

С. Н. БАЖЕНОВ, В. Л. БЕНИН

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ЭНЕРГО- СИСТЕМАХ

**ДОПУЩЕНО
МИНИСТЕРСТВОМ ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР
В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ
ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ВУЗОВ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНІКА» КИЕВ — 1966

6П2.11
Б16

621-531.9

В книге рассмотрены вопросы автоматического регулирования режима работы энергетической системы: автоматического регулирования возбуждения, частоты и активной мощности.

Изложены необходимые сведения из теории автоматического регулирования и методы исследования устойчивости регулирования напряжения, скорости вращения, частоты и активной мощности.

Книга предназначена для студентов энергетических вузов и факультетов и может быть использована инженерно-техническими работниками энергосистем и проектных организаций.

Рецензент *С. Е. Кашпровский*, инженер

Редакция литературы по энергетике, электронике, кибернетике и связи

Заведующий редакцией
инж. *Р. П. Рак*

3-3-9

496-66

Советский народ под руководством КПСС успешно решает задачу создания материально-технической базы коммунизма. Эта историческая задача решается на основе широкой механизации и автоматизации производственных процессов.

В энергетической системе производственный процесс выработки и распределения электроэнергии имеет особенности: непрерывность производственного процесса, одновременность производства электроэнергии и ее потребления, взаимосвязанность элементов энергосистемы, расположенных на большой территории, большая сложность происходящих в энергосистеме явлений. Этими особенностями определяются необходимость широкой автоматизации энергосистем и трудности, возникающие при решении этой задачи. Одним из важнейших направлений автоматизации энергетических систем является применение в производственном процессе автоматического регулирования.

Если в установке (производственной, транспортной, исследовательской и т. п.) происходит технический процесс, то режим работы установки характеризуется совокупностью определенных физических величин. В некоторых случаях для правильного ведения технического процесса необходимо поддерживать заданное (постоянное или изменяющееся по определенному закону) значение одной или нескольких из величин, характеризующих режим работы установки, например, скорости вращения, напряжения и т. п.

Автоматическим регулированием называется поддержание заданного значения определенной физической величины при помощи устройства, именуемого *автоматическим регулятором* или *регулятором* — без непосредственного участия человека.

Физическая величина, заданное значение которой поддерживается при автоматическом регулировании, называется *регулируемой величиной*.

Установка, в которой происходит технический процесс, подлежащий регулированию, называется *регулируемым объектом*, или кратко *объектом*. В конкретных случаях понятие регулирования уточняют, говоря о регулировании того или иного объекта, технического процесса или регулируемой величины.

Регулируемый объект и автоматический регулятор образуют совместно *систему автоматического регулирования*, которую будем кратко называть *системой регулирования*, *системой*, или *САР*.

Автоматическое регулирование является разновидностью автоматического управления [27, 42, 44], которое можно определить

как осуществление автоматических воздействий на установку (управляемый объект) с целью повлиять определенным образом на происходящий в ней технический процесс.

Ручное регулирование почти полностью вытеснено автоматическим во всех важных технических процессах. Это объясняется тем, что автоматическое регулирование:

1) можно применить в случаях, когда ручное регулирование осуществить нельзя, например, из-за большой скорости протекания регулируемого процесса, невозможности нахождения человека вблизи регулируемого объекта и т. д.;

2) дает возможность значительно точнее поддерживать заданное значение регулируемой величины, а следовательно, улучшить качество продукции и поднять культуру производства;

3) создает экономические выгоды, так как позволяет осуществить более экономичное ведение технического процесса и уменьшить количество обслуживающего персонала;

4) облегчает труд обслуживающего персонала.

В энергосистемах автоматическое регулирование выполняет следующие основные функции:

1) поддержание заданных значений основных показателей качества электроэнергии — частоты в электрической системе и напряжения в определенных пунктах электрической системы;

2) обеспечение целесообразного распределения активных и реактивных нагрузок между электрическими станциями и отдельными синхронными машинами. Обычно такое распределение достигается совместным использованием автоматического регулирования и средств вычислительной техники;

3) повышение надежности работы электрической системы путем повышения ее устойчивости и облегчения ресинхронизации после нарушения синхронной работы двух частей электрической системы.

Если к проблеме автоматического регулирования в энергетической системе подходить теоретически, учитывая взаимосвязанность ее элементов, всю энергосистему совместно с используемыми в ней автоматическими регуляторами следует рассматривать как единую САР. Но в первом приближении можно считать, что многие процессы автоматического регулирования, предназначенные для обеспечения правильного функционирования отдельных элементов энергосистемы, не влияют на энергосистему в целом. Примером может служить автоматическое регулирование уровня воды в барабане парового котла. В этом случае в качестве системы регулирования можно рассматривать паровой котел с регулятором уровня воды (регулятором питания). Процесс регулирования уровня

воды при исправной работе котла практически не отражается на других элементах энергосистемы. Подобные виды автоматического регулирования, имеющие лишь местное значение для отдельных элементов энергосистемы, в курсе автоматического регулирования энергосистем не рассматриваются.

В этой книге, кроме общих вопросов автоматического регулирования, рассматриваются те виды автоматического регулирования в энергосистемах, которые существенно влияют на режим работы энергосистемы в целом. К ним относятся автоматическое регулирование напряжения, частоты реактивной мощности и активной мощности.

При автоматическом регулировании напряжения регулятор поддерживает заданное значение напряжения на выводах синхронного генератора или синхронного компенсатора, воздействуя на систему возбуждения последних. В энергосистемах также применяются другие автоматические устройства, воздействующие, как и регуляторы напряжения, на возбуждение синхронных машин, но не для регулирования напряжения, а с иными целями. Осуществление воздействий на системы возбуждения синхронных машин при помощи любых автоматических устройств (в том числе и регуляторов напряжения), называется *автоматическим регулированием возбуждения*. Такое название нельзя считать удачным, так как оно не соответствует общепринятому пониманию слов автоматическое регулирование. Все же, учитывая широкое использование в литературе термина *автоматическое регулирование возбуждения*, будем применять его в этой книге, хотя правильнее было бы выразить его смысл словами *автоматическое управление возбуждением*.

Понятие автоматического регулирования возбуждения охватывает и автоматическое регулирование реактивной мощности синхронных машин, так как последнее осуществляется автоматическими устройствами, воздействующими на системы возбуждения.

Так как регуляторы напряжения и другие устройства автоматического регулирования возбуждения тесно взаимодействуют, то в этой книге наряду с регулированием напряжения и реактивной мощности рассматриваются и другие виды автоматического регулирования возбуждения.

С каждым годом в энергосистемах внедряются и будут внедряться новые методы и средства автоматического регулирования. В технике автоматического регулирования энергосистем будут использоваться достижения электроники, вычислительной техники, технической кибернетики и др. Намечаются следующие основные направления дальнейшего развития автоматического регулирования энергосистем.

1. Более глубокий учет взаимосвязи элементов сложной системы, включающей в себя энергосистему и используемые в ней автоматические устройства.

Устройства автоматического регулирования возбуждения повышают устойчивость электрических систем. Но более значительного эффекта можно добиться, используя одновременно устройства автоматического регулирования возбуждения и специальные автоматические регуляторы, воздействующие на впуск энергоносителя в турбины. Подобные регуляторы разрабатываются в настоящее время. Еще большие перспективы имеют комбинированные регуляторы, реагирующие на некоторые параметры режима агрегата турбина-генератор и их производные по времени и воздействующие на возбуждение генератора и впуск энергоносителя в турбину.

2. Применение самонастраивающихся САР. В последние годы в результате развития технической кибернетики ведутся разработки систем регулирования нового типа — самонастраивающихся САР. САР имеют способность приспосабливаться к изменяющимся внешним условиям. В этих системах свойства регулятора автоматически изменяются, чем обеспечиваются наилучшие (в заранее установленном смысле) режимы объекта.

3. Широкое применение средств вычислительной техники. Средства вычислительной техники можно широко применять в автоматическом регулировании энергосистем для выполнения различных математических и логических операций.

Большое значение будут иметь вычислительные устройства и машины для самонастраивающихся САР, где они будут использоваться для анализа режима работы энергосистемы и формирования (на основании произведенного анализа) сигналов-команд, обеспечивающих требуемые изменения свойств регулятора.

4. Применение новых схем, приборов и устройств, разработанных и разрабатываемых в настоящее время, открывают большие возможности для развития техники регулирования энергосистем. Например, для различных регуляторов с успехом могут быть использованы появившиеся в последние годы новые виды полупроводниковых приборов.

Гл. 1 и 2, а также §§ 1 и 4 гл. 3 и § 5 гл. 4 написаны Баженовым С. Н., а §§ 2, 3, 5—9 гл. 3 и §§ 1—4, 6, 7 гл. 4 и гл. 5 — Бениным В. Л.

Отзывы и замечания по этой книге просим направлять по адресу: Киев, 4, Пушкинская, 28, издательство «Техніка».

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

§ 1. ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Воздействия на САР и ее элементы. В процессе автоматического регулирования регулятор оказывает на объект воздействие, называемое регулирующим воздействием. При изменениях режима работы объекта регулятор так изменяет регулирующее воздействие, чтобы регулируемая величина не отклонялась от заданного значения. Часть регулируемого объекта, на которую непосредственно воздействует регулятор, называется регулирующим элементом объекта.

Если при регулировании поддерживаются заданные значения некоторого количества регулируемых величин, то объект должен иметь, по крайней мере, такое же количество регулирующих элементов, на каждый из которых регулятор (или несколько регуляторов) оказывает особое регулирующее воздействие.

В системах регулирования предусматривается возможность изменения в определенных пределах заданного значения или заданного закона изменения регулируемой величины. Для этого используется задающее устройство, воздействующее на регулятор* и изменяющее его настройку. Воздействие задающего элемента на регулятор будем называть задающим воздействием. Задающее устройство может действовать автоматически или приводиться в действие персоналом, обслуживающим объект.

Воздействия, оказываемые одними элементами САР на другие, являются для системы внутренними воздействиями. Примером внутреннего воздействия может служить регулирующее воздействие.

* В некоторых случаях задающее устройство выполняется как конструктивная деталь регулятора, но для удобства изложения будем считать его отдельным устройством, а не частью регулятора.

Воздействия, оказываемые на САР извне, называются внешними, или возмущающими. Их изменения называют возмущениями. Возмущающие воздействия могут быть приложены к объекту или к регулятору. Во многих системах регулирования важным возмущающим воздействием на объект является его нагрузка. Характерным возмущающим воздействием на регулятор является задающее воздействие. К объекту и регулятору приложены и другие возмущающие воздействия.

Основные принципы автоматического регулирования. При отсутствии регулятора действующие на объект возмущения отклоняли бы регулируемую величину от заданного значения. Задачей автоматического регулирования является поддержание заданного значения регулируемой величины. Эту задачу можно решить двумя основными способами.

Первый способ заключается в том, что регулятор реагирует на изменения одного или нескольких наиболее существенных возмущающих воздействий, приложенных к объекту (будем называть их главными возмущающими воздействиями), изменяя регулирующее воздействие так, чтобы регулируемая величина имела заданное значение. Такой способ регулирования называется автоматическим регулированием по возмущению.

Второй способ состоит в том, что регулятор реагирует на регулируемую величину и выявляет ее отклонения от заданного значения. При появлении таких отклонений он изменяет свое воздействие на регулируемый объект, восстанавливая заданное значение регулируемой величины. Такое регулирование называется автоматическим регулированием по отклонению регулируемой величины, или регулированием по отклонению.

САР могут быть основаны на принципе регулирования по возмущению или по отклонению, или на использовании обоих принципов одновременно. В последнем случае системы регулирования называются комбинированными САР.

Система регулирования по возмущению. На рис. 1 приведена элементная схема САР, на которой показаны элементы системы (объект и регулятор) и взаимодействия между ними, а также возмущающие воздействия, приложенные к элементам системы. Задающее устройство, не входящее в состав САР, изображено на схеме штриховой линией. Схема отражает наиболее простой случай системы с одним главным возмущающим воздействием на регулируемый объект.

Как видно из элементной схемы, цепь главного возмущающего воздействия разветвляется. Обе ветви воздействуют на

объект, одна — непосредственно, другая — через регулятор. На объекте цепь обрывается, так как объект на другие элементы системы не воздействует. Следовательно, система регулирования по возмущению имеет разомкнутую разветвленную цепь воздействий.

Принципиальные недостатки систем регулирования по возмущению заключаются в относительно невысокой точности поддержания заданного значения регулируемой величины, что объясняется двумя причинами.

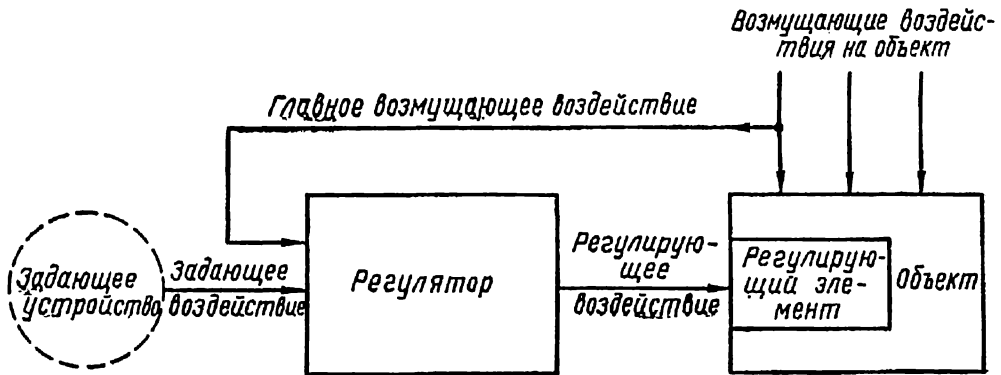


Рис. 1. Элементарная схема системы регулирования по возмущению.

1. Для точного поддержания заданного значения регулируемой величины необходимо, чтобы выработанное регулятором регулирующее воздействие на объект зависело от главных возмущающих воздействий. Однако достаточно точно выполнить требуемую функциональную зависимость между этими величинами в большинстве случаев не удастся.

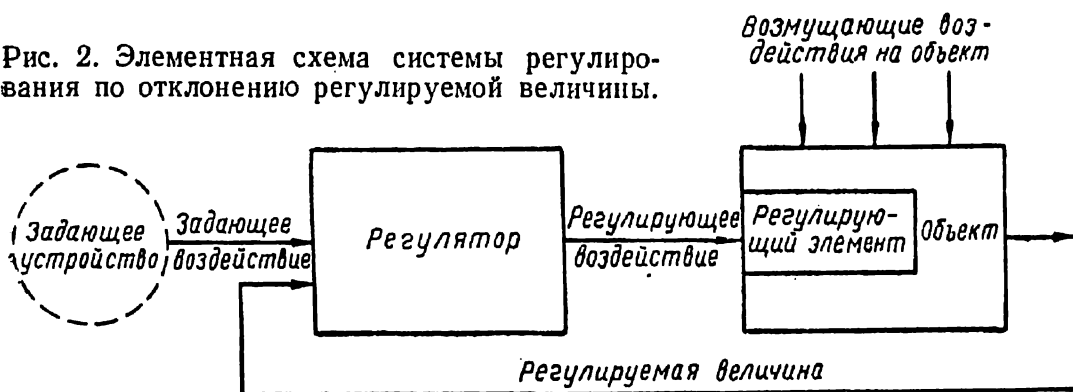
2. При регулировании по возмущению регулятор реагирует на изменения только одного или нескольких главных возмущающих воздействий на регулируемый объект. Изменения остальных возмущающих воздействий влияют на регулируемую величину, но не компенсируются действием регулятора.

Рассматриваемые САР имеют принципиальное преимущество, заключающееся в том, что при изменении главного возмущающего воздействия регулятор сразу же вступает в действие и изменяет регулирующее воздействие на объект еще до того, как успеет сколько-нибудь заметно измениться регулируемая величина (предполагается, что скорость действия регулятора достаточно велика). Таким образом, при регулировании по возмущению можно свести к малой величине отклонения регулируемой величины от задан-

ного значения в первые моменты после изменения главного возмущающего воздействия.

Система регулирования по отклонению. В результате изменений возмущающих воздействий на объект регулируемая величина может отклоняться от заданного значения. Отклонения регулируемой величины воспринимаются регулятором, который так изменяет регулирующее воздействие на объект, чтобы регулируемая величина вновь приобрела заданное значение. Таким образом,

Рис. 2. Элементная схема системы регулирования по отклонению регулируемой величины.



САР по отклонению имеет замкнутую цепь воздействий: объект воздействует на регулятор, регулятор воздействует на объект и т. д. (рис. 2)*. Поэтому систему регулирования по отклонению называют замкнутой.

Рассматриваемый принцип автоматического регулирования характерен тем, что регулятор реагирует непосредственно на регулируемую величину и устраняет любые ее отклонения от заданного значения, независимо от причин, вызывающих эти отклонения (такими причинами могут быть какие угодно возмущения). Поэтому можно с высокой точностью поддерживать заданные значения регулируемой величины, что является принципиальным преимуществом регулирования по отклонению.

Однако при таком способе автоматического регулирования трудно предотвратить отклонение регулируемой величины от заданного значения в первые моменты после быстрого изменения возмущающего воздействия, так как регулятор начинает действовать только после возникновения такого отклонения. Этот недо-

* Возможны САР с несколькими воздействиями объекта на регулятор и регулятора на объект. Их элементные схемы более сложны, чем схема, изображенная на рис. 2.

статок можно устранить в таких системах регулирования по отклонению, у которых регулятор реагирует не только на мгновенные значения регулируемой величины, но и на ее производные по времени (обычно на первую или на первую и вторую произ-

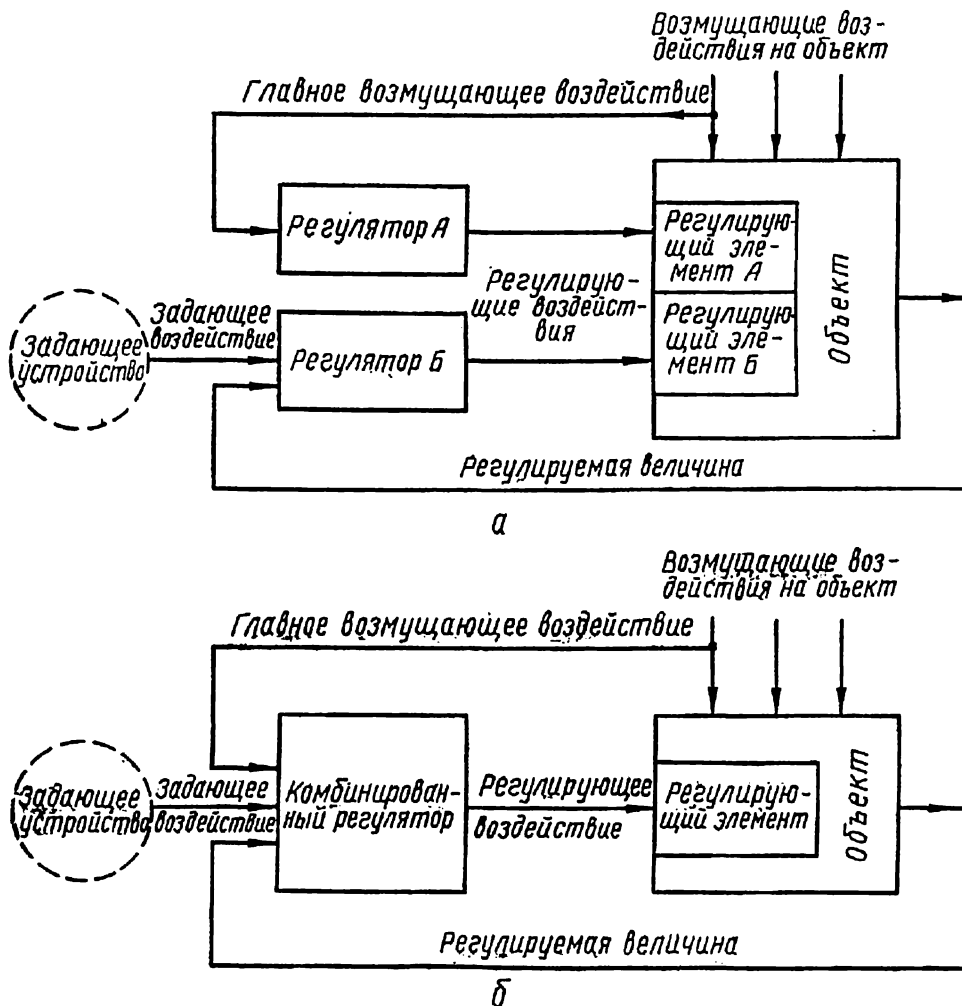


Рис. 3. Элементные схемы комбинированных систем регулирования.

водные). В таких системах регулирующее воздействие на объект может значительно измениться уже в самом начале процесса изменения регулируемой величины, вызванного каким-либо возмущением, так как производные регулируемой величины в этот момент могут быть велики.

Комбинированные системы регулирования по возмущению и по отклонению регулируемой величины. В настоящее время

широко применяются системы, одновременно использующие принципы регулирования по возмущению и по отклонению регулируемой величины, называемые комбинированными САР. Два варианта элементных схем комбинированных систем изображены на рис. 3.

Схема, приведенная на рис. 3, а, содержит регуляторы А и Б, регулирующие соответственно регулируемую величину по возмущению и по отклонению. Без регулятора Б регулятор А мог бы поддерживать заданное значение регулируемой величины с невысокой точностью, не удовлетворяющей требованиям ведения технического процесса. Регулятор Б выполняет функцию корректора регулируемой величины. Он реагирует на возникающие вследствие неточной работы регулятора А отклонения регулируемой величины от заданного значения и устраняет их.

