержки времени РВЗ будет запущено. Если теперь колебания параметра не прекратятся в течение заданного времени РВЗ (до 20 с), то схема подействует на отключение линии.

Использование в схеме реле времени РВ1, РВ2 с двумя замыкающими с замедлением контактами повышает надежность работы схемы при нарушении цепи на одном из контактов.

Для выявления асинхронного режима в неполнофазном режиме электропередачи используется аналогичная схема, только в качестве пускового органа применяется реле тока пuleвой последовательности.

Реле асинхронного режима. Помимо применения для АПАР схем, выполненных на серийных реле, ведется разработка специальных реле асинхронного режима. Некоторые из них применяются в энергосистемах.

Реле РТНР разработано во ВНИИЭ [90]. Оно фиксирует возникновение асинхронного режима по пульсации тока в линии, к трансформатору тока которой подключено, срабатывая при определенном заданном скольжении. Недостаток реле РТНР состоит в том, что оно может применяться только со значительной выдержкой времени (около 10 с) для предотвращения излишнего срабатывания автоматики при к. з. и синхронных качаниях.

Реле РНХ-69 разработано в ЦЛЭМ Тулэнерго [91]. Оно реагирует на знак фазового угла между переменными составляющими огибающих полного тока $I_{a.p}$ и активной мощности передачи $P_{a.p}$ при асинхронном режиме. Величины $I_{a.p}$ и $P_{a.p}$ изменяются с частотой скольжения, а кривые $I_{a.p}(\delta_{12})$ и $P_{a.p}(\delta_{12})$ (см. рис. 8-14)

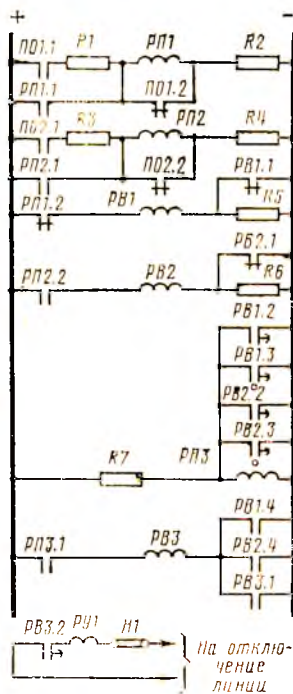


Рис. 8-18. Схема резервного устройства АПАР с использованием двух пусковых реле.

сдвинуты между собой примерно на четверть периода скольжения в ту или иную сторону в зависимости от знака скольжения.

В схеме реле активная мощность и общий ток передачи преобразовываются в постоянные напряжения, из них при асинхронном режиме выделяются переменные составляющие, от которых питается двухфазный микро-двигатель. Ротор микродвигателя при отсутствии скольжения под действием моментных пружин занимает нейтральное положение, а при асинхронном режиме отклоняется в ту или иную сторону в зависимости от знака скольжения. В реле применена бесконтактная схема фиксации отклонения ротора. Реле не реагирует на к. з. и синхронные качания на электропередачах, загруженных более чем на 25% пропускной способности. Недостатком реле является невозможность использования его на слабых связях между мощными объединениями, когда частота скольжения при асинхронном режиме может быть ниже частоты срабатывания реле, равной 0,5 Гц.

8-5. АВТОМАТИКА ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ЧАСТОТЫ (АОЧ) И НАПРЯЖЕНИЯ (АОН)

Назначение и принцип выполнения АОЧ. Автоматика ограничения повышения частоты (АОЧ) предназначена для защиты местных тепловых электростанций при возникновении аварийного избытка мощности, сосредоточенного на гидростанции. Число оборотов гидротурбин ввиду медленного действия их регуляторов при избытках мощности может значительно превышать 110—112%. Вместе с тем какое число оборотов считается максимально допустимым для тепловых турбин: при его достижении в соответствии с ПТЭ должны срабатывать автоматы безопасности тепловых турбин и закрывать доступ пара в них. Дальнейшее увеличение частоты может привести к повреждению тепловых турбин, так как генераторы перейдут в двигательный режим и будут увеличивать частоту вращения. Также неблагоприятно может влиять повышение частоты и на работу агрегатов собственных нужд и местной нагрузки станции.

Средством, предотвращающим опасное повышение частоты, является своевременное отключение части гидрогенераторов (ОГ).

Для того чтобы остановить процесс увеличения частоты непосредственно в момент отключения гидрогенераторов от автоматики, необходимо уменьшить генерирующую мощность энергосистемы на величину

$$\Delta P_{o.r} = P_{r0}(1 - k_r \Delta f_d) + P_{t0}(1 - k_t \Delta f_d) - P_{n0}(1 + k_n \Delta f_d), \quad (8-14)$$

где P_{r0} , P_{t0} , P_{n0} — исходная мощность гидрогенераторов, турбогенераторов и нагрузки; Δf_d — увеличение частоты энергосистемы к рассматриваемому моменту; k_r , k_t , k_n — коэффициенты, учитывающие изменение мощности гидротурбин, тепловых турбин и нагрузки при изменении частоты. Эти коэффициенты зависят от промежутка времени между моментом возникновения повреждения и моментом отключения генераторов. Поскольку точное значение $\Delta P_{o.r}$ в условиях реальной энергосистемы оценить трудно, для облегчения настройки автоматики и повышения точности ее работы целесообразно выполнять ее двухступенчатой.

Уменьшение генерирующей мощности первой ступенью автоматики ($\Delta P_{o.r1}$), срабатывающей при частоте f_{cr1} , выбирается таким, чтобы обеспечить прекращение увеличения частоты к моменту достижения частотой уставки второй ступени автоматики f_{cr2} :

$$\Delta P_{o.r1} = \frac{P_{r0}(1 - k_r \Delta f_2) + P_{t0}(1 - k_t \Delta f_2) - P_{n0}(1 + k_n \Delta f_2)}{1 - k_r(f_{cr2} - f_{d1})}, \quad (8-15)$$

где $\Delta f_2 = f_{cr2} - f_0$ — превышение частоты срабатывания второй ступени по сравнению с номинальной; f_{d1} — частота в момент отключения генераторов от первой ступени автоматики.

Обычно при расчетах выражение (8-15) упрощают, приняв $k_r = 0$ (мощность гидрогенераторов за время повышения частоты до уставки второй ступени существенно не меняется), $k_t \Delta f_2 = 1$ (турбогенераторы полностью разгружаются), $k_n = 2$:

$$\Delta P_{o.r1} = P_{r0} - P_{n0}(1 + 2\Delta f_2). \quad (8-16)$$

Вторая ступень срабатывает только в случае неточного определения $\Delta P_{o.r1}$, т. е. служит для корректировки действия первой ступени.

Для резервирования автоматики ограничения повышения частоты, установленной на ГЭС, применяется де-

лительная автоматика, реагирующая на повышение частоты и действующая на отключение линии связи между тепловой станцией с выделенной на нее нагрузкой и гидростанциями. Уставка реле частоты делительной автоматики выбирается несколько большей, чем $f_{ср2}$.

Автоматика для ограничения повышения напряжения (АОН) представляет собой по существу защиту электрооборудования от повышения напряжения. Значительное повышение напряжения возможно при отключении достаточно протяженной линии электропередачи с одной стороны. Для снижения напряжения АОН может действовать на включение шунтирующих реакторов, если они были отключены, и на отключение линии, являющейся источником перенапряжения. В случае отказа выключателя линии АОН действует на отключение автотрансформатора подстанции с повышенным напряжением.

В качестве пускового органа автоматики используются максимальные реле напряжения с повышенным коэффициентом возврата ($k_v \geq 0,95$). Повышенный коэффициент возврата необходим для обеспечения чувствительности при надежном возврате в нормальных эксплуатационных условиях. На подстанциях, где источником повышенного напряжения может быть любая из нескольких линий, применяется схема направленной автоматики с реле реактивной мощности.

Автоматика для предотвращения аварийного понижения напряжения, применяемая в некоторых случаях, действует на отключение части потребителей (ОН).

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите и проанализируйте средства сохранения статической и динамической устойчивости.
2. Проследите работу схемы АОН-67(О) ВТИ при ограничении мощности до заданной уставки.
3. Каким образом исключается подгорание контактов реле мощности в схеме фиксации мощности предшествующего режима?
4. Проанализируйте с помощью временной диаграммы работу счетчика циклов асинхронного режима при малой частоте скольжения.
5. Как влияет уставка по частоте на значение отключаемой мощности для ограничения повышения частоты на заданном уровне?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие и совершенствование средств и методов автоматизации является обязательной составной частью работ в области развития энергетики — одной из ведущих и наиболее высокоорганизованных отраслей народного хозяйства.

Совершенствование средств автоматики идет по следующим основным направлениям:

применение новых схем, приборов и устройств, использующих новые виды полупроводниковых, магнитных и других элементов;

разработка комбинированных регуляторов, реагирующих на несколько параметров режима агрегата и их производные по времени и воздействующих одновременно на возбуждение генератора и впуск энергоносителя в турбину;

применение самонастраивающихся АСР, способных приспосабливаться наилучшим образом к изменяющимся внешним условиям;

сочетание централизованных (более селективных) устройств с местными (более простыми, дешевыми и надежными);

создание устройств на базе специализированных и универсальных вычислительных машин для управления как нормальными, так и аварийными режимами.

Качественно новой ступенью развития методов автоматизации энергетики является разработка и внедрение отраслевой автоматизированной системы управления энергетикой — ОАСУ «Энергия», которая будет иметь многоуровневую структуру и решать на всех уровнях две группы задач: оперативно-диспетчерского управления; производственно-хозяйственной деятельности.

Автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ) является подсистемой ОАСУ «Энергия».

Она основана на комплексном использовании совершенных технических средств сбора, передачи, обработки, хранения и выдачи информации (управляющих команд) и прежде всего взаимосвязанных вычислительных машин третьего поколения (М-6000, Видеотон-1010Б, ЕС-1022, ЕС-1033, ЕС-1040 и др.).

Создание ОАСУ «Энергия» требует больших, но экономически оправданных народнохозяйственных затрат.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

П1-1. ЗАДАЧИ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА АСР

Автоматическая система регулирования (АСР) — это замкнутая система, состоящая из объекта регулирования и автоматического регулятора, которая без непо-

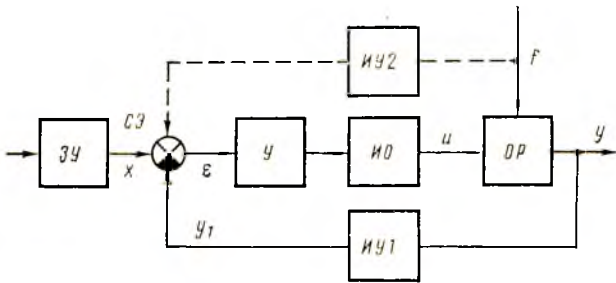


Рис. П1-1. Функциональная схема автоматической системы регулирования.

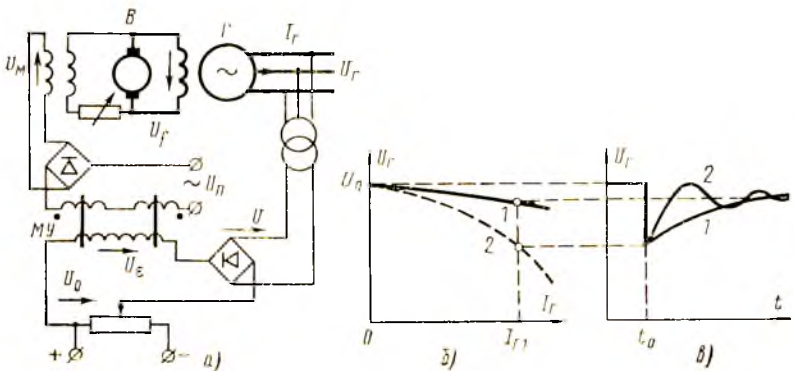


Рис. П1-2. Статическая АСР напряжения.

средственного участия человека осуществляет поддержание постоянства некоторой величины, характеризующей процесс, или изменение ее по заданному закону. На рис. П1-1 показана обобщенная функциональная схема АСР, которая включает в себя следующие элементы:

$ZУ$ — задающее устройство; $СЭ$ — суммирующий элемент; $ИУ1$ — измерительное устройство регулируемой величины; $У$ — усилительное устройство; $ИО$ — исполнительный орган; $ОР$ — объект регулирования; $ИУ2$ — измерительное устройство возмущения.

Эта система работает по комбинированному принципу, т. е. предписанное значение регулируемой величины y поддерживается как за счет компенсации влияния возмущения f по каналу $ИУ2—СЭ—У—ИО—ОР$, так и за счет воздействия по отклонению $\varepsilon = x - y$. Все элементы, кроме объекта регулирования, входят в автоматический регулятор.

На рис. П1-2,а в качестве примера АСР, осуществляющей регулирование только по отклонению, показана упрощенная принципиальная схема АСР напряжения генератора. Эта система поддерживает с некоторой допустимой ошибкой предписанное значение напряжения U_r , соответствующее задающему воздействию U_0 при изменении возмущающего воздействия (тока нагрузки I_r) в широких пределах (кривая 1 на рис. П1-2,б).

Основной задачей анализа АСР является исследование устойчивости системы, т. е. анализ сходимости переходных процессов. Только устойчивая система, у которой переходные процессы затухают, может быть работоспособной.

Второй задачей анализа является исследование качества процесса регулирования.

На рис. П1-2,в представлены переходные процессы изменения действующего значения напряжения, вызванные ступенчатым (скачкообразным) изменением тока нагрузки от нуля до I_{r1} в момент времени t_0 . Предполагается, что из-за инерционности регулятора напряжение в начальный момент времени практически мгновенно снижается до значения, определяемого нагрузочной характеристикой генератора (кривая 2 на рис. П1-2,б). Затем напряжение асимптотически стремится к установившемуся значению, соответствующему характеристике замкнутой системы регулирования (кривая 1 на рис. П1-2,б). Этот переходный процесс мо-

жет протекать монотонно (кривая 1 на рис. П1-2,в) или колебательно (кривая 2 на рис. П1-2,в). Время регулирования, т. е. время затухания переходной составляющей до пренебрежимо малого значения, а также величины, характеризующие колебательность процесса, являются основными показателями качества переходного процесса.

Автоматическая система регулирования работоспособна при условии, что она не только устойчива, но и имеет достаточно высокие показатели качества. Если анализ показывает, что заданные значения показателей качества не обеспечиваются, то возникает задача введения в систему дополнительных, определенным образом рассчитанных элементов, т. е. задача синтеза системы.

П1-2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АСР И ЕЕ ЗВЕНЬЕВ

Аналитическое исследование устойчивости и качества регулирования, а также решение задачи синтеза требуют адекватного математического описания АСР.

Математическое описание статических свойств системы и ее звеньев осуществляется статическими характеристиками или уравнениями статики. Для математического описания динамики применяются уравнения движения, характеристические уравнения, передаточные функции и динамические характеристики.

При составлении уравнения движения системы рационально предварительно разделить систему на звенья и выводить уравнения для каждого звена порознь. При этом каждое звено должно обладать направленностью действия, т. е. передавать воздействие только в одном направлении — от входа к выходу. Можно указать по крайней мере три условия, обеспечивающие направленность действия звеньев:

последующее звено практически не влияет на предыдущее ввиду малой мощности, которую оно отбирает у предыдущего звена. Это условие соблюдается при присоединении измерительного устройства к объекту регулирования, усилителя к измерительной схеме и т. п.;

несколько взаимосвязанных элементов, каждый из которых в отдельности не является звеном направленного действия, объединяются в одно звено направленного действия. Например, усилитель и его нагрузка образуют совместно звено направленного действия;

в качестве выходной величины предыдущего звена выбирается такая величина, которая не зависит от присоединения последующего звена. Например, если генератор обладает внутренним сопротивлением, соизмеримым с сопротивлением его нагрузки, то в качестве его выходной величины следует выбирать создаваемую им э. д. с., которая не зависит от присоединения нагрузки, чего нельзя сказать о соответствующих напряжении и токе.

Составление уравнений и нахождение передаточных функций линейных звеньев. Составление уравнений звеньев производится на основании тех физических законов, которым подчиняются процессы в исследуемом звене. Поэтому данный вопрос выходит за рамки теории автоматического регулирования. Однако можно указать общую методику составления уравнения линейного звена.

1. Составляется система уравнений для переходного процесса по соответствующим физическим законам. Перед составлением уравнений принимаются некоторые упрощающие допущения.

2. Составленные уравнения решаются совместно. При этом исключаются промежуточные переменные и получается уравнение движения звена, связывающее выходную величину и ее производные по времени с входными величинами и их производными по времени. При совместном решении уравнений удобно в целях упрощения предварительно алгебраизировать дифференциальные уравнения, т. е. ввести символ дифференцирования $D = d/dt$; ...; $D^h = d^h/dt^h$, и рассматривать его при преобразованиях как обычную алгебраическую величину.

3. Полученное уравнение движения звена принято приводить к нормализованной форме:

слагаемые, содержащие выходную величину и ее производные, записывают в левой части дифференциального уравнения по убыванию порядка производных. Слагаемые с входными величинами и их производными записывают в правой части в той же последовательности;

все члены уравнения делят на коэффициент при выходной величине, а если он равен нулю, то деление производится на коэффициент при младшей производной от выходной величины;

сложные по форме выражения коэффициентов заменяют обозначениями, включающими в себя постоянные времени и коэффициенты передачи (усиления). Послед-

ние представляют собой коэффициенты при входных величинах, а постоянные времени являются коэффициентами при производных от выходной и входной величин и имеют размерность времени.

4. В некоторых случаях с целью упрощения уравнений и придания им общности осуществляется приведение уравнения к безразмерной форме. При этом рассматриваемые величины относят к некоторым базисным значениям (обычно в качестве базисных выбирают номинальные, максимальные или установившиеся значения).

После нахождения нормализованных уравнений обычно определяют передаточные функции звеньев. С этой целью в полученном уравнении звена переходят от величин (функций времени) к их изображениям по Лапласу при нулевых начальных условиях. Затем из уравнения определяют передаточную функцию звена по каждой его входной величине как отношение изображения выходной величины к изображению входной величины. При нахождении передаточных функций звена с несколькими входами используется принцип наложения.

Линеаризация уравнений нелинейных звеньев. Если хотя бы одно из исходных уравнений звена нелинейно, то возникает необходимость в линеаризации, т. е. в замене нелинейного уравнения соответствующим образом полученным линейным. Общий порядок составления линеаризованных уравнений сводится к следующему:

составляется система исходных уравнений;

составляется система уравнений статики звена. Для этого в исходных уравнениях достаточно положить равными нулю все производные по времени. В результате статического расчета системы находят установившиеся значения величин для исследуемого статического режима;

нелинейные функции величин, входящие в исходные уравнения, разлагают в окрестности установившихся значений величин в ряды Тейлора. Члены рядов, содержащие отклонения величин от их установившихся значений в степенях выше первой, отбрасывают. В результате получают следующие приближенные линеаризованные разложения нелинейных функций:

для функции одной переменной

$$F(x_1) \approx F(x_{10}) + \left(\frac{dF}{dx_1} \right)_{x_1=x_{10}} \Delta x_1,$$

где $x_{10} = \text{const}$ — установившееся значение переменной x_1 ;
 $\Delta x_1 = x_1 - x_{10}$ — отклонение переменной x_1 ;

для функции двух переменных

$$F(x_1, x_2) \approx F(x_{10}, x_{20}) + \left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \right)_{\substack{x_1 = x_{10} \\ x_2 = x_{20}}} \Delta x_1 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \right)_{\substack{x_1 = x_{10} \\ x_2 = x_{20}}} \Delta x_2.$$

Допустимость линеаризации обеспечивается выполнением двух условий: отклонения величин от установившихся значений должны быть малыми настолько, чтобы можно было пренебречь нелинейным остатком ряда, и нелинейная функция должна быть дифференцируемой в рассматриваемой точке установившегося режима.