В схеме, изображенной на рис. 3, б, вместо двух регуляторов используется один комбинированный регулятор, регулирующий по возмущению и по отклонению.

Обе рассмотренные комбинированные системы применяются на практике.

В комбинированных САР регулируемая величина одновременно регулируется по возмущению и по отклонению. Поэтому в таких САР сочетаются преимущества обоих видов регулирования. Регулированием по возмущению обеспечивается быстрая реакция комбинированной системы на изменение главного возмущающего воздействия, вследствие чего можно избежать значительных отклонений регулируемой величины от заданного значения в начале процесса регулирования. В то же время регулированием по отклонению обеспечивается высокая точность поддержания заданного значения регулируемой величины в установившихся режимах системы.

§ 2. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Классификация систем регулирования по характеру регулирующего воздействия. Для поддержания заданного значения регулируемой величины регулятор создает регулирующее воздействие на объект, зависящее от некоторых координат системы, которые являются входными величинами регулятора. В общем случае регулирующее воздействие может зависеть не только от мгновенных значений входных величин регулятора, но также от их производных и интегралов по времени, т. е. регулятор может реагировать на входные величины, их производные и интегралы.

В системах регулирования *непрерывного действия* непрерывному изменению величин, на которые реагирует регулятор, соответствует непрерывное изменение регулирующего воздействия.

В системах регулирования *импульсного действия* регулирующее воздействие (скорость изменения регулирующего воздействия) имеет характер периодически повторяющихся импульсов. В промежутках между импульсами регулирующее воздействие (скорость его изменения) имеет постоянное значение (например, нулевое), а амплитуда, продолжительность или частота импульсов является функцией величин, на которые реагирует регулятор.

В системах регулирования *релейного действия* регулирующее воздействие не является непрерывной функцией входных величин регулятора. В таких системах регулирующее воздействие (скорость изменения регулирующего воздействия) может принимать несколько фиксированных значений.

В этой книге вопросы теории автоматического регулирования рассматриваются применительно к системам регулирования непрерывного действия.

Координаты системы регулирования. Состояние САР характеризуется значениями ряда физических величин, называемых координатами системы. Координатами САР могут быть, например, температура в определенной точке системы, давление пара, газа или жидкости, сила тока в электрической цепи, напряжение, мощность и т. д.

Одной из координат САР является регулируемая величина. Различные воздействия, приложенные к объектам и регуляторам (рис. 1—3), также относятся к координатам системы регулирования.

Состояния равновесия и движения САР. Если координаты системы регулирования не изменяются во времени, то система находится в состоянии равновесия (в установившемся состоянии), а режим ее работы называют равновесным, или установившимся. Состояние равновесия САР может наблюдаться только при неизменности возмущающих воздействий. Если же координаты САР меняются вследствие изменений возмущающих воздействий, то этот процесс называют процессом регулирования, а состояние системы в процессе регулирования — состоянием движения.

В соответствии с наличием двух состояний САР теория автоматического регулирования содержит два основных раздела — статики и динамики автоматического регулирования. В статике рассматривается равновесие, а в динамике — движение систем регулирования.

Устойчивость системы регулирования. Равновесный режим работы САР может быть нарушен в результате изменения возмущающих воздействий. Если возмущающие воздействия на систему вновь приобретут постоянные значения, то устойчивая САР перейдет в новое состояние равновесия с заданным значением регулируемой величины. Способность системы переходить в состояние равновесия с заданным значением регулируемой величины при постоянных возмущающих воздействиях и в дальнейшем поддерживать это состояние называется устойчивостью САР.

Вследствие инерционности большинства элементов САР новое состояние равновесия наступает не в момент прекращения изменений возмущающих воздействий, а после окончания переходного процесса, во время которого система еще находится в состоянии движения. В новом установившемся режиме регулируемая величина принимает заданное значение, которое в общем случае может отличаться от заданного значения для предыдущего установившегося режима. Однако может оказаться, что после прекращения изменения возмущающих воздействий равновесие системы никогда не наступит или система придет к ненормальному равновесному режиму со значением регулируемой величины, отличающимся от заданного. Такая система называется неустойчивой. Неустойчивые САР непригодны для практического использования.

Функциональные элементы системы регулирования. САР состоит из нескольких взаимосвязанных элементов, различающихся по выполняемым ими функциям. Элементы САР, рассматриваемые с точки зрения их функций, будем называть функциональными элементами системы. В каждой САР такими элементами являются регулируемый объект и регулятор. В свою очередь, регулятор состоит обычно из нескольких более мелких функциональных элементов.

Функциональные элементы САР взаимосвязаны, их действие представляет собой единый процесс. На элементы системы действуют внешние и внутренние воздействия. В свою очередь, каждый элемент воздействует на один или несколько других элементов системы (исключение составляет регулируемый объект в САР по возмущению, не воздействующий на другие элементы).

Входная и выходная величины. Величина, на которую реагирует элемент САР, называется его входной величиной, а величина, выражающая воздействие этого элемента на другой, — выходной. Выходная величина некоторого элемента, который будем называть предыдущим, является одновременно входной величиной для другого элемента — последующего.

В общем случае элемент САР может иметь несколько непосредственно воздействующих на него предыдущих элементов и соответственно столько же входных величин. Выходная величина некоторого элемента может в общем случае воздействовать на несколько последующих элементов.

Функциональные элементы регулятора. Каждый регулятор состоит из измерительного элемента, воспринимающего изменения величины, на которую реагирует регулятор (т. е. изменения главного возмущающего воздействия или регулируемой величины), и исполнительного элемента, непосредственно осуществляющего воздействие на регулируемый элемент объекта. Кроме того, в состав регуляторов может входить большое количество функциональных элементов других типов.

Если необходимо осуществить воздействие одного элемента САР на другой, но выходная величина первого не может являться входной для второго, то для преобразования выходной величины первого элемента используется преобразующий элемент. Выходная величина преобразующего элемента отличается от входной количественно (например, при пропорциональном преобразовании переменного напряжения трансформатором) или качественно (например, при преобразовании силы тока в перемещение, осуществляемое электромагнитным механизмом).

Детализированные элементные схемы САР. Элементные схемы систем регулирования можно изобразить более подробно, если показать на них отдельные функциональные элементы регулятора. Например, на рис. 4 изображены элементные схемы САР по возмущению и по отклонению регулируемой величины в предположении, что регулятор состоит из измерительного, преобразующего и исполнительного элементов.

В рассматриваемых системах измерительный элемент регулятора реагирует на главное возмущающее воздействие (рис. 4, а) или на регулируемую величину (рис. 4, б) и воздействует на преобразующий элемент. Выходная величина последнего приложена ко входу исполнительного элемента, который оказывает регулирующее воздействие на объект.

Усилительные элементы регуляторов (усилители). Каждый элемент автоматического регулятора затрачивает определенную энергию при воздействии на последующие элементы. Рассматривая элементы регуляторов в отношении энергетического баланса, их можно разделить на две группы.

К первой группе относятся элементы, использующие для воздействия на последующие элементы энергию, полученную от пре-

дыдущих. Ко второй группе относятся усилители, использующие для воздействия на последующие элементы энергию, полученную от внешнего источника. Энергия, поступившая от предыдущего элемента, управляет потоком энергии, при помощи которого усилитель воздействует на последующий элемент. К усилителям относится большинство применяемых на практике исполнительных

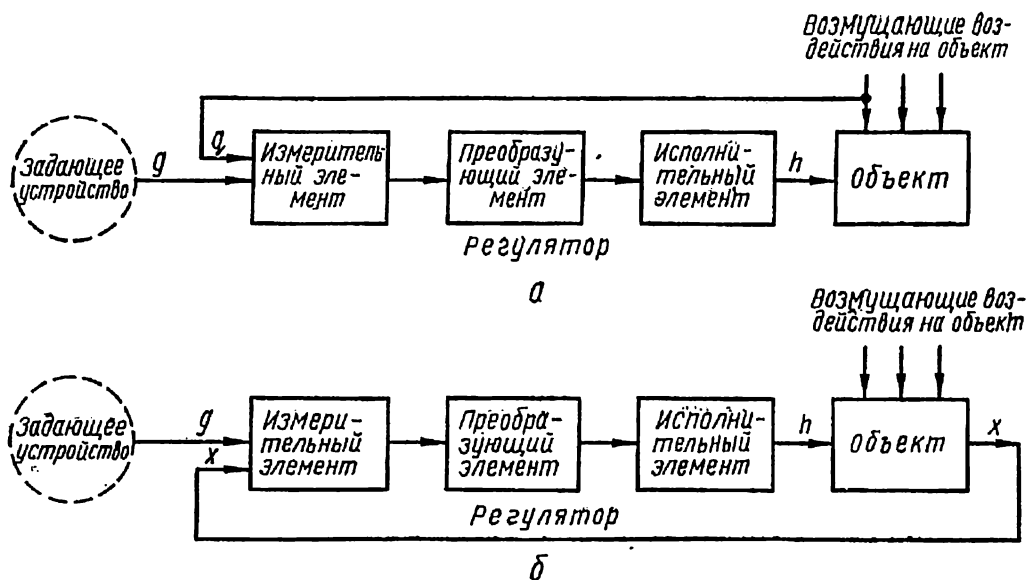


Рис. 4. Детализированные элементные схемы систем регулирования: q — главное возмущающее воздействие; g — задающее воздействие; h — регулирующее воздействие; x — регулируемая величина.

элементов, а также многие измерительные и другие функциональные элементы регуляторов.

Усилители, предназначенные специально для усиления мощности воздействия, будем называть усилительными функциональными элементами. Они представляют собой разновидность преобразовательных функциональных элементов регуляторов.

Прямое и не прямое регулирование. Если для воздействия на объект регулятор получает энергию с воздействиями, на которые он реагирует, то регулирование называется прямым, а регулятор — регулятором прямого действия. Если для воздействия используется внешний источник энергии, то регулирование называется непрямым, а регулятор — регулятором непрямого действия.

Регуляторы непрямого действия содержат один или несколько усилительных элементов, в то время как у регуляторов прямого действия усилительных элементов нет.

Регуляторы прямого действия можно использовать только в тех случаях, когда мощность, требуемая для оказания регулирующего воздействия на объект, относительно невелика.

Обратная связь. Устройство, при помощи которого выходная величина элемента САР воздействует на его вход, называется устройством обратной связи.

Обозначим воздействие на элемент \mathcal{E} (рис. 5, а) со стороны предыдущего элемента системы (входную величину) через $x_{вх}$ и воздействие, оказываемое элементом \mathcal{E} на последующий элемент (выходную величину), — через $x_{вых}$. Устройство обратной связи $ОС$

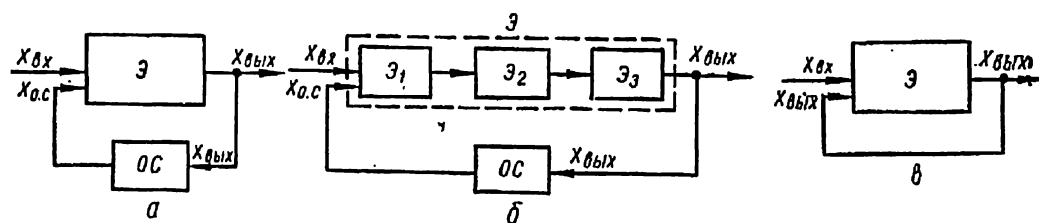


Рис. 5. Схемы осуществления обратной связи в элементах САР.

реагирует на величину $x_{вых}$ и создает дополнительное воздействие $x_{о.с}$ на вход элемента. В этом случае обратная связь охватывает элемент \mathcal{E} . Элемент с обратной связью вследствие дополнительного воздействия на него $x_{о.с}$ приобретает новые свойства.

В общем случае обратная связь может охватывать несколько взаимосвязанных элементов (например, \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 и \mathcal{E}_3), но их можно рассматривать, как один сложный элемент \mathcal{E} (рис. 5, б).

Жесткая и гибкая обратные связи. Если воздействие $x_{о.с}$ обратной связи на элемент системы в каждый момент времени зависит только от выходной величины $x_{вых}$ элемента, то обратная связь называется жесткой. Простейшая жесткая обратная связь не преобразует воздействие, а только передает выходную величину элемента на его вход (рис. 5, в). В этом случае $x_{о.с} = x_{вых}$.

Если же величина $x_{о.с}$ зависит от производных выходной величины $x_{вых}$ по времени, то обратная связь называется гибкой.

В установившихся режимах системы $x_{вых}$ — величина постоянная, и ее производные равны нулю. Следовательно, гибкая обратная связь не действует в состояниях равновесия и влияет лишь на протекание процесса регулирования. В то же время жесткая обратная связь действует как во время движения системы, так и в состояниях равновесия.

Положительная и отрицательная обратные связи. Обратная связь называется положительной (отрицательной), если она усиливает (ослабляет) изменения выходной величины при изменениях входной величины охватываемого ею элемента.

Отрицательные обратные связи широко используются для достижения более благоприятного протекания процесса регулирования. В некоторых случаях положительные жесткие обратные связи вводят в усилители для получения более значительных изменений выходной величины при изменениях входной.

Главная и дополнительная обратные связи. Рассмотрим изображенную на рис. 4, б САР по отклонению регулируемой величины, являющуюся замкнутой системой. Если бы измерительный элемент регулятора был отключен от объекта, то система представляла бы собой разомкнутую последовательную цепь функциональных элементов. В действительности выходная величина этой цепи — регулируемая величина x — воздействует на вход цепи. Следовательно, связь объекта с измерительным элементом регулятора представляет собой простейшую жесткую обратную связь, охватывающую все элементы САР. Ее называют главной обратной связью системы регулирования.

Кроме главной обратной связи, в системах регулирования по отклонению могут применяться обратные связи, охватывающие часть элементов или один элемент. Их называют дополнительными обратными связями. Обычно под обратными связями в САР по отклонению регулируемой величины подразумевают дополнительные обратные связи, поскольку наличие в таких системах главной обратной связи само собой разумеется.

Обратные связи, охватывающие отдельные элементы или группы элементов, можно использовать и в САР по возмущению.

Одноконтурные и многоконтурные САР. Система регулирования по отклонению регулируемой величины называется одноконтурной, если ее элементы образуют одну замкнутую неразветвленную цепь (один контур), как, например, на рис. 2 или рис. 4, б. Если же цепь звеньев содержит несколько контуров, система регулирования называется многоконтурной. САР с дополнительными обратными связями являются многоконтурными системами.

Примером многоконтурной САР может служить система, элементная схема которой представлена на рис. 6*. Однако эту САР можно представить как одноконтурную, если элементы 2 и 3 с об-

* Возмущающие воздействия на элементной схеме не показаны.

ратной связью 8 рассматривать как единый элемент I, а элемент 6 со своей обратной связью — как некоторый элемент II.

Классификация САР по характеру изменения во времени задающего воздействия. Требуемые изменения заданных значений регулируемой величины осуществляются изменением задающего воздействия на регулятор со стороны задающего элемента. Обыкновенные (не самонастраивающиеся) системы регулирования можно подразделить на следующие три класса:

1) системы автоматической стабилизации, у которых задающее воздействие изменяется не автоматически, т. е. вручную;

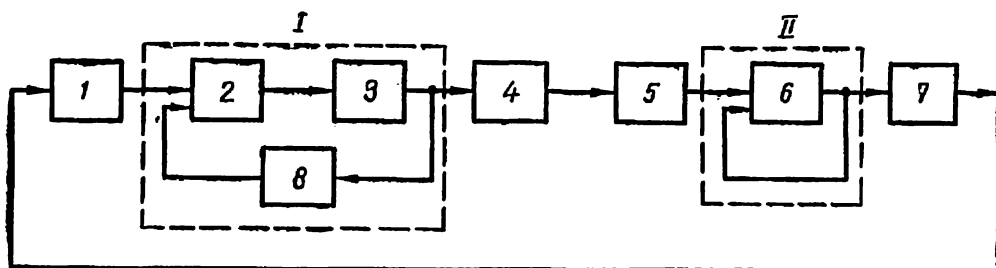


Рис. 6. Элементная схема многоконтурной САР: 1 — 8 элементы системы.

2) системы программного регулирования, у которых задающее (программное) устройство автоматически изменяет настройку регулятора по заданной программе;

3) следящие системы, у которых заданное значение регулируемой величины изменяется автоматически по заранее неизвестному закону.

Для автоматического регулирования в энергосистемах чаще всего применяются системы автоматической стабилизации. В дальнейшем (кроме особо оговоренных случаев) под системами регулирования будем подразумевать системы автоматической стабилизации.

Характеристика регулирования. В соответствии с условиями ведения технического процесса в объекте регулируемая величина в общем случае должна зависеть от некоторых возмущающих воздействий и других координат, характеризующих состояние объекта. Закон изменения установившихся значений регулируемой величины в функции некоторых координат регулируемого объекта (при постоянном значении задающего воздействия*) на-

* Режим работы с постоянным значением задающего воздействия является нормальным для систем автоматической стабилизации и возможен в системах программного регулирования или в следящих системах на отдельных отрезках времени.

зывается характеристикой регулирования САР. Характеристика регулирования выражается уравнением

$$x = F(q_1, q_2, \dots, q_l), \quad (1,1)$$

где x — установившееся значение регулируемой величины;
 q_1, q_2, \dots, q_l — некоторые из координат объекта;
 F — знак функциональной зависимости.

Вследствие возможной неточности работы САР фактическое установившееся значение x регулируемой величины может отклоняться от заданного значения x_3 , которое определяется требованиями ведения технического процесса в объекте и представляет собой функцию

$$x_3 = F_3(q_1, q_2, \dots, q_l). \quad (1,2)$$

Уравнение (1,2) представляет собой заданную характеристику регулирования.

Статическая ошибка регулирования. Разность $x - x_3$ представляет собой ошибку системы в состоянии равновесия, называемую статической ошибкой регулирования.

В удовлетворительно работающей САР статические ошибки должны быть достаточно малыми. Поэтому не будем различать фактическое установившееся и заданное значения регулируемой величины, кроме тех случаев, когда будем рассматривать вопросы, связанные со статическими ошибками регулирования.

Графическое представление характеристик регулирования. В большинстве случаев установившееся значение регулируемой величины является функцией одного из возмущающих воздействий q на объект или представляет собой постоянную величину C , т. е.

$$x = F(q) \quad (1,3)$$

или

$$x = C. \quad (1,4)$$

Характеристика регулирования (1,3) изображается некоторой кривой в прямоугольной системе координат (рис. 7).

Коэффициент статизма характеризует степень изменения регулируемой величины x при изменениях возмущающего воздействия q . Коэффициентом статизма (или статизмом) k_s называется взятое с обратным знаком отношение изменения регулируемой величины x к соответствующему изменению независимой переменной q при переходе от одного установившегося состояния к другому.

Пусть величины q и x в первом установившемся режиме (рис. 7, а) имеют значения q' и x' , а во втором — q'' и x'' соответственно. Тогда с учетом обозначений $\Delta q = q'' - q'$ и $\Delta x = x'' - x'$ получим

$$k_c = - \frac{\Delta x}{\Delta q}. \quad (1,5)$$

Коэффициент статизма положителен, если при возрастании q уменьшается x . Одновременному возрастанию (убыванию) величин

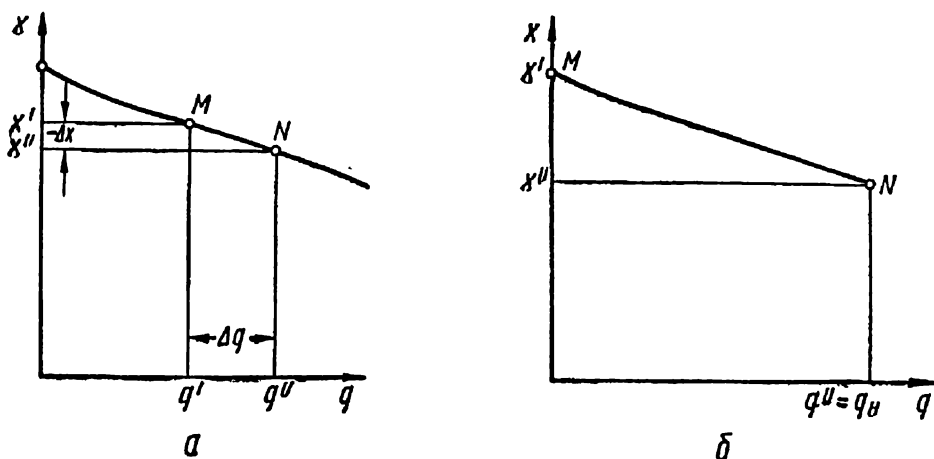


Рис. 7. Характеристики регулирования:
M и N — точки, соответствующие рассматриваемым установившимся режимам.

q и x (что на практике случается реже) соответствует отрицательный коэффициент статизма.

В относительных единицах коэффициент статизма k_{c*} выражается зависимостью

$$k_{c*} = - \frac{\Delta x_*}{\Delta q_*}, \quad (1,5a)$$

где Δq_* и Δx_* — изменения величин q и x в относительных единицах:

$$\Delta q_* = \frac{\Delta q}{q_H}; \quad \Delta x_* = \frac{\Delta x}{x_H};$$

q_H и x_H — номинальные или другие характерные значения величин q и x .

Только для прямолинейной характеристики регулирования коэффициент статизма не зависит от величин q' и q'' , т. е. от того, для каких установившихся режимов он подсчитан. При криво-

линейной характеристике регулирования представляет интерес коэффициент статизма в данной точке характеристики, вычисленный для бесконечно малой величины Δq и характеризующий соотношение между малыми изменениями величин x и q вблизи данной точки характеристики,

$$k_c = - \frac{dx}{dq}, \quad (1,6)$$

или в относительных единицах

$$k_{c*} = - \frac{dx_*}{dq_*}, \quad (1,6a)$$

где q_* и x_* — относительные величины,

$$q_* = \frac{q}{q_n}; \quad x_* = \frac{x}{x_n}.$$

Степень неравномерности. Коэффициент статизма (в относительных единицах), соответствующий полному изменению возмущающего воздействия q от нуля до номинальной величины q_n , называется коэффициентом или степенью неравномерности.

При вычислении степени неравномерности $k_{нр}$ (рис. 7, б)

$$\Delta q_* = \frac{q'' - q'}{q_n} = \frac{q_n - 0}{q_n} = 1;$$

$$\Delta x_* = \frac{x'' - x'}{x_n}.$$

Отсюда

$$k_{нр} = \frac{x' - x''}{x_n}, \quad (1,7)$$

где x' и x'' — установившиеся значения регулируемой величины, соответствующие нулевому и номинальному значениям возмущающего воздействия q .

Следовательно, степень неравномерности равна относительному уменьшению установившегося значения регулируемой величины при изменении возмущающего воздействия q от нуля до номинального значения.

Статические и астатические характеристики регулирования. Характеристика регулирования называется статической, если при изменениях возмущающего воздействия q установившееся значение регулируемой величины x также изменяется, и астатиче-

ской — если установившееся значение регулируемой величины x остается постоянным.

Статическая характеристика регулирования изображается кривой или наклонной прямой, а астатическая — прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 8)*. Статические характеристики регулирования обычно не имеют точек минимума или максимума: по мере возрастания q они поднимаются или снижаются. Падающей характеристике 3 соответствуют положительные коэффициенты статизма, поднимающейся характеристике 1 — отрицательные коэффициенты статизма и астатической характеристике регулирования 2 — нулевой коэффициент статизма.

В соответствии с видом характеристик регулирования различают статическое и астатическое регулирование, статические и астатические регуляторы.

Нечувствительность регулирования. В некоторых элементах систем регулирования под влиянием трения, воздушных зазоров между деталями, гистерезиса и других факторов зависимость между входной и выходной величинами в установившемся режиме может оказаться неоднозначной: одному и тому же значению выходной величины могут соответствовать различные значения входной величины, лежащие в определенных пределах. При этом появляется нечувствительность регулирования, выражающаяся в некоторой неопределенности установившихся значений регулируемой величины для заданных возмущающих воздействий на систему.

При постоянных значениях возмущающих воздействий установившиеся значения x регулируемой величины могут находиться в интервале

$$\Delta x_{нч} = x_{\max} - x_{\min}.$$

Для количественной оценки нечувствительности регулирования вводится понятие о степени нечувствительности регулирования ϵ , под которой подразумевают относительную величину интервала возможных изменений установившихся значений регули-

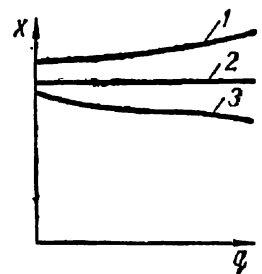


Рис. 8. Характеристики регулирования:

1 — $k_c < 0$; 2 — $k_c = 0$; 3 — $k_c > 0$.

* Сложившиеся исторически термины — *статическая* и *астатическая характеристики* — определяют не различные состояния САР (оба вида характеристик выражают соотношения для состояний равновесия, т. е. для статических состояний), а различные виды характеристик регулирования.

руемой величины при заданных значениях возмущающих воздействий

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_{нч}}{x_{ср}}, \quad (1,8)$$

где

$$x_{ср} = \frac{x_{max} + x_{min}}{2}.$$

Если регулируемая величина x зависит от возмущающего воздействия q , то соотношения между этими величинами выражаются не линией (рис. 7 и 8), а полосой (рис. 9), называемой зоной нечувствительности. Когда ширина зоны нечувствительности ничтожно мала, то система не имеет зоны нечувствительности.

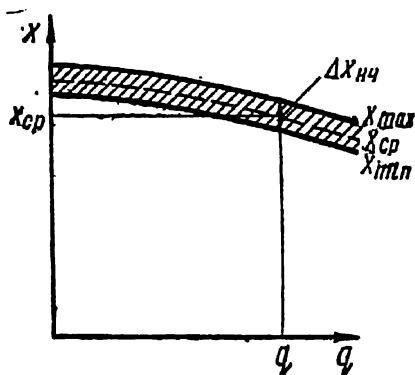


Рис. 9. Характеристика регулирования с учетом нечувствительности.

§ 3. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

Первые автоматические регуляторы промышленного назначения. Автоматические регуляторы применяются в промышленных установках очень давно. В 1588 г. был описан регулятор скорости вращения мельничного жернова. В 1763 г. выдающийся представитель русской технической мысли И. И. Ползунов изобрел поплавковый регулятор уровня воды для парового котла. В 1784 г. английский механик Джеймс Уатт изобрел центробежный регулятор скорости вращения вала машины. В дальнейшем центробежные регуляторы начали широко применяться. Такие регуляторы применяются очень часто в энергосистемах для регулирования паровых и гидравлических турбин.

Центробежные регуляторы реагируют на значения регулируемой величины — скорости вращения. Поэтому САР, в которых они используются, относятся к системам регулирования по отклонению регулируемой величины*.

Рассмотрим принцип действия и свойства некоторых видов центробежных регуляторов скорости вращения.

* В некоторых случаях начинают применять также и комбинированные САР скорости с центробежными регуляторами, реагирующими на скорость вращения и нагрузку двигателя.

Регулятор скорости вращения прямого действия. Принципиальная схема САР показана на рис. 10, а. Регулируемым объектом является двигатель D (например, паровая или гидравлическая турбина), скорость вращения которого регулируется центробежным регулятором. Наиболее значительное возмущающее воздействие на двигатель создает нагрузка H , потребляющая механическую энергию. Регулирующий элемент объекта условно изображен в виде задвижки 7, от положения которой зависит количество энергоносителя (например, пара или воды), поступающего в двигатель. У паровых турбин функции задвижки выполняют регулирующие клапаны, у гидротурбин — направляющий аппарат.

Основной частью регулятора является устройство, называемое центробежным маятником, состоящее из грузов 3, муфты 2, кольца 1, пружины 5, системы рычагов и оси регулятора 6, которая связана с валом двигателя посредством редуктора 8.

Вместе с осью центробежного маятника вращаются все его элементы, кроме кольца, к которому на шарнире прикреплен конец A рычага ABB . При помощи этого рычага центробежный маятник воздействует на задвижку.

Центробежные силы, действующие на грузы и рычаги центробежного маятника при его вращении, стремятся переместить муфту 2 вверх. Эти силы уравниваются весом грузов, рычагов и муфты, а также силой давления пружины 5 на муфту. Положение грузов 3, рычагов и муфты 2 зависит от скорости вращения оси центробежного маятника. Чем больше скорость, тем сильнее действуют центробежные силы и тем выше положение муфты, при котором все приложенные к ней силы находятся в равновесии.

Если муфта находится ниже (выше) положения равновесия, соответствующего данной скорости вращения оси центробежного маятника, то равнодействующая приложенных к ней сил направлена вверх (вниз). Вследствие инерции деталей САР, приходящих в движение при осевом перемещении муфты, последняя не устанавливается мгновенно в положение равновесия, а начинает

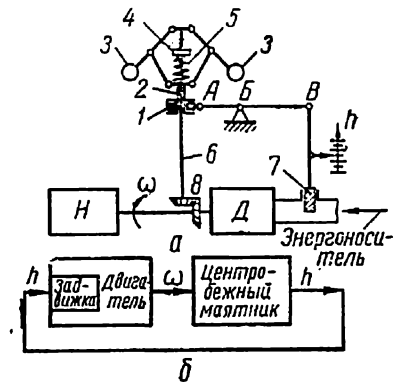


Рис. 10. Система регулирования скорости вращения центробежным регулятором прямого действия.

колебаться относительно этого положения *. Но под влиянием сил трения, действующих на муфту и сцепленные с нею части САР, колебания центробежного маятника быстро затухают.

Изменения возмущающего воздействия на объект регулирования со стороны нагрузки происходит при включениях, отключениях или изменениях условий работы потребителей механической энергии. Количественно возмущающее воздействие на объект регулирования оценивается величиной тормозящего механического момента M_n , с которым нагрузка действует на вал двигателя **

Предположим, что установившийся режим работы системы будет нарушен вследствие возрастания момента нагрузки M_n . В результате этого понизятся скорость вращения ω вала двигателя и пропорциональная ей скорость вращения оси центробежного маятника. Муфта 2 регулятора с кольцом 1 переместится вниз, рычаг ABV повернется против часовой стрелки, задвижка 7 поднимется, и количество поступающего в двигатель энергоносителя увеличится. Процесс регулирования закончится после того, как возросшая величина развиваемого двигателем вращающего момента уравнивает тормозящий момент нагрузки. Таким образом, вследствие действия регулятора, увеличивающего впуск энергоносителя, скорость вращения двигателя восстановится до нового установившегося значения, близкого к предыдущему.

Задающее устройство, воздействующее на регулятор скорости, будем называть механизмом изменения скорости вращения (МИС). Для изменения скорости двигателя МИС смещает вдоль оси центробежного маятника упор 4, фиксирующий положение верхнего конца пружины (на рис. 10 МИС не показан). Задающим воздействием можно считать расстояние упора от нижней точки пружины. Чтобы повысить скорость вращения, которую поддерживает регулятор при данной величине момента нагрузки, МИС должен переместить упор 4 вниз. При этом пружина 5 сожмется, сила ее давления на муфту 2 возрастет, вследствие чего регулятор придет в действие, и новое состояние равновесия САР наступит уже при более значительной скорости вращения, чем до изменения положения упора.

Элементная схема системы изображена на рис. 10, б. Двигатель является регулируемым объектом, а задвижка — регулирующим органом. Угловая скорость ω вала двигателя, заданное

* Движение муфты напоминает колебания маятника. Отсюда наименование — центробежный маятник.

** Для простоты рассуждений предполагаем, что момент нагрузки не зависит от скорости вращения двигателя.

значение которой поддерживается при регулировании, представляет собой регулируемую величину. Возмущающие воздействия на схеме не показаны.

Изменения регулируемой величины воспринимаются центробежным маятником, являющимся измерительным элементом регулятора. Так как центробежный маятник соединен рычагами с задвижкой, то он одновременно выполняет функции исполнительного элемента.

Создаваемое центробежным маятником регулирующее воздействие выражается некоторой координатой h (рис. 10, а), характеризующей положение задвижки, а также рычага $АВВ$ и муфты 2.

Характеристика регулирования 2 для рассматриваемой системы, выражающая зависимость установившегося значения скорости вращения ω от момента M_n нагрузки двигателя, показана на рис. 11. После возрастания момента нагрузки регулятор увеличивает впуск энергоносителя. Поэтому в новом состоянии равновесия задвижка будет расположена выше, чем до изменения нагрузки, а скорость вращения двигателя соответственно понизится. Для нормальных режимов работы характеристику регулирования обычно можно представить прямой линией.

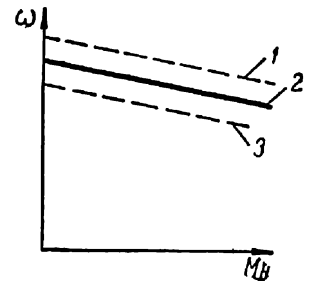


Рис. 11. Характеристики регулирования скорости вращения центробежным регулятором прямого действия.

Таким образом, регулирование в системе (рис. 10) осуществляется по статической характеристике с положительным статизмом. Наклон характеристики, а следовательно, и величина коэффициента статизма зависят от конструктивных данных регулятора. При перемещении упора пружины вниз характеристика регулирования смещается вверх (характеристика 1 на рис. 11) и — наоборот (характеристика 3 на рис. 11).

Рассматриваемые регуляторы не могут создать значительного усилия для изменения положения регулирующего элемента (задвижки). Поэтому трение в задвижке заметно влияет на действие САР, и регулирование происходит со значительной зоной нечувствительности. Поэтому регуляторы скорости прямого действия можно применять только для регулирования двигателей относительно небольшой мощности, в которых не требуется большое усилие для перестановки регулирующего элемента. Кроме того, применение этих регуляторов ограничивается тем, что в некоторых случаях (в особенности при необходимости регулирования скорости

с малым статизмом) они не обеспечивают устойчивости и достаточно быстрого протекания переходных процессов в системе.

Регулятор скорости вращения непрямого действия без обратной связи. Принципиальная схема САР (рис. 12, а) содержит, кроме элементов системы прямого регулирования (рис. 10, а), гидравлический усилитель, состоящий из золотника 5 и гидравлического серводвигателя 6. В состоянии равновесия поршни золотника 5 полностью закрывают верхнее и нижнее окна (вырезы в стенке цилиндра золотника), от которых отходят маслопроводы M_1 и M_2 , соединяющие золотник с верхней и нижней полостями цилиндра гидравлического серводвигателя.

Если вследствие возрастания нагрузки угловая скорость ω уменьшается, то грузы 2 центробежного маятника вместе с муфтой 1 перемещаются вниз под действием силы тяжести и пружины 4, закрепленной упором 3. Одновременно опускаются поршни золотника 5, связанные штоком с точкой B рычага ABV . Масло, поступающее под давлением в среднюю полость золотника, проходит через частично или полностью открывшееся нижнее окно и маслопровод M_1 в нижнюю полость серводвигателя 6, вызывая перемещение его поршня вверх. При этом из верхней полости серводвигателя 6 через маслопровод M_2 , верхнее окно и верхнюю полость золотника 5 масло идет на слив. Вместе с поршнем гидравлического серводвигателя поднимается задвижка 7, при этом увеличивается впуск энергоносителя, вследствие чего скорость вращения двигателя возрастает, поднимаются муфта центробежного маятника и поршни золотника.

Если САР устойчива, то процесс регулирования закончится установлением нового состояния равновесия, в котором окна золотника вновь будут закрыты поршнями, задвижка остановится на более высоком уровне, а угловая скорость ω достигнет установившегося значения.

После снижения нагрузки устойчивая САР перейдет в новое состояние равновесия, в котором задвижка остановится на более низком уровне.

В рассматриваемой системе механическую работу по перемещению задвижки выполняет гидравлический серводвигатель, использующий для этого энергию, полученную от маслонапорной установки, а центробежный маятник выполняет относительно небольшую работу по перемещению поршней золотника.

Элементная схема системы (рис. 12, б) отличается от ранее рассмотренной (рис. 10, б) введением в замкнутую цепь воздействий исполнительного функционального элемента в виде гидрав-

лического усилителя. На элементной схеме принято, что собственно золотник, его шток и рычаг $АВВ$ составляют единый элемент САР, условно называемый золотником. Воздействие

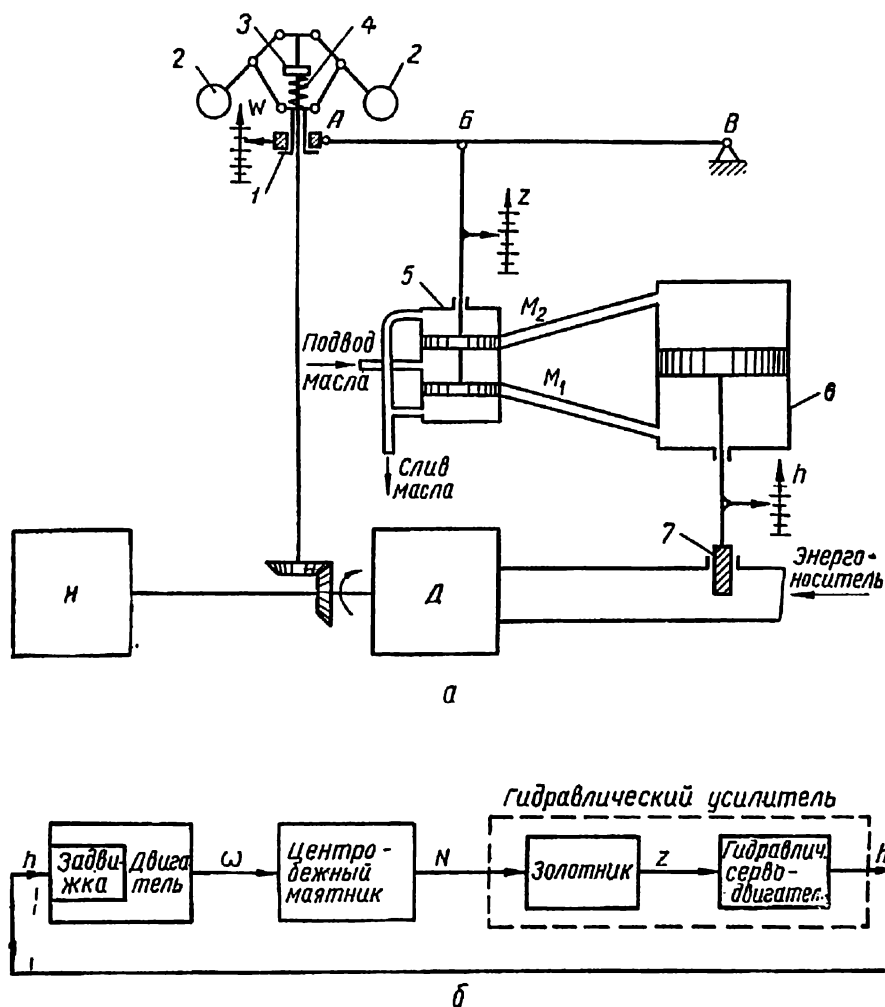


Рис. 12. Система регулирования скорости центробежным регулятором непрямого действия без обратной связи.

центробежного маятника на золотник можно выразить координатой ω , характеризующей положение муфты. Воздействие золотника на гидравлический серводвигатель зависит от степени открытия окон золотника и выражается координатой z . Гидравлический серводвигатель создает регулирующее воздействие h на регулирующий элемент объекта — задвижку.

Равновесие САР возможно лишь при таком положении поршней золотника, когда каждый из них полностью закрывает соответствующее окно золотника, поскольку только в этом случае поршень гидравлического серводвигателя будет неподвижен. Этому положению поршней золотника соответствует определенное положение муфты центробежного маятника (рис. 12, а) и, следовательно, определенное установившееся значение скорости вращения двигателя ω , одинаковое для всех значений момента нагрузки M_n .

Таким образом, характеристика регулирования оказывается астатической (рис. 13). При изменении задающего воздействия со стороны МИС, соответствующем перемещению упора пружины вниз, астатическая характеристика регулирования смещается вверх и наоборот (штриховые прямые на рис. 13).

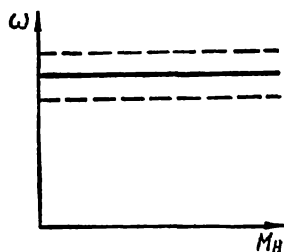


Рис. 13. Характеристика регулирования скорости центробежным регулятором непрямого действия без обратной связи.

Устойчивость САР. Каждому значению момента нагрузки M_n соответствует определенное состояние равновесия системы, в котором скорость ω вращения двигателя равна заданной постоянной величине ω_3 , а задвижка находится в таком положении, при котором вращающий момент двигателя M_d равен моменту нагрузки M_n . Но наличие таких теоретически возможных состояний равновесия не означает еще, что САР устойчива.

В процессе движения САР скорость вращения двигателя изменяется, причем угловое ускорение пропорционально избыточному моменту

$$M_{изб} = M_d - M_n.$$

Примем, что момент нагрузки M_n и вращающий момент двигателя M_d не зависят от скорости вращения ω .

Допустим, что система находилась в состоянии равновесия при некотором значении момента нагрузки M_{n1} , после чего нагрузка изменилась и момент нагрузки скачкообразно возрос до нового значения M_{n2} (рис. 14, а). Моментам M_{n1} и M_{n2} соответствуют состояния равновесия с заданным значением ω_3 скорости двигателя и положениями задвижки, характеризующимися соответственно координатами h_1 и h_2 , причем $h_2 > h_1$.

Рассмотрим упрощенно протекание процесса регулирования после возрастания момента нагрузки. При этом будем считать, что колебания центробежного маятника быстро затухают и их влиянием на движение системы можно пренебречь.

При возрастании нагрузки понижается скорость двигателя (участок 1—2 кривой на рис. 14, б), в результате чего под действием регулятора поднимается задвижка и возрастает вращающий момент M_d . Для некоторого значения регулирующего воздействия $h = h_2$ избыточный момент $M_{изб}$ становится равным нулю, и снижение скорости ω прекращается (точка 2).

Регулятор после этого продолжает перемещать задвижку вверх, вследствие чего избыточный момент становится положительным и возрастает по величине, а скорость вращения двигателя начинает повышаться (участок 2—3), достигает заданной величины ω_3 (точка 3) и продолжает расти (участок 3—4). Муфта центробежного маятника, реагирующего с небольшим запаздыванием на изменения угловой скорости ω , перемещает вверх поршни золотника, которые перекрывают окна после того, как скорость ω достигнет заданной величины ω_3 . В момент полного закрытия окон золотника скорость движения поршня гидравлического серводвигателя обратится в нуль, а координата h будет максимальной. Затем муфта центробежного маятника и поршни золотника поднимутся выше положения, соответствующего равновесию системы, в верхнюю полость гидравлического серводвигателя будет нагнетаться масло, и задвижка станет опускаться. Когда задвижка вновь достигнет положения, соответствующего равновесию системы ($h = h_2$), скорость ω будет максимальной (точка 4).