Линеаризованные разложения нелинейных функций подставляют в исходные уравнения. Затем из исходных уравнений вычитают соответствующие уравнения статики. Учитывают, что производные от величин по времени равны производным по времени от их отклонений

$$\frac{dm x_i}{dt^m} = \frac{dm \Delta x_i}{dt^m}; \quad m = 1, 2 \dots$$

В результате получают систему линейных дифференциальных уравнений, в которую в качестве переменных входят отклонения величин от их постоянных установившихся значений. Дальнейшие преобразования полученной системы уравнений выполняются так же, как и для линейного звена, т. е. производится совместное решение этих уравнений, нормализация, а при необходимости и приведение к безразмерной форме.

Пример. Составить линеаризованное уравнение синхронного генератора в режиме холостого хода, считая входной величиной напряжение возбудителя u_f , приложенное к обмотке возбуждения генератора, а выходной — э. д. с. E_q . Будем считать, что частота вращения ротора постоянна, гистерезис отсутствует, свободными токами в успокоительных обмотках и бочке ротора пренебрегаем.

1. Система исходных уравнений:

$$\omega_f \frac{d\Phi_f}{dt} + r_f i_f = u_f; \quad E_q = \omega \omega_{ст} (1 - \sigma_f) \Phi_f; \quad E_q = f(i_f), \quad (\text{П1-1})$$

где Φ_f — магнитный поток, создаваемый током возбуждения i_f ; r_f , σ_f — активное сопротивление и коэффициент рассеяния обмотки возбуждения (обмотки ротора); ω_f , $\omega_{ст}$ — числа витков обмотки ротора и статора соответственно; $\omega = 2\pi f$ — угловая скорость.

Систему (П1-1) можно упростить, объединив первое и второе уравнения:

$$\frac{n}{\omega} \frac{dE_q}{dt} + r_f i_f = u_f; \quad E_q = f(i_f); \quad n = \frac{\omega_f}{\omega_{ст}(1 - \sigma_f)}. \quad (\text{П1-2})$$

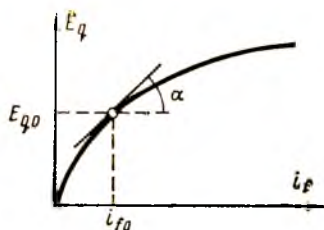


Рис. П1-3. Характеристика холостого хода генератора.

Функция $f(i_f)$ — характеристика холостого хода генератора — является нелинейной функцией и может быть задана графически (рис. П1-3) или аналитически.

2. Система уравнений статики:

$$r_f i_{f0} = u_{f0}; \quad E_{q0} = f(i_{f0}), \quad (\text{П1-3})$$

где E_{q0} , i_{f0} , u_{f0} — установившиеся значения соответствующих величин для исследуемого статического режима.

3. Линеаризованное приближенное выражение для нелинейной функции

$$E_q = E_{q0} + \Delta E_q = f(i_{f0}) + c_i \Delta i_f, \quad (\text{П1-4})$$

где

$$c_i = \left[\frac{df(i_f)}{di_f} \right]_{i_f = i_{f0}}$$

— крутизна нелинейной функции в окрестности статического режима; ΔE_q , Δi_f — малые отклонения величин от их установившихся значений.

При графическом задании функции коэффициент c_i находится

методом касательной (рис. П1-3) $c_i = \frac{m_E}{m_i} \operatorname{tg} \alpha$, где m_E , m_i — масштабы по соответствующим осям.

4. Подставим (П1-4) в (П1-2) и вычтем затем уравнения (П1-3) из (П1-2). В результате получим уравнения для абсолютных отклонений:

$$\frac{n}{\omega} \frac{d\Delta E_q}{dt} + r_f \Delta i_f = \Delta u_f; \quad \Delta E_q = c_i \Delta i_f. \quad (\text{П1-5})$$

Решив систему (П1-5), получим после нормализации следующее линеаризованное уравнение генератора:

$$T_r \frac{d\Delta E_q}{dt} + \Delta E_q = k_r \Delta u_f, \quad (\text{П1-6})$$

где

$$T_r = \frac{c_i}{\omega r_f} \frac{\omega_f}{\omega_{ст}(1 - \sigma_f)}$$

— постоянная времени; $k_r = c_i / r_f$ — коэффициент усиления.

Передаточная функция генератора

$$W_r(p) = \frac{\Delta E_q(p)}{\Delta U_f(p)} = \frac{k_r}{T_r p + 1}.$$

Нахождение уравнений систем регулирования. Уравнение системы регулирования может быть найдено по

уравнениям образующих ее звеньев двумя способами:
 совместным решением уравнений звеньев;
 составлением и преобразованием алгоритмической
 структурной схемы.

Второй способ является более простым и наглядным (особенно для сложных систем). Рассмотрим основные этапы этого способа.

Во-первых, составляется алгоритмическая структурная схема АСР, т. е. такая схема, в которой каждой математической операции преобразования сигнала соответствует определенное звено. В дальнейшем алгоритми-

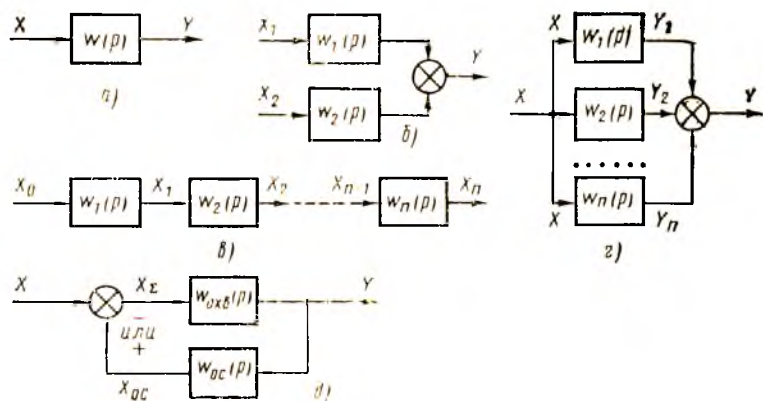


Рис. П1-4. Структурные схемы звеньев и их соединений.

ческие структурные схемы для краткости будем называть просто структурными. Каждое звено структурной схемы изображается прямоугольником, в который вписывается передаточная функция звена. Входные и выходные величины звеньев на структурной схеме показывают условно в виде стрелок, причем направление стрелки указывает направление воздействия (рис. П1-4). Так же, как и на функциональной схеме, суммирующие элементы, в которых величины складываются или вычитаются, изображаются в виде кружков, разделенных на секторы (рис. П1-4, б, в, г, д); секторы, к которым присоединяется стрелка вычитаемой величины, обычно зачерняются (рис. П1-5). Узлы, в которых воздействие разветвляется, направляясь к различным звеньям системы, обозначаются зачерненными точками.

Примеры составления структурных схем. Уравнение звена с одной входной величиной x имеет вид:

$$Y(p) = W(p)X(p),$$

где $X(p)$ и $Y(p)$ — изображения входной и выходной величин.

Соответствующая структурная схема показана на рис. П1-4,а. В целях упрощения записи оператор p у изображений величин на рисунках опускается.

Уравнение звена с двумя входными величинами x_1 и x_2 , имеющее вид:

$$Y(p) = W_1(p)X_1(p) + W_2(p)X_2(p),$$

показывает, что воздействие $X_1(p)$ должно пройти через звено с передаточной функцией $W_1(p)$, а воздействие $X_2(p)$ — через звено с передаточной функцией $W_2(p)$, а результаты необходимо просуммировать. Перечисленным операциям преобразования соответствует структурная схема данного звена (рис. П1-4,б).

После того как структурная схема системы регулирования составлена, приступают к ее преобразованиям. При преобразованиях структурной схемы производится ее упрощение, заключающееся в том, что соединение нескольких звеньев заменяется одним звеном. Формулы эквивалентных передаточных функций наиболее распространенных соединений звеньев:

последовательного соединения (рис. П1-4,в)

$$W(p) = \frac{X_n(p)}{X_0(p)} = \frac{X_1(p)}{X_0(p)} \frac{X_2(p)}{X_1(p)} \cdots \frac{X_n(p)}{X_{n-1}(p)} = \prod_{i=1}^n W_i(p), \quad (\text{П1-7})$$

т. е. эквивалентная передаточная функция последовательного соединения звеньев равна произведению передаточных функций этих звеньев;

параллельного соединения (рис. П1-4,г)

$$W'(p) = \frac{Y'(p)}{X(p)} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i(p)}{X(p)} = \sum_{i=1}^n W_i(p), \quad (\text{П1-8})$$

т. е. эквивалентная передаточная функция параллельного соединения равна сумме передаточных функций всех параллельно соединенных звеньев;

встречно-параллельного соединения (рис. П1-4,б), образованного тремя звеньями: охваченным звеном с передаточной функцией $W_{\text{охв}}(p)$, охватывающим звеном обратной связи с передаточной функцией $W_{\text{ос}}(p)$ и суммирующим звеном

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{Y(p)}{X_{\Sigma}(p) \pm X_{\text{ос}}(p)} = \frac{W_{\text{охв}}(p)}{1 \pm W_{\text{охв}}(p) W_{\text{ос}}(p)}, \quad (\text{П1-9})$$

причем знак плюс в (П1-9) соответствует отрицательной обратной связи, а минус — положительной.

При наличии перекрестных связей пользуются правилами перемещения звеньев через узел разветвления или через суммирующее звено [1, 2]; эти правила основаны на следующем условии: произведение передаточных функций звеньев по любому каналу от входа к выходу и по любому замкнутому контуру должно оставаться неизменным.

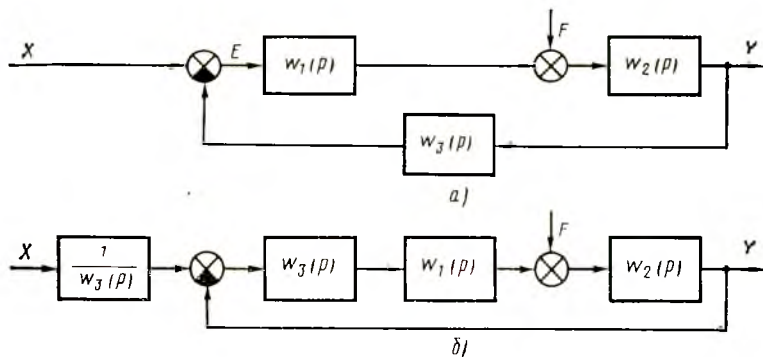


Рис. П1-5. Структурные схемы замкнутой АСР.

Применяя соответствующие формулы, можно преобразовать структурную схему исследуемой системы к эквивалентной одноконтурной схеме (рис. П1-5,а). Здесь F — изображение внешнего возмущающего воздействия f , Y — изображение регулируемой величины y , X — изображение уставки регулируемой величины x (задающего воздействия), E — изображение рассогласования e , $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$ — эквивалентные передаточные функции отдельных участков замкнутой системы. Основу этой структурной схемы составляет встречно-параллельное соединение звеньев. Воспользовавшись формулой преобразования (П1-9), можно сформулировать сле-

дующее правило нахождения передаточных функций замкнутой системы.

Передаточная функция замкнутой одноконтурной системы представляется дробью, числитель которой равен произведению передаточных функций звеньев, расположенных между местом приложения входной величины и рассматриваемой выходной величиной в направлении прохождения воздействия, а знаменатель — увеличенному на единицу произведению передаточных функций всех звеньев, входящих в замкнутый контур.

Найдем по этому правилу основные передаточные функции замкнутой системы (рис. П1-5,а).

1. Передаточная функция по задающему воздействию x относительно регулируемой величины y :

$$\Phi(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{W_1(p) W_2(p)}{1 + W_1(p) W_2(p) W_3(p)} = \frac{W_1(p) W_2(p)}{1 + W(p)}. \quad (\text{П1-10})$$

2. Передаточная функция по возмущению f относительно регулируемой величины y :

$$\Phi_f(p) = \frac{Y(p)}{F(p)} = \frac{W_3(p)}{1 + W(p)}. \quad (\text{П1-11})$$

3. Передаточная функция по задающему воздействию относительно рассогласования e :

$$\Phi_e(p) = \frac{E(p)}{X(p)} = \frac{1}{1 + W(p)}. \quad (\text{П1-12})$$

4. Передаточная функция по возмущению относительно рассогласования

$$\Phi_{ef}(p) = \frac{E(p)}{F(p)} = -\frac{W_2(p) W_3(p)}{1 + W(p)}. \quad (\text{П1-13})$$

В этих формулах $W(p) = W_1(p) W_2(p) W_3(p)$ — так называемая передаточная функция разомкнутой системы. Воспользовавшись найденными передаточными функциями, можно записать уравнение движения замкнутой системы для изображений величин:

относительно регулируемой величины

$$Y(p) = \Phi(p) X(p) + \Phi_f(p) F(p), \quad (\text{П1-14})$$

относительно рассогласования

$$E(p) = \Phi_e(p) X(p) + \Phi_{ef}(p) F(p), \quad (\text{П1-15})$$

Подставив в эти уравнения выражения для передаточных функций и умножив левую и правую части на общий знаменатель передаточных функций, можно записать уравнения движения в одну строку, а при необходимости перейти к обычной форме записи дифференциального уравнения.

Иногда при расчете системы с неединичной обратной связью бывает целесообразно привести ее структурную схему (рис. П1-5,а) к эквивалентной схеме (рис. П1-5,б), имеющей замкнутый контур с единичной обратной связью. Такое преобразование осуществляется по правилу перемещения звена [в данном случае $W_3(p)$] через суммирующий элемент.

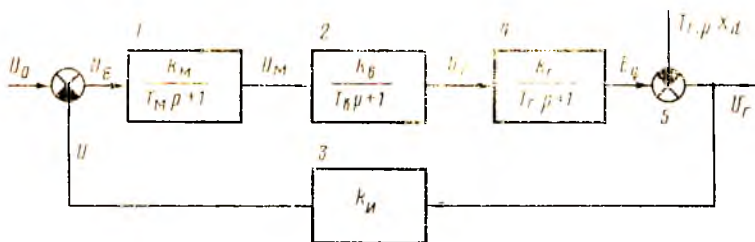


Рис. П1-6. Структурная схема АСР напряжения генератора.

Характеристическое уравнение замкнутой системы (точнее, дифференциального уравнения замкнутой системы) находится приравнованием нулю входных величин, что равносильно приравнованию нулю знаменателя передаточной функции, т. е.

$$1 + W(p) = 0, \quad (\text{П1-16})$$

так как именно знаменатель равен оператору левой части дифференциального уравнения. Передаточная функция разомкнутой системы во многих случаях является дробно-рациональной функцией вида

$$W(p) = K(p) / D(p), \quad (\text{П1-17})$$

где $K(p)$ и $D(p)$ — многочлены целой положительной степени, причем уравнение

$$D(p) = 0$$

представляет собой характеристическое уравнение разомкнутой системы.

Учитывая (П1-17), можно записать (П1-16) в виде

$$A(p) = D(p) + K(p) = 0. \quad (\text{П1-18})$$

Левая часть характеристического уравнения замкнутой системы (ее характеристический многочлен $A(p)$) равна сумме числителя и знаменателя передаточной функции соответствующей разомкнутой системы.

Пример. На рис. П1-6 показана упрощенная структурная схема АСР напряжения генератора (см. рис. П1-2,а). Звенья 1, 2, 3 описывают магнитный усилитель, возбудитель и трансформатор с выпрямителем соответственно. Звенья 4 и 5 образуют приближенную модель генератора для малых отклонений.

Величины u , u_g , u_m , u_f , u_r можно принять выходными для звеньев этой схемы при допущении, что каждый функциональный элемент является звеном направленного действия. Сравнивая схемы, показанные на рис. П1-5 и П1-6, можно найти выражения для $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$. В частности, $W_2(p) = -1$. Пользуясь формулами (П1-10) и (П1-11), определяем передаточные функции:

$$\Phi(p) = \frac{U_r(p)}{U_o(p)} = \frac{k_m k_b k_r}{(T_m p + 1)(T_b p + 1)(T_r p + 1) + K}; \quad (\text{П1-19})$$

$$\Phi_f(p) = \frac{U_r(p)}{X_d I_{г.р}(p)} = \frac{-(T_m p + 1)(T_b p + 1)(T_r p + 1)}{(T_m p + 1)(T_b p + 1)(T_r p + 1) + K}, \quad (\text{П1-20})$$

где $K = k_m k_b k_r k_n$ — коэффициент усиления разомкнутой системы; $I_{г.р}$ — реактивный ток нагрузки генератора.

Характеристическое уравнение замкнутой системы

$$(T_m p + 1)(T_b p + 1)(T_r p + 1) + K = 0. \quad (\text{П1-21})$$

Передаточная функция и характеристическое уравнение разомкнутой системы соответственно имеют вид:

$$W(p) = \frac{K}{(T_m p + 1)(T_b p + 1)(T_r p + 1)}; \quad (\text{П1-22})$$

$$(T_m p + 1)(T_b p + 1)(T_r p + 1) = 0. \quad (\text{П1-23})$$

Динамические характеристики звеньев и систем. Динамические характеристики определяют поведение звеньев и систем в движении, т. е. при изменении во времени входных и выходных величин. Различают временные и частотные динамические характеристики.

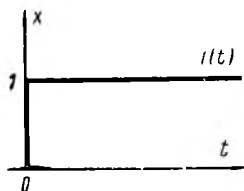


Рис. П1-7. Единичное ступенчатое воздействие.

Временные характеристики (функции) представляют собой зависимости выходной величины от времени при определенных типовых входных воздействиях и нулевых

предначальных условиях. Так, в частности, переходная характеристика (переходная функция) $h(t)$ представляет собой зависимость выходной величины от времени при единичном ступенчатом (рис. П1-7) воздействии на входе

$$x(t) = 1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0; \\ 1 & \text{при } t > 0 \end{cases}$$

и нулевых предначальных условиях.

Так как изображение единичного ступенчатого воздействия по Лапласу

$$L\{1(t)\} = \frac{1}{p},$$

то изображение переходной функции

$$L\{h(t)\} = W(p) L\{1(t)\} = \frac{W(p)}{p}, \quad (\text{П1-24})$$

где $W(p)$ — соответствующая передаточная функция.

Частотные характеристики определяют динамические свойства звеньев и систем в установившемся режиме гармонических колебаний. Пусть на вход звена (системы) подано гармоническое воздействие

$$x(t) = x_m \sin(\omega t + \varphi_x),$$

которое, как известно, может быть представлено в символической форме, в виде комплекса мгновенного значения

$$\dot{x}(t) = x_m e^{j(\omega t + \varphi_x)}.$$

После окончания переходного процесса на выходе установятся гармонические колебания, комплекс мгновенного значения которых

$$\dot{y}(t) = y_m e^{j(\omega t + \varphi_y)}.$$

Если повторить этот эксперимент для всего диапазона частот $0 \leq \omega \leq \infty$, то в результате могут быть получены следующие частотные характеристики:

1. Амплитудная частотная характеристика (АЧХ) $A(\omega)$, представляющая собой зависимость от частоты отношения амплитуд выходной и входной величин, т. е.

$$A(\omega) = y_m(\omega) / x_m(\omega). \quad (\text{П1-25})$$

2. Фазовая частотная характеристика (ФЧХ) $\varphi(\omega)$, представляющая собой зависимость от частоты сдвига фаз между выходной и входной величинами, т. е.

$$\varphi(\omega) = \varphi_y(\omega) - \varphi_x(\omega). \quad (\text{П1-26})$$

3. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФХ), или комплексный коэффициент усиления $W(j\omega)$, представляющий собой зависимость от частоты отношения комплексов выходной и входной величин, т. е.

$$W(j\omega) = \frac{y_m(\omega) e^{j[\omega t + \varphi_y(\omega)]}}{x_m(\omega) e^{j[\omega t + \varphi_x(\omega)]}} = \frac{y_m(\omega)}{x_m(\omega)} e^{j[\varphi_y(\omega) - \varphi_x(\omega)]}. \quad (\text{П1-27})$$

Принимая во внимание (П1-25) и (П1-26), из (П1-27) получаем следующую связь АФХ с АЧХ и ФЧХ:

$$W(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}. \quad (\text{П1-28})$$

Из (П1-28) видно, что АЧХ является модулем АФХ, а ФЧХ — аргументом АФХ, т. е.

$$A(\omega) = |W(j\omega)|; \quad (\text{П1-29})$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega). \quad (\text{П1-30})$$

Амплитудно-фазовая характеристика является комплексной функцией частоты и поэтому может быть представлена в алгебраической форме

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega), \quad (\text{П1-31})$$

где $U(\omega) = \operatorname{Re} W(j\omega)$ — вещественная частотная характеристика (ВЧХ); $V(\omega) = \operatorname{Im} W(j\omega)$ — мнимая частотная характеристика (МЧХ).

Характеристики АЧХ и ФЧХ могут быть выражены через ВЧХ и МЧХ:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}; \quad (\text{П1-32})$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)}. \quad (\text{П1-33})$$

Все частотные характеристики, кроме АФХ, строятся в прямоугольных координатах, причем по горизонталь-

пой оси откладываются значения частоты ω . Характеристика АФХ строится в комплексной плоскости, по мнимой оси которой откладываются значения $jV(\omega)$, а по вещественной — значения $U(\omega)$ (рис. П1-8). Любой точке АФХ соответствует определенное значение ω . Каждое значение АФХ можно рассматривать как вектор, проведенный из начала координат в соответствующую точку АФХ [например, вектор $W(j\omega_1)$ на рис. П1-8]. Длина этого вектора пропорциональна значению $A(\omega_1)$, а угол между положительной вещественной полуосью и данным вектором равен значению $\varphi(\omega_1)$ при соответствующей частоте, причем направление отсчета углов против часовой стрелки принято за положительное.

Комплексный коэффициент усиления может быть получен из передаточной функции $W(p)$ путем подстановки $p=j\omega$, т. е. уравнение АФХ

$$W(j\omega) = W(p) \big|_{p=j\omega}. \quad (\text{П1-34})$$

Широкое применение находят также логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ), отличающиеся простотой построения. При построении ЛЧХ по оси абсцисс откладываются отрезки, пропорциональные десятичному логарифму ω . В этом случае отрезок оси абсцисс, принятый за единицу, изображает интервал частот, заключенный между произвольным значением ω и десятикратным значением частоты 10ω , и называется декадой (дек). Логарифмические частотные характеристики делятся на логарифмические амплитудные характеристики (ЛАХ) и логарифмические фазовые характеристики (ЛФХ). При построении ЛАХ по оси ординат откладываются отрезки, измеряемые в децибелах, пропорциональные

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega), \quad (\text{П1-35})$$

где $A(\omega)$ — ордината обычной АЧХ.

При построении ЛФХ по оси ординат откладываются значения ФЧХ $\varphi(\omega)$ в обычном масштабе, т. е. в градусах или радианах.

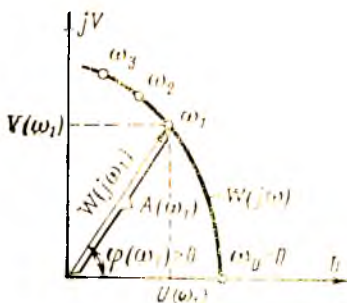


Рис. П1-8. Амплитудно-фазовая характеристика.

Построение частотных характеристик разомкнутой системы по частотным характеристикам звеньев. Рассмотрим разомкнутую систему, образованную последовательным соединением звеньев (рис. П1-4,в). Подставив в выражение (П1-7) для передаточной функции этого соединения $p=j\omega$, получим:

$$W(j\omega) = \prod_{l=1}^n W_l(j\omega) \quad (\text{П1-36})$$

Из (П1-36) видно, что каждый вектор АФХ разомкнутой системы получается перемножением векторов АФХ всех звеньев для соответствующего значения ω . Представив в (П1-36) каждую из комплексных величин в показательной форме, найдем:

$$A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} = e^{j \sum_{l=1}^n \varphi_l(\omega)} \prod_{l=1}^n A_l(\omega). \quad (\text{П1-37})$$

Выражение (П1-37) показывает, что модули комплексных частотных функций (т. е. ординаты АЧХ) $A_l(\omega)$ отдельных звеньев перемножаются, т. е.

$$A(\omega) = \prod_{l=1}^n A_l(\omega), \quad (\text{П1-38})$$

а аргументы (т. е. ординаты ФЧХ) $\varphi_l(\omega)$ складываются, т. е.

$$\varphi(\omega) = \sum_{l=1}^n \varphi_l(\omega). \quad (\text{П1-39})$$

Логарифмируя (П1-38), устанавливаем, что при последовательном соединении звеньев ЛАХ отдельных звеньев складываются, т. е.

$$L(\omega) = \sum_{l=1}^n L_l(\omega), \quad (\text{П1-40})$$

в чем состоит одно из упрощений, связанных с применением ЛАХ. Другое упрощение заключается в том, что во многих случаях вместо истинных ЛАХ можно рассматривать асимптотические ЛАХ, состоящие из отрезков прямых.

Построение частотных характеристик замкнутой системы по частотным характеристикам разомкнутой системы.

Как было указано выше, структурную схему замкнутой системы с неединичной обратной связью можно эквивалентно преобразовать в схему, имеющую замкнутый контур с единичной обратной связью. Характеристика АФХ $\Phi(j\omega)$ замкнутой системы с единичной обратной связью связана с АФХ $W(j\omega)$ разомкнутой системы соотношением

$$\Phi(j\omega) = \frac{W(j\omega)}{1 + W(j\omega)}. \quad (\text{П1-41})$$

На основании (П1-41) построены приводимые в справочной литературе круговые диаграммы и номограммы, позволяющие существенно упростить нахождение частотных характеристик замкнутой системы по частотным характеристикам разомкнутой системы.

Типовые звенья линейных автоматических систем управления. Для упрощения исследования процессов в теории автоматического управления вводится понятие типовых звеньев, передаточная функция которых только в существенном для рассматриваемой задачи частотном диапазоне соответствует реальным звеньям системы управления.

Рассматривая структурные схемы различных систем управления, можно выделить в них ряд наиболее распространенных типовых звеньев, основные из которых следующие:

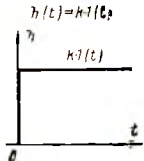
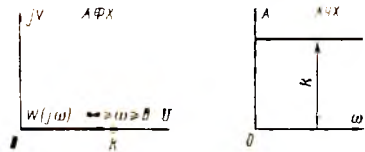
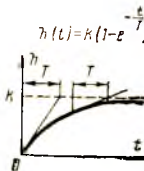
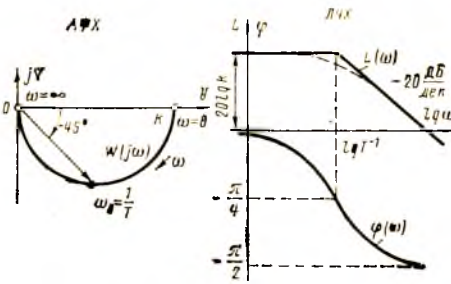
безынерционное, инерционное первого порядка, инерционное второго порядка, интегрирующее, дифференцирующее, инерционно-дифференцирующее, форсирующее, инерционно-форсирующее, звено постоянного запаздывания (запаздывающее).

В табл. П1-1 приведены уравнения, передаточные функции, динамические характеристики и примеры перечисленных типовых звеньев. При этом через x обозначена входная величина, а через y — выходная.

П1-3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ

Как было указано выше, устойчивость системы предполагает затухание ее свободного движения. Свободная составляющая будет затухать только в том случае, если все корни характеристического уравнения имеют отрицательную вещественную часть (так называемые «левые корни»). При наличии хотя бы одного корня с положи-

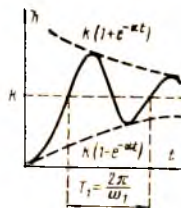
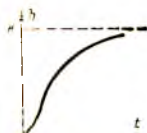
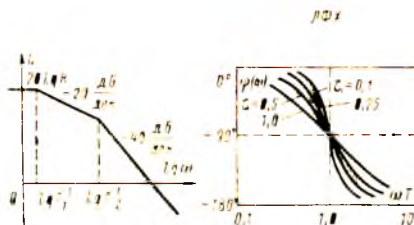
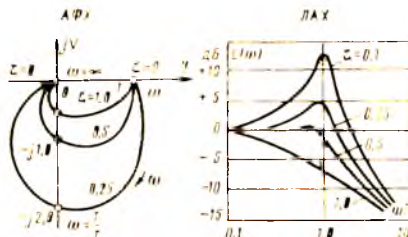
Таблица П1-1

Переходные функции и характеристики	Частотные характеристики	Примеры
$h(t) = k(1 - e^{-\frac{t}{T}})$ 		Электронный (полупроводниковый) усилитель с активной нагрузкой, делитель напряжения, рычажная или зубчатая передача
$h(t) = k(1 - e^{-\frac{t}{T}})$ 		Генератор, двигатель (выходная величина — скорость), магнитный усилитель, паровая турбина

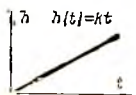
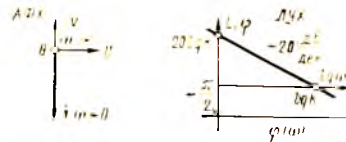
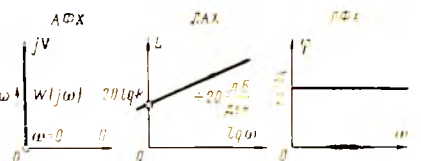
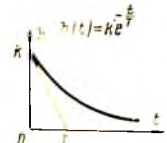
Переходные функции и характеристики

Частотные характеристики

Примеры


 а) $0 < \xi < 1$

 б) $\xi > 1$

 ЛАХ для $\xi > 1$

Центробежный маятник (датчик частоты вращения), электрический контур из последовательно соединенных элементов R, L, C (выход—напряжение на емкости), двигатель постоянного тока (с учетом индуктивности якоря, выход—скорость, вход—напряжение якоря)

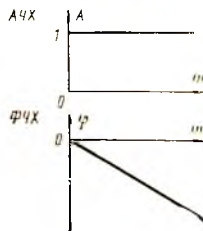
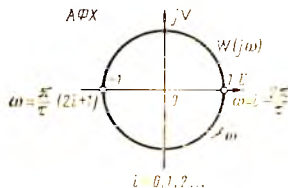
Звено, уравнение движения и передаточная функция	Переходные функции и характеристики	Частотные характеристики	Примеры
Интегрирующее $\frac{dy}{dt} = kx$ $W(p) = k/p$			Двигатели (выход—перемещение, инерционность пренебрежимо мала), резервуар (вход—приток жидкости, выход—уровень)
Дифференцирующее $y = k \frac{dx}{dt}$ $W(p) = kp$	$h(t) = k\delta(t), \text{ где } \delta(t) \text{—дельта-функция (функция Дирака)}$		Звено физически не реализуемо, так как требует источника бесконечно большой мощности
Инерционно-дифференцирующее $T \frac{dy}{dt} + y = kT \frac{dx}{dt}$ $W(p) = \frac{kTp}{Tp+1}$			Дифференцирующий трансформатор, CR-четырёхполосник (выход—напряжение на резисторе), гидромеханический изодром

Переходные функции и характеристики	Частотные характеристики	Примеры
$h(t) = k [T\delta(t) + 1(t)]$	АФХ ЛАХ ЛФХ	Физически нереализуемо, так как требует источника бесконечно большой мощности
	АФХ ЛАХ ЛФХ	

Продолжение табл. П1-1

Частотные характеристики

Примеры



Транспортер, длинная линия без потерь, нагруженная на согласованное сопротивление

тельной вещественной частью (т. е. «правого корня») система неустойчива. Система находится на границе устойчивости, если помимо левых корней имеются один или несколько корней, расположенных на мнимой оси (т. е. мнимых или нулевых корней).

Таким образом, для анализа устойчивости нет необходимости находить корни характеристического уравнения — достаточно лишь проверить, все ли они левые.

Необходимое условие устойчивости заключается в наличии одинакового знака (положительного) у всех коэффициентов характеристического уравнения. Это условие является и достаточным для систем первого и второго порядка.

Необходимые и достаточные условия устойчивости для систем любого порядка выражены в виде критериев устойчивости, т. е. в виде правил, позволяющих без решения характеристического уравнения проверить, все ли его корни являются левыми. Критерии устойчивости, помимо анализа устойчивости при заданных значениях всех параметров, позволяют также определить критические значения параметров, при которых система находится на границе устойчивости.

Критерии устойчивости делятся на алгебраические (критерии Гурвица, Рауса, И. А. Вышнеградского), которые предполагают выполнение ряда алгебраических действий над коэффициентами характеристического уравнения, и частотные (критерии Михайлова, Найквиста), заключающиеся в построении и анализе некоторых частотных функций.

Помимо критериев, при анализе устойчивости могут быть использованы:

метод D -разбиения, позволяющий построить область устойчивости в пространстве варьируемых параметров;

метод корневого годографа, позволяющий построить годографы корней характеристического уравнения при изменении варьируемого параметра.

Критерий устойчивости Гурвица. Пусть характеристическое уравнение исследуемой системы имеет вид:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0. \quad (\text{П1-42})$$

Определитель Гурвица k -го порядка ($k=1, 2, \dots, n$) составляется по следующему правилу: по главной диагонали выписываются все коэффициенты от a_1 до a_k включительно, вверх от главной диагонали столбцы достран-

ваются коэффициентами с последовательно возрастающими индексами, а вниз от главной диагонали ставятся коэффициенты с последовательно убывающими индексами, причем вместо коэффициентов, индексы которых получаются больше n и меньше нуля, ставятся нули.

Главный определитель Гурвица имеет вид:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix} = a_n \Delta_{n-1}. \quad (\text{П1-43})$$

Определители Гурвица низших порядков $k < n$ могут быть получены как диагональные миноры Δ_n .

Система устойчива, если все определители Гурвица положительны (при $a_0 > 0$).

Раскрывая определители Гурвица для уравнений третьего и четвертого порядков, находим необходимые и достаточные условия устойчивости:

для уравнений третьего порядка

$$\left. \begin{aligned} a_0 > 0; \quad a_1 > 0; \quad a_2 > 0; \quad a_3 > 0; \\ \Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1-44})$$

т. е. требуется, чтобы коэффициенты были положительны и произведение средних коэффициентов $a_1 a_2$ было больше произведения крайних $a_0 a_3$;

для уравнения четвертого порядка требуется, чтобы коэффициенты были положительны и

$$\Delta_3 = a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a^2_1 a_4 > 0. \quad (\text{П1-45})$$

Для уравнений, порядок которых выше четвертого, пользоваться критерием Гурвица нецелесообразно, так как процесс раскрытия определителей высокого порядка становится неоправданно трудоемким.

Если система n -го порядка находится на границе устойчивости, то определители

$$\Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0, \dots, \Delta_{n-2} > 0, \Delta_{n-1} \geq 0,$$

а главный определитель $\Delta_n = 0$, причем, как видно из (П1-43), $\Delta_n = 0$ в двух случаях:

$$a_n > 0; \Delta_{n-1} = 0; \quad (\text{П1-46})$$

$$a_n = 0; \Delta_{n-1} > 0. \quad (\text{П1-47})$$

В первом случае характеристическое уравнение имеет помимо левых корней пару мнимых корней. Во втором случае помимо левых корней характеристическое уравнение имеет один нулевой корень. Условие (П1-46) $\Delta_{n-1}=0$ дает уравнение, из которого обычно находят так называемые критические (граничные) значения параметров системы, выводящие ее на границу устойчивости, а также строят области устойчивости.

Пример. Исследуем с помощью критерия Гурвица зависимость критического коэффициента усиления от постоянных времени для статической системы, характеристическое уравнение которой имеет вид (П1-21). Преобразуем это уравнение к нормализованному виду

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0,$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= T_M T_B T_r; & a_1 &= T_M T_B + T_B T_r + T_r T_M; \\ a_2 &= T_M + T_B + T_r; & a_3 &= K + 1. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что необходимое условие устойчивости выполняется при любых значениях параметров. Поэтому, приравняв к нулю определитель Гурвица второго порядка, получим условие нахождения замкнутой системы на границе устойчивости:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 = 0.$$

Подставив сюда выражения для коэффициентов и решив полученное уравнение относительно K , найдем:

$$K_{кр} = 2 + \frac{T_M}{T_B} + \frac{T_B}{T_r} + \frac{T_r}{T_M} + \frac{T_M}{T_r} + \frac{T_r}{T_B} + \frac{T_B}{T_M}. \quad (\text{П1-48})$$

Уравнение (П1-48) показывает, что критический коэффициент усиления зависит от отношений постоянных времени, причем наиболее неблагоприятный с точки зрения устойчивости случай соответствует равенству всех постоянных времени; при этом критический коэффициент имеет минимальное значение $(K_{кр})_{\min} = 8$.

Критерий устойчивости Михайлова. Советский ученый А. В. Михайлов был первым, кто предложил использовать развитые в электротехнике и радиотехнике частотные методы для исследований процессов в автоматических системах регулирования. Существо критерия Михайлова сводится к следующему. Из характеристического многочлена, соответствующего уравнению (П1-42), подстановкой $p = j\omega$ образуется функция мнимого аргумента:

$$\begin{aligned} A(j\omega) &= a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1} (j\omega) + \\ &+ a_n = M(\omega) + jN(\omega) = |A(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}, \end{aligned} \quad (\text{П1-49})$$

где

$$M(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - \dots; \quad (\text{П1-50})$$

$$N(\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 - \dots \quad (\text{П1-51})$$

На комплексной плоскости функция $A(j\omega)$ может быть представлена в виде вектора, исходящего из начала координат. При изменении ω от 0 до ∞ конец вектора опишет годограф, который называется кривой Михайлова. Для устойчивости системы n -го порядка необ-

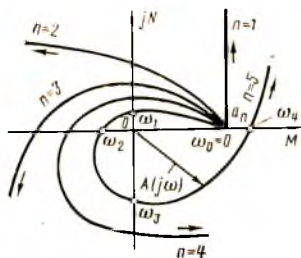


Рис. П1-9. Кривые Михайлова.

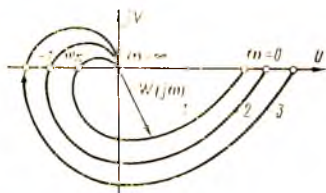


Рис. П1-10. К анализу устойчивости по критерию Найквиста.

ходимо и достаточно, чтобы вектор кривой Михайлова $A(j\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ повернулся, нигде не обращаясь в нуль, вокруг начала координат против часовой стрелки на угол $n\pi/2$.

Иначе говоря, приращение аргумента $\varphi(\omega)$ вектора $A(j\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ составляет для устойчивой системы $n\pi/2$, что можно записать следующим образом:

$$\Delta \arg A(j\omega) \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} = \Delta \varphi(\omega) \Big|_{\omega=0}^{\omega=\infty} = n\pi/2. \quad (\text{П1-52})$$

Так как $A(j0) = a_n > 0$, то кривая Михайлова начинается на вещественной положительной полуоси. При $\omega \rightarrow \infty$ вектор $A(j\omega) \approx a_0(j\omega)^n$ и поэтому кривая Михайлова уходит в бесконечность вдоль вещественной оси при четном n и вдоль мнимой при нечетном n . На рис. П1-9 показаны кривые Михайлова для устойчивых систем различного порядка n . Из этих графиков видно, что кривая Михайлова при возрастании ω от 0 до ∞ обходит последовательно n квадрантов комплексной плоскости начи-

ная с первого (т. е. в порядке $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \dots$), не проходя через начало координат.

Для анализа устойчивости систем невысокого порядка ($n \leq 6$) можно воспользоваться следствием из критерия Михайлова: система устойчива, если корни минимой (П1-51) и вещественной (П1-50) функций Михайлова вещественны и перемежаются, т. е. корни одного уравнения расположены между корнями другого. Это правило называется правило перемежаемости корней и позволяет обойтись без построения кривой Михайлова.