Таким образом, в рассматриваемой системе произошло перерегулирование, выразившееся в том, что регулируемая величина ω не только поднялась до заданного значения, но и превысила его.

Далее задвижка опустится ниже положения равновесия и скорость вращения будет убывать, достигнув вторично заданного значения ω_3 , и вновь станет от него отклоняться. Произойдет новое перерегулирование, на этот раз в сторону понижения скорости вращения двигателя.

Таким образом, в результате перерегулирований движение системы имеет колебательный характер. Можно доказать, что колебания скорости вращения являются расходящимися, т. е. их

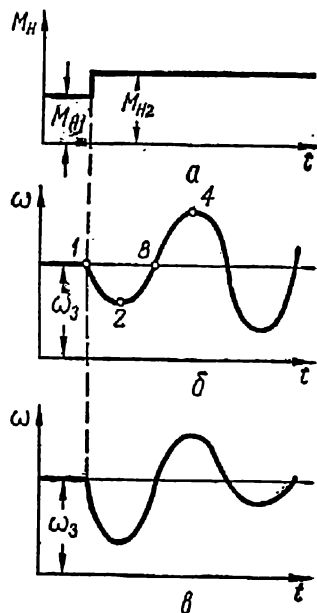


Рис. 14. Графики, характеризующие протекание процесса регулирования скорости вращения регулятором непрямого действия без обратной связи.

амплитуда возрастает во времени (рис. 14, б)*. Следовательно, при независимости моментов M_d и M_n от скорости вращения ω система неустойчива.

При иных свойствах двигателя с присоединенной к нему нагрузкой (в широко распространенном на практике случае, когда с ростом скорости вращения избыточный момент $M_{изб} = M_d - M_n$ уменьшается) колебания могут оказаться затухающими (рис. 14, в), что будет свидетельствовать об устойчивости системы. Но все же и в этом случае перерегулирования обычно бывают довольно значительными, вследствие чего колебания, возникшие в САР, затухают слишком медленно. Поэтому рассмотренная система не применяется на практике. Для достижения устойчивости системы и достаточно быстрого затухания возникших в процессе регулирования колебаний скорости вращения применяют регуляторы непрямого действия с обратными связями.

Регулятор скорости непрямого действия с жесткой обратной связью. Принципиальная и элементная схема САР показаны на рис. 15 (обозначения аналогичны обозначениям на рис. 12). В отличие от регулятора непрямого действия без обратной связи (рис. 12) у регулятора с жесткой обратной связью точка B рычага не закреплена неподвижно, а связана с поршнем гидравлического серводвигателя. Поэтому, кроме координаты ω , характеризующей положение муфты 1 центробежного маятника, на золотник 5 дополнительно воздействует величина h , характеризующая положение поршня серводвигателя 6, что отражено в элементной схеме (рис. 15, б).

Таким образом, при помощи штока, связывающего поршень серводвигателя с точкой B рычага ABV , выходная величина h гидравлического усилителя воздействует на его вход. Следовательно, шток представляет собой простейшее устройство обратной связи гидравлического усилителя.

В состояниях равновесия большему значению момента нагрузки соответствует более высокое положение задвижки 7, а также поршня серводвигателя 6 и точки B рычага ABV (рис. 15, а). В то же время положение точки B рычага во всех состояниях равновесия остается одинаковым и соответствует полному закрытию окон золотника.

После возрастания момента нагрузки M_n точка B рычага в состоянии равновесия займет более высокое положение B' , и ры-

* При полной безынерционности центробежного маятника колебания оказываются незатухающими.

чаг ABB' примет новое положение $A'B'B'$ (рис. 15, а). Следовательно, новое положение A' точки A будет ниже предыдущего,

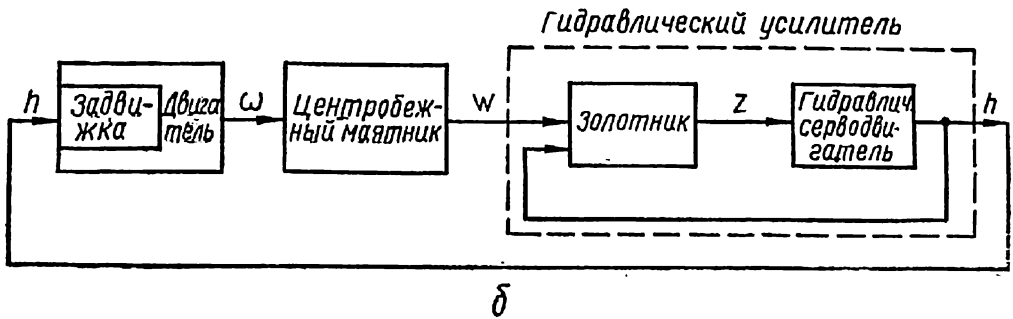
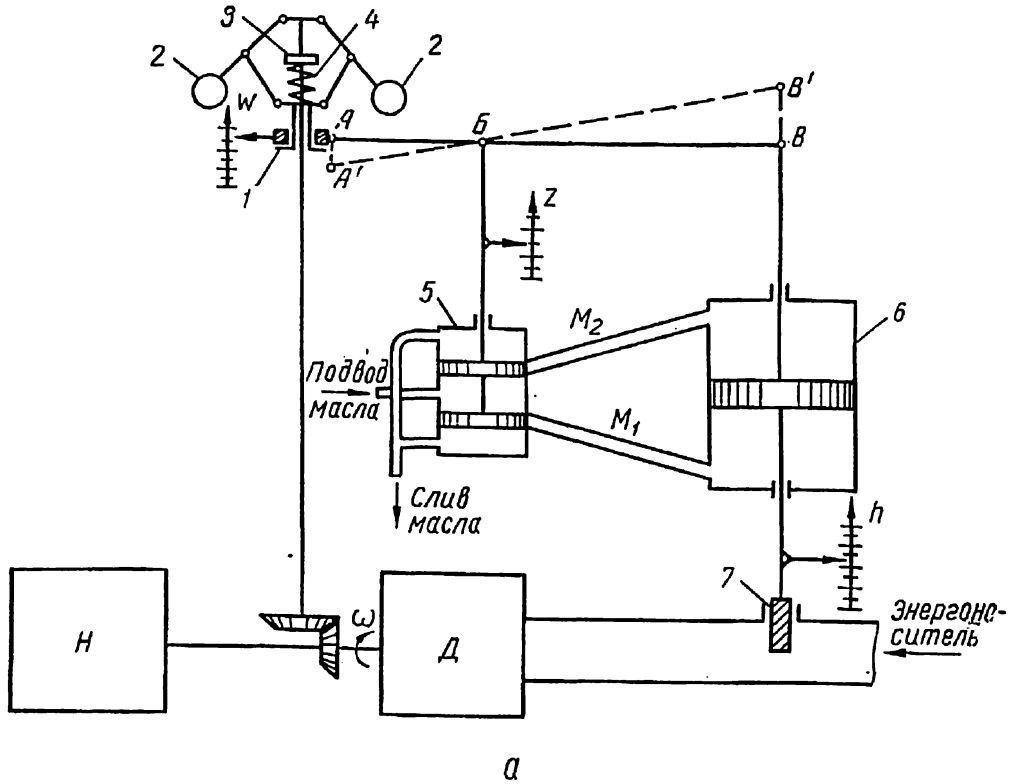


Рис. 15. Система регулирования скорости центробежным регулятором с жесткой обратной связью.

что возможно лишь при сниженном (по сравнению с предыдущим) установившемся значении скорости вращения. Поскольку возрастанию момента M_H соответствует снижение установившихся значений угловой скорости ω , характеристика регулирования оказы-

вается статической, как и в случае использования регулятора скорости прямого действия (рис. 11).

Пусть при определенной величине момента нагрузки M_{H1} САР находится в состоянии равновесия. В этом режиме скорость вращения двигателя имеет значение ω_{31} , а рычаг $АВВ$ занимает положение, показанное на рис. 15, a . Если момент нагрузки возрастет до величины M_{H2} , то скорость вращения двигателя начнет уменьшаться. При этом устойчивая САР должна перейти в новое состояние равновесия с новым установившимся значением ω_{32} скорости вращения двигателя, причем $\omega_{32} < \omega_{31}$ (рис. 16).

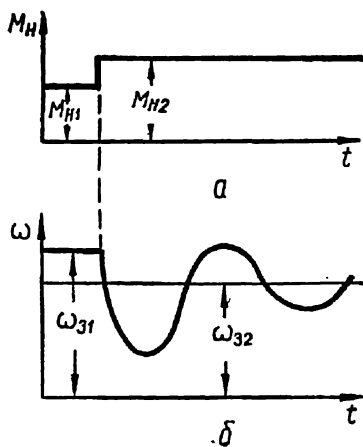


Рис. 16. Графики, характеризующие протекание процесса регулирования скорости вращения регулятором непрямого действия с жесткой обратной связью:
 $a - M_H = f(t)$; $б - \omega = f(t)$.

Вследствие снижения скорости ω вращения двигателя муфта регулятора и поршни золотника опускаются. По маслопроводу M_1 масло проходит в нижнюю полость гидравлического серводвигателя, в результате чего поднимаются вверх его поршень и задвижка 7 (рис. 15, a). Вместе с поршнем серводвигателя поднимается вверх точка B рычага $АВВ$.

Таким образом, поршни золотника при наличии обратной связи поднимаются выше, чем при ее отсутствии. Следовательно, окна золотника перекроются раньше, чем муфта центробежного маятника и точка A рычага вернуться

в положение, которое они занимали до изменения момента нагрузки. Продолжая подниматься, поршни золотника пройдут через нейтральное положение, и регулятор начнет перемещать задвижку вниз еще до того, как скорость вращения ω успеет возрасти до прежнего установившегося значения ω_{31} . Более раннее изменение направления движения поршня гидравлического серводвигателя, чем у регулятора без обратной связи, замедляет в процессе регулирования рост скорости вращения двигателя и уменьшает ее максимальное значение.

Когда скорость ω после достижения максимального значения начинает уменьшаться, поршни золотника находятся выше нейтрального положения, а поршень гидравлического серводвигателя перемещается вниз. Вместе с ним опускается точка B рычага, вследствие чего окна золотника закрываются раньше, чем это

могло произойти при неподвижном положении точки B . При этом скорость понижается более плавно и на меньшую величину.

Таким образом, при наличии обратной связи быстрее затухают колебания, возникающие в процессе регулирования. Это свойство обратной связи используется для достижения устойчивости и повышения качества процесса регулирования.

Рассматриваемая обратная связь, с одной стороны, является жесткой, поскольку ее воздействие $x_{o.c}$ на гидравлический усилитель в каждый момент времени равно выходной величине этого элемента $x_{вых} = h$. С другой стороны, эта обратная связь является отрицательной. Действительно, если равновесие гидравлического усилителя нарушается вследствие изменения его входной величины ω , то обратная связь создает на входе гидравлического усилителя дополнительное воздействие противоположного знака, уменьшающее изменение выходной величины h .

На практике широко используются различные варианты конструктивных исполнений рассматриваемых регуляторов. Для автоматического регулирования скорости крупных двигателей можно применять центробежные регуляторы, снабженные последовательно включенными двумя или более гидравлическими усилителями с жесткими обратными связями.

Необходимо учитывать, что, применяя жесткую обратную связь, можно улучшить процесс регулирования, но в то же время установившиеся значения скорости вращения будут зависеть от нагрузки. В некоторых случаях (например, при регулировании скорости вращения гидротурбин) устойчивости и благоприятного протекания процесса регулирования можно добиться только за счет очень сильного действия жесткой обратной связи. В этом случае степень неравномерности может достигнуть значительной величины (нескольких десятых долей единицы), что свидетельствует о недопустимо больших колебаниях скорости при изменениях нагрузки. В таких случаях для осуществления статического регулирования с достаточно малым статизмом и даже для астатического регулирования применяют изодромные центробежные регуляторы [9, 15, 51], имеющие гибкую обратную связь или жесткую и гибкую обратные связи одновременно.

§ 4. ЗВЕНЬЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Движение системы представляет собой совокупность движений отдельных ее взаимодействующих элементов. В процессе движения элемента системы изменяются физические величины, характеризующие его состояние, — координаты элемента.

Движение каждого элемента САР описывается математически уравнением элемента, выражающим зависимость выходной величины от входной (или от нескольких входных величин). Характер изменения выходной величины при заданном законе изменения входной величины зависит от динамических свойств элемента, определяющихся его уравнением.

Элемент САР, рассматриваемый с точки зрения его динамических свойств, называется звеном. Однотипные звенья, имеющие аналогичные динамические свойства, описываются однотипными уравнениями. При введении понятия звена упрощается рассмотрение динамики автоматического регулирования, так как динамические свойства САР, определяющие закономерности их движения, зависят от динамических свойств элементов, а не от их назначения и конструктивного выполнения. Элементы систем, отличающиеся один от другого по назначению и по конструкции, могут иметь одинаковые динамические свойства, т. е. могут оказаться однотипными звеньями. Даже относительно сложные САР обычно удается представить состоящими из небольшого количества типов звеньев.

Устойчивые и неустойчивые звенья. Предположим, что после соответствующих изменений входная величина звена приобрела постоянное значение. Если после этого движение звена заканчивается установлением состояния равновесия, то звено называется устойчивым. Если же при постоянном значении входной величины состояние равновесия не наступает, звено называется неустойчивым.

Линейные и нелинейные звенья и системы регулирования. Звенья, движение которых описывается линейными алгебраическими уравнениями или линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, называются линейными. Звенья, движение которых описывается нелинейными уравнениями, называются соответственно нелинейными.

САР, состоящие только из линейных звеньев, относят к линейным, а содержащие хотя бы одно нелинейное звено — к нелинейным.

Звеньев, движение которых с абсолютной точностью описывалось бы линейными уравнениями, в действительности не существует хотя бы потому, что параметры, определяющие свойства элемента, фактически в какой-то степени зависят от режима его работы. Например, активное сопротивление металлического проводника зависит от протекающего по нему тока; геометрические размеры детали механизма зависят от действующих на нее сил и т. д. Нелинейность некоторых реальных элементов САР усугубляется такими явлениями, как сухое трение, гистерезис и т. п.

Нелинейностью многих элементов можно пренебречь, считать их практически линейными звеньями. В некоторых случаях реальные звенья могут иметь значительную нелинейность, однако для ограниченного диапазона режимов работы описывающие их уравнения можно с практически достаточной точностью заменить линейными уравнениями, называемыми уравнениями линейного приближения. Подобная замена называется линеаризацией. Идеализированное звено, свойства которого в точности описываются уравнением линейного приближения, называют линейной моделью реального звена. САР, у которой нелинейные звенья заменены их линейными моделями, называется линейной моделью реальной САР.

С помощью линеаризации многие вопросы динамики нелинейных систем регулирования можно решить относительно простыми методами, разработанными для линейных систем. Однако линеаризация допустима только в том случае, если нелинейность реального звена не влияет существенно на работу системы. Если нелинейность звена является свойством, принципиально необходимым для выполнения возложенных на него функций, то линеаризация его уравнения невозможна.

Исследование линейных систем автоматического регулирования (а следовательно, и линейных моделей нелинейных систем) является предметом линейной теории автоматического регулирования. Элементы линейной теории автоматического регулирования рассматриваются в основном в первых двух главах этой книги.

Начала отсчета координат звеньев. При составлении уравнений звеньев в качестве координат целесообразно принимать неполные значения x физических величин, характеризующих состояние звена, а их отклонения Δx от некоторых избранных значений x_0 , которые могут наблюдаться в заранее избранном равновесном режиме САР. Это означает, что координата отсчитывается не от нулевого, а от избранного значения физической величины. Связь между рассмотренными величинами выражается зависимостью

$$x = x_0 + \Delta x. \quad (1,9)$$

Выражение координат в относительных единицах. Во многих случаях отклонения физических величин от избранных значений выражают в относительных единицах, относя их к базисной величине, в качестве которой выбирается номинальное или другое характерное значение физической величины. Обозначив базисную

величину через $x_{\text{баз}}$, для относительного отклонения χ получим соотношение

$$\chi = \frac{\Delta x}{x_{\text{баз}}}. \quad (1,10)$$

Величины x , Δx и χ характеризуют состояние звена и поэтому являются его координатами. Но значения этих величин в различной форме содержат одну и ту же информацию о состоянии звена. Координаты x , Δx и χ не являются независимыми, так как взаимно связаны уравнениями (1,9) и (1,10).

Линеаризация уравнений звеньев. В зависимости от характера и условий той или иной практической задачи динамики автоматического регулирования для ее решения можно использовать различные способы линеаризации нелинейных уравнений звеньев системы.

Важное значение имеет исследование движения системы в условиях очень малых отклонений координат от значений, соответствующих некоторому состоянию равновесия. В этом случае состояние равновесия рассматривается, как избранный равновесный режим, и линеаризация выполняется разложением входящих в уравнение нелинейных функций в ряд Тейлора в окрестности избранных значений физических величин и последующим отбрасыванием нелинейных членов разложения.

Пусть, например, в линеаризуемое уравнение звена входит нелинейная функция $F(x)$ физической величины x . Будем рассматривать значения функции $F(x)$ при малых (по абсолютной величине) отклонениях Δx переменной x от избранного значения x_0 . Величина Δx должна войти в линеаризованное уравнение как одна из координат звена.

Если функция $F(x)$ во всех точках некоторого интервала, внутри которого находится точка $x = x_0$, имеет непрерывные производные до $(n + 1)$ -го порядка включительно, то внутри этого интервала функцию с помощью формулы Тейлора можно представить в виде

$$F(x) = F(x_0 + \Delta x) = F(x_0) + \Delta x F'(x_0) + \frac{(\Delta x)^2}{2!} F''(x_0) + \\ + \frac{(\Delta x)^n}{n!} F^{(n)}(x_0) + R_n,$$

где R_n — остаточный член разложения Тейлора.

Ограничиваясь первыми двумя членами разложения, получаем

$$F(x) = F(x_0) + F'(x_0) \Delta x + R_1.$$

Если координата Δx бесконечно мала, то остаточный член R_1 является бесконечно малой [величиной более высокого порядка, и им можно пренебречь]. Следовательно, для бесконечно малых значений координаты Δx

$$F(x) = F(x_0) + F'(x_0)\Delta x. \quad (1,11)$$

Заметим, что $F(x_0)$ и $F'(x_0)$ — постоянные величины. При конечных значениях координаты Δx уравнение (1,11) является приближенным, но точность его возрастает по мере уменьшения абсолютных значений величины Δx .

Аналогично поступают с входящими в уравнение звена нелинейными функциями нескольких физических величин. Например, функцию $\Phi(x, y)$ в соответствии с формулой Тейлора для функций от нескольких независимых переменных при бесконечно малых отклонениях Δx и Δy величин x и y от избранных значений x_0 и y_0 можно выразить уравнением

$$\Phi(x, y) = \Phi(x_0, y_0) + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} \Delta x + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} \Delta y. \quad (1,12)$$

В правой части этого уравнения не вписаны бесконечно малые члены более высокого порядка, чем члены, содержащие Δx или Δy в первой степени. В случае малых (по абсолютной величине), но конечных значений координат Δx и Δy зависимость (1,12) является приближенной.

При линейризации в уравнение звена вместо нелинейных функций $F(x)$ и $\Phi(x, y)$ вводятся линейные функции координат Δx и Δy в соответствии с уравнениями (1,11) и (1,12).

Если функции $F(x)$ и $\Phi(x, y)$ заданы графически с помощью кривой или семейства кривых, то значения полной производной

$$F'(x_0) = \left(\frac{dF}{dx}\right)_{x=x_0}$$

и частных производных

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}}; \quad \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}},$$

соответствующие избранным значениям независимых переменных, можно определить графически, проведя касательные к графикам функций $F(x)$, $[\Phi(x, y)]_{y=y_0}$ и $[\Phi(x, y)]_{x=x_0}$ в точках, соответствующих избранному режиму.

Звенья направленного действия. Звено, не воздействующее непосредственно на предыдущее, называется звеном направленного

действия. В отличие от него звено ненаправленного действия непосредственно воздействует не только на последующее, но и на предыдущее звено.

При подключении звена направленного действия к выходу предыдущего звена не изменяется закон движения последнего. Иначе говоря, если движение некоторого звена, рассматриваемого отдельно от других звеньев, описывается определенным уравнением, то после присоединения к его выходу последующего звена направленного действия уравнение остается в силе.

Если система регулирования состоит только из звеньев направленного действия, то процессы, происходящие в каждом звене, будут зависеть только от воздействий со стороны предыдущего звена (или нескольких предыдущих звеньев) и от тех возмущающих воздействий, которые приложены непосредственно к данному звену. В этом случае уравнения отдельных звеньев, рассматриваемых изолированно от других звеньев, составляют систему уравнений, описывающих движение САР.

Большинство звеньев реальных систем автоматического регулирования практически можно отнести к звеньям направленного действия. Если не все звенья системы обладают направленностью действия, при составлении уравнений необходимо учитывать обратные воздействия звеньев ненаправленного действия на предыдущие звенья.

Предположим, что к выходу звена направленного действия присоединено звено ненаправленного действия. Движение предыдущего звена будет зависеть от обратного воздействия со стороны последующего. Поэтому уравнение предыдущего звена, взятого отдельно от последующего звена ненаправленного действия, не будет справедливым при работе звеньев в системе. Но оба звена в совокупности можно рассматривать, как одно сложное звено направленного действия. Уравнение этого сложного звена можно получить, рассматривая совместное действие двух составляющих его звеньев с учетом воздействия последующего звена на предыдущее.