Критерий устойчивости Найквиста. Если разомкнутая система устойчива, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая характеристика $W(j\omega)$ разомкнутой системы не охватывала точку $(-1, j0)$ или, что то же самое, чтобы точка $(-1, j0)$ лежала вне контура АФХ разомкнутой системы. Точка $(-1, j0)$ иногда называется опасной точкой (с точки зрения устойчивости).

Амплитудно-фазовые характеристики, показанные на рис. П1-10, типичны для разомкнутых статических систем с передаточной функцией вида (П1-22). Такая разомкнутая система устойчива, так как ее характеристическое уравнение не имеет правых корней. Замкнутая система будет устойчивой, если АФХ имеет вид кривой 1. Если АФХ имеет вид кривой 3, то замкнутая система неустойчива.

Если же АФХ проходит через опасную точку (кривая 2), то замкнутая система находится на границе устойчивости и ее характеристическое уравнение имеет пару мнимых корней

$$p_{k, k+1} = \pm j\omega_{\pi},$$

где ω_{π} — частота, при которой АФХ проходит через точку $(-1, j0)$ и фазовый сдвиг равен $\pm\pi$.

На основании критерия Найквиста можно сформулировать суждение об устойчивости замкнутой системы по ЛФХ разомкнутой системы. Назовем положительным переход ЛФХ разомкнутой системы через линию $\varphi = \text{const}$, если он происходит при увеличении частоты в направлении снизу вверх. Переход ЛФХ в обратном направлении при тех же условиях назовем отрицательным. Если устойчива разомкнутая система, то замкнутая будет устойчива, если во всех областях положительных значений ЛАХ $L(\omega) > 0$, разность между числом поло-

жительных и отрицательных переходов ЛФХ через линии $\pm\pi$, $\pm 3\pi$, $\pm 5\pi \dots$ равняется нулю.

На рис. П1-11,а показаны ЛЧХ устойчивой разомкнутой системы с передаточной функцией вида (П1-22). Замкнутая система устойчива, так как ЛФХ не имеет переходов через линию $-\pi$ в области, где $L(\omega) > 0$. При увеличении коэффициента усиления может появиться

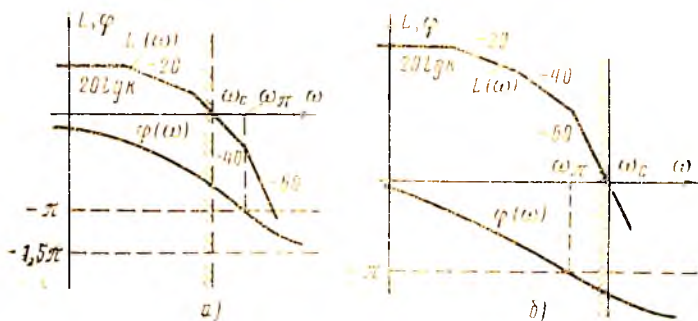


Рис. П1-11. К анализу устойчивости замкнутой системы по ЛЧХ разомкнутой системы.

один отрицательный переход ЛФХ через линию $-\pi$ в области, где $L(\omega) > 0$ (рис. П1-11,б). Замкнутая система станет неустойчивой. Для случаев, подобных показанным на рис. П1-11, когда ФЧХ имеет лишь один переход через линию $-\pi$, об устойчивости замкнутой системы можно судить по выполнению неравенства

$$\omega_c < \omega_\pi, \quad (\text{П1-53})$$

где ω_c — частота среза, для которой $L(\omega_c) = 0$, ω_π — частота, при которой $\varphi(\omega_\pi) = -\pi$.

Неравенство (П1-53) показывает, что в указанном частном случае замкнутая система устойчива, если ЛАХ пересекает ось частот при меньшей частоте, чем ЛФХ — линию $-\pi$.

Построение областей устойчивости в пространстве параметров системы. D-разбиение. Под параметрами системы понимают постоянные времени, коэффициенты усиления отдельных звеньев. Некоторые из этих параметров не подлежат изменению, другие же могут изменяться с целью обеспечения устойчивости. Если система имеет s изменяемых параметров, то можно говорить об s -

мерном пространстве варьируемых параметров. Точки, которым соответствует m правых и $n - m$ левых корней характеристического уравнения n -й степени, образуют в пространстве параметров область, обозначаемую $D(m)$. Область устойчивости соответственно обозначается $D(0)$, и ее нахождение является целью исследования. Однако отыскать область устойчивости удастся, как правило, лишь построив предварительно и все остальные D -области, хотя они не представляют обычно самостоятельного интереса. Общая методика разбиения пространства параметров на области с различным распределением корней предложена советским ученым Ю. И. Неймарком в 1948 г. под названием D -разбиения.

В основе метода D -разбиения лежит нахождение уравнения и построение границы D -разбиения, разделяющей пространство параметров на D -области. Эта граница при большом числе изменяемых параметров s является s -мерной поверхностью, а в частном случае при $s \leq 2$ представляет собой кривую в плоскости, называемую кривой D -разбиения. Граница D -разбиения в пространстве параметров является отображением мнимой оси плоскости корней. Поэтому для нахождения уравнения границы D -разбиения достаточно в характеристическом уравнении замкнутой системы заменить p на $j\omega$. Разрешив затем характеристическое уравнение относительно изменяемых параметров и задавая значения ω от $-\infty$ до $+\infty$, получим все точки пространства параметров, которым соответствует один или несколько мнимых корней характеристического уравнения. Штриховка кривой D -разбиения по определенному правилу дает возможность выделить из всех D -областей такую область, всем точкам которой соответствует наибольшее количество левых корней в характеристическом уравнении. Эта область иногда называется претендентом на область устойчивости. Проверка системы на устойчивость, выполненная для любой точки области-претендента по любому из критериев устойчивости, позволяет ответить на вопрос, является ли область-претендент искомой областью устойчивости.

D -разбиение плоскости одного комплексного параметра. В тех случаях, когда требуется выяснить влияние на устойчивость только одного параметра при заданных значениях остальных, целесообразно ввести вместо этого параметра комплексную величину, вещественные значе-

ния которой равны значениям исследуемого параметра. Рассмотрим случай, когда исследуемый параметр A входит в характеристическое уравнение линейно, благодаря чему последнее можно привести к следующему виду:

$$S(p) + AR(p) = 0. \quad (\Pi 1-54)$$

Делая подстановку $p=j\omega$ и решая это уравнение относительно A , получаем уравнение границы D -разбиения в плоскости комплексной переменной $A(j\omega)$:

$$A(j\omega) = -\frac{S(j\omega)}{R(j\omega)} = x(\omega) + jy(\omega).$$

Так как $x(\omega)$ является четной функцией ω , а $y(\omega)$ — нечетной, то достаточно построить лишь одну ветвь кривой D -разбегания для положительных значений ω . Вторая ветвь (для $0 \geq \omega \geq -\infty$) может быть построена как зер-

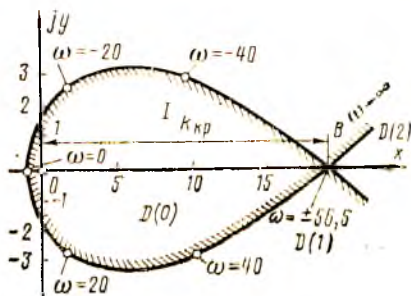


Рис. П1-12. D -разбиение по одному параметру.

ческого уравнения, какова кратность штриховки. Поэтому претендентом на область устойчивости будет область I , окруженная со всех сторон штриховкой. Если проверка по любому из критериев устойчивости подтверждает, что область I , является областью устойчивости, то практический интерес представляет лишь отрезок OB положительной вещественной полуоси, входящий в область устойчивости.

Пример. Дано характеристическое уравнение замкнутой системы:

$$(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) + k = 0.$$

Такого вида уравнение имеет система регулирования напряжения (см. рис. П1-2). Выясним влияние на устойчивость коэффициента усиления k .

Уравнение границы D -разбиения получим, решив характеристическое уравнение относительно k и подставив $p=j\omega$:

$$k(j\omega) = -(j\omega T_1 + 1)(j\omega T_2 + 1)(j\omega T_3 + 1) = \\ = x(\omega) - jy(\omega), \quad (\text{П1-55})$$

где

$$x(\omega) = (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) \omega^2 - 1;$$

$$y(\omega) = T_1 T_2 T_3 \omega^3 - (T_1 + T_2 + T_3) \omega.$$

На рис. П1-12 по уравнению (П1-55) построена кривая D -разбиения при $T_1 = 0,1$ с, $T_2 = 0,05$ с, $T_3 = 0,01$ с. Область I внутри петли является претендентом на область устойчивости. Для проверки на устойчивость можно взять какую-либо точку внутри петли (например, $k=0$). Для этой точки система устойчива, так как все три корня $p_1 = -1/T_1$, $p_2 = -1/T_2$, $p_3 = -1/T_3$ являются отрицательными вещественными.

Таким образом, область внутри петли является областью устойчивости $D(0)$. Так как нас интересуют только действительные положительные значения k , то из всей области устойчивости имеет смысл лишь отрезок OB , равный значению критического коэффициента усиления разомкнутой системы $k_{кр}$, общая формула для которого имеет вид (П1-48).

П1-4. МЕТОДЫ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ И СИНТЕЗА СИСТЕМ ПО ЗАДАНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА

Устойчивость системы — необходимое, но не достаточное условие ее работоспособности. Действительно, устойчивая система может оказаться недостаточно точной при обработке заданных воздействий, переходные процессы в ней могут затухать чересчур медленно и отличаться сильной колебательностью, т. е. система может не удовлетворять требованиям качества процесса регулирования.

На рис. П1-13, а показана структурная схема АСР, состоящей из объекта регулирования с передаточной функцией $W_o(p)$, устройства управления $W_{\pi}(p)$ в пря-

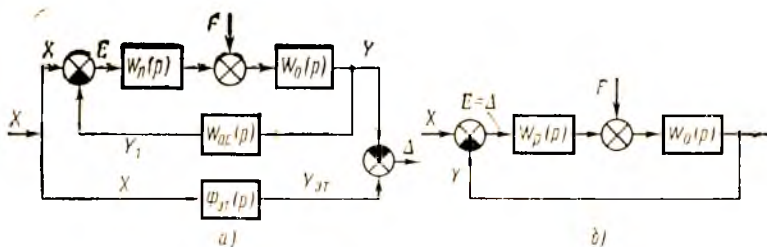


Рис. П1-13. Структурные схемы для анализа ошибки регулирования.

мом канале и устройства управления $W_{o.c}(p)$ в цепи обратной связи. На систему действуют задающий сигнал x и возмущение f . Качество процесса регулирования оценивается по ошибке (погрешности) регулирования $\delta(t)$, представляющей собой разность между выходной величиной $y_{э\tau}$ некоторой воображаемой идеальной (эталонной) линейной системы с передаточной функцией $\Phi_{э\tau}(p)$ и регулируемой величиной y реальной исследуемой системы, т. е.

$$\delta(t) = y_{э\tau}(t) - y(t).$$

Разность между задающим сигналом x и сигналом y_1 главной обратной связи представляет собой рассогласование

$$\varepsilon(t) = x(t) - y_1(t),$$

которое в общем случае, как это видно из рис. П1-13,а, не равно ошибке регулирования $\delta(t)$. Лишь в частном, довольно часто встречающемся случае, когда $\Phi_{э\tau} = 1$ и $W_{oc} = 1$ (рис. П1-13,б), ошибка системы равна ее рассогласованию, т. е.

$$\delta(t) = \varepsilon(t) = x(t) - y(t). \quad (\text{П1-56})$$

В дальнейшем будет рассмотрен именно этот случай, для которого изображение ошибки

$$E(p) = \Phi_{\varepsilon}(p) X(p) + \Phi_{\varepsilon f}(p) F(p), \quad (\text{П1-57})$$

где $\Phi_{\varepsilon}(p)$ и $\Phi_{\varepsilon f}(p)$ — передаточные функции, определяемые согласно (П1-12) и (П1-13).

Уравнение (П1-57) представляет собой уравнение замкнутой системы для изображения ошибки и показывает, что ошибка, как функция внешних воздействий, имеет две составляющие: собственную ошибку воспроизведения задающего воздействия $x(t)$ [ее изображение $\Phi_{\varepsilon}(p) X(p)$] и ошибку воспроизведения, вызванную возмущением.

Общее решение дифференциального уравнения, соответствующего (П1-57), имеет вид:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{уст}(t) + \varepsilon_n(t), \quad (\text{П1-58})$$

где $\varepsilon_{уст}(t)$ — установившаяся ошибка (частное решение неоднородного уравнения); $\varepsilon_n(t)$ — переходная (свобод-

ная) составляющая ошибки, или переходная погрешность (общее решение однородного уравнения).

Выражение (П1-58) показывает, что ошибка, как функция времени, имеет две составляющие. Переходная составляющая зависит от времени следующим образом:

$$\varepsilon_n(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{p_i t}, \quad (\text{П1-59})$$

где C_i — постоянные интегрирования; p_i — корни (некратные) характеристического уравнения замкнутой системы n -го порядка.

В устойчивой системе, как известно, переходная составляющая затухает, т. е.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_n(t) = 0. \quad (\text{П1-60})$$

Учитывая (П1-58) и (П1-60), из (П1-56) получаем:

$$e_{уст}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [x(t) - y(t)] = x(t) - y_{уст}'(t), \quad (\text{П1-61})$$

где $y_{уст}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$ — установившийся закон изменения выходной величины.

Из (П1-58) с учетом (П1-56) и (П1-61) найдем:

$$e_n(t) = e(t) - e_{уст}(t) = y_{уст}(t) - y(t). \quad (\text{П1-62})$$

Из (П1-62) видно, что переходная погрешность равна отклонению выходной величины от установившегося закона ее изменения.

Установившаяся погрешность определяет качество установившихся режимов, а переходная погрешность — качество переходных процессов.

Задача анализа качества процессов управления — выяснить, удовлетворяет ли та или иная система предъявленным к ней требованиям качества, а также установить, какое влияние оказывают структура системы и значения ее параметров на процесс управления и показатели его качества.

Выбор структуры и параметров системы управления в соответствии с заданными требованиями качества составляет задачу синтеза.

Анализ точности систем регулирования в установившихся режимах. Наиболее часто встречающиеся или наиболее тяжелые для системы воздействия обычно заданы

в виде определенной (детерминированной) функции времени и называются типовыми. Наиболее распространенными воздействиями являются:

ступенчатые воздействия

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= x_0 \cdot 1(t); \\ f(t) &= f_0 \cdot 1(t), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1-63})$$

где $x_0 = \text{const}$, $f_0 = \text{const}$;

воздействие, изменяющееся с постоянной скоростью,

$$x(t) = v_0 t; \quad (\text{П1-64})$$

воздействие, изменяющееся с постоянным ускорением,

$$x(t) = at^2/2; \quad (\text{П1-65})$$

гармонические воздействия

$$x(t) = x_m \sin \omega t; \quad f(t) = f_m \sin \omega t. \quad (\text{П1-66})$$

Установившаяся ошибка при постоянных воздействиях называется, как известно, статической ошибкой. Статическая ошибка в общем случае может быть найдена в результате статического расчета системы. Для линейных систем, а также для линеаризованных систем при малых отклонениях любую постоянную установившуюся ошибку (в частности, статическую ошибку) можно определить по передаточной функции, используя теорему операционного исчисления о конечном (предельном) значении оригинала. Согласно (П1-57) для воздействий вида (П1-63) найдем изображение ошибки по Лапласу

$$E(p) = \Phi_e(p) \frac{x_0}{p} - \Phi_f(p) \frac{f_0}{p} \quad (\text{П1-67})$$

и по теореме о предельном значении найдем статическую ошибку

$$\epsilon_{\text{ст}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p E(p) = \Phi_e(0) x_0 - \Phi_f(0) f_0. \quad (\text{П1-68})$$

Для структурной схемы (рис. П1-13,б) примем следующие выражения передаточных функций:

передаточная функция регулятора

$$W_p(p) = \frac{k_p Q_p(p)}{D_p(p)}; \quad (\text{П1-69})$$

передаточная функция объекта

$$W_o(p) = \frac{k_o Q_o(p)}{D_o(p)}, \quad (\text{П1-70})$$

где k_p и k_o — коэффициенты усиления регулятора и объекта соответственно; $Q_p(p)$, $Q_o(p)$, $D_p(p)$, $D_o(p)$ — нормализованные многочлены.

Учитывая (П1-69) и (П1-70), из (П1-68) получаем:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ст} = & \frac{D_p(0) D_o(0)}{D_p(0) D_o(0) + K Q_p(0) Q_o(0)} x_o - \\ & - \frac{k_o Q_o(0) D_p(0)}{D_p(0) D_o(0) + K Q_p(0) Q_o(0)} f_o, \end{aligned} \quad (\text{П1-71})$$

где $K = k_p k_o$ — коэффициент усиления разомкнутой системы; $D_p(0) = 1$; $D_p(0) = 0$ — для статического и астатического (имеющего интегрирующее звено) регулятора соответственно; $D_o(0) = 1$; $D_o(0) = 0$ — для статического и астатического объекта соответственно; $Q_o(0) = Q_p(0) = 1$.

Установившиеся ошибки при гармонических воздействиях могут быть найдены с помощью частотных характеристик системы. Для этого достаточно в (П1-57) положить $p = j\omega$.

Если воздействие изменяется медленно по сравнению с длительностью переходного процесса и имеет конечное число производных, то ошибку можно определить, разложив передаточную функцию в ряд Маклорена по степеням p :

$$\begin{aligned} \Phi_s(p) = & \Phi_s(0) + \left(\frac{d\Phi_s(p)}{dp} \right)_{p=0} p + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2\Phi_s(p)}{dp^2} \right)_{p=0} p^2 + \dots \\ & \dots + \frac{1}{i!} \left(\frac{d^i\Phi_s(p)}{dp^i} \right)_{p=0} p^i + \dots = C_0 + C_1 p + C_2 p^2 + \dots \\ & \dots + C_i p^i + \dots, \end{aligned} \quad (\text{П1-72})$$

где $C_0, C_1, C_2, \dots, C_i$ — коэффициенты ошибок.

Подставляя (П1-72) в (П1-57) при $f=0$ и переходя к оригиналам при нулевых начальных условиях, получаем выражение для динамической установившейся ошибки:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{уст}(t) = & C_0 x(t) + C_1 x'(t) + C_2 x''(t) + \dots \\ & \dots + C_i x^{(i)}(t), \end{aligned} \quad (\text{П1-73})$$

где

$$x'(t) = \frac{dx(t)}{dt}, \quad x''(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2}, \quad \dots, \quad x^{(i)}(t) = \frac{d^i x(t)}{dt^i}$$

— отличные от нуля производные входного воздействия.

Коэффициент C_0 называется коэффициентом статической ошибки, так как он определяет статическую ошибку при $x(t)=\text{const}$. Коэффициент C_1 называется коэффициентом скоростной ошибки, а C_2 — коэффициентом ошибки по ускорению. Для астатической системы первого порядка (т. е. при наличии одного интегрирующего звена в разомкнутой системе) $C_0=0$, для астатической системы второго порядка (т. е. при наличии двух интегрирующих звеньев) $C_0=C_1=0$. Коэффициенты ошибок можно также определить простым делением числителя передаточной функции $\Phi_*(p)$ на ее знаменатель, расположив предварительно слагаемые в делимом и делителе по возрастанию степеней p .

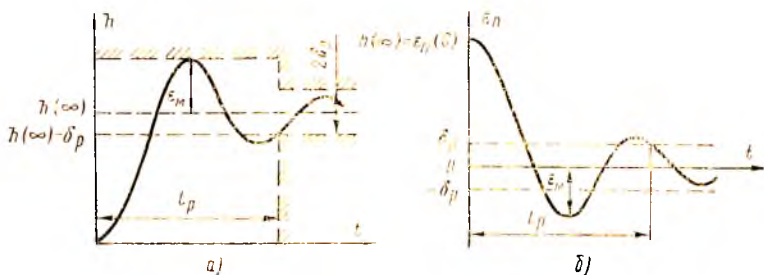


Рис. П1-14. К анализу качества переходного процесса.

Показатели качества и методы исследования качества переходных процессов. Как было отмечено выше, качество переходных процессов определяется переходной погрешностью. Постоянные интегрирования в (П1-59) зависят от начальных условий, т. е. от значений ошибки и ее производных в момент $t=0$ сразу после приложения внешнего воздействия.

Для того чтобы можно было сравнивать качество переходных процессов в различных системах, обычно предполагают, что предначальные условия нулевые (система находится в равновесном статическом режиме непосредственно перед приложением внешнего воздействия) и внешнее воздействие имеет вид единичного скачка [единичное ступенчатое воздействие вида (П1-63)]. Изменение выходной величины $y(t)$ системы при указанных условиях, как известно, определяется переходной функцией замкнутой системы $h(t)$.

Следовательно, согласно (П1-62) качество переходного процесса оценивается по отклонению переходной функции $h(t)$ от ее установившегося значения $h(\infty)$, т. е. по

$$\varepsilon_{\pi}(t) = h(\infty) - h(t). \quad (\text{П1-74})$$

На рис. П1-14,а показана переходная функция некоторой системы, а на рис. П1-14,б — график изменения переходной погрешности для этого случая.

Оценки (показатели) качества, полученные непосредственно из кривой процесса регулирования, называют прямыми оценками качества, а методы, позволяющие непосредственно осуществлять построение исследуемого процесса, — прямыми методами анализа качества.

Рассмотрим основные прямые оценки качества.

Время регулирования t_r равно интервалу времени от начала переходного процесса до того момента, когда абсолютное значение переходной погрешности становится и остается в дальнейшем меньше некоторой заданной малой величины δ_p (рис. П1-14), т. е.

$$|\varepsilon_{\pi}(t)| \leq \delta_p \text{ при } t \geq t_r$$

или, что то же самое, $|h(\infty) - h(t)| \leq \delta_p$ при $t \geq t_r$.

Обычно $\delta_p = (0,03-0,05) \varepsilon_{\pi}(0) = (0,03-0,05) h(\infty)$. Время регулирования является основной характеристикой быстрогодействия системы.

Максимальным перерегулированием называется выраженное в процентах отношение максимального значения переходной погрешности, обусловленного действием регулятора, к максимальному значению переходной погрешности, вызванному внешним воздействием. Так, для рис. П1-14 максимальное перерегулирование

$$\sigma = \frac{\varepsilon_M}{h(\infty)} \cdot 100\% \quad (\text{П1-75})$$

где ε_M — максимальное значение переходной погрешности, обусловленное действием регулятора (регулятор в данном случае действует на увеличение регулируемой величины); $h(\infty) = \varepsilon_{\pi}(0)$ — максимальное значение переходной погрешности, вызванное внешним воздействием.

Число колебаний N регулируемой величины в течение времени переходного процесса. Обычно условия ка-

чества допускают не более одного-двух колебаний в течение переходного процесса.

Затухание колебаний ψ равно относительному уменьшению амплитуд колебаний переходной погрешности за один период.

К прямым методам анализа качества относятся:

классический метод решения неоднородного дифференциального уравнения замкнутой системы;

операторный метод решения вышеуказанного уравнения;

численные методы решения уравнений;

частотный метод, основанный на обратном преобразовании Фурье;

моделирование системы управления на аналоговой вычислительной машине.

При классическом и операторном методе требуется, как известно, решить характеристическое уравнение. Эта операция является самой трудоемкой в указанных методах. Поэтому они применяются, как правило, лишь в тех случаях, когда порядок уравнения невысок. Численные методы лишены этого недостатка, так как предполагают переход от дифференциалов к конечным приращениям.

При частотном методе не требуется решения характеристического уравнения и, более того, инженерные графоаналитические варианты расчета по этому методу предполагают выполнение простейших алгебраических операций и графических построений. Один из таких способов, использующий ВЧХ, рассмотрен ниже.

Моделирование переходных процессов в системе, исходящих при нулевых начальных условиях, а также установившихся процессов может быть осуществлено непосредственно по ее структурной схеме, что показано на приводимом ниже примере. Построение переходного процесса при этом полностью механизмуется.

Пример. Составить схему электронной модели АСР напряжения генератора (см. рис. П1-2,а) и определить ее параметры.

Схема электронной модели на рис. П1-15 соответствует структурной схеме на рис. П1-6 с учетом инвертирования знака электронным усилителем и того, что передаточная функция каждого звена $W(p)$ рассматривается как инвариантный во времени линейный оператор $W(D)$, где $D = \frac{d}{dt}$.

Схема на рис. П1-15 состоит из трех звеньев, моделирующих соответственно: 1 — трансформатор с выпрямителем и магнитный

усилитель (звенья 3 и 1 на рис. П1-6); 2 — возбудитель (2); 3 — генератор (4). Сигнал Δ на входе звена 1 соответствует ступенчатому возмущению $\Delta I_{г.р} x_d$ или Δu_0 .

Параметры модели (α , R , C) рассчитываются по коэффициентам передаточных функций с учетом масштабов моделирования напряжений: на выходе магнитного усилителя m_M , возбудителя m_f , генератора m_r . Примем масштаб времени $m_t = 1$.

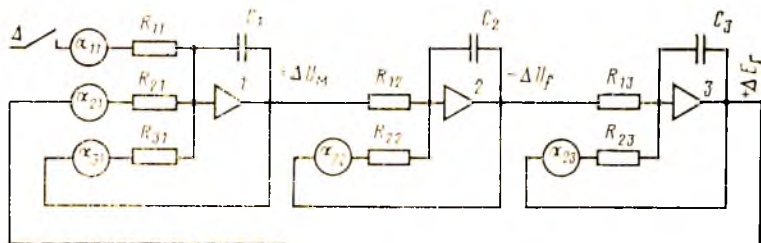


Рис. П1-15. Схема электронной модели АСР напряжения генератора.

Для звена 2

$$\frac{\Delta u_M}{m_M} \frac{1}{R_{12}} - \frac{\Delta u_f}{m_f} \frac{\alpha_{22}}{R_{22}} - \frac{C_2}{m_f} D \Delta u_f = 0,$$

откуда

$$\frac{\Delta u_f}{\Delta u_M} = \frac{\frac{m_f}{m_M} \frac{R_{22}}{R_{12}} \frac{1}{\alpha_{22}}}{\frac{R_{22} C_2}{\alpha_{22}} D + 1}.$$

Сравнивая правую часть этого выражения с передаточной функцией возбудителя, получаем:

$$T_B = \frac{R_{22} C_2}{\alpha_{22}}, \quad \text{т. е. } \alpha_{22} = \frac{R_{22} C_2}{T_B};$$

$$k_B = \frac{m_f}{m_M} \frac{R_{22}}{R_{12}} \frac{1}{\alpha_{22}}.$$

Если принять масштаб $m_M = \frac{m_f}{k_B \alpha_{22}}$, то $R_{12} = R_{22}$.

Для звена 3 аналогично предыдущему

$$\alpha_{23} = \frac{R_{23} C_3}{T_r}.$$

Если принять масштаб $m_f = \frac{m_r}{k_r \alpha_{23}}$, то $R_{13} = R_{23}$.

Для звена I

$$\alpha_{21} = \frac{R_{21} C_1}{T_M}; \quad k_H k_M = \frac{m_M}{m_T} \frac{R_{21}}{R_{21}} \frac{\alpha_{21}}{\alpha_{21}}.$$

Так как в соответствии с ранее принятым

$$m_M = \frac{m_T}{k_B k_T \alpha_{22} \alpha_{23}},$$

то при $R_{21} = R_{31}$

$$\alpha_{21} = k_H k_M k_B k_T \alpha_{22} \alpha_{23} \alpha_{31} = k \alpha_{22} \alpha_{23} \alpha_{31},$$

где k — коэффициент усиления разомкнутой системы; α_{22} , α_{23} , α_{31} находятся по приведенным выше формулам.

Значение сигнала Δ , В:

$$\bar{\Delta} = \bar{\Delta}_* \frac{U_{Г.НОМ}}{m_T},$$

если принять $\alpha_{11} = \alpha_{21}$ и $R_{11} = R_{21}$, где $\Delta_* = \frac{\Delta}{\Delta_6}$ — относительное значение возмущения; Δ_6 — базисное возмущение, изменяющее относительное напряжение генератора на единицу.

Целесообразно принять $m_T = \frac{U_{Г.НОМ}}{100}$, т. е. ΔE_T равное $U_{Г.НОМ}$, соответствует 100 В.

Косвенные оценки качества определяются обычно проще, чем прямые, без построения кривой переходного процесса. Они связаны с прямыми, но характер этих зависимостей в общем случае неоднозначен. Достоинством косвенных оценок является то, что они сравнительно просто определяются через параметры системы, а это дает возможность производить анализ влияния параметров на качество переходного процесса и синтез систем

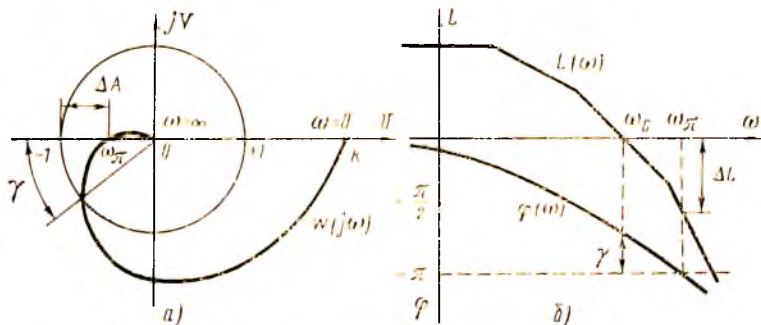


Рис. 11-16. К определению запасов устойчивости.

(определение параметров) по заданным значениям косвенных оценок.

Простейшими косвенными оценками являются запасы устойчивости по усилению (по модулю) и по фазе, определяемые по критерию Найквиста. Для того чтобы процессы в устойчивой системе обладали хорошим качеством, амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы не должна подходить к опасной точке $(-1, j0)$ слишком близко. Запасы устойчивости как раз и характеризуют расстояния от АФХ до точки $(-1, j0)$. На рис. П1-16,а показано, как определяются запасы устойчивости по модулю ΔA и по фазе γ из АФХ разомкнутой системы. На рис. П1-16,б показано определение запаса устойчивости по фазе γ и запаса устойчивости по модулю ΔL из ЛЧХ разомкнутой системы.

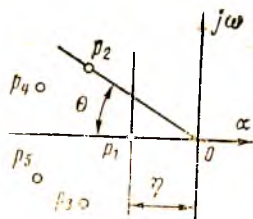


Рис. П1-17. К определению корневых оценок.

Основные методы косвенных оценок качества делятся на три группы: корневые, интегральные и частотные. Под общим названием корневых методов объединяют различные способы оценки качества переходных процессов по расположению корней характеристического уравнения замкнутой системы в комплексной плоскости. В частности, применяя корневые методы, можно определить расстояние η (рис. П1-17) от мнимой оси до ближайшего к ней корня или пары сопряженных корней, не решая характеристического уравнения. Это расстояние называется степенью устойчивости. Ближайшему к мнимой оси корню $p_1 = -\eta$ соответствует наиболее медленно затухающая составляющая переходного процесса, по сравнению с которой можно иногда пренебречь всеми остальными составляющими. В этом случае можно определить приближенно время регулирования по формуле:

$$t_p \approx \frac{1,3 \div 1,5}{\eta} \ln 20. \quad (\text{П1-76})$$

Другая корневая оценка μ , называемая колебательностью, представляет собой отношение абсолютных значений величин мнимой и вещественной частей того корня, у которого это отношение наибольшее.

Согласно рис. П1-17

$$\mu = \operatorname{tg} \Theta \quad (\text{П1-77})$$

при одинаковых масштабах по осям. Чем больше μ , тем при прочих равных условиях больше и перерегулирование.

Заданную границу допустимого расположения корней в комплексной плоскости можно отобразить в пространстве варьируемых параметров с помощью метода, аналогичного методу D -разбиения (так называемый обобщенный метод D -разбиения [2]). Таким путем можно, в частности, построить в плоскости варьируемых параметров области, для которых степень устойчивости (колебательность) имеет значения не менее (не более) заданных.

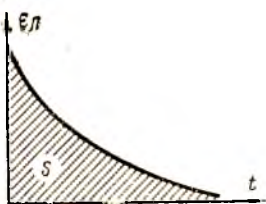


Рис. П1-18. К определению интегральной оценки.

Область применения корневых методов, строго говоря, ограничена условием отсутствия нулей (корней числителя) у передаточной функции по исследуемому каналу.

Интегральные методы позволяют найти интегральные оценки качества, представляющие собой определенные интегралы по времени от переходной погрешности и ее производных, т. е.

$$I = \int_0^{\infty} f(\epsilon_n, \epsilon'_n, \epsilon''_n, \dots, \epsilon_n^{(n)}) dt, \quad (\text{П1-78})$$

где I — интегральная оценка; $\epsilon_n, \epsilon'_n, \epsilon''_n, \dots, \epsilon_n^{(n)}$ — переходная погрешность и ее производные до n -го порядка включительно.

В частности, простейшей интегральной оценкой является линейная интегральная оценка

$$I = \int_0^{\infty} \epsilon_n dt, \quad (\text{П1-79})$$

пропорциональная площади S между кривой переходной погрешности и осью времени (рис. П1-18). Для монотонных процессов эта оценка может служить мерой их длительности.

Квадратичная интегральная оценка

$$I_0 = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\pi}^2 dt \quad (\text{П1-80})$$

может применяться при анализе длительности не только монотонных, но и колебательных процессов, так как в этом случае знак ε_{π} не влияет на значение оценки. Оценка I_0 равна нулю только для ступенчатого (безынерционного) процесса. Эта оценка может иметь для весьма колебательного процесса значение меньшее, чем для монотонного процесса такой же или даже меньшей длительности; в этом заключается ее существенный недостаток.

Улучшенная интегральная оценка

$$I_1 = \int_0^{\infty} [\varepsilon_{\pi}^2 + T^2 (\varepsilon'_{\pi})^2] dt \quad (\text{П1-81})$$

имеет абсолютный минимум для экспоненциального процесса

$$\varepsilon_{\pi} = (\varepsilon_{\pi}(0)) e^{-t/T}$$

и может служить мерой приближения к нему, причем по отклонению I_1 от ее абсолютного минимума можно оценить максимально возможные отклонения исследуемого процесса от экспоненты [1, 2].

Интегральные оценки применяют при анализе сравнительно близких по свойствам систем, а также при выборе значений параметров, минимизирующих интегральную оценку (задача синтеза). В последнем случае оптимальные значения параметров τ , ν определяются из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial I_i(\tau, \nu)}{\partial \tau} &= 0; \\ \frac{\partial I_i(\tau, \nu)}{\partial \nu} &= 0; \\ i &= 0, 1. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1-82})$$

Все рассмотренные интегральные оценки могут быть найдены сравнительно просто по изображению переходной погрешности или по коэффициентам уравнения движения системы [1, 2].

Частотные методы позволяют оценивать основные показатели качества переходного процесса по амплитудной

или вещественной частотной характеристике замкнутой системы, а также по АФХ и ЛЧХ разомкнутой системы. Одно из преимуществ частотных методов — возможность использования не только расчетных, но и экспериментальных характеристик.

Например, по амплитудной характеристике замкнутой системы (рис. П1-19) определяется косвенная оценка качества, представляющая собой относительное значение ее максимума. Эта оценка называется показателем колебательности и определяется по формуле:

$$M = \frac{A_{\text{макс}}}{A(0)}. \quad (\text{П1-83})$$

Если амплитудно-частотная характеристика исследуемой системы, независимо от сложности этой системы, близка к АЧХ колебательного звена с показателем колебательности M и частотой резонансного пика ω_M , то и переходные процессы в системе будут близки к соответствующим переходным процессам такого колебательного звена.

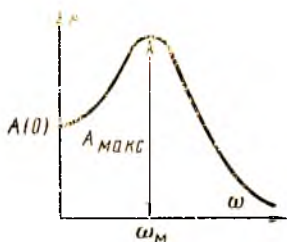


Рис. П1-19. К определению показателя колебательности.

Анализ качества переходных процессов по вещественной частотной характеристике. В основе рассматриваемого метода лежит следующая зависимость, вытекающая из преобразования Фурье:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{U(\omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega, \quad (\text{П1-84})$$

где $h(t)$ — переходная функция; $U(\omega)$ — вещественная частотная характеристика.

В общем случае непосредственное нахождение переходного процесса по (П1-84) встречает значительные трудности. Поэтому обычно прибегают к приближенному графическому определению переходных функций. Для этого вещественную частотную характеристику системы разбивают на типовые трапецидальные или треугольные характеристики, для которых переходные процессы табулированы [1, 2].

Пользование этими таблицами поясним на примере. Допустим, что для некоторой системы найдена вещественная частотная характеристика $U(\omega)$ и требуется построить переходный процесс при единичном ступенчатом воздействии. Аппроксимируем $U(\omega)$ отрезками прямых линий (рис. П1-20,а), причем в точках экстремума функции $U(\omega)$ проводим горизонтальные отрезки (ab , cd , ef). Продолжив эти горизонтальные отрезки до пересечения

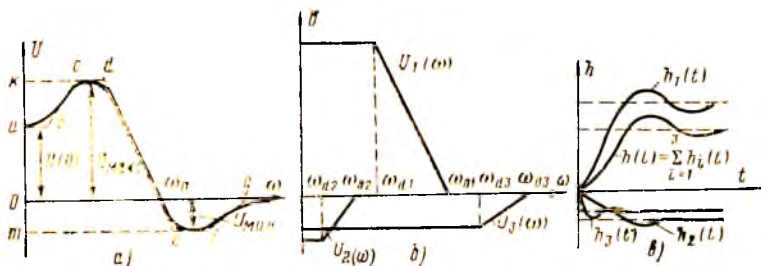


Рис. П1-20 К построению переходной функции по ВЧХ.

с осью ординат, получим возможность представить спрямленную ВЧХ в виде алгебраической суммы трех трапецидальных характеристик (рис. П1-20,б):

$$U(\omega) = U_1(\omega) + U_2(\omega) + U_3(\omega),$$

где $U_1(\omega)$ — трапеция $kdem$; $U_2(\omega)$ — трапеция $abck$; $U_3(\omega)$ — трапеция $ogfm$.

Для каждой из трапецидальных характеристик находим частоты пропускания ω_{01} , ω_{02} , ω_{03} , частоты равномерного пропускания ω_{d1} , ω_{d2} , ω_{d3} и высоты $U_1(0)$, $U_2(0)$, $U_3(0)$. Вычислив коэффициенты наклона трапеций

$$\alpha_1 = \omega_{d1}/\omega_{01}; \quad \alpha_2 = \omega_{d2}/\omega_{02}; \quad \alpha_3 = \omega_{d3}/\omega_{03},$$

выпишем из таблиц h -функций [1, 2] переходные функции $h_{\alpha_1}(\tau)$, $h_{\alpha_2}(\tau)$, $h_{\alpha_3}(\tau)$ для единичных трапеций (высота которых равна единице) с соответствующими коэффициентами наклона. Переходные функции $h_i(t)$ для каждой трапецидальной характеристики

$$h_i(t) = U_i(0) h_{\alpha_i}(\tau), \quad i = 1, 2, 3, \quad (\text{П1-85})$$

причем истинное время связано с безразмерным (табличным) временем соотношением

$$t = \tau / \omega_{0i}. \quad (\text{П1-86})$$

Таким образом, из (П1-85) и (П1-86) видно, что переход от табличной h -функции к истинной заключается в умножении значений h на высоту соответствующей трапецидальной характеристики и делении табличного (безразмерного) времени τ на частоту пропускания той же трапецидальной характеристики. Построив затем переходные функции $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$ с учетом знака ординат соответствующих им трапецидальных характеристик и просуммировав ординаты этих переходных функций (рис. П1-20,б), найдем искомый переходный процесс в системе

$$h(t) = \sum_{i=1}^3 h_i(t), \quad (\text{П1-87})$$

По виду вещественной характеристики можно определить тип переходного процесса (монотонный или колебательный) и значения его показателей качества [1].