§ 5. УРАВНЕНИЯ ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

Составим уравнения звеньев системы регулирования скорости центробежным регулятором с жесткой обратной связью (рис. 15).

Уравнение двигателя. Входной величиной для двигателя является координата h , характеризующая положение регулирующего элемента и выражающая воздействие на двигатель со стороны

гидравлического серводвигателя. От величины h зависит количество энергоносителя, поступающего в двигатель. Выберем направление отсчета координаты h так, чтобы ее возрастанию соответствовало увеличение впуска энергоносителя.

Выходной величиной является угловая скорость ω вращения вала двигателя, воздействующая на центробежный маятник регулятора скорости.

Регулирующий элемент двигателя не влияет существенно на движение поршня гидравлического серводвигателя. Поэтому двигатель можно рассматривать, как звено направленного действия.

Исходное уравнение двигателя можно записать в виде

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_n,$$

где J — приведенный к валу машины момент инерции движущихся частей;

M_d — движущий момент, приложенный к валу;

M_n — момент сопротивления на валу двигателя, созданный полезной нагрузкой и силами трения (момент нагрузки).

Будем выводить уравнение двигателя для случая постоянства возмущающего воздействия со стороны нагрузки, т. е. будем предполагать, что определяющиеся внешними для САР факторами состав и условия работы потребителей механической энергии не изменяются. Однако момент нагрузки M_n при этом нельзя считать постоянным, так как в общем случае он является функцией скорости ω вращения вала двигателя, изменяющейся в процессе движения системы:

$$M_n = M_n(\omega).$$

Движущий момент M_d зависит от координаты h , определяющей открытие регулирующего элемента, а также от угловой скорости ω :

$$M_d = M_d(h, \omega).$$

Теперь уравнение двигателя примет вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_d(h, \omega) - M_n(\omega), \quad (1,13)$$

причем M_d и M_n в общем случае являются нелинейными функциями координат. Будем рассматривать малые отклонения координат h и ω от их значений h_0 и ω_0 в избранном равновесном режиме. Для линеаризации уравнения (1,13) разлагаем расположенные в правой части нелинейные функции в ряд Тейлора и отбра-

сываем все нелинейные члены разложения, при этом получаем

$$M_{\text{д}}(h, \omega) = M_{\text{д}0} + \left(\frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial h}\right)_0 \Delta h + \left(\frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial \omega}\right)_0 \Delta \omega; \quad (1,14)$$

$$M_{\text{н}}(\omega) = M_{\text{н}0} + \left(\frac{dM_{\text{н}}}{d\omega}\right)_0 \Delta \omega, \quad (1,15)$$

где

$$\Delta h = h - h_0; \quad (1,16)$$

$$\Delta \omega = \omega - \omega_0; \quad (1,17)$$

$$M_{\text{д}0} = M_{\text{д}}(h_0, \omega_0); \quad M_{\text{н}0} = M_{\text{н}}(\omega_0);$$

$$\left(\frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial h}\right)_0 = \left(\frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial h}\right)_{\substack{h=h_0 \\ \omega=\omega_0}};$$

$$\left(\frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial \omega}\right)_0 = \left(\frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial \omega}\right)_{\substack{h=h_0 \\ \omega=\omega_0}};$$

$$\left(\frac{dM_{\text{н}}}{d\omega}\right)_0 = \left(\frac{dM_{\text{н}}}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_0}.$$

Воспользовавшись зависимостями (1,13)—(1,15) и учитывая равенство

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\Delta\omega}{dt},$$

вытекающее из соотношения (1,17), получаем линейризованное уравнение двигателя

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} + \left(\frac{dM_{\text{н}}}{d\omega} - \frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial \omega}\right)_0 \Delta \omega = M_{\text{д}0} - M_{\text{н}0} + \left(\frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial h}\right)_0 \Delta h, \quad (1,18)$$

где

$$\left(\frac{dM_{\text{н}}}{d\omega} - \frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial \omega}\right)_0 = \left(\frac{dM_{\text{н}}}{d\omega} - \frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial \omega}\right)_{\substack{h=h_0 \\ \omega=\omega_0}}.$$

Линейризованное уравнение (1,18) составлено относительно отклонений Δh и $\Delta \omega$ физических величин на входе и на выходе двигателя от избранных значений.

В избранном состоянии равновесия движущий момент уравновешивается моментом нагрузки, т. е.

$$M_{\text{д}0} - M_{\text{н}0} = 0. \quad (1,19)$$

Это же соотношение можно получить из уравнения (1,18), в котором для избранного равновесного режима нужно принять

$$\Delta h = 0; \quad \Delta \omega = 0; \quad \frac{d\Delta\omega}{dt} = 0.$$

С учетом выражения (1,19) линеаризованное уравнение двигателя можно записать в более простом виде

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} + \left(\frac{dM_H}{d\omega} - \frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right)_0 \Delta\omega = \left(\frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0 \Delta h. \quad (1,20)$$

Поскольку J , $\left(\frac{dM_H}{d\omega} - \frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right)_0$ и $\left(\frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0$ являются постоянными величинами, уравнение двигателя (1,20) представляет собой линейное дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами.

Уравнение в относительных единицах с безразмерными членами. Свойства элементов САР легко оценивать и сопоставлять, если выразить координаты в относительных единицах и применить уравнение с безразмерными членами (безразмерное уравнение).

Для получения уравнения двигателя в относительных единицах в качестве базисной величины перемещения регулирующего элемента выберем его перемещение h_{\max} , при переходе двигателя от режима холостого хода к номинальному и в качестве базисной величины угловой скорости — номинальную скорость вращения ω_H вала двигателя. Относительное отклонение от избранных значений перемещения регулирующего элемента и угловой скорости вала двигателя обозначим соответственно μ и φ , причем

$$\varphi = \frac{\Delta\omega}{\omega_H}; \quad (1,21)$$

$$\mu = \frac{\Delta h}{h_{\max}}. \quad (1,22)$$

Воспользовавшись выражениями (1,21) и (1,22), из уравнения (1,20) получаем

$$J\omega_H\varphi' + \left(\frac{dM_H}{d\omega} - \frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right)_0 \omega_H\varphi = \left(\frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0 h_{\max}\mu.$$

Координаты μ и φ являются безразмерными величинами, но каждый член полученного уравнения имеет размерность момента. Чтобы перейти к уравнению с безразмерными членами, левую и правую части этого уравнения необходимо разделить на любую величину, также имеющую размерность момента. Разделив обе части уравнения на коэффициент при входной координате μ , получим

$$T_1\varphi' + k_1\varphi = \mu, \quad (1,23)$$

где

$$T_1 = \frac{J\omega_H}{h_{\max} \left(\frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0}; \quad (1,24)$$

$$k_1 = \frac{\omega_H \left(\frac{dM_H}{d\omega} - \frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right)_0}{h_{\max} \left(\frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0}. \quad (1,25)$$

Аналогично, выбирая в качестве делителя коэффициент при входной координате φ , получим другую часто используемую форму уравнения двигателя

$$T_2\varphi' + \varphi = k_2\mu, \quad (1,26)$$

где

$$T_2 = \frac{T_1}{k_1} = \frac{J}{\left(\frac{dM_H}{d\omega} - \frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right)_0}; \quad (1,27)$$

$$k_2 = \frac{1}{k_1} = \frac{h_{\max} \left(\frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0}{\omega_H \left(\frac{dM_H}{d\omega} - \frac{\partial M_D}{\partial \omega} \right)_0}. \quad (1,28)$$

Из уравнений (1,23) и (1,26) видно, что k_1 и k_2 — безразмерные коэффициенты, а T_1 и T_2 имеют размерность времени.

Уравнение центробежного маятника. Выходная величина двигателя — угловая скорость вращения вала ω — является входной центробежного маятника.

Воздействие центробежного маятника на последующий элемент системы — золотник — определяется величиной ω , характеризующей положение муфты регулятора и являющейся для центробежного маятника выходной величиной. Принимаем, что при перемещении муфты вверх координата ω возрастает.

Поскольку массы деталей центробежного маятника и момент трения, возникающий при его вращении, относительно малы, можно считать, что маятник не воздействует непосредственно на закон движения двигателя. Следовательно, центробежный маятник является звеном направленного действия.

Рассмотрим механическую систему, состоящую из муфты и движущихся с нею деталей центробежного маятника (система рычагов, грузы и т. д.). Внешними силами для этой системы являются центробежные силы, сила пружины, силы веса и тре-

ния. Заменяем их приведенными силами, приложенными к муфте, и направленными вдоль оси центробежного маятника. Массы элементов рассматриваемой механической системы также приведем к муфте регулятора.

При определенном положении муфты каждая из центробежных сил, действующих на грузы и рычаги центробежного маятника, пропорциональна квадрату угловой скорости оси регулятора или пропорциональной ей угловой скорости вала двигателя. Отсюда следует, что равнодействующая A всех центробежных сил, приведенных к муфте регулятора, также пропорциональна квадрату угловой скорости вала двигателя:

$$A = C\omega^2,$$

где C — коэффициент пропорциональности.

При изменении положения муфты меняются и расстояния вращающихся масс от оси регулятора, вследствие чего изменяются центробежные силы. Одновременно изменяются коэффициенты приведения центробежных сил к муфте регулятора. В результате этого коэффициент C оказывается функцией координаты ω положения муфты:

$$C = C(\omega).$$

Из двух последних уравнений видно, что сила A представляет собой нелинейную функцию координат ω и ω

$$A = A(\omega, \omega). \quad (1,29)$$

Заметим, что сила A всегда направлена вверх. Но перемещению муфты регулятора вверх препятствуют сила пружины и силы веса деталей центробежного маятника. Равнодействующую приведенных к муфте сил пружины и веса, направленную вниз, обозначим буквой B . Так как коэффициенты приведения этих сил зависят от положения муфты, то сила B должна зависеть (в общем случае — нелинейно) от координаты ω :

$$B = B(\omega). \quad (1,30)$$

К действующим на муфту и связанные с нею части центробежного маятника силам трения относятся силы сухого трения, а также вязкого трения, вызванного движением деталей в масле и воздухе. Силы трения действуют в направлении, противоположном перемещению деталей, причем силы сухого трения можно считать постоянными по величине, а силы вязкого трения — пропорциональными скорости движения. При точном учете действия

сил сухого трения нельзя заменить центробежный маятник его линейной моделью, т. е. в этом случае усложняется исследование системы автоматического регулирования. Обычно для упрощения анализа все силы трения в центробежном маятнике условно представляют в виде сил вязкого трения, действующих на муфту регулятора.

Направление результирующей силы вязкого трения $F_{\text{тр}}$ зависит от направления движения муфты. Будем считать силу $F_{\text{тр}}$ положительной, если она направлена вверх. Учитывая, что по величине она пропорциональна скорости $\frac{d\omega}{dt}$ перемещения муфты регулятора, имеем

$$F_{\text{тр}} = -D \frac{d\omega}{dt}, \quad (1,31)$$

где D — коэффициент пропорциональности.

Знак минус в уравнении (1,31) означает, что при движении муфты вверх ($\frac{d\omega}{dt} > 0$) сила трения направлена вниз ($F_{\text{тр}} < 0$) и наоборот.

Уравнение движения муфты с учетом зависимостей (1,29)—(1,31) записывается в виде

$$M \frac{d^2\omega}{dt^2} = A(\omega, \omega) - B(\omega) - D \frac{d\omega}{dt}, \quad (1,32)$$

где M — масса муфты совместно с приведенными массами движущихся с нею деталей.

Масса M зависит от положения муфты. Но, чтобы придать уравнению (1,32) более простой вид, будем считать величину M постоянным коэффициентом, имеющим определенное усредненное значение. Предположение о постоянстве суммы приведенных масс не вносит в практические расчеты существенных погрешностей.

Уравнение (1,32) — нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка. Для его линеаризации нелинейные функции $A(\omega, \omega)$ и $B(\omega)$ необходимо заменить линейными. Рассматриваем малые отклонения координат от избранных значений и осуществляем линеаризацию заменой нелинейных функций линейными членами разложения Тейлора.

Здесь и в дальнейшем будем пользоваться теми же символами, что и при выводе уравнения двигателя: значение функции в избранном равновесном режиме будем обозначать индексом 0, отклонение координаты от избранного значения — символом Δ .

Воспользовавшись зависимостями

$$A(\omega, w) = A_0 + \left(\frac{\partial A}{\partial \omega}\right)_0 \Delta\omega + \left(\frac{\partial A}{\partial w}\right)_0 \Delta w;$$

$$B(w) = B_0 + \left(\frac{dB}{dw}\right)_0 \Delta w$$

и учитывая равенство

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d\Delta w}{dt}, \quad \frac{d^2w}{dt^2} = \frac{d^2\Delta w}{dt^2},$$

получаем из уравнения (1,32) линеаризованное уравнение центробежного маятника

$$M \frac{d^2\Delta w}{dt^2} = A_0 - B_0 + \left(\frac{\partial A}{\partial \omega}\right)_0 \Delta\omega - \left(\frac{dB}{dw} - \frac{\partial A}{\partial w}\right)_0 \Delta w - D \frac{d\Delta w}{dt}.$$

Приняв в этом выражении координаты $\Delta\omega$ и Δw и производные от координаты Δw для избранного равновесного режима равными нулю, получим уравнение

$$A_0 - B_0 = 0,$$

с учетом которого уравнение центробежного маятника можно записать в виде

$$M \frac{d^2\Delta w}{dt^2} + D \frac{d\Delta w}{dt} + \left(\frac{dB}{dw} - \frac{\partial A}{\partial w}\right)_0 \Delta w = \left(\frac{\partial A}{\partial \omega}\right)_0. \quad (1,33)$$

Найденное уравнение центробежного маятника представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. Уравнение составлено относительно выходной координаты Δw . Входная координата $\Delta\omega$ рассматривается, как независимая переменная.

Относительное отклонение от избранного значения угловой скорости определяется формулой (1,21). Выраженное в относительных единицах отклонение муфты от положения, занимаемого ею в избранном режиме, обозначим буквой η и определим зависимость

$$\eta = \frac{\Delta w}{w_{\max}}, \quad (1,34)$$

где w_{\max} — максимальный ход муфты, предусмотренный конструкцией регулятора.

С помощью уравнений (1,21), (1,33) и (1,34) можно легко получить уравнение центробежного маятника в относительных единицах с безразмерными членами

$$T_p^2 \eta'' + T_k \eta' + \delta \eta = \varphi, \quad (1,35)$$

где

$$T_p^2 = \frac{M\omega_{\max}}{\omega_n \left(\frac{\partial A}{\partial \omega} \right)_0}; \quad (1,36)$$

$$T_k = \frac{D\omega_{\max}}{\omega_n \left(\frac{\partial A}{\partial \omega} \right)_0}; \quad (1,37)$$

$$\delta = \frac{\omega_{\max} \left(\frac{dB}{d\omega} - \frac{\partial A}{\partial \omega} \right)_0}{\omega_n \left(\frac{\partial A}{\partial \omega} \right)_0}. \quad (1,38)$$

Рассматривая уравнение (1,35), легко убедиться, что коэффициент δ — безразмерный, а коэффициенты T_k и T_p^2 имеют соответственно размерности времени и квадрата времени.

Уравнение золотника должно описывать работу элемента САР, называемого на элементной схеме (рис. 15, б) золотником и содержащего, кроме собственно золотника, также шток и рычаг $АВВ$. На золотник воздействуют две входные величины: координата ω положения муфты регулятора и координата y положения точки $В$ рычага*. Выходной величиной является координата z , определяющая положение поршней золотника и, следовательно, характеризующая воздействие золотника на гидравлический серводвигатель. Будем полагать, что координата y возрастает при перемещении точки $В$ рычага $АВВ$ вниз, а координата z увеличивается при перемещении точки $В$ вверх. Ранее было принято, что положительному приращению координаты ω соответствует перемещение муфты (и, следовательно, точки $А$ рычага) снизу вверх.

Чтобы учесть влияние инерции движущихся частей золотника (поршней, штока, рычага $АВВ$) на движение муфты регулятора, массы этих частей можно привести к муфте регулятора и включить в сумму приведенных масс центробежного маятника M . Точно так же силы трения, действующие на движущиеся части золотника, можно учесть совместно с силами трения, приложенными к деталям центробежного маятника, соответствующим выбором коэффициента D в уравнении (1,33). Поскольку инерция

* В рассматриваемой САР (рис. 15) положение точки $В$ рычага определяется координатой h , характеризующей открытие регулирующего элемента двигателя. Координата y введена для удобства исследования динамики регулирования скорости (гл. 5).

золотника и трение в нем в этом случае учитываются уравнением центробежного маятника, следует условно считать, что золотник не имеет массы и работает без трения. Такой идеализированный золотник не влияет на движение муфты регулятора и является звеном направленного действия.

Возможные перемещения точек A , B и V рычага при работе регулятора малы по сравнению с длиной рычага. Поэтому, не допуская практически заметной погрешности, будем считать, что эти точки рычага движутся по параллельным прямым*.

На рис. 17 изображен рычаг ABV при наличии отклонений координат от избранных значений. Прямая $A_0B_0V_0$ изображает этот же рычаг в избранном равновесном режиме.

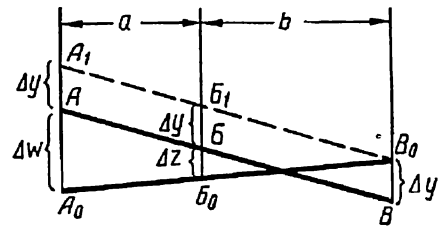


Рис. 17. Схематическое изображение положений рычага ABV .

Буквами a и b на рис. 17 обозначены длины плеч рычага AB и BV соответственно. Через точку V_0 проводим прямую $A_1B_1V_0$, параллельную прямой ABV . Из подобия треугольников $B_0V_0B_1$ и $A_0V_0A_1$ следует

$$\frac{\Delta z + \Delta y}{\Delta w + \Delta y} = \frac{b}{a + b},$$

откуда получаем уравнение золотника

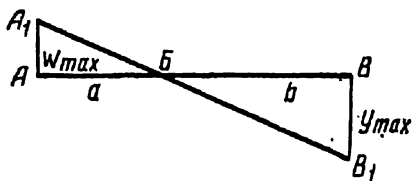
$$\Delta z = \frac{b}{a + b} \Delta w - \frac{a}{a + b} \Delta y. \quad (1,39)$$

Уравнение (1,39), в отличие от выведенных ранее уравнений других элементов,— алгебраическое линейное уравнение.

Для получения координаты Δw в относительных единицах при выводе уравнения центробежного маятника в качестве базисной величины был принят максимальный ход муфты w_{\max} . Обозначим через y_{\max} перемещение точки V рычага, соответствующую

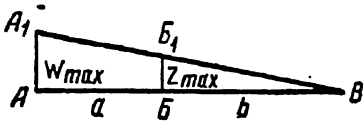
* В действительности, если точка A перемещается по прямой линии, то точки B и V движутся по криволинейным траекториям, так как движение рычага ABV в общем случае не является поступательным. Поэтому связь между точкой B рычага и штоком золотника, а также между точкой V рычага и штоком гидравлического серводвигателя в реальной конструкции должна осуществляться не непосредственно, а через стержни, присоединенные с помощью шарниров одним концом к штоку, а другим — к соответствующей точке рычага.

щее перемещению точки A на расстояние w_{\max} при закрепленной точке B . Аналогично через z_{\max} обозначим перемещение точки B при закрепленной точке A , если точка A проходит расстояние w_{\max} (рис. 18). Примем величины y_{\max} и z_{\max} в качестве базисных для выражения координат Δy и Δz в относительных единицах. Следовательно, к соотношению (1,34) добавляются соотношения



$$\xi = \frac{\Delta y}{y_{\max}}; \quad (1,40)$$

$$\sigma = \frac{\Delta z}{z_{\max}}, \quad (1,41)$$



в которых ξ и σ — относительные перемещения точек V и B рычага. Связь между величинами w_{\max} , y_{\max} , z_{\max} выражается уравнениями

Рис. 18. К определению величин y_{\max} и z_{\max} .

$$\frac{w_{\max}}{y_{\max}} = \frac{a}{b}; \quad \frac{w_{\max}}{z_{\max}} = \frac{a+b}{b},$$

из которых вытекает соотношение

$$bw_{\max} = ay_{\max} = (a+b)z_{\max}. \quad (4,42)$$

Переходя от уравнения (1,39) к уравнению золотника в относительных единицах, с помощью зависимостей (1,34), (1,40) — (1,42) получаем

$$\sigma = \eta - \xi. \quad (1,43)$$

Таким образом, в относительных единицах выходная величина золотника σ равна разности входных величин η и ξ .

Уравнение гидравлического серводвигателя. Для гидравлического серводвигателя входная величина — координата z положения поршней золотника и выходная величина — координата y положения поршня гидравлического серводвигателя. Выходная величина воздействует на двигатель, определяя положение его регулирующего элемента, и одновременно — на золотник. Последнее воздействие создается жесткой обратной связью регулятора.

Уравнение гидравлического серводвигателя должно отражать зависимость между положениями поршней золотника и серводвигателя. Установлено, что количество масла, протекающего за единицу времени через малое отверстие, можно считать пропорциональным площади отверстия и разности давлений по обе стороны отверстия. Напор масла, поступающего к золотнику от

маслонапорной установки, расходуется в основном на проведение масла через верхнее и нижнее окна золотника. Поэтому, считая давление подведенного к золотнику масла постоянным, можно принять, что переток масла от золотника к гидравлическому серводвигателю и обратно пропорционален площади отверстий в цилиндре золотника, открывшихся при смещении его поршней относительно нейтрального положения. Влиянием на скорость протекания масла силы, с которой действует на поршень гидравлического серводвигателя регулирующей элемент двигателя, и влиянием сил инерции пренебрегаем.