Задачи и методы синтеза системы регулирования. Под синтезом систем регулирования понимается задача

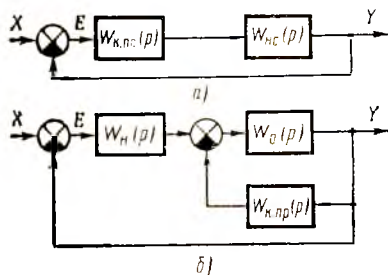


Рис. П1-21. Схемы включения корректирующих устройств.

расчета специальных корректирующих устройств, обеспечивающих заданные статические и динамические характеристики. При этом предполагается, что основные функциональные устройства (исполнительное, усилительное и измерительное устройство, объект регулирования) уже выбраны в соответствии с техническим заданием и пред-

ставляют собой неизменяемую часть системы.

На рис. П1-21 показаны наиболее распространенные структурные схемы включения корректирующих устройств.

При наиболее простой последовательной коррекции (рис. П1-21,а) корректирующее устройство включается непосредственно в контур регулирования последовательно с остальными звеньями. Передаточная функция разомкнутой скорректированной системы

$$W_{ск}(p) = W_{н.с.}(p) W_{к.р.}(p), \quad (\text{П1-88})$$

где $W_{ис}(p)$ — передаточная функция разомкнутой нескорректированной системы; $W_{к.ис}(p)$ — передаточная функция последовательного корректирующего устройства.

При параллельной схеме корректирующее устройство включается в цепь дополнительной (местной) обратной связи (рис. П1-21,б). Передаточная функция такой системы в разомкнутом виде

$$W_{ск}(p) = \frac{W_o(p) W_{н}(p)}{1 + W_o(p) W_{к.пр}(p)}, \quad (\text{П1-89})$$

где $W_o(p)$ — передаточная функция части системы, охваченной корректирующей связью; $W_{н}(p)$ — передаточная функция части системы, не охваченной корректирующей связью; $W_{к.пр}(p)$ — передаточная функция параллельного корректирующего устройства.

Теоретически всегда можно подобрать параллельную коррекцию таким образом, чтобы получить тот же результат, что и при последовательной коррекции, и наоборот. Параллельная коррекция обладает рядом преимуществ перед последовательной: параллельное корректирующее устройство меньше подвержено влиянию высокочастотных помех (так как оно обычно получает входной сигнал с выхода весьма инерционных элементов, подавляющих высокие частоты), применение параллельной коррекции повышает стабильность характеристик системы. Рассмотренные корректирующие устройства могут применяться совместно в одной системе регулирования.

В настоящее время разработано большое число в основном приближенных методов синтеза корректирующих устройств. Наибольшее распространение в инженерной практике получили графоаналитические методы синтеза, основанные на построении частотных характеристик разомкнутой системы (особенно логарифмических).

Синтез корректирующих устройств по логарифмическим характеристикам. При синтезе корректирующего устройства одна из основных задач состоит в нахождении желаемых логарифмических амплитудных и фазовых характеристик скорректированной системы. Для минимально-фазовых систем, т. е. систем, не содержащих запаздывающих и неустойчивых звеньев, можно ограничиться построением лишь одной логарифмической

амплитудно-частотной характеристики ЛАХ $L_{\text{ск}}(\omega)$, руководствуясь некоторыми общими рекомендациями.

1. В низкочастотной области ($0 \leq \omega \leq \omega_1$, рис. П1-22) наклон характеристики должен составлять -20ν дБ/дек, где $\nu=0, 1, 2 \dots$ — порядок астатизма системы. При

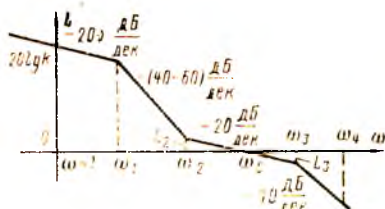


Рис. П1-22. Желаемая ЛАХ скорректированной системы.

частоте $\omega=1$ низкочастотная асимптота должна иметь ординату $20 \lg k$, где k — коэффициент усиления разомкнутой системы, находимый по требованиям точности работы системы в установившихся режимах (например, по формулам для определения статической или скорост-

ной ошибки). Низкочастотный участок ЛАХ определяет, таким образом, точность работы системы в установившихся режимах. Наименьшая сопрягающая частота ω_1 должна быть, как правило, не меньше, чем наибольшая частота входного воздействия. Это обеспечит его обработку с достаточной точностью.

2. В среднечастотной области ($\omega_1 \leq \omega \leq \omega_4$) прежде всего следует найти частоту среза ω_c , при которой $L_{\text{ск}}(\omega_c)=0$. Частота среза ω_c находится из номограммы по заданным времени регулирования и перерегулированию в предположении, что вещественная частотная характеристика замкнутой скорректированной системы должна совпадать с типовой ВЧХ [1].

Вблизи частоты среза (на интервале $\omega_2 \leq \omega \leq \omega_3$) наклон желаемой ЛАХ рекомендуется выбирать равным -20 дБ/дек, что обеспечивает, как правило, необходимые запасы устойчивости. При этом абсолютные значения ординат ЛАХ на концах указанного интервала (рис. П1-22) $L_2=L_3=\Delta L$, где запас устойчивости по модулю ΔL находится из номограммы для типовой ВЧХ по заданному значению перерегулирования σ . Наклон ЛАХ в диапазоне $\omega_1 < \omega < \omega_2$ выбирается равным -40 дБ/дек или -60 дБ/дек. Наклон ЛАХ на участке $\omega_3 < \omega < \omega_4$ составляет обычно -40 дБ/дек, причем частота $\omega_4 \approx (6 \div 8) \omega_c$.

Частотам $\omega > \omega_4$ соответствует высокочастотный участок ЛАХ, мало влияющий на устойчивость и качество

процесса регулирования. Таким образом, среднечастотный участок ЛАХ влияет главным образом на устойчивость и качество переходного процесса и строится исходя из соответствующих показателей.

3. Желательно, чтобы ЛАХ нескорректированной системы и желаемая ЛАХ скорректированной системы в возможно более широком диапазоне частот совпадали друг с другом или проходили параллельно. В противном случае реализация корректирующих устройств усложняется.

4. Более точный выбор желаемой ЛАХ и уточнение показателей качества для выбранной приближенно желаемой ЛАХ можно произвести по приводимым в справочной литературе номограммам [2], которые устанавливают связь основных показателей качества переходной функции и показателя колебательности с параметрами типовой ЛАХ.

Синтез последовательного корректирующего устройства по логарифмическим характеристикам. При последовательной коррекции (см. рис. П1-21,а) амплитудные и фазовые характеристики разомкнутой скорректированной системы будут согласно (П1-88) выражаться следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} L_{ск}(\omega) &= L_{ис}(\omega) + L_k(\omega); \\ \varphi_{ск}(\omega) &= \varphi_{ис}(\omega) + \varphi_k(\omega), \end{aligned} \quad (\text{П1-90})$$

где $L_k(\omega)$ и $\varphi_k(\omega)$ — искомые амплитудная и фазовая характеристики последовательного корректирующего устройства.

Из (П1-90) следует, что характеристики корректирующего устройства определяются путем вычитания из желаемых логарифмических характеристик скорректированной системы логарифмических характеристик нескорректированной системы.

По найденным логарифмическим частотным характеристикам необходимо подобрать электрическую схему коррекции (как наиболее универсальную и простую) и рассчитать числовые значения ее параметров.

Синтез параллельного корректирующего устройства по ЛАХ приближенно осуществляется по формуле [2]

$$L_k(\omega) = L_{ис}(\omega) - L_{ск}(\omega) - L_0(\omega) \quad (\text{П1-91})$$

в следующем порядке:

строится ЛАХ нескорректированной системы $L_{ис}(\omega)$ по известным параметрам основных звеньев;

строится желаемая ЛАХ скорректированной системы $L_{ск}(\omega)$ в соответствии с изложенными выше рекомендациями;

путем вычитания $L_{ск}(\omega)$ из характеристики $L_{ис}(\omega)$ находится суммарная характеристика $L_{к}(\omega) + L_{о}(\omega)$;

с учетом требований к системе и технической осуществимости определяется структурная схема скорректиро-

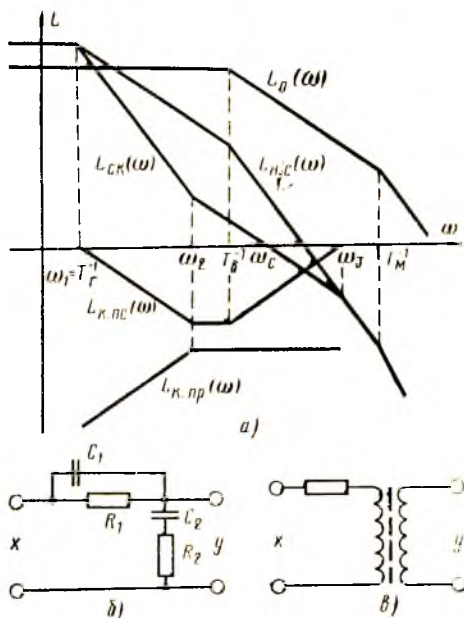


Рис. П1-23. К синтезу корректирующих устройств.

ванной системы, т. е. точки подключения параллельного корректирующего устройства, после чего строится логарифмическая характеристика охваченных звеньев $L_o(\omega)$;

вычитая из характеристики $L_{к}(\omega) + L_o(\omega)$ в диапазоне частот, где $L_{к}(\omega) + L_o(\omega) > 0$, характеристику $L_o(\omega)$, находим логарифмическую частотную характеристику $L_{к}(\omega)$ искомого корректирующего звена, включенного в цепь корректирующей обратной связи;

по виду $L_{к}(\omega)$ выбирается схема и рассчитываются параметры корректирующего устройства.

Пример. Рассчитать корректирующее устройство для АСР напряжения генератора (см. рис. П1-2,а), если заданы ЛАХ $L_{ис}(\omega)$

пескорректированной системы и желаемая ЛАХ $L_{\text{ек}}(\omega)$ скорректированной разомкнутой системы (рис. П1-23,а).

ЛАХ $L_{\text{к.ис}}(\omega)$ последовательного корректирующего устройства найдена согласно (П1-90). Пользуясь таблицами корректирующих устройств, можно установить, что последовательное корректирующее устройство должно быть интегродифференцирующим, а также выбрать один из вариантов его схемной реализации (рис. П1-23,б). Одним из электрических параметров схемы (рис. П1-23,б) задаются произвольно, а остальные рассчитывают по ЛАХ $L_{\text{к.ис}}(\omega)$.

Для расчета параллельного корректирующего устройства прежде всего учтем, что

$$L_{\text{к.пр}}(\omega) + L_0(\omega) = L_{\text{ис}}(\omega) - L_{\text{ек}}(\omega) = -L_{\text{к.ис}}(\omega).$$

Затем выберем в качестве охваченных отрицательной обратной связью звеньев магнитный усилитель и возбудитель и построим их суммарную ЛАХ $L_0(\omega)$ (рис. П1-23,а). Далее определим искомую ЛАХ по формуле

$$L_{\text{к.пр}}(\omega) = -L_{\text{к.ис}}(\omega) - L_0(\omega)$$

в диапазоне частот

$$\frac{1}{T_r} \leq \omega \leq \omega_3, \quad \text{где } L_0(\omega) + L_{\text{к.пр}}(\omega) = -L_{\text{к.ис}}(\omega) \geq 0.$$

По виду ЛАХ $L_{\text{к.пр}}(\omega)$ видно, что параллельное корректирующее устройство должно быть инерционно-дифференцирующим звеном и его можно реализовать в виде дифференцирующего трансформатора (рис. П1-23,в), что согласуется с данными практики.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ РЕЛЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ

П2-1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЛЕЙНОГО УСТРОЙСТВА

Релейное устройство как преобразователь сигналов. Всякое релейное устройство (рис. П2-1) можно представить как преобразователь сигналов, поступающих по входным каналам $x_1, x_2, \dots, x_n$. Эти сигналы дают устройству информацию о состоянии некоторых параметров объекта управления. Устройство анализирует их и в результате выдает некоторые управляющие сигналы по каналам $y_1, y_2, \dots, y_m$.

Для отдельных устройств автоматики и релейной защиты объектом управления являются установки энергосистемы. Входными каналами служат цепи от трансформаторов тока и напряжения,

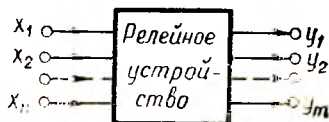


Рис. П2-1. Релейное устройство — преобразователь сигналов.

блок-контакты, характеризующие положение коммутационной аппаратуры, ключи управления и накладки, положение которых характеризует задаваемый оперативным персоналом режим работы, а также выходные цепи (контакты) других устройств защиты и автоматики. Выходными каналами устройства служат цепи, идущие на включение (отключение) выключателей, в систему сигнализации и к другим релейным устройствам.

Характерной особенностью релейных устройств является то, что входные и выходные сигналы можно пред-



Рис. П2-2. Связь реального и дискретного времени.

ставить в двоичной форме: есть напряжение (напряжение больше заданного значения) или нет напряжения (напряжение меньше заданного значения) на данном входе (выходе); замкнут или разомкнут контакт. Иными

словами, каждый сигнал имеет два состояния, которые обычно обозначают 1 и 0. При этом 1 соответствует наличию напряжения, замкнутому контакту. Противоположный сигнал обозначается через 0. В силу этого ограничения на входах и выходах релейного устройства в любой момент времени может существовать определенная совокупность сигналов, принадлежащая конечному множеству совокупностей.

Состояния и работа релейного устройства во времени. Всякое релейное устройство состоит из отдельных частей, например из разного рода реле. В определенный момент времени каждое из этих реле может находиться в каком-то состоянии (подтянуто, опущено — для электромагнитного реле; в левом, среднем, правом положении — для поляризованного трехпозиционного реле и т. д.). Совокупность состояний всех реле будет характеризовать состояние устройства в целом. Так как всякое релейное устройство имеет конечное число частей, то число состояний устройства тоже будет конечным.

В теории релейных устройств обычно считается, что изменение сигналов и состояний реле происходит мгновенно. Это означает, что мы пренебрегаем рассмотрением переходных процессов при изменении сигналов и состояний реле. При таком допущении оказывается удобным вместо реального непрерывного времени рассматривать дискретное время, которое получаем, разби-

вая реальное время на интервалы (рис. П2-2). Считаем, что в промежутках между границами интервалов с устройством и с сигналами ничего не происходит, поэтому оказывается возможным весь интервал рассматривать как один и тот же момент времени. Различные, следующие друг за другом интервалы времени принято обозначать цифрами натурального ряда: $0, 1, 2, 3 \dots$

Функции, описывающие работу релейного устройства. Работу релейного устройства можно представить следующим образом. В какой-то момент времени t оно, находясь в состоянии $s(t)$, получает сигнал $x(t)$. Устройство при этом выдает на объект управления сигнал $y(t)$ и переходит в другое состояние $s(t+1)$. Это новое состояние мы уже относим к моменту времени $t+1$, так как изменение состояния означает переключение какого-то реле, и должны поэтому на оси времени поставить новую черточку, за которой начинается следующий момент времени.

Следует отметить векторный характер величин, обозначаемых символами $x(t)$; $s(t)$; $y(t)$. Входной сигнал $x(t)$ обозначает здесь комбинацию сигналов $x_1, x_2, \dots, x_n$, поступающих по каждому входу в момент времени t . При этом каждое x_i может быть нулем или единицей. Аналогично $y(t)$ — это комбинация выходных сигналов $y_1, y_2, \dots, y_m$, выдаваемых устройством по всем выходам в момент времени t , а $s(t)$ — комбинация состояний отдельных частей $s_1, s_2, \dots, s_p$ (где s_i обозначает состояние i -й части). Какие значения могут принимать состояния s_i , будет рассмотрено ниже.

Значения $s(t+1)$ и $y(t)$ определяются законом, по которому функционирует устройство. Этот закон можно описать двумя функциями:

$$\left. \begin{aligned} s(t+1) &= \Phi_1[s(t), x(t)]; \\ y(t) &= \Phi_2[s(t), x(t)]. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П2-1})$$

Первая из этих функций называется функцией переходов, вторая — функцией выходов. Если задано начальное состояние устройства, то функции переходов и выходов позволяют однозначно определить его работу для любой последовательности входных сигналов. Так, например, зная $s(0)$ и $x(0)$, можно определить $y(0)$ и $s(1)$, зная $s(1)$ и $x(1)$ — $y(1)$ и $s(2)$ и т. д. Характерной особенностью рассматриваемых функций является то, что как множество состояний, так и множество входных сиг-

налов могут принимать лишь конечное число значений, и поэтому эти функции могут быть заданы таблицами.

Задание множества входных сигналов, выходных сигналов, состояний релейного устройства и его функций переходов и выходов полностью описывает математическую модель релейного устройства, которая известна под названием «конечный автомат с памятью».

П2-2. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РЕЛЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАБОТЫ РЕЛЕ

Электромеханическое реле. Будем обозначать реле и его обмотку латинской прописной буквой, а контакты этого реле — строчной (рис. П2-3). Входом реле являются цепи, идущие на обмотку. Входным сигналом v , который называют возбуждением, является наличие или отсутствие напряжения на обмотке ($v=1$ или $v=0$).

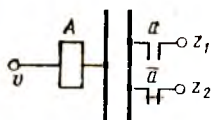


Рис. П2-3. Электро-механическое промежуточное реле.

Считается, что $v=1$, когда на обмотку реле подано такое напряжение, которое вызывает его срабатывание.

Выходами реле являются контакты или цепи, которые этими контактами включаются. Выходными сигналами будут состояния контактов или напряжение в выходных цепях. Принято состояние замыкающего контакта обозначать символом без черточки, а размыкающего — с черточкой. Эти сигналы принимают значение 1, когда соответствующий контакт замкнут ($a=1$, $\bar{a}=1$) или на выходе имеется напряжение ($z_i=1$). В последнем случае предполагается, что контакт подсоединен к одному из полюсов источника питания. Сигнал считается равным 0, когда контакт разомкнут, на выходе нет напряжения.

Состояние реле может принимать тоже два значения: $s=0$ — реле отпущено и $s=1$ — реле подтянуто.

Функции переходов и выходов такого реле можно записать в виде таблиц переходов и выходов (рис. П2-4).

Таблицы строятся следующим образом. Строки соответствуют значениям аргумента s , столбцы — значениям аргумента v . На пересечении строки и столбца ставится соответствующее этим аргументам значение функции, которое получается из рассмотрения работы реле в раз-

личных условиях. Например, если $s=0$ и $v=0$ (реле отпущено, на обмотке нет напряжения), то в следующий момент времени реле сохранит это состояние и значение $\Phi_1 [0,0]$ будет равно нулю. Если же $s=0$ и $v=1$ (на катушку подано напряжение), то в следующий момент времени реле сработает, т. е. $\Phi_1 [0,1]=1$.

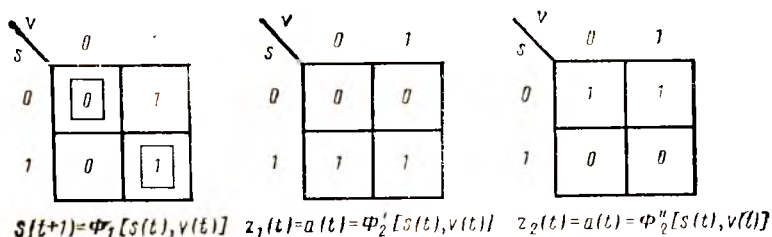


Рис. П2-4. Таблицы переходов и выходов для промежуточного реле.

Когда состояние реле s при данном входном сигнале v не изменяется, то говорят, что это состояние устойчиво при данном входном сигнале, в противном случае — состояние неустойчиво. Для рассматриваемого реле устойчивы следующие пары s и v : $s=0$ и $v=0$; $s=1$ и $v=1$. Значения функций, соответствующие указанным аргументам, на таблице переходов обведены рамкой.

Отметим одну особенность функций выходов для рассматриваемого реле — они зависят только от значений состояния. Если это условие выполняется, то таблицы переходов и выходов могут быть объединены (рис. П2-5).

$s \backslash v$	0	1	$a(z_1)$	$a(z_2)$
0	0	1	0	1
1	0	1	1	0

Рис. П2-5. Объединенная таблица переходов и выходов для промежуточного реле.

Реле времени. Входы и выходы описываются так же, как и у предыдущего реле. Для правильного описания работы реле (рис. П2-6) здесь необходимо ввести больше состояний. Дело в том, что реле имеет контакты, замыкающиеся с разной выдержкой времени. Положим: $s=0$, когда реле отпущено; $s=1$ — реле подтянуто и замкнут мгновенный контакт a_1 ; $s=2$ — реле подтянуто

и замкнуты все контакты. Переход из состояния $s=1$ в состояние $s=2$ (его длительность) определяется выдержкой времени реле.

Объединенная таблица переходов и выходов выглядит, как показано на рис. П2-7.

Если реле времени имеет, кроме того, временно замыкающий контакт, то потребуется еще больше состояний для описания его работы.

Бесконтактное реле. В реле повторного включения РПВ-58 (см. рис. 5-6) включение исполнительного реле производится при помощи предварительно заряженного конденсатора. Эту систему можно представить в виде релей-



Рис. П2-6. Реле времени.

$s \backslash v$	0	1	$a_1(z_1)$	$a_2(z_2)$
0	0	1	0	0
1	0	2	1	0
2	0	2	1	1

Рис. П2-7. Объединенная таблица переходов и выходов для реле времени.

ного устройства следующим образом. Устройство имеет входы v_1 и v_2 , которыми являются контакты некоторых реле или ключей (рис. П2-8). Входными сигналами являются состояния этих контактов. Замкнутому состоянию контактов соответствуют значения сигналов $v_1=1$ и $v_2=1$, разомкнутому — $v_1=0$, $v_2=0$. Сигнал v_1 соответствует цепи заряда, v_2 — цепи разряда конденсатора.

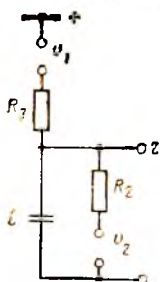


Рис. П2-8. Бесконтактное реле повторного включения.

$s \backslash v_1 v_2$	00	01	10	11	z
0	0	0	1	0	0
1	1	0	1	0	1

Рис. П2-9. Таблица переходов и выходов для бесконтактного реле повторного включения.

Выходом z является цепь, идущая на обмотку исполнительного реле. Выходной сигнал $z=1$ — высокое напряжение на выходе, $z=0$ — низкое.

Устройство имеет два состояния: $s=0$ — на конденсаторе низкое напряжение, $s=1$ — высокое. Напряжение считается высоким, если оно может вызвать срабатывание исполнительного реле, в противном случае оно низкое.

Работа устройства описывается таблицей переходов и выходов на рис. П2-9.

Устойчивые пары «состояние — входной сигнал» помечены, как и раньше, рамкой.

П2-3. СТРУКТУРА СЛОЖНОГО РЕЛЕЙНОГО УСТРОЙСТВА

Рассмотрим сложное релейное устройство, состоящее из нескольких реле. Выделим в этом устройстве наряду с входами и выходами всего устройства входы и выходы отдельных реле (рис. П2-10). При этом устройство условно можно разбить на две части. Одна часть, которая носит название «память», представляет собой отдельные реле устройства, не соединенные между собой. Входы «памяти» — это входы соответствующих реле, а выходы — выходы этих реле. Другая часть (комбинационная) представляет собой схему, объединяющую реле в одно целое; входами служат входы устройства и выходы «памяти», а выходами — выходы устройства и входы «памяти».

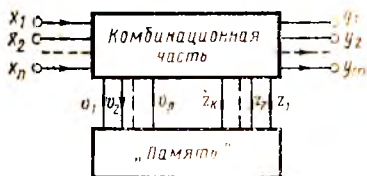


Рис. П2-10. Структура сложного релейного устройства.

Разделение устройства на комбинационную часть и «память» зависит от того, что принято за входы и выходы отдельных реле. Для релейно-контактных схем удобно к «памяти» относить обмотки реле, а к комбинационной части — схему, составленную из контактов.

Исходя из структуры, изображенной на рис. П2-10, оказывается более удобным описывать работу релейного устройства не системой уравнений (П2-1), а следующей системой уравнений:

$$s(t+1) = \varphi_1[s(t), v(t)]; \quad (\text{П2-2a})$$

$$v(t) = \varphi_2[x(t), z(t)]; \quad (\text{П2-2б})$$

$$y(t) = \varphi_3[x(t), z(t)]; \quad (\text{П2-2в})$$

$$z(t) = \varphi_4[s(t)]. \quad (\text{П2-2г})$$

Здесь переменные x , s , v , z и y , как и в (П2-1), являются векторами. Компоненты переменных s , v и z при этом являются переменными s_i , v_i и z_i для отдельных реле.

Система уравнений (П2-2) может быть легко приведена к системе (П2-1). Для этого нужно уравнение (П2-2г) подставить в уравнения (П2-2б) и (П2-2в), а уравнение (П2-2б) — в (П2-2а):

$$s(t+1) = \varphi_1\{s(t), \varphi_2[x(t), \varphi_4[s(t)]]\} = \Phi_1[s(t), x(t)];$$

$$y(t) = \varphi_3[x(t), \varphi_4[s(t)]] = \Phi_2[s(t), x(t)].$$

Так же как и система уравнений (П2-1), система уравнений (П2-2) позволяет проследить за работой устройства, если известна последовательность входных сигналов и начальное состояние. Пусть в момент $t=0$ устройство находилось в состоянии $s(0)$ и был подан сигнал $x(0)$. Тогда уравнение (П2-2г) позволяет найти $z(0)$, после чего по уравнениям (П2-2б) и (П2-2в) находятся $v(0)$ и $y(0)$, а затем по уравнению (П2-2а) состояние устройства в следующий момент времени $s(1)$. Теперь, если известно $x(1)$, то аналогично определяются $z(1)$, $v(1)$, $y(1)$, $s(2)$ и т. д.

П2-4. ЗАДАНИЕ УРАВНЕНИЙ РЕЛЕЙНОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ПОМОЩИ БУЛЕВЫХ ФОРМУЛ

Как уже отмечалось, система уравнений (П2-1), а значит, и система (П2-2) могут быть заданы таблицами. Однако для сложных устройств эти таблицы могут быть слишком громоздкими. Так, например, устройство, имеющее семь входов и пять двухпозиционных реле, будет иметь $2^7=128$ состояний входов и $2^5=32$ состояний устройства. Таблицы переходов и выходов будут содержать каждая по $32 \times 128=4096$ клеток. Ясно, что такую таблицу трудно построить, а еще труднее использовать для анализа. Поэтому для задания системы уравнений (П2-2), описывающей сложное релейное устройство, применяется комбинированный способ.

Уравнения (П2-2а) и (П2-2г) задаются таблицами. Эти таблицы будут представлять собой совокупность таблиц переходов и выходов отдельных реле, которые очень просты. Такое рассмотрение становится возможным благодаря тому, что состояние выхода каждого реле зависит только от входа и от состояния этого же реле и не зависит от входов и состояний других реле. То же самое можно сказать и о состояниях отдельных реле.

Перейдем теперь к рассмотрению уравнений (П2-2б) и (П2-2в). Таблицы для них получились бы громоздкими, поэтому будем их задавать другим способом. В эти уравнения входят векторы x , y , v и z , компоненты которых могут принимать только два значения, обозначаемые 0 и 1. Распишем уравнения (П2-2б) и (П2-2в) для каждой компоненты отдельно:

$$\left. \begin{aligned} v_1(t) &= \varphi_2^{(1)} [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), z_1(t), z_2(t), \dots, z_k(t)]; \\ v_p(t) &= \varphi_2^{(p)} [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), z_1(t), z_2(t), \dots, z_k(t)]; \\ y_1(t) &= \varphi_3^{(1)} [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), z_1(t), z_2(t), \dots, z_k(t)]; \\ y_m(t) &= \varphi_3^{(m)} [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), z_1(t), z_2(t), \dots, z_k(t)]. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П2-3})$$

Как известно, функции, принимающие два значения (0 и 1), у которых аргументы также принимают два значения, могут быть записаны в виде формул булевой алгебры. Таким образом, и система уравнений (П2-3) может быть представлена в виде булевых формул.

Основные операции булевой алгебры следующие:

операция «дизъюнкция» (логическое сложение, *ИЛИ*) задается правилами:

$$0 \vee 0 = 0, \quad 0 \vee 1 = 1 \vee 0 = 1, \quad 1 \vee 1 = 1;$$

операция «конъюнкция» (логическое умножение, *И*) задается правилами:

$$0 \cdot 0 = 0, \quad 0 \cdot 1 = 1 \cdot 0 = 0, \quad 1 \cdot 1 = 1;$$

операция «отрицания» (*НЕ*) задается правилами

$$\bar{1} = 0, \quad \bar{0} = 1.$$

Можно говорить, например, что состояние замыкающего контакта реле является отрицанием состояния размыкающего контакта того же реле в тот же момент вре-

мени, поскольку когда состояние одного из них есть 1, состояние другого есть 0, и наоборот, как для операции «отрицания». Состояние двух параллельно соединенных контактов является дизъюнкцией состояний этих контактов, а состояние двух последовательно соединенных контактов — конъюнкцией состояний этих контактов (рис. П2-11).

Под состоянием сложной цепи понимается следующее: цепь замкнута, цепь разомкнута. Легко проверяется, что это согласуется с определением операций булевой алгебры, данных выше. Формулы булевой алгебры могут быть в случае необходимости преобразованы по правилам булевой алгебры.

Рассмотрим в качестве примера схему, изображенную на рис. П2-12, и составим для нее уравнение (П2-26) в виде булевой формулы.

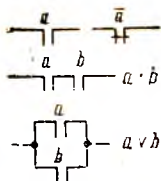


Рис. П2-11. Варианты включения контактов реле.

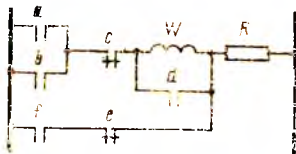


Рис. П2-12. Схема сложной цепи.

Перепишем исходное уравнение

$$v_W(t) = \varphi_2^{(W)}[x(t), z(t)]$$

в соответствии с обозначениями, принятыми в схеме, тогда:

$$v_W(t) = \varphi_2^{(W)}[a, b, \bar{c}, d, \bar{e}, \bar{f}].$$

Переменная $v_W=1$ (подано напряжение на обмотку реле) в том и только в том случае, если имеется хотя бы одна цепь из замкнутых контактов, проходящая от одного полюса схемы до другого через обмотку реле, и нет ни одной цепи, шунтирующей ее.

Пусть имеются цепи $R_1, R_2, \dots, R_n$, проходящие через обмотку реле, и цепи $T_1, T_2, \dots, T_m$, шунтирующие ее. Каждая из этих цепей может находиться в двух состояниях: 1 — замкнута и 0 — разомкнута. Уравнение для v_W можно теперь записать так:

$$v_W = (R_1 \vee R_2 \vee \dots \vee R_n) \cdot (\bar{T}_1 \vee \bar{T}_2 \vee \dots \vee \bar{T}_m). \quad (\text{П2-4})$$

В самом деле, $v_m=1$ тогда и только тогда, когда хотя бы одно $R_i=1$ и все $T_j=0$, т. е.

$$v_w = (1 \vee 0 \vee \dots \vee 0) \cdot \overline{(0 \vee 0 \vee \dots \vee 0)} = 1 \cdot \overline{0} = 1 \cdot 1 = 1.$$

Чтобы получить окончательное выражение для v_w , необходимо записать состояние каждой цепи через состояния входящих в эту цепь контактов, которые для каждой цепи соединены между собой последовательно. Например, если цепь R_i проходит через замыкающие контакты, состояния которых обозначены $a_1, a_2, \dots, a_k$, и размыкающие контакты, состояния которых обозначены $a_{k+1}, a_{k+2}, \dots, a_p$, то состояние цепи запишется:

$$R_i = a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_k \cdot \overline{a_{k+1}} \cdot \overline{a_{k+2}} \cdot \dots \cdot \overline{a_p}. \quad (\text{П2-5})$$

Таким образом, можно сформулировать порядок записи уравнений вида (П2-3).

Для каждого v_i выявляются все цепи, проходящие через обмотку реле, по которым происходит его срабатывание, а также все цепи, шунтирующие обмотку реле, и для них записываются выражения по форме (П2-5). После этого составляется уравнение по форме (П2-4).

Для y_i уравнения вида (П2-3) составляются аналогично, поскольку можно представить, что каждая выходная цепь подключена к катушке какого-либо исполнительного реле.

Для приведенной схемы применение указанного правила дает:

$$R_1 = a \cdot \bar{c}; \quad R_2 = b \cdot \bar{c}; \quad T_1 = \bar{f} \cdot \bar{e}; \quad T_2 = d,$$

откуда

$$v_w = (a \cdot \bar{c} \vee b \cdot \bar{c}) \cdot \overline{(\bar{f} \cdot \bar{e} \vee d)} = (a \cdot \bar{c} \vee b \cdot \bar{c}) (\bar{f} \vee e) \cdot \bar{d}.$$

Для преобразования v_w использованы известные правила булевой алгебры: $\overline{a \cdot b} = \bar{a} \vee \bar{b}$ и $\overline{a \vee b} = \bar{a} \cdot \bar{b}$.

П2-5. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЛЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ

Рассмотрим, каким образом описание релейного устройства с помощью математической модели «конечный автомат с памятью» может быть использовано для

анализа его работы. Изложение будем вести на примере устройства АПВ (см. гл. 5, рис. 5-6).

Опишем входы, выходы и реле для этого устройства, при этом для удобства введем следующие обозначения.

Входы устройства:

x_1 — контакт ключа управления $KУ.2$;

x_2 — контакт ключа управления $KУ.3$;

x_3 — контакт ключа управления $KУ.1$;

x_4 — контакт «запрет АПВ», соединяющий зажим 8 с минусом источника оперативного тока;

x_5 — контакт реле защиты $PЗ$;

x_6 — блок-контакты $B.1$ и $B.2$ выключателя ($x_6=1$) при включенном выключателе и $x_6=0$ — при отключенном);

x_7 — накладка H .

Выходы устройства:

y_1 — цепь на обмотку $ЭО$;

y_2 — цепь на обмотку $КП$;

y_3 — цепь к $PПУ$;

y_4 — цепь к указательному реле $PУ$.

Внутренние реле:

A — конденсаторное реле (C, R_2, R_3);

B — реле $PΠO$;

C — реле $PΠ1$;

D — реле $PБМ$;

E — реле $PВ.1$.

Реле A, B, C и D описаны ранее. Для реле времени E в данном случае можно не учитывать наличие мгновенно размыкающего контакта, а поэтому оно описывается аналогично реле A, B, C и D .

Переходим далее к составлению уравнений (П2-3). Выделим для каждого реле пути срабатывания R и пути шунтирования T . Так, например, для реле $B(PΠO)$ путь срабатывания один — через блок-контакт $B.1$ и обмотку $КП$, т. е. $R_B = \bar{x}_6$. Путь шунтирования два: $KУ.2, PБМ.2$ и $PБМ.2, H, PΠ1.1, KУ.1$, откуда получаем:

$$T_B = x_1 \cdot \bar{d} \vee \bar{d} \cdot x_7 \cdot c \cdot x_3.$$

Уравнение (условие) возбуждения для реле B запишется так:

$$\begin{aligned} v_b &= \bar{x}_6 \cdot (x_1 \cdot \bar{d} \vee \bar{d} \cdot x_7 \cdot c \cdot x_3) = \\ &= \bar{x}_6 \cdot d \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_6 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_7 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_6 \cdot c. \end{aligned}$$

Для остальных реле условия возбуждения записываются аналогично. Для реле, имеющих две обмотки (например, РБМ), записываются отдельно условия возбуждения для каждой из обмоток v_{D1} , v_{D2} . Пусть v_{D1} — возбуждение основной обмотки (токовой), а v_{D2} — удерживающей. Тогда условие возбуждения для реле записывается следующим образом:

$$v_D = v_{D1} \vee d \cdot v_{D2}.$$

С учетом сказанного после упрощений система уравнений вида (П2-3) для устройства АПВ выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} v_{1A} &= x_3; \\ v_{2A} &= e \vee x_4 \vee b; \\ v_B &= \bar{x}_6 \cdot d \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_6 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_7 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{c}; \\ v_C &= a \cdot e \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_6 \cdot x_7 \cdot c \cdot \bar{d}; \\ v_D &= x_2 \cdot x_6 \vee x_6 \cdot x_6 \vee x_1 \cdot d \vee x_3 \cdot x_7 \cdot c \cdot d; \\ v_E &= x_3 \cdot b; \\ y_1 &= x_2 \cdot x_6 \vee x_5 \cdot x_6; \\ y_2 &= x_1 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{d} \vee x_3 \cdot \bar{x}_6 \cdot x_7 \cdot c \cdot \bar{d}; \\ y_3 &= x_3 \cdot c; \\ y_4 &= \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_6 \cdot x_7 \cdot c \cdot \bar{d}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П2-5})$$

Здесь v_{1A} описывает цепь заряда конденсаторного реле, а v_{2A} — все возможные цепи разряда.

Полученная система уравнений совместно с таблицей отдельных реле полностью описывает устройство, и ее решение позволяет найти реакцию устройства на любую последовательность входных сигналов.

Например, устройство находилось в состоянии *ABCDE-10000* (конденсатор заряжен, все реле обесточены). Это состояние, очевидно, соответствует готовности устройства к работе.

Рассмотрим его реакцию на следующую последовательность входных сигналов: $x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 = 0010011$, 0010111 , 0010101 , 0010001 , 0010011 , которая соответствует следующим событиям: выключатель включен, возникает повреждение ($x_5=1$), выключатель отключается ($x_6=0$), размыкается контакт реле защиты ($x_5=0$),

выключатель включается ($x_6=1$), повреждение устранено ($x_5=0$).

Расчет ведется в следующей последовательности.

1. Подставляя в (П2-6) $x_1x_2x_3x_4x_5x_6x_7=0010011$, $abcde=10000$, получаем $v_{1A}v_{2A}v_Bv_Cv_Dv_E=100000$ $y_1y_2y_3 \times y_4=0000$. Из таблиц для отдельных реле (см. § П2-2) видно, что ни одно из них не стремится изменить своего состояния для найденных значений возбуждений v . Следовательно, состояние всего устройства устойчивое.

2. Входные сигналы приняли следующее значение: $x_1 \dots x_7=0010111$, но по-прежнему $a \dots e=10000$. Решая уравнения (П2-6), получаем $v_{1A} \dots v_E=100010$ и $y_1 \dots y_4=1000$. Получает возбуждение реле D и выход y_1 на отключение выключателя, поэтому к следующему моменту времени может изменить свое состояние реле D или входной сигнал x_6 , связанный с выключателем. Считая, что срабатывание реле D произойдет быстрее, имеем для следующего момента времени состояние устройства $ABCDE=10010$ и прежние состояния входных сигналов.

3. При $x_1 \dots x_7=0010111$ и $a \dots e=10010$ получаем $v_{1A} \dots v_E=100010$ и $y_1 \dots y_4=1000$. Сравнение возбуж-

$x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7$	$ABCDE$	$v_{1A} v_{2A} v_B v_C v_D v_E$	$y_1 y_2 y_3 y_4$
0010011	10000	<u>100000</u>	0000
0010111	10000	<u>1000 1 0</u>	1000
0010111	10010	<u>100010</u>	1000
0010101	10010	<u>10 1 0 0 0</u>	0000
0010101	11010	<u>1010 01</u>	0000
0010101	11000	<u>10100 1</u>	0000
0010001	11000	<u>10100 1</u>	0000
0010001	11001	<u>11 1 1 01</u>	0000
0010001	11101	<u>110 101</u>	0111
0010001	10101	<u>11 010 0</u>	0111
0010001	00101	<u>11010 0</u>	0111
0010001	00100	<u>110 100</u>	0111
0010011	00100	<u>10 0 0 00</u>	0010
0010011	00000	<u>10 0000</u>	0000
0010011	10000	<u>100000</u>	0000

няются до тех пор, пока не изменятся входные сигналы. (Состояние, устойчивое в течение заданного времени t , обозначается двойным кружком с величиной t под ним. Например, состояние 11001 устойчиво при неизменных входных сигналах в течение выдержки времени реле времени $PB1(E) - t_E$, а состояние 00000 — в течение времени заряда конденсатора $C - t_{1A}$.)