Рассмотрим случай, когда окно золотника имеет прямоугольную форму (рис. 19). В любом состоянии равновесия системы регулирования, в том числе и в избранном равновесном режиме, окна золотника полностью закрыты поршнем, торцовые поверхности которого находятся на уровне верхней и нижней сторон окна.

Допустим, что каждый из поршней золотника переместился на расстояние Δz относительно положения в равновесном режиме (рис. 19). Если буквой n обозначить ширину окна золотника, то площадь открывшегося в цилиндре отверстия будет равна $n\Delta z$. Этой площади пропорционален объем V_1 масла, проходящего через окно золотника за единицу времени,

$$V_1 = k_{\text{зол}} n \Delta z,$$

где $k_{\text{зол}}$ — коэффициент пропорциональности.

Считая масло несжимаемым, можно утверждать, что такой же объем масла поступает за единицу времени в верхнюю полость и вытекает из нижней полости гидравлического серводвигателя. За единицу времени поршень серводвигателя перемещается на расстояние $\frac{dy}{dt}$. Следовательно,

$$V_1 = S \frac{dy}{dt},$$

где S — площадь поперечного сечения внутреннего объема цилиндра гидравлического серводвигателя.

Приравнивая правые части двух последних зависимостей и учитывая соотношение

$$\frac{dy}{dt} = \frac{d\Delta y}{dt},$$

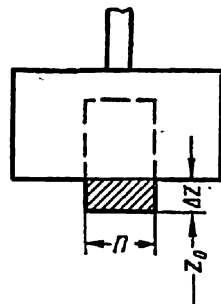


Рис. 19.
Поршень и окно золотника.

получаем уравнение гидравлического серводвигателя

$$S \frac{d\Delta y}{dt} = k_{\text{зол}} n \Delta z. \quad (1,44)$$

Воспользовавшись зависимостями (1,40) и (1,41), получим уравнение в относительных единицах с безразмерными членами

$$T_{1c} \xi' = \sigma, \quad (1,45)$$

в котором коэффициент

$$T_{1c} = \frac{S}{k_{\text{зол}} n} \frac{y_{\text{max}}}{z_{\text{max}}} \quad (1,46)$$

имеет размерность времени.

Если окна золотника имеют не прямоугольную форму, то уравнение (1,45) обычно удается использовать как приближенное.

Гидравлический серводвигатель воздействует на предыдущее звено САР (золотник) через элемент обратной связи (шток), связывающий поршень гидравлического серводвигателя с точкой *B* рычага *АВВ* (рис. 15, *а*). Поэтому гидравлический серводвигатель, как и другие рассмотренные звенья системы, следует считать звеном направленного действия.

Золотник, гидравлический серводвигатель и элемент обратной связи можно рассматривать, как одно сложное направленное звено — гидравлический усилитель. Исключив из уравнений (1,43) и (1,45) координату σ , получим уравнение гидравлического усилителя

$$T_{1c} \xi' + \xi = \eta, \quad (1,47)$$

выражающее зависимость его выходной координаты ξ от входной η .

§ 6. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ, ПЕРЕХОДНЫЕ ФУНКЦИИ И АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Операторная форма записи дифференциальных уравнений. В большинстве случаев линейные звенья систем регулирования состоят из элементов с сосредоточенными параметрами. Уравнение такого звена (или системы, состоящей из нескольких подобных звеньев) при одной входной величине в общем случае имеет вид

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n x_{\text{ВЫХ}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_{\text{ВЫХ}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x_{\text{ВЫХ}} = \\ = b_0 \frac{d^l x_{\text{ВХ}}}{dt^l} + b_1 \frac{d^{l-1} x_{\text{ВХ}}}{dt^{l-1}} + \dots + b_l x_{\text{ВХ}}, \end{aligned} \quad (1,48)$$

где $x_{\text{вых}}$ и $x_{\text{вх}}$ — соответственно входная и выходная величины, представляющие собой отклонения от избранных значений физических величин на входе и на выходе звена.

Свободный член в правой части уравнения (1,48) отсутствует, поскольку в избранном равновесном режиме величины $x_{\text{вх}}$, $x_{\text{вых}}$ и их производные равны нулю. Величины $x_{\text{вх}}$ и $x_{\text{вых}}$ в уравнении (1,48) являются функциями времени t :

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{вх}} &= x_{\text{вх}}(t); \\ x_{\text{вых}} &= x_{\text{вых}}(t). \end{aligned} \right\} \quad (1,49)$$

Уравнения (1,23), (1,26), (1,35), (1,45) и (1,47) представляют собой частные случаи уравнения (1,48).

Для упрощения записи, преобразования, исследования и решения дифференциальных уравнений в теории автоматического регулирования широко используются функциональные преобразования Лапласа или Лапласа — Карсона, с которыми читатель знаком из курсов высшей математики и теоретических основ электротехники. Будем пользоваться преобразованием Лапласа — Карсона функции $f(t)$ независимой переменной t в функцию $F(p)$ независимой переменной p согласно уравнению

$$F(p) = p \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt.$$

Функция $f(t)$ называется оригиналом, а $F(p)$ — его изображением. Соотношение между оригиналом и изображением будем обозначать знаком $\overset{\cdot}{\rightarrow}$ или $\overset{\cdot}{\leftarrow}$, направляя стрелку в сторону оригинала:

$$F(p) \overset{\cdot}{\rightarrow} f(t) \text{ или } f(t) \overset{\cdot}{\leftarrow} F(p).$$

Рассматривая левую и правую части дифференциального уравнения (1,48), как оригиналы, с помощью функционального преобразования Лапласа — Карсона можно получить их изображения. Уравнение, выражающее равенство изображений левой и правой частей дифференциального уравнения, представляет собой дифференциальное уравнение в операторной форме.

Составление уравнения в операторной форме. Для получения дифференциального уравнения в операторной форме воспользуемся правилом нахождения изображения производных функций. Если

$$f(t) \overset{\cdot}{\leftarrow} F(p),$$

то изображение k -й производной $f^{(k)}(t)$ функции $f(t)$ определяется зависимостью

$$f^{(k)}(t) \stackrel{\cdot}{\leftarrow} p^k F(p) - p^k f(0) - p^{k-1} f'(0) - \dots - p f^{(k-1)}(0). \quad (1,50)$$

При нулевых начальных значениях оригинала и его $k-1$ производных

$$\left. \begin{aligned} f(0) &= 0; \\ f'(0) &= 0; \\ \cdot & \\ \cdot & \\ f^{(k-1)}(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1,51)$$

изображение k -й производной выражается формулой

$$f^{(k)}(t) \stackrel{\cdot}{\leftarrow} p^k F(p). \quad (1,52)$$

Для решения дифференциального уравнения (1,48) должны быть известны начальные условия, т. е. значения функции $x_{\text{вых}}(t)$ и ее первых $(n-1)$ производных при определенном значении t , например, при $t=0$. Пусть известны нулевые начальные условия:

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{вых}}(0) &= 0; \\ x'_{\text{вых}}(0) &= 0; \\ \cdot & \\ \cdot & \\ x^{(n-1)}_{\text{вых}}(0) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1,53)$$

Кроме того, если правая часть дифференциального уравнения содержит производные от $x_{\text{вх}}(t)$, примем, что функция $x_{\text{вх}}(t)$ и ее $(l-1)$ производные имеют нулевые начальные значения:

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{вх}}(0) &= 0; \\ x'_{\text{вх}}(0) &= 0; \\ \cdot & \\ \cdot & \\ x^{(l-1)}_{\text{вх}}(0) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1,54)$$

Воспользовавшись зависимостью (1,52), уравнение (1,48) запишем в операторной форме для случая нулевых начальных условий*

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) x_{\text{вых}}(p) = (b_0 p^l + b_1 p^{l-1} + \dots + b_l) x_{\text{вх}}(p), \quad (1,55)$$

* Под нулевыми начальными условиями для дифференциального уравнения (1,48) будем подразумевать начальные условия (1,53) совместно с условиями (1,54).

где $x_{вх}(p)$ и $x_{вых}(p)$ — изображения функций $x_{вх}(t)$ и $x_{вых}(t)$ соответственно,

$$\begin{aligned} x_{вх}(p) &\overset{\cdot}{\rightarrow} x_{вх}(t); \\ x_{вых}(p) &\overset{\cdot}{\rightarrow} x_{вых}(t). \end{aligned}$$

Такая система записи изображений условна, так как функции $x_{вх}(t)$ и $x_{вх}(p)$ не являются одинаковыми функциями разных независимых переменных t и p , а представляют собой различные функции. Это же относится к функциям $x_{вых}(t)$ и $x_{вых}(p)$.

Обычно, записывая дифференциальное уравнение в операторной форме, для изображений функций времени применяют точно те же обозначения, что и для их оригиналов. Например, уравнение (1,55) обычно записывают в виде

$$\begin{aligned} (a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) x_{вых} = (b_0 p^l + \\ + b_1 p^{l-1} + \dots + b_l) x_{вх}, \end{aligned} \quad (1,55a)$$

причем подразумевается, что

$$\left. \begin{aligned} x_{вх} &= x_{вх}(p); \\ x_{вых} &= x_{вых}(p). \end{aligned} \right\} \quad (1,56)$$

В то же время в соответствии с тождествами (1,49) в дифференциальном уравнении (1,48) символы $x_{вх}$ и $x_{вых}$ означают функции времени $x_{вх}(t)$ и $x_{вых}(t)$.

Сравнивая уравнения (1,48) и (1,55), видим, что при нулевых начальных условиях дифференциальное уравнение в операторной форме формально можно получить из исходного дифференциального уравнения, если символ $\frac{d}{dt}$ заменить на p , $\frac{d^2}{dt^2}$ — на p^2 и т. д. Таким образом, уравнения звеньев

$$\begin{aligned} T_1 \varphi' + k_1 \varphi &= \mu; \\ T_p^2 \eta'' + T_k \eta' + \delta \eta &= \varphi; \\ \sigma &= \eta - \xi; \\ T_{1c} \xi' &= \sigma \end{aligned}$$

в операторной форме примут вид

$$\begin{aligned} (T_1 p + k_1) \varphi &= \mu; \\ (T_p^2 p^2 + T_k p + \delta) \eta &= \varphi; \\ \sigma &= \eta - \xi; \\ T_{1c} p \xi &= \sigma. \end{aligned}$$

Если условия (1,53) и (1,54) или некоторые из них не выполняются, то при составлении дифференциального уравнения в операторной форме вместо зависимости (1,52) необходимо использовать (1,50). При этом усложняются процесс составления уравнения в операторной форме и его окончательный вид.

В некоторых случаях при составлении дифференциального уравнения звена или системы в операторной форме представляет интерес вид исходного дифференциального уравнения, а не его решение с учетом начальных условий. В таких случаях уравнение в операторной форме записывается в простейшем виде, соответствующем нулевым начальным условиям. Если же начальные условия не являются нулевыми и при этом необходимо проинтегрировать дифференциальное уравнение, условно записанное в операторной форме в простейшем виде, то предварительно в соответствии с зависимостью (1,50) его необходимо дополнить членами, учитывающими начальные значения функций $x_{вх}(t)$, $x_{вых}(t)$ и их производных.

Операторные полиномы дифференциального уравнения. Дифференциальное уравнение (1,55) линейного звена или системы в операторной форме при нулевых начальных условиях можно записать в виде

$$d(p) x_{вых}(p) \stackrel{\sim}{=} m(p) x_{вх}(p), \quad (1,57)$$

или

$$d(p) x_{вых} = m(p) x_{вх}, \quad (1,57a)$$

где

$$d(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n; \quad (1,58)$$

$$m(p) = b_0 p^l + b_1 p^{l-1} + \dots + b_{l-1} p + b_l. \quad (1,59)$$

Полиномы $d(p)$ и $m(p)$ от p являются операторными полиномами соответственно левой и правой частей уравнения (1,57).

Если операторный полином $m(p)$ правой части уравнения не содержит членов, пропорциональных p в первой, второй и более высоких степенях (коэффициенты b_0, b_1, \dots, b_{l-1} равны нулю), т. е. представляет собой постоянную величину

$$m(p) = b,$$

то звено называется простым. Если же $m(p)$ — полином, содержащий члены с p в степенях выше нулевой, то звено называется дифференцирующим. Таким образом, правая часть уравнения простого звена не содержит производные входной величины, а дифференцирующего — содержит.

Большинство встречающихся на практике звеньев САР относятся к простым. Уравнение простого звена имеет вид

$$d(p)x_{\text{вых}} = bx_{\text{вх}} \quad (1,60)$$

Передаточная функция $W(p)$ звена (системы) — отношение изображения выходной координаты к изображению входной координаты при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} \quad (1,61)$$

Из уравнения (1,57) следует, что

$$W(p) = \frac{m(p)}{d(p)}, \quad (1,62)$$

т. е. передаточная функция равна отношению операторных полиномов правой и левой частей дифференциального уравнения.

Коэффициент усиления k_y звена (системы) — отношение выходной координаты к входной в состоянии равновесия (если оно возможно при постоянном значении входной величины).

Соотношения установившегося режима можно получить из уравнения (1,48), в котором все производные входной и выходной величины принять равными нулю, поскольку в установившемся режиме координаты не изменяются. Из сопоставления уравнения (1,48) с уравнением (1,55) следует, что формально эти же соотношения можно получить из уравнения (1,55) при $p = 0$:

$$d(0)x_{\text{вых}\infty} = m(0)x_{\text{вх}\infty},$$

где $x_{\text{вх}\infty}$ и $x_{\text{вых}\infty}$ — установившиеся значения входной и выходной координат.

После подстановки $p = 0$ в уравнение (1,55) величины $x_{\text{вх}}$ и $x_{\text{вых}}$ будут представлять собой не изображения координат, а установившиеся значения $x_{\text{вх}\infty}$ и $x_{\text{вых}\infty}$ координат $x_{\text{вх}}(t)$ и $x_{\text{вых}}(t)$. Из последней зависимости и равенства (1,62) находим

$$k_y = \frac{x_{\text{вых}\infty}}{x_{\text{вх}\infty}} = W(0). \quad (1,63)$$

Таким образом, коэффициент усиления звена (системы) численно равен передаточной функции при нулевом значении независимой переменной*.

* Зависимость (1,63) можно также получить из соотношения (1,61) при помощи теоремы операционного исчисления о конечном значении оригинала, согласно которой $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = F(0)$.

Переходная функция. Для оценки и сопоставления динамических свойств звеньев (систем) часто рассматривают движение находившегося ранее в состоянии равновесия звена (системы) после скачкообразного изменения входной величины. При этом входную и выходную величины целесообразно отсчитывать от их значений в избранном равновесном режиме, выбрав в качестве последнего режим, существовавший до изменения входной величины.

Если считать, что время отсчитывается от момента изменения входной величины $x_{вх}$, которая после этого приобретает постоянное значение $x_{вх.с}$, то график входной величины будет иметь вид, показанный на рис. 20. Выходная величина при $t < 0$ также будет иметь нулевое значение, а при $t > 0$ будет изменяться по некоторой кривой, ход которой определяется динамическими свойствами звена (системы). Зависимость выходной величины от времени при

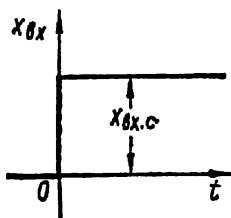


Рис. 20. График изменения входной величины во времени, используемый для оценки динамических свойств звена (системы).

$$x_{вх.с} = 1$$

называется переходной функцией звена (системы). Переходная функция характеризует переходный процесс после скачкообразного изменения входной величины.

Связь между переходной и передаточной функциями простого звена. Пусть входная величина $x_{вх} = x_{вх}(t)$ простого звена, движение которого описывается дифференциальным уравнением n -го порядка

$$a_0 \frac{d^n x_{вых}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_{вых}}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx_{вых}}{dt} + a_n x_{вых} = b x_{вх}, \quad (1,64)$$

соответствующим уравнению (1,60) в операторной форме, скачкообразно изменяется во времени в соответствии с рис. 20. В этом случае выходная величина пропорциональна переходной функции или равна ей (при $x_{вх.с} = 1$).

Если $t < 0$, выходная величина $x_{вых}(t) = 0$, при этом равны нулю и все ее производные. В момент времени $t = 0$ входная величина $x_{вх}$ изменяется скачкообразно. Однако выходная величина $x_{вых}$ скачкообразно измениться не может, так как в точке разрыва непрерывности этой функции времени предпоследний член левой части уравнения (содержащий производную $\frac{dx_{вых}}{dt}$) приобрел бы бесконечно большое значение, в то время как правая

часть дифференциального уравнения является конечной величиной. Следовательно,

$$x_{\text{вых}}(0) = 0.$$

Точно так же не может измениться скачкообразно и первая производная от выходной величины $\frac{dx_{\text{вых}}}{dt}$, поскольку при этом третий член левой части дифференциального уравнения от конца приобрел бы бесконечно большое значение. Таким образом, $x'_{\text{вых}}(0) = 0$. Аналогично получим

$$x''_{\text{вых}}(0) = 0;$$

$$x^{n-1}_{\text{вых}}(0) = 0.$$

Следовательно, при решении дифференциального уравнения (1,64) для нахождения переходной функции простого звена начальные условия оказываются нулевыми.

Обозначим переходную функцию через $x_{\text{п}}(t)$, а ее изображение — через $x_{\text{п}}(p)$. Изображение переходной функции, найденное из соотношения (1,61),

$$x_{\text{п}}(p) = W(p) x_{\text{вх}}(p).$$

Входная величина изменяется согласно графику, приведенному на рис. 20, причем $x_{\text{вх.с}} = 1$. В соответствии с теоремой операционного исчисления, изображение входной величины в этом случае

$$x_{\text{вх}}(p) = 1.$$

Следовательно,

$$x_{\text{п}}(p) = W(p),$$

откуда

$$x_{\text{п}}(t) \stackrel{\cdot}{\leftarrow} W(p). \quad (1,65)$$

Таким образом, передаточная функция $W(p)$ простого звена является изображением переходной функции $x_{\text{п}}(t)$. Поэтому переходную функцию простого звена можно найти по передаточной и наоборот.

Сказанное относится не только к простым звеньям, но и к системам, движение которых описывается дифференциальным уравнением (1,64).

Гармоническое воздействие на звено (систему). Для решения некоторых задач динамики автоматического регулирования применяются методы, основанные на рассмотрении стационарных режимов звеньев или систем при изменении входной величины по гармоническому закону.

Пусть входная величина звена (системы), описываемого уравнения (1,48), изменяется по синусоидальному закону с круговой частотой ω :

$$x_{\text{вх}} = A_{\text{вх}} \sin \omega t. \quad (1,66)$$

Применяя символический метод, можно написать

$$x_{\text{вх}} = A_{\text{вх}} e^{j\omega t}. \quad (1,67)$$

Гармонически изменяющаяся величина $x_{\text{вх}}$ в соответствии с зависимостью (1,67) условно представлена в виде вращающегося вектора

$$A_{\text{вх}} e^{j\omega t} = A_{\text{вх}} (\cos \omega t + j \sin \omega t),$$

где $j = \sqrt{-1}$.

Действительное значение величины $x_{\text{вх}}$ для любого момента времени t представляет собой проекцию вращающегося вектора на мнимую ось, равную $A_{\text{вх}} \sin \omega t$.

Решение дифференциального уравнения (1,48) представляет собой сумму общего решения однородного уравнения и частного решения уравнения с правой частью. Найдем одно из частных решений дифференциального уравнения (1,48) в виде степенной функции

$$x_{\text{вых}} = A_{\text{вых}} e^{j(\omega t + \psi)}, \quad (1,68)$$

где $A_{\text{вых}}$ — амплитуда;

ψ — начальная фаза гармонических колебаний выходной величины.

Нахождение частного решения в таком виде сводится к определению величин $A_{\text{вых}}$ и ψ , исходя из того, что частное решение (1,68) должно удовлетворять уравнению (1,48). Подставив в левую и правую части уравнения (1,48) выражения (1,67) и (1,68), выполнив необходимые преобразования и воспользовавшись соотношением (1,62), получим

$$A_{\text{вых}} e^{j\psi} = W(j\omega) A_{\text{вх}}. \quad (1,69)$$

Если $A_{\text{вых}}$ и ψ определить из зависимости (1,69), то величина $x_{\text{вых}}$, выраженная равенством (1,68), будет удовлетворять уравнению (1,48). Следовательно, выражение

$$A_{\text{вых}} e^{j(\omega t + \psi)}$$

представляет собой одно из частных решений дифференциального уравнения (1,48).

Зависимость (1,68) представляет собой символическое выражение выходной величины. Действительное значение выходной величины можно записать в виде

$$x_{\text{вых}} = A_{\text{вых}} \sin(\omega t + \psi). \quad (1,70)$$

В частном решении (1,70) дифференциального уравнения (1,48) выходная величина $x_{\text{вых}}$ выражена как гармоническая функция времени t . Следовательно, полученное частное решение соответствует стационарному режиму звена (системы). Колебания выходной величины, определяющиеся этим частным решением, как известно, называются вынужденными.

Стационарный режим гармонических колебаний устойчивых звеньев (систем) можно исследовать экспериментально. Для этого на вход звена (системы) необходимо подать изменяющуюся по гармоническому закону величину $x_{\text{вх}}$. Можно показать, что после этого через достаточный промежуток времени в устойчивом звене (системе) заканчивается переходный процесс и устанавливается стационарный режим. Гармонические колебания величин $x_{\text{вх}}$ и $x_{\text{вых}}$ в этом режиме наблюдают или записывают с помощью осциллографа или специального устройства.

Комплексная частотная функция. Входящая в уравнение (1,69) комплексная величина $W(j\omega)$, полученная из передаточной функции $W(p)$ при подстановке $p = j\omega$, является функцией частоты ω и называется комплексной частотной функцией звена (системы). Как видно из зависимости (1,69),

$$W(j\omega) = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}} e^{j\psi}, \quad (1,71)$$

откуда следует, что

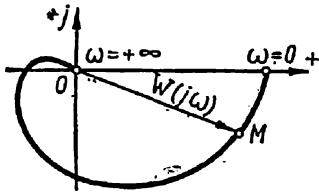
$$\begin{aligned} \text{mod } W(j\omega) &= \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}}; \\ \text{arg } W(j\omega) &= \psi. \end{aligned}$$

Таким образом, модуль комплексной частотной функции равен отношению амплитуд выходной и входной величин, а аргумент — фазовому сдвигу выходной величины относительно входной величины в стационарном режиме при гармоническом законе изменения входной величины.

Амплитудно-фазовая характеристика. Для определенного значения частоты ω комплексную частотную функцию $W(j\omega)$ можно представить на комплексной плоскости в виде вектора \overline{OM} , проекции которого на вещественную и мнимую оси соответственно равны

вещественной и мнимой частям функции $W(j\omega)$ (рис. 21). Геометрическое место конца M вектора \overline{OM} (т. е. годограф вектора \overline{OM}), изображающего комплексную частотную функцию $W(j\omega)$, при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ называется амплитудно-фазовой характеристикой звена (системы).

Амплитудно-фазовые характеристики непосредственно отражают свойства звена (системы), проявляющиеся в стационарных режимах при гармонических изменениях входной величины. Но эти характеристики можно использовать для исследования нестационарных процессов в системах регулирования.



§ 7. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ

Классификация линейных звеньев с сосредоточенными параметрами

Рис. 21. Амплитудно-фазовая характеристика звена (системы).

Подразделение звеньев по виду правой части дифференциального уравнения. Прежде всего звенья можно классифицировать по количеству входных величин. Движение линейного звена с одной входной величиной описывается уравнением (1,48) или (1,55а). При двух входных величинах $x_{вх1}$ и $x_{вх2}$ уравнение звена в операторной форме имеет вид

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) x_{вых} = (b_0 p^l + b_1 p^{l-1} + \dots + b_l) x_{вх1} + (c_0 p^s + c_1 p^{s-1} + \dots + c_s) x_{вх2}. \quad (1,72)$$

Аналогично записываются уравнения для трех и более входных величин. В этом параграфе будем рассматривать встречающиеся в большинстве случаев звенья с одной входной величиной.

Кроме того, в зависимости от вида правой части уравнения звенья подразделяются на простые и дифференциальные.

Подразделение звеньев по виду левой части дифференциального уравнения. В соответствии с порядком дифференциального уравнения, т. е. с наивысшим порядком входящих в левую часть производных выходной величины, различают звенья первого, второго и более высоких порядков. При отсутствии производных в левой части уравнения звена, последнее можно назвать звеном нулевого порядка.

По виду левой части дифференциального уравнения звеня также подразделяются на статические и астатические. Если коэффициент a_n при величине $x_{\text{ВЫХ}}$ не равен нулю, звено называется статическим, если $a_n = 0$ — астатическим*.

Специфическое свойство астатических звеньев заключается в том, что при отличном от нуля постоянном значении входной величины они не могут находиться в состоянии равновесия. Действительно, из уравнения астатического звена

$$a_0 \frac{d^n x_{\text{ВЫХ}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_{\text{ВЫХ}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} = b_0 \frac{d^l x_{\text{ВХ}}}{dt^l} + b_1 \frac{d^{l-1} x_{\text{ВХ}}}{dt^{l-1}} + \dots + b_l x_{\text{ВХ}}$$

видно, что при не равной нулю правой части уравнения все производные выходной величины не могут иметь нулевых значений и, следовательно, выходная величина должна изменяться.

Уравнение звена всегда можно преобразовать так, чтобы один из его коэффициентов оказался равным единице. Уравнения статических звеньев обычно приводят к такому виду, чтобы был равен единице коэффициент a_n при $x_{\text{ВЫХ}}$, а уравнения астатических звеньев — чтобы был равен единице коэффициент при производной наименьшего порядка от величины $x_{\text{ВЫХ}}$.

Рассмотрим наиболее важные типы звеньев нулевого, первого и второго порядков. Звенья более высоких порядков не будем рассматривать, поскольку каждое такое звено можно условно представить в виде нескольких последовательно включенных звеньев первого и второго порядка.

Простые звенья нулевого и первого порядка

Пропорциональное звено, называемое также усилительным, или безынерционным, описывается как в канонической, так и в операторной форме уравнением вида

$$x_{\text{ВЫХ}} = kx_{\text{ВХ}} \quad (1,73)$$

(где k — постоянный коэффициент) и является простым звеном нулевого порядка.

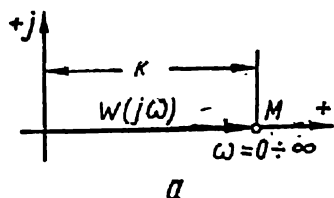
* При этом предполагается, что в правой части дифференциального уравнения коэффициент b_l при $x_{\text{ВХ}}$ не равен нулю, так как в противном случае порядок дифференциального уравнения можно было бы понизить, проинтегрировав его обе части.

Величина k равна коэффициенту усиления звена:

$$k_y = k. \quad (1,74)$$

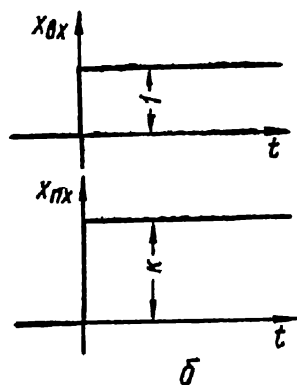
Передаточная функция пропорционального звена при любых значениях p равна коэффициенту усиления:

$$W(p) = k. \quad (1,75)$$



Комплексная частотная функция при любых частотах ω также равна коэффициенту усиления:

$$W(j\omega) = k. \quad (1,76)$$



Амплитудно-фазовая характеристика (рис. 22, а) в соответствии с равенством (1,76) изображается точкой M на вещественной оси комплексной плоскости. Переход-

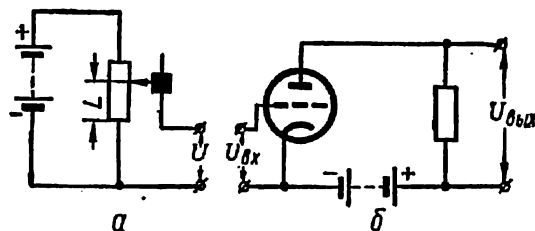


Рис. 22. Пропорциональное звено:

а — амплитудно-фазовая характеристика; б — график переходной функции.

Рис. 23. Примеры пропорциональных звеньев:

а — реостатный преобразователь; б — электронный усилитель.

ная функция звена (рис. 22, б) выражается его уравнением (1,73), в котором нужно положить $x_{вх} = 0$ (при $t < 0$) и $x_{вх} = 1$ (при $t > 0$). Звено является устойчивым, так как при постоянстве входной величины выходная величина имеет установившееся значение и, следовательно, звено находится в состоянии равновесия.

Как видно из уравнения (1,73), при любых изменениях входной величины выходная величина мгновенно (без запаздывания) принимает значения, пропорциональные входной величине. Примерами пропорциональных звеньев являются изображенные на рис. 23 реостатный преобразователь (входная величина — механическое перемещение L , выходная — напряжение U), электронный усилитель (входная и выходная величины — напряжения $U_{вх}$ и $U_{вых}$) и некоторые другие элементы автоматических систем.

Устойчивое аperiodическое звено первого порядка, называемое кратко аperiodическим, или инерционным звеном, описывается уравнением

$$T \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = kx_{\text{ВХ}}, \quad (1,77)$$

или в операторной форме

$$(Tp + 1)x_{\text{ВЫХ}} = kx_{\text{ВХ}}, \quad (1,78)$$

где T и k — постоянные коэффициенты, причем $T > 0$. Коэффициент T имеет размерность времени.

Как видно из уравнения (1,77), аperiodическое звено является простым статическим звеном первого порядка. Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}, \quad (1,79)$$

Коэффициент усиления звена

$$k_y = k, \quad (1,80)$$

так как $W(0) = k$.

Комплексная частотная функция имеет вид

$$W(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega T}. \quad (1,81)$$

Из формулы (1,81) получаем соотношение

$$W(j\omega) + j\omega TW(j\omega) = k.$$

Комплексные величины $W(j\omega)$ и $j\omega TW(j\omega)$, а также их сумму (вещественную величину k) изобразим векторами на комплексной плоскости (рис. 24, а). Так как

$$\arg j\omega TW(j\omega) = \arg W(j\omega) + 90^\circ,$$

то угол между слагаемыми векторами составляет 90° и, следовательно, точка M конца вектора $W(j\omega)$ лежит на полуокружности OMN , построенной на векторе \bar{k} как на диаметре. При изменении частоты ω от 0 до ∞ конец M вектора $W(j\omega)$ перемещается по этой полуокружности от точки N к точке O . Таким образом, полуокружность OMN представляет собой амплитудно-фазовую характеристику аperiodического звена.

Переходную функцию рассматриваемого звена можно найти, решив дифференциальное уравнение (1,77) для случая, когда вход-

ная величина в момент $t = 0$ изменяется скачком от нуля до единицы, причем до этого момента звено находилось в избранном состоянии равновесия. Решая дифференциальное уравнение обычным методом математического анализа с учетом нулевого начального условия

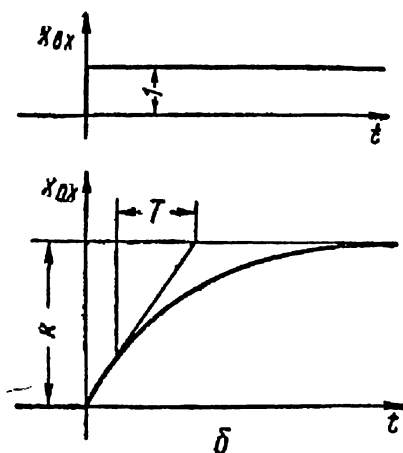
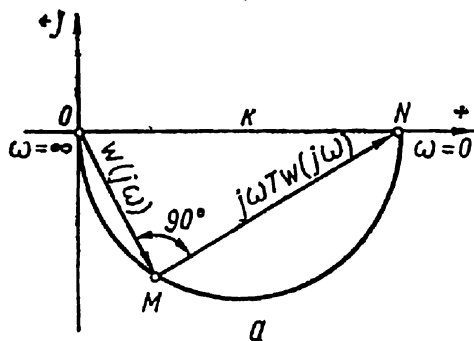
$$x_{\text{вых}}(0) = 0,$$

находим переходную функцию аperiodического звена

$$x_{\text{п}} = k(1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (1,82)$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Рис. 24. Аperiodическое звено:
а — амплитудно-фазовая характеристика; б — график переходной функции.



Более просто переходную функцию можно найти с помощью операционного исчисления, если воспользоваться соотношением (1,65), согласно которому изображением переходной функции $x_{\text{п}}$ является передаточная функция $W(p)$. Определение переходной функции сводится к нахождению оригинала, соответствующего данному изображению. Отметим, что при более сложном виде передаточной функции преимущество операторного метода оказывается значительным.

Как видно из выражения (1,82) и графика переходной функции (рис. 24, б), при скачкообразном изменении входной величины выходная изменяется аperiodически (т. е. без колебаний) по экспоненциальному закону с постоянной времени T . Если $T \rightarrow 0$, переходная функция аperiodического звена приближается к переходной функции пропорционального звена, а при $T = 0$ аperiodическое звено превращается в пропорциональное.

Апериодические звенья широко применяются в системах регулирования. Обычно апериодические звенья образуются в результате соединения детали, обладающей емкостью в широком смысле этого слова (т. е. способностью накапливать энергию или вещество), с деталью, создающей сопротивление прохождению энергии или вещества.

К апериодическим звеньям относятся изображенные на рис. 25 электрические схемы (входные и выходные величины — напряжения $U_{вх}$ и $U_{вых}$ соответственно).

Другим примером апериодического звена может служить магнитный усилитель. Входной величиной для него является напряжение, приложенное к управляющей обмотке, а выходной — ток нагрузки. Теоретически и экспериментально показано, что при скачкообразном изменении напряжения, приложенного к управляющей обмотке, ток нагрузки с достаточной точностью можно считать изменяющимся по экспоненциальному закону.

Неустойчивое апериодическое звено, являющееся другой разновидностью простых статических звеньев первого порядка, описывается уравнением

$$T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} - x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}, \quad (1,83)$$

или

$$(Tp - 1) x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}, \quad (1,84)$$

причем подразумевается, что $T > 0$.

Для рассматриваемого звена

$$W(p) = \frac{k}{Tp - 1}; \quad (1,85)$$

$$k = -k_y; \quad (1,86)$$

$$W(j\omega) = \frac{k}{-1 + j\omega T}; \quad (1,87)$$

$$x_n = k(e^{\frac{t}{T}} - 1). \quad (1,88)$$

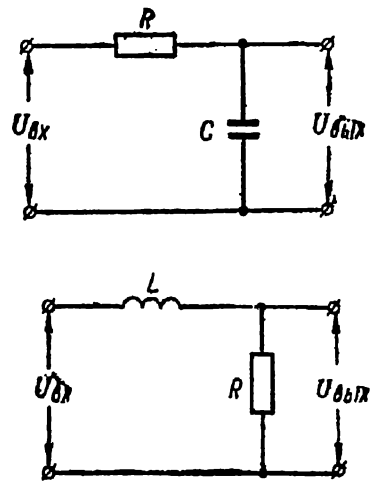


Рис. 25. Примеры апериодических звеньев.

Эти зависимости можно получить из уравнения звена (1,83), а также из равенств (1,79)—(1,82), заменив знаки перед величинами T и k на противоположные, что вытекает из сопоставления уравнений (1,77) и (1,83).

Амплитудно-фазовая характеристика неустойчивого аperiodического звена и его переходная функция изображены на рис. 26.

Как видно из уравнения (1,88) или из графика переходной функции, после скачкообразного изменения входной величины рас-

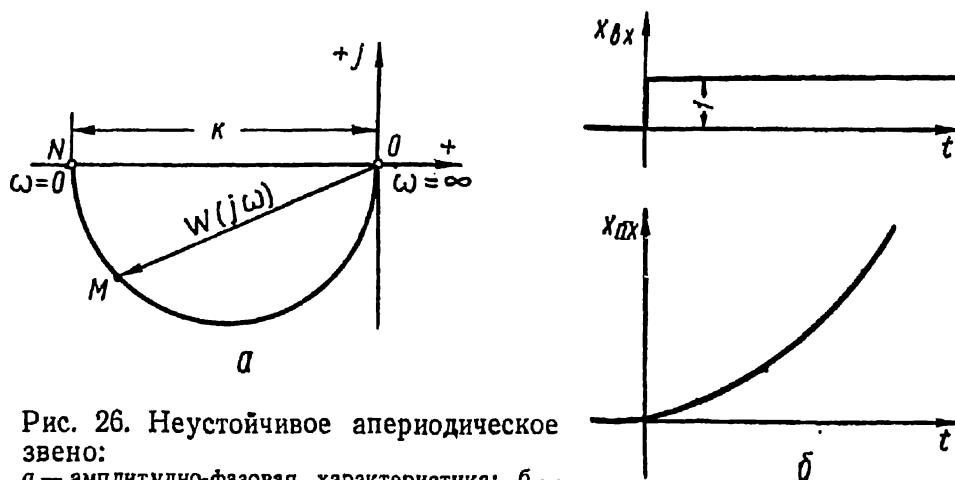


Рис. 26. Неустойчивое аperiodическое звено:
 а — амплитудно-фазовая характеристика; б — график переходной функции.

сматриваемое звено не приходит к новому состоянию равновесия, поскольку величина $x_{\text{вых}}$ бесконечно возрастает, т. е. звено является неустойчивым.

Неустойчивые аperiodические звенья применяются относительно редко.

Интегрирующее звено описывается уравнением

$$\frac{dx_{\text{вых}}}{dt} = k_{\text{и}} x_{\text{вх}} \quad (1,89)$$

или

$$p x_{\text{вых}} = k_{\text{и}} x_{\text{вх}} \quad (1,90)$$

и является астатическим звеном первого порядка. Коэффициент $k_{\text{и}}$ имеет размерность, обратную размерности времени (при одинаковой размерности величин $x_{\text{вх}}$ и $x_{\text{вых}}$).

Проинтегрировав обе части уравнения (1,89), получим

$$x_{\text{вых}} = k_{\text{и}} \int x_{\text{вх}} dt. \quad (1,91)$$

При нулевом начальном условии

$$|x_{\text{ВЫХ}}|_{t=0} = 0$$

выходную величину можно выразить в виде определенного интеграла:

$$x_{\text{ВЫХ}} = k_{\text{И}} \int_0^t x_{\text{ВХ}} dt. \quad (1,92)$$

Из выражений (1,91) и (1,92) видно, что выходная величина пропорциональна интегралу от входной величины.

Как видно из уравнений (1,89), (1,91) и (1,92); интегрирующее звено находится в равновесии только при $x_{\text{ВХ}} = 0$. Если $x_{\text{ВХ}} \neq 0$, выходная величина непрерывно изме-

няется со скоростью $\frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt}$, пропорциональной входной величине. Если входная величина возвращается к нулевому значению $x_{\text{ВХ}} = 0$, звено вновь приходит к состоянию равновесия, в котором выходная величина не изменяется, но может иметь любое значение.

Приняв в уравнении (1,92) $x_{\text{ВХ}} = 1$, получим выражение для переходной функции интегрирующего звена (рис. 27, б)

$$x_{\text{И}} = k_{\text{И}} t. \quad (1,93)$$

Передаточная функция и комплексная частотная функция определяются зависимостями

$$W(p) = \frac{k_{\text{И}}}{p}; \quad (1,94)$$

$$W(j\omega) = -j \frac{k_{\text{И}}}{\omega}. \quad (1,95)$$

В соответствии с уравнением (1,95) амплитудно-фазовая характеристика звена (рис. 27, а) совпадает с отрицательной частью мнимой оси на комплексной плоскости.

Устойчивое или неустойчивое апериодическое звено, описываемое уравнением

$$a_0 \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + a_1 x_{\text{ВЫХ}} = b x_{\text{ВХ}},$$

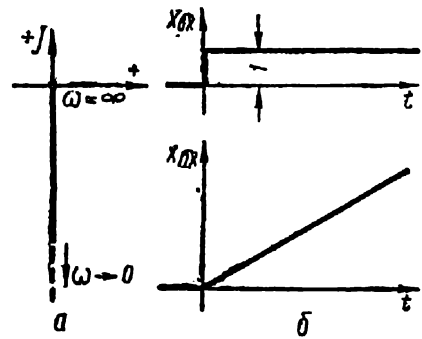


Рис. 27. Интегрирующее звено: а — амплитудно-фазовая характеристика; б — график переходной функции.

при $a_1 \rightarrow 0$ перерождается в интегрирующее звено. Коэффициент усиления

$$k_y = \frac{b}{a_1}$$

при этом бесконечно возрастает. Следовательно, для интегрирующего звена

$$k_y = \pm \infty, \quad (1,96)$$

что можно также получить из зависимости (1,63).

К интегрирующим звеньям относится гидравлический серводвигатель, уравнение (1,45) которого было получено ранее.

Другим примером интегрирующего звена является электрический серводвигатель постоянного тока с независимым возбуждением, входной величиной которого является напряжение, подведенное к якорю, и выходной — угол поворота вала относительно начального положения. Угловую скорость вращения вала, равную производной от угла его поворота, можно приближенно считать пропорциональной приложенному к якорю двигателя напряжению.

Двигатель в системе регулирования скорости вращения как пример звена первого порядка. Как видно из уравнений (1,23) и (1,26), двигатель является звеном первого порядка системы регулирования. В зависимости от соотношения производных * $\frac{dM_H}{d\omega}$ и $\frac{\partial M_D}{\partial \omega}$ двигатель может оказаться устойчивым аperiodическим, неустойчивым аperiodическим или интегрирующим звеном.

1. При $\frac{dM_H}{d\omega} > \frac{\partial M_D}{\partial \omega}$ коэффициент T_2 уравнения (1,26), определяемый соотношением (1,27), имеет положительное значение. Следовательно, в этом случае двигатель является устойчивым аperiodическим звеном.

2. Если $\frac{dM_H}{d\omega} < \frac{\partial M_D}{\partial \omega}$, $T_2 < 0$, следовательно, двигатель является неустойчивым аperiodическим звеном.

3. Наконец, при $\frac{dM_H}{d\omega} = \frac{\partial M_D}{\partial \omega}$ коэффициент k_1 в уравнении (1,23) обращается в нуль, как это видно из выражения (1,25). В этом случае двигатель представляет собой интегрирующее звено.

* Значения производных $\frac{dM_H}{d\omega}$ и $\frac{\partial M_D}{\partial \omega}$ будем считать независимыми от координат h и ω , поскольку линеаризованные уравнения (1,23) и (1,26) получены в предположении, что движущий момент M_D и момент нагрузки M_H линейно зависят от координат в соответствии с уравнениями (1,14) и (1,15).

Допустим, что двигатель находился в состоянии равновесия, после чего входная величина μ получила положительное приращение (т. е. задвижка переместилась вверх). Момент M_d становится больше момента M_n , вследствие чего двигатель начинает ускоряться.

В первом случае при увеличении угловой скорости ω уменьшается избыточный момент $M_d - M_n$ до тех пор, пока не установится новое состояние равновесия, характеризующееся возросшим значением скорости и отсутствием избыточного момента.

Во втором случае с возрастанием скорости избыточный момент увеличивается, в результате чего скорость будет увеличиваться еще быстрее.

В третьем случае избыточный момент остается постоянным, и скорость двигателя возрастает с постоянным угловым ускорением*.

Поведение двигателя во всех трех случаях отражает овойства рассмотренных простых звеньев первого порядка.

Простые звенья второго порядка

Наиболее часто применяются простые звенья второго порядка, описываемые дифференциальным уравнением, в левой части которого все три коэффициента отличны от нуля и имеют одинаковый знак. Уравнение таких звеньев можно записать в виде

$$T_1^2 \frac{d^2 x_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + T_2 \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = kx_{\text{ВХ}}, \quad (1,97)$$

или

$$(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1) x_{\text{ВЫХ}} = kx_{\text{ВХ}}, \quad (1,98)$$

где T_1 и T_2 — постоянные величины, имеющие размерность времени, причем $T_2 > 0$.

Разделив обе части уравнения (1,98) на T_1^2 , получим

$$(p^2 + 2hp + \omega_0^2) x_{\text{ВЫХ}} = k\omega_0^2 x_{\text{ВХ}}, \quad (1,99)$$

где

$$2h = \frac{T_2}{T_1}; \quad (1,100)$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{T_1^2}. \quad (1,101)$$

* Если двигатель ведет себя, как неустойчивое аperiodическое или как интегрирующее звено (такие свойства имеет, например, дизель, работающий вхолостую или с малой нагрузкой), то его нельзя использовать без автоматического регулирования скорости вращения.

Из уравнения (1,99), определяем

$$W(p) = \frac{k\omega_0^2}{p^2 + 2hp + \omega_0^2}; \quad (1,102)$$

$$k_y = k; \quad (1,103)$$

$$W(j\omega) = \frac{k\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + j2h\omega}. \quad (1,104)$$

Амплитудно-фазовая характеристика, построенная в соответствии с уравнением (1,104), имеет вид, показанный на рис. 28.

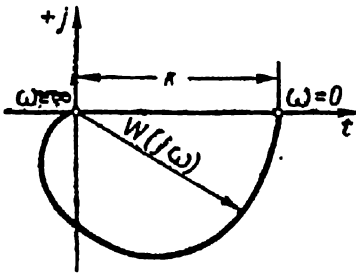


Рис. 28. Амплитудно-фазовая характеристика простого статического звена второго порядка.

В зависимости от соотношения между коэффициентами левой части уравнения (1,99) различают простые статические звенья второго порядка — колебательное и аperiodическое.

Колебательное звено. Если

$$h^2 < \omega_0^2, \quad (1,105)$$

то простое статическое звено второго порядка называется колебательным.

Для определения переходной функции колебательного звена воспользуемся следующей формулой операционного исчисления, применимой при соблюдении неравенства (1,105):

$$\frac{1}{p^2 + 2hp + \omega_0^2} \rightarrow \frac{1}{\omega_0^2} \left[1 - \frac{\omega_0}{\beta} e^{-ht} \sin(\beta t + \psi) \right]; \quad (1,106)$$

$$\beta = \sqrt{\omega_0^2 - h^2}; \quad (1,107)$$

$$\psi = \arctg \frac{\beta}{h}. \quad (1,108)$$

С учетом формулы (1,106) из зависимостей (1,65) и (1,102) получим

$$x_n = k \left[1 - \frac{\omega_0}{\beta} e^{-ht} \sin(\beta t + \psi) \right]. \quad (1,109)$$

Из уравнения (1,109) и показанного на рис. 29 графика переходной функции видно, что переходный процесс после скачкообразного изменения входной величины имеет характер затухающих колебаний. Звено является устойчивым, так как по окончании переходного процесса наступает установившееся состояние.

Колебания, происходящие при неизменном воздействии на звено, называются свободными. Частота свободных колебаний в соответствии с уравнением (1,109) равна величине β .

Как следует из уравнения (1,109) переходной функции, чем меньше h , тем медленнее затухают колебания. При $h = 0$ уравнение звена принимает вид

$$(p^2 + \omega_0^2) x_{\text{вых}} = k\omega_0^2 x_{\text{вх}}, \quad (1,110)$$

а переходная функция согласно уравнениям (1,107) — (1,109) выражается уравнением

$$x_{\text{п}} = k(1 - \cos \omega_0 t). \quad (1,111)$$

Таким образом, движение звена имеет характер незатухающих гармонических колебаний с частотой ω_0 . В рассматриваемом случае ($h = 0$) колебательное звено называют консервативным. Из уравнения (1,111) следует, что консервативное звено неустойчиво, так как при постоянстве входной величины выходная величина не принимает с течением времени постоянного значения.

Апериодическое звено второго порядка. При

$$h^2 > \omega_0^2 \quad (1,112)$$

звено, описываемое уравнением (1,99), называется апериодическим второго порядка. Пользуясь формулой

$$\frac{1}{p^2 + 2hp + \omega_0^2} \rightarrow \frac{1}{\omega_0^2} \left[1 - \frac{\omega_0^2}{n-m} \left(\frac{e^{-mt}}{m} - \frac{e^{-nt}}{n} \right) \right], \quad (1,113)$$

применимой при выполнении условия (1,112), находим переходную функцию звена

$$x_{\text{п}} = k \left[1 - \frac{\omega_0^2}{n-m} \left(\frac{e^{-mt}}{m} - \frac{e^{-nt}}{n} \right) \right]. \quad (1,114)$$

В зависимостях (1,113) и (1,114) буквами m и n обозначены вещественные положительные величины, определяемые равенствами

$$\left. \begin{aligned} m &= h - \sqrt{h^2 - \omega_0^2}; \\ n &= h + \sqrt{h^2 - \omega_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (1,115)$$

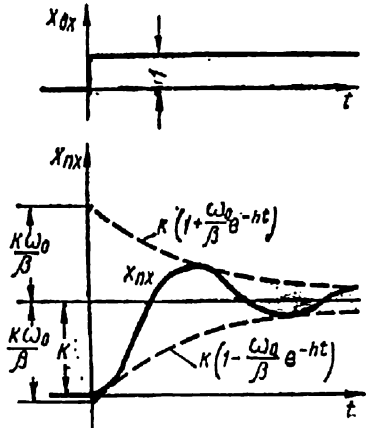


Рис. 29. График переходной функции колебательного звена.

и представляющие собой взятые с обратным знаком корни операторного полинома

$$d(p) = p^2 + 2hp + \omega_0^2.$$

Из графика переходной функции, изображенного на рис. 30, видно, что после скачкообразного изменения входной величины выходная величина изменяется аperiodически. По окончании переходного процесса она достигает установившегося значения, т. е. звено является устойчивым.

Покажем, что любое аperiodическое звено второго порядка можно условно рассматривать, как состоящее из двух последовательно включенных аperiodических звеньев первого порядка. Учитывая, что операторный полином левой части уравнения (1,99) аperiodического звена второго порядка можно представить в виде произведения

$$p^2 + 2hp + \omega_0^2 = (p + m)(p + n)$$

(причем $mn = \omega_0^2$), преобразуем уравнение звена к виду

$$(T'p + 1)(T''p + 1)x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}, \quad (1,116)$$

где

$$T' = \frac{1}{m}; \quad T'' = \frac{1}{n}.$$

Рис. 30. График переходной функции аperiodического звена второго порядка.

Рассмотрим два последовательно включенных аperiodических звена первого порядка, описываемых уравнениями:

$$(T'p + 1)x_1 = k'x_{\text{вх}};$$

$$(T''p + 1)x_{\text{вых}} = k''x_1;$$

в которых x_1 означает выходную величину первого звена и входную величину второго.

Исключая из этих уравнений x_1 , находим уравнение совокупности двух последовательно включенных звеньев

$$(T'p + 1)(T''p + 1)x_{\text{вых}} = k'k''x_{\text{вх}},$$

которое при $k'k'' = k$ совпадает с уравнением (1,116) аperiodического звена второго порядка. Таким образом, аperiodическое

звено второго порядка эквивалентно двум последовательно включенным аperiодическим звеньям первого порядка с соответственно выбранными коэффициентами T' , k' , T'' и k'' .

Примеры простых статических звеньев второго порядка приведены на рис. 31. Электрический контур, состоящий из последовательно включенных емкости C , индуктивности L и активного сопротивления R (рис. 31, а), при $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ представляет собой колебательное звено, а при $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ — аperiодическое звено второго порядка.

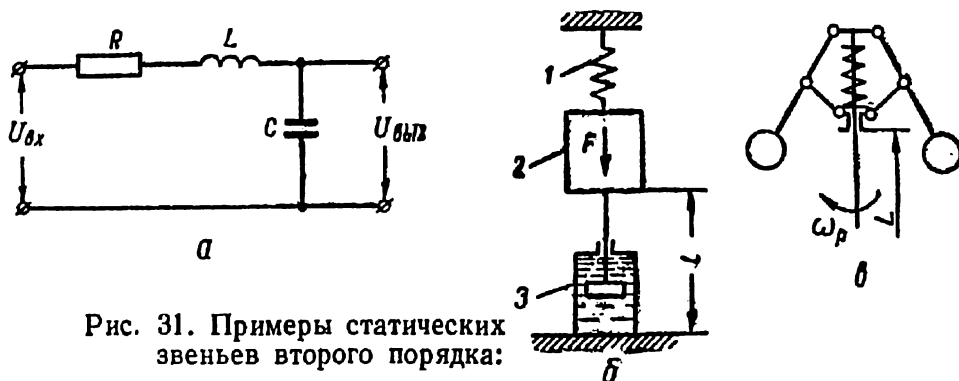


Рис. 31. Примеры статических звеньев второго порядка:

напряжение $U_{вх}$, сила F , угловая скорость ω_p — входные величины;
напряжение $U_{вых}$, расстояние L — выходные величины.

Масса 2, связанная с пружиной 1, при наличии вязкого трения в масляном успокоителе 3 (рис. 31, б) является колебательным звеном, если вязкое трение невелико, и аperiодическим звеном второго порядка — при относительно большом вязком трении. Центробежный маятник (рис. 31, в) является колебательным звеном. Если к муфте центробежного маятника присоединить сильнорействующий успокоитель, центробежный маятник можно превратить в аperiодическое звено второго порядка.

Дифференцирующие звенья

Идеальное дифференцирующее звено описывается уравнением

$$x_{вых} = k_d \frac{dx_{вх}}{dt}, \quad (1,117)$$

или

$$x_{вых} = k_d p x_{вх}, \quad (1,118)$$

где k_d — постоянный коэффициент, имеющий размерность времени при одинаковой размерности величин $x_{вх}$ и $x_{вых}$.

Выходная величина идеального дифференцирующего звена в каждый момент времени пропорциональна производной входной величины.

Для рассматриваемого звена

$$W(p) = k_d p; \quad (1,119)$$

$$k_y = 0; \quad (1,120)$$

$$W(j\omega) = j\omega k_d. \quad (1,121)$$

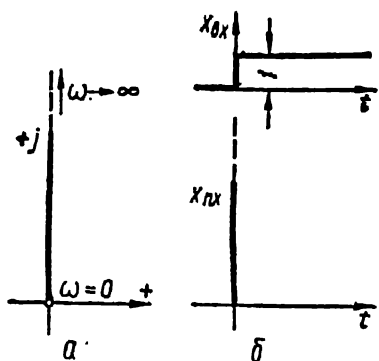


Рис. 32. Идеальное дифференцирующее звено:

a — амплитудно-фазовая характеристика; *b* — график переходной функции.

В соответствии с уравнением (1,121) амплитудно-фазовая характеристика звена совпадает (при $k_d > 0$) с положительной частью мнимой оси (рис. 32, *a*).

Переходная функция звена (рис. 32, *b*), как следует из уравнения (1,117), представляет собой мгновенный импульс бесконечной величины, соответствующий моменту $t = 0$ скачкообразного изменения входной величины. При $t \neq 0$ переходная функция имеет нулевое значение.

Рассмотрим в качестве примера идеального дифференцирующего звена конденсатор при условии, что входной величиной будет напряжение u , а выходной — ток i (рис. 33). При отсутствии в цепи конденсатора активного сопротивления ток выражается зависимостью

$$i = C \frac{du}{dt},$$

аналогичной уравнению (1,117).

Реальное дифференцирующее звено. Идеальных дифференцирующих звеньев в действительности нет, так как в каждом реальном элементе САР действуют факторы, препятствующие бесконечному возрастанию выходной величины при скачкообразном изменении входной.

В схеме, изображенной на рис. 33, активное сопротивление конденсатора, соединительных проводов и элемента, реагирующего на изменение тока i , фактически отлично от нуля. Если учесть активное сопротивление R в цепи конденсатора (рис. 34), получим

$$RC \frac{di}{dt} + i = C \frac{du}{dt}.$$

Изображенное на рис. 34 звено описывается уравнением вида

$$T \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = k_{\text{д}} \frac{dx_{\text{ВХ}}}{dt}, \quad (1,122)$$

или

$$(Tp + 1) x_{\text{ВЫХ}} = k_{\text{д}} p x_{\text{ВХ}}. \quad (1,123)$$

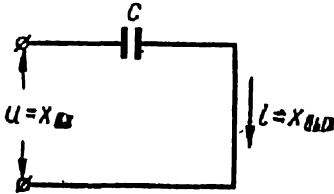


Рис. 33. Схема идеального дифференцирующего звена.

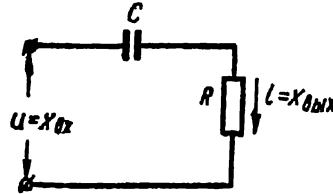


Рис. 34. Схема реального дифференцирующего звена.

Такие звенья будем называть простейшими реальными дифференцирующими звеньями или кратко реальными дифференцирующими звеньями.

Для таких звеньев

$$W(p) = \frac{k_{\text{д}} p}{Tp + 1}; \quad (1,124)$$

$$k_{\text{у}} = 0; \quad (1,125)$$

$$W(j\omega) = \frac{j\omega k_{\text{д}}}{j\omega T + 1}. \quad (1,126)$$

Чтобы определить амплитудно-фазовую характеристику, воспользуемся соотношением

$$W(j\omega) - \frac{j}{\omega T} W(j\omega) = \frac{k_{\text{д}}}{T},$$

вытекающим из уравнения (1,126). Характеристика, показанная на рис. 35, а, представляет собой полуокружность, построенную на векторе $\frac{k_{\text{д}}}{T}$ как на диаметре.

Переходная функция реального дифференцирующего звена является решением уравнения (1,122), если входная величина изменяется в соответствии с рис. 20 и $x_{\text{ВХ.с}} = 1$. Для $t > 0$ правая часть уравнения равна нулю и решение уравнения имеет вид

$$x_{\text{ВЫХ}} = Ae^{-\frac{t}{T}},$$

где A — постоянная интегрирования, зависящая от начального условия.

Из уравнения (1,122) следует, что

$$x_{\text{вых}} = \frac{d}{dt} (k_{\text{д}} x_{\text{вх}} - T x_{\text{вых}}).$$

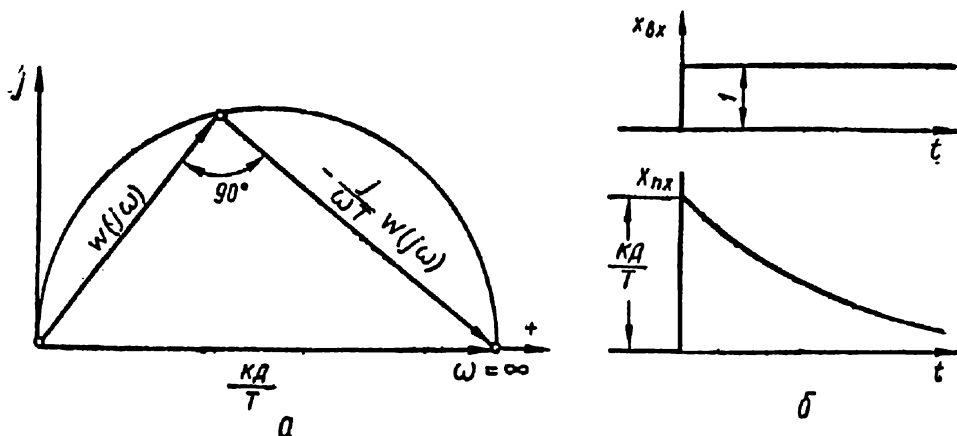


Рис. 35. Реальное дифференцирующее звено:

a — амплитудно-фазовая характеристика; b — график переходной функции.

Поскольку у реального звена выходная величина не может быть бесконечно большой, функция $k_{\text{д}} x_{\text{вх}} - T x_{\text{вых}}$ не может претерпевать скачкообразных изменений. Отсюда, учитывая, что

$$|x_{\text{вх}}|_{t=-0} = 0 \text{ и } |x_{\text{вых}}|_{t=-0} = 0,$$

получаем начальное условие

$$|k_{\text{д}} x_{\text{вх}} - T x_{\text{вых}}|_{t=+0} = 0.$$

Определив с его помощью постоянную интегрирования A , находим решение уравнения (1,122) в виде

$$x_{\text{вых}} = \frac{k_{\text{д}}}{T} x_{\text{вх.с}} e^{-\frac{t}{T}}$$

Приняв $x_{\text{вх.с}} = 1$, получим переходную функцию

$$x_n = \frac{k_{\text{д}}}{T} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (1,127)$$

график которой изображен на рис. 35, б.

Если коэффициент T , имеющий размерность времени, весьма мал по сравнению с длительностью процессов, происходящих в других звеньях САР, то, приняв в уравнении (1,122) $T = 0$, звено можно считать идеальным дифференцирующим.

Контрольные вопросы и упражнения

1. Разъясните понятия *автоматическое регулирование* и *система автоматического регулирования*.

2. Какие принципы действия и свойства систем регулирования по возмущению, по отклонению и комбинированных?

3. Что такое устойчивость САР?

4. Назовите известные типы функциональных элементов САР и объясните их назначение.

5. Что такое обратная связь? Как классифицируются обратные связи?

6. Изобразите принципиальную и элементную схемы системы регулирования скорости вращения центробежным регулятором прямого действия, объясните действие САР, изобразите характеристику регулирования.

7. Изобразите принципиальную и элементную схемы системы регулирования скорости вращения центробежным регулятором непрямого действия без обратной связи и с жесткой обратной связью, объясните действие САР, изобразите характеристику регулирования.

8. По каким признакам подразделяются звенья систем регулирования?

9. Выведите уравнения элементов САР скорости с жесткой обратной связью.

10. Приведите примеры звеньев направленного действия.

11. Звено описывается уравнением

$$5 \frac{d^2 x_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + 2 \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = 3 \frac{dx_{\text{ВХ}}}{dt} + 10x_{\text{ВХ}}$$

Составьте уравнение в операторной форме, определите операторные полиномы левой и правой частей уравнения, передаточную функцию, коэффициент усиления и комплексную частотную функцию.

12. Напишите уравнения и приведите примеры известных типов звеньев. Для каждого типа звеньев изобразите график переходной функции и амплитудно-фазовую характеристику.

13. К какому типу относятся звенья, описываемые уравнениями:

$$(p^2 + 4p + 20) x_{\text{ВЫХ}} = 10x_{\text{ВХ}};$$

$$(p^2 + 4p + 3) x_{\text{ВЫХ}} = 10x_{\text{ВХ}};$$

$$(p^2 + 9) x_{\text{ВЫХ}} = 10x_{\text{ВХ}}?$$

Покажите, что одно из этих звеньев эквивалентно двум последовательно включенным звеньям первого порядка.

ДИНАМИКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

§ 1. УРАВНЕНИЯ И ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Разомкнутая цепь звеньев замкнутой САР

Размыкание замкнутой цепи звеньев системы. САР по отклонению регулируемой величины почти всегда можно представить как одноконтурную систему, состоящую из s' последовательно включенных звеньев $1-s$ направленного действия (рис. 36, а). Первое звено воздействует на второе, второе — на третье, $(s-1)$ -е — на s -е, а s -е — на первое. К некоторым звеньям приложены возмущающие воздействия, не показанные на схеме.

Пусть связь между двумя соседними звеньями будет нарушена, например, на первое звено не поступает воздействие со стороны s -го звена (рис. 36, б). Полученная разомкнутая цепь звеньев не выполняет функции САР. Но от ее свойств зависят некоторые свойства замкнутой САР по отклонению.

Входной величиной $x_{вх}$ рассматриваемой разомкнутой цепи будем считать входную величину первого звена, а выходной величиной $x_{вых}$ — выходную величину s -го звена. Будем также предполагать, что на вход разомкнутой цепи извне поступает определенное воздействие $x_{вх} = x_1$.

Уравнение разомкнутой цепи звеньев. Предположим, что возмущающие воздействия на разомкнутую цепь звеньев (кроме $x_{вх}$) не изменяются и, следовательно, их отклонения от избранных значений равны нулю. В этом случае каждое звено разомкнутой цепи будет иметь только одну входную величину, и уравнения отдельных звеньев примут вид

$$\left. \begin{aligned} d_1(p) x_2 &= m