Из состояния 11000 выходят две стрелки. Это означает следующее: при входных сигналах 0010101 (см. таблицу) начинается переход, который не успевает закончиться, так как входные сигналы меняются на 0010001.

Устройство будет проходить указанную последовательность состояний, если имеют место следующие соотношения между временами изменения состояний отдельных реле: время срабатывания реле B меньше времени отпадания реле D ; время срабатывания реле E больше времени отпадания реле D ; время «переброса» A больше времени срабатывания реле C плюс время отпадания реле B ; при переходе из состояния 10101 при входных сигналах 0010001 раньше успевает разрядиться конденсатор, чем отпадает реле E .

В тех случаях, когда диаграмма используется только для наглядного описания работы релейного устройства, при ее построении целесообразно не учитывать те входы, выходы, а иногда и реле, которые не определяют работу устройства в данном конкретном цикле. Так, например, при описании работы схемы АПВ для рассмотренного выше цикла можно не учитывать наличие входов x_1, x_2, x_4, x_7 и выходов y_3, y_4 . Такой подход к рассмотрению устройства позволяет упростить построение диаграммы.

Таким образом, описанная математическая модель может быть использована для анализа релейного устройства и описания его работы в различных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воронов А. А.** Основы теории автоматического управления. Ч. 1. М.—Л., «Энергия», 1965. 395 с.
2. **Теория автоматического управления.** Под общей ред. А. В. Петушила. М., «Высшая школа», ч. 1, 1969. 424 с.; ч. 2, 1972. 429 с.
3. **Гаврилов М. А.** Структурная теория релейных устройств, Курс лекций. Изд. ВЗЭИ, 1961. 126 с.
4. **Глушков В. М.** Синтез цифровых автоматов. Физматгиз, 1962. 476 с.
5. **Соловьев И. И.** Автоматизация энергетических систем. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956. 360 с.
6. **Баженов С. Н., Бенин В. Л.** Автоматическое регулирование в энергосистемах. Киев, «Техника», 1966. 411 с.
7. **Беркович М. А., Семенов В. А.** Основы автоматики энергосистем. М., «Энергия», 1968. 432 с.
8. **Барзам А. Б.** Системная автоматика. М., «Энергия», 1973. 391 с.
9. **Электротехнический справочник.** Под ред. профессоров МЭИ. Т. 2, раздел 36. М., «Энергия», 1975, с. 521—602.
10. **Кучкин М. Д.** Автоматическое управление и контроль режима работы гидроэлектростанций. М., «Энергия», 1967. 239 с.
11. **Веников В. А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М., «Высшая школа», 1970. 472 с.
12. **Ульянов С. А.** Электромагнитные переходные процессы. М., «Энергия», 1970. 519 с.
13. **Справочник по релейной защите.** Под ред. М. А. Берковича. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 512 с.
14. **Гизила Е. П.** Расчет устройств автоматики энергосистем. Киев, «Вища школа», 1974. 342 с.
15. **Иванов Ю. И.** Управление и автоматика в энергоустановках энергосистем. Киев, «Техника», 1967. 406 с.
16. **Правила устройства электроустановок.** М.—Л., «Энергия», 1965. 464 с.
17. **Иносов В. Л., Цукерник Л. В.** Компаундирование и электромагнитный корректор напряжения синхронных генераторов. М., Госэнергоиздат, 1954. 149 с.
18. **Инструкция по наладке и эксплуатации устройств компаундирования с электромагнитным корректором напряжения.** БТИ ОРГРЭС. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958. 95 с.
19. **Наладка устройств компаундирования и электромагнитных корректоров напряжения синхронных машин.** М., «Энергия», 1968. 78 с. БТИ ОРГРЭС.

20. Баршай И. В. Снижение инерционности коррекции напряжения синхронных генераторов. — «Электрические станции», 1973, № 3, с. 59—63.

21. Цукерник Л. В., Костюк О. М., Рыбинский В. Е. Управляемое фазовое компаундирование синхронных машин с коррекцией по напряжению. — «Электричество», 1958, № 2, с. 27—34.

22. Костюк О. М., Рыбинский В. Е., Цукерник Л. В. Новые автоматические электромагнитные регуляторы возбуждения синхронных машин. — «Электрические станции», 1959, № 11, с. 41—48.

23. Костюк О. М. Устройство фазового компаундирования синхронной машины как обратная модель объекта. — В кн.: Системы релейной защиты и автоматики с применением нелинейных элементов. Киев, «Наукова думка», 1968. с. 7—12.

24. Штейнгауз А. Х. Наладка и испытание автоматического регулятора возбуждения фазового компаундирования РВА-62. М., «Энергия», 1969. 72 с.

25. Методические указания по наладке и испытаниям полупроводниковых систем возбуждения турбогенераторов серии ТВБ. М., «Энергия», 1967. 50 с. (БТИ ОРГРЭС).

26. Сильное регулирование возбуждения. М.—Л., Госэнергоиздат, 152 с. Авт.: В. А. Веников, Г. Р. Герценберг, С. А. Совалов, Н. Н. Соколов.

27. Автоматические регуляторы возбуждения. — «Труды ВЭИ», 1966. Вып. 73. 308 с.

28. Автоматическое регулирование и управление в энергосистемах. Труды ВЭИ, 1968. Вып. 78. 324 с.

29. Савченко Е. В. Ионное возбуждение турбогенераторов ТГВ-200. Киев, «Техника», 1970. 207 с.

30. Росман Л. В. Групповое управление возбуждением синхронных генераторов гидроэлектростанций. М., Госэнергоиздат, 1962. 168 с.

31. Росман Л. В. Составление и расчет систем группового управления возбуждением синхронных генераторов. М., «Энергия», 1966. 71 с.

32. Мельников Н. А., Солдаткина Л. А. Регулирование напряжения в электрических сетях. М., «Энергия», 1968. 153 с.

33. Баркан Я. Д. Регулирование напряжения в распределительных сетях. М., «Энергия», 1966. 220 с.

34. Электрические системы. Том 2. Под ред. В. А. Веникова, М., «Высшая школа», 1971. 438 с. Авт.: В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков и др.

35. Бесконтактные автоматические регуляторы напряжения для трансформаторов с регулированием под нагрузкой. — «Электричество», 1963, № 7, с. 4—12. Авт.: Е. Л. Сиротинский, М. Г. Рожков, Н. Н. Вострокнутов и др.

36. Алексеев Ю. А., Окунцов Е. И. Устройство для автоматического регулирования силовых трансформаторов с РПН. — «Электрические станции», 1973, № 10, с. 52—57.

37. Лебедева Н. С., Сиротинский Е. Л. Регулирование синхронных компенсаторов электромагнитными регуляторами возбуждения. — «Электрические станции», 1968, № 2, с. 51—56.

38. Режимы работы энергетических систем. Переводы докладов XXII сессии СИГРЭ, 1968 г. Под ред. В. А. Веникова. М., «Энергия», 1970. 256 с.

39. Маркович И. М. Режимы энергетических систем. М., «Энергия», 1969. 351 с.

40. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов. Под ред. В. А. Веникова. М., «Высшая школа», 1973. 318 с. Авт.: В. А. Веников, В. И. Горюшкин, И. М. Маркович и др.

41. Оптимизация режимов энергетических систем. Под ред. В. М. Сидникова. Киев, «Высшая школа», 1973. 278 с. — Авт.: В. М. Сидников, А. В. Богословский, Я. А. Калиновский и др.

42. Руководящие указания по выбору наивыгоднейшего распределения активной нагрузки между тепловыми электростанциями. М.—Л., ГЭИ, Госэнергоиздат, 1958. 83 с.

43. Горнштейн В. М. Наивыгоднейшие режимы работы гидроэлектростанций в энергетических системах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959. 248 с.

44. Кириллов И. И. Автоматическое регулирование паровых и газовых турбин. М., Машгиз, 1961. 600 с.

45. Москалев А. Г. Автоматическое регулирование режима энергетической системы по частоте и активной мощности. М., Госэнергоиздат, 1960. 240 с.

46. Альтерман Д. З. Монтаж, наладка и эксплуатация устройств группового регулирования частоты и мощности системы УКАМ. М., Госэнергоиздат, 1963. 118 с.

47. Киселев Г. С., Руденский М. Я., Эпштейн Р. М. Системы группового регулирования мощности гидроэлектростанций. М., «Энергия», 1974. 136 с.

48. Амбросович В. Д. Статические преобразователи мощности для телеизмерительных систем. М., «Наука», 1965. 118 с.

49. Работы ОРГРЭС по автоматизации оборудования гидроэлектростанций. Сборник статей. М., 1964. 119 с.

50. Система автоматического регулирования частоты и мощности (АРЧМ ОРГРЭС). ВДНХ, 1967.

51. Коньцов И. Б., Федоров В. Л., Щуров В. М. Системы автоматического управления режимом работы электростанций по частоте и активной мощности. Труды ВНИИЭ, вып. XXXI, 1967, с. 120—141.

52. Стернинсон Л. Д. О построении и динамике систем автоматического регулирования частоты и мощности. — «Энергетика и транспорт», 1965, № 2, с. 50—61.

53. Стернинсон Л. Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. М., «Энергия», 1975. 216 с.

54. Плевнев Г. П. Автоматическое регулирование и защита теплоэнергетических установок электрических станций. М., «Энергия», 1976. 424 с.

55. Баклушин П. А. Автоматическое управление теплоэнергетическими установками электростанций. М., «Энергия», 1968. 80 с.

56. Электронные регулирующие приборы серии РПИБ. Инструкция МЗТА. М., 1968. 180 с.

57. Опыт разработки и эксплуатации автооператоров гидроэлектростанций. М., «Энергия», 1969. 100 с. (БТИ ОРГРЭС. Авт. В. Д. Урин).

58. Эксплуатация турбогенераторов с непосредственным охлаждением. Под ред. Л. С. Линдорфа, Л. Г. Мамиконянца, М., «Энергия», 1972. 351 с.

59. Сиротинский Е. Л. Синхронизация на автоматических ГЭС. — В кн.: Автоматизация и телемеханизация гидростанций. М., Госэнергоиздат, 1950, с. 77—96.
60. Элькинд Ю. М. Схемы и устройства для самосинхронизации синхронных машин. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956. 208 с.
61. Сиротинский Е. Л., Рожков М. Г. Реле разности частот на полупроводниках. — «Электрические станции», 1961, № 2, с. 59—64.
62. Бибииков А. П., Колодий О. Д. Устройства автоматики для самосинхронизации и точной синхронизации генераторов. — В кн.: Опыт эксплуатации релейных защит и электроавтоматики в Тульской энергосистеме. М., «Энергия», 1972, с. 66—73.
63. Бобров И. И. Импульсный автоматический синхронизатор. — «Электричество», 1967, № 3, с. 14—19.
64. Вострокнутов Н. Н., Сиротинский Е. Л. Новый принцип получения постоянного времени опережения в автоматических синхронизаторах. — «Электричество», 1961, № 8, с. 35—40.
65. Вятский Б. А., Кузнецов С. А., Михайлов А. П. Автоматический синхронизатор с постоянным временем опережения типа АСТ-4. — «Электрические станции», 1956, № 6, с. 29—32.
66. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М., Госэнергоиздат, 1963. 528 с.
67. Мамиконянц Л. Г. Токи и моменты вращения, возникающие в синхронной машине при включении ее способом самосинхронизации. — «Труды ЦНИЭЛ», 1956, № 4, с. 9—87.
68. Берловский В. М., Гиршберг В. В., Ходнев В. В. Автоматический пуск и защита синхронных компенсаторов. — «Электрические станции», 1954, № 10, с. 29—32.
69. Царев М. И., Гельфанд Я. С., Голубев М. Л. Релейная защита и электроавтоматика на переменном оперативном токе. М., «Энергия», 1973. 279 с.
70. Какуевидный Л. И., Смирнова Т. В. Справочник реле защиты и автоматики. М., «Энергия», 1972. 343 с.
71. Богорад А. М., Назаров Ю. Г. Автоматическое повторное включение в энергосистемах. М., «Энергия», 1969. 336 с.
72. Хачатуров А. А. Несинхронные включения и ресинхронизация в электрических системах. М., «Энергия», 1969. 216 с.
73. Мамиконянц Л. Г., Хачатуров А. А. Условия применения несинхронных АПВ в энергосистемах. — «Электричество», 1965, № 1, с. 14—18.
74. О допустимых кратностях токов при несинхронном АПВ. Эксплуатационный циркуляр № Э-9/61. — «Электрические станции», 1961, № 11, с. 94—96.
75. Уточнение эксплуатационного циркуляра № Э-9/61 о допустимых кратностях токов при несинхронных АПВ. — «Электрические станции», 1965, № 2, с. 90.
76. Майкопар А. С. Дуговые замыкания на линиях электропередачи. М., «Энергия», 1965. 200 с.
77. Способы обеспечения правильной работы релейной защиты при несинхронных включениях. Информационные материалы ВНИИЭ, № 47, М.—Л., Госэнергоиздат, 1960. 32 с.
78. Александров И. Н., Красновский А. З. Автоматическое повторное включение линий электропередачи с двусторонним питанием. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958. 94 с.
79. Средства противоаварийной автоматики энергосистем. М., «Энергия», 1964. 254 с.

80. Фейст П. К., Белов Г. Ф. Схемы устройств однофазного автоматического повторного включения с избирательными органами дистанционного типа для линий электропередачи с двусторонним питанием. М., ГЭИ, 1959. 43 с. Информационные материалы ВНИИЭ, № 46.

81. Долгополов В. М., Нестеров Н. В., Поляков В. Е. Автооператор трансформаторной подстанции. — «Электрические станции», 1972, № 4, с. 86—88.

82. Головкин П. И. Повышение эффективности использования устройств автоматической частотной разгрузки энергосистем. — «Электрические станции», 1968, № 10, с. 63—66.

83. Методические указания по автоматической частотной разгрузке (АЧР). Решение Минэнерго № Э-21/71. М., СЦНТИ ОРГРЭС, 1972. 66 с.

84. Панфилов Б. И., Пашков Л. Д., Гришанов В. Г. Новые реле частоты. — «Электрические станции», 1971, № 8, с. 58—61.

85. Сивокобыленко В. Ф., Совпель В. Б., Носов В. М. Импульсное реле частоты. — «Электрические станции», 1974, № 11, с. 70—72.

86. Старостин В. И., Петренко Г. Ф., Бодунов В. Г. Автоматическая частотная разгрузка ускоренного сброса мощности нагрузки энергосистем. — «Электрические станции», 1973, № 9, с. 68—71.

87. Маркушевич Н. С. Автоматическая частотная разгрузка с зависимой выдержкой времени. — «Электрические станции», 1969, № 6, с. 66—69.

88. Руководящие указания и нормативы по проектированию развития энергосистем. М., «Энергосетьпроект», 1972. 68 с.

89. Иофьев Б. И. Автоматическое аварийное управление мощностью энергосистем. М., «Энергия», 1974. 415 с.

90. Степунин С. Е. Устройство, выявляющее несинхронный режим в энергосистеме. — «Труды ВНИИЭ», 1963, вып. XV, с. 21—47.

91. Загоскин Е. И., Колодий О. Д. Реле несинхронного хода типа РНХ-69. — «Электрические станции», 1973, № 2, с. 67—71.

92. Задачи противоаварийной автоматики в обеспечении надежности электроэнергетических систем. — «Электрические станции», 1974, № 11, с. 66—70. Авт.: М. А. Беркович, Л. А. Кошечев, Е. А. Марченко и др.

93. Лугинский Я. Н., Семенов В. А. Информационно-вычислительные системы в диспетчерском управлении. М., «Энергия», 1975. 160 с.

94. Соображения по использованию ЭВМ «Видеотон» 1010 Б в АСДУ. — «Электрические станции», 1974, № 3, с. 14—18. Авт.: У. М. Берзиньш, А. А. Королев, В. К. Мокрушин и др.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- 436

Автоматическое регулирование возбуждения, устройство автоматического распределения реактивных нагрузок, схема многолучевой звезды 79—80

— — — — — многоугольника 81—82

динамические характеристики систем регулирования 65—70

коэффициент статизма 71, 73, 117

метод долевого статизма при астатическом регулировании 75—76

— — — — — встречном регулировании 77

— интегрального отклонения напряжения 78

основные типы систем возбуждения 9, 110—115

— функции 9

регуляторы см. Регуляторы возбуждения генераторов

гоковое компаундирование см. Компаундирование токовое

турбогенераторов типа ТВВ 49—31

фазовое компаундирование см. Компаундирование фазовое

форсировка возбуждения и развозбуждения генераторов с электромашинным возбудителем 18—21, 36

характеристики систем возбуждения 15—17

Автоматическое регулирование напряжения в распределительных сетях:

бесконтактными устройствами 87—91

изменением емкости батарей конденсаторов 91

регулированием возбуждения синхронных компенсаторов 92

трансформаторами с РПН 87

Автоматическое регулирование реактивной мощности групповое:

схема системы ГУВ с централизованным изменением уставок АРВ и уравниванием по току ротора 84, 85

— — — — — регулированием напряжения и уравниванием по напряжению ротора 83, 84, 85

Автоматическое регулирование технологических процессов на ТЭС:

парогенератора 166—171

первичные измерительные приборы 172—174

регулятор электронный 171—179

система регулирования водного режима 183—186

— — вспомогательных установок 186—187

— — питания парогенератора водой 184—185

— — процесса горения 181—184

— — температуры перегрева пара 184

Автоматическое регулирование частоты и активной мощности 94

астатическое одним агрегатом 106

метод ведущего генератора 106

— долевого статизма 106—108

— интегрального отклонения частоты 108

Автоматическое регулирование частоты и активной мощности:

метод регулирования частоты по внутреннему статизму энергосистемы 114

— регулирующей энергосистемы 114

— селективного регулирования частоты 114

с положительным статизмом 104—105

система регулирования АРЧМ ОРГЭС 142, 149, 158—164

— — САУРЧМ 149—158

— с раздельным регулированием пиковых и внепиковых изменений активной нагрузки 11—112

условия наимыгоднейшего распределения активных нагрузок 97—104

характеристика удельных приростов 98, 99, 100, 101, 102

Асинхронный пуск синхронных двигателей:

прямой 216

реакторный 216, 219

— легкий 219, 222

— тяжелый 219, 220

с контролем разворота по частоте тока ротора 222—223

схема устройства автоматического управления для двигателя с тиристорной системой возбуждения 223, 224

схемы подключения обмотки возбуждения синхронного двигателя 218

условия втягивания в синхронизм 217

Асинхронный пуск синхронных компенсаторов 220

— — — — — схема устройства автоматического управления реакторным пуском с контролем разворота по току 224—227

Асинхронный режим 247—253

Быстродействие систем возбуждения 15, 16

Занавыживание систем возбуждения при форсировке 16

Звенья автоматических систем регулирования 366, 368—369, 376, 382—386

Компаундирование:

токовое 31, 32, 33

— нормальное 32, 33, 34

— фазовое 34, 40, 41

— силовое 47—48

устройство с электромагнитным корректором 43, 44—46

Коэффициент ошибки по ускорению 406

— скорости ошибки 406

— статизма системы возбуждения 16—17

— статической ошибки 406

Кратность форсировки 15

Критерии устойчивости 387—392

Методы анализа качества регулирования 395—410

— — устойчивости 387—394

— синтеза корректирующих устройств по ЛАХ 411—414

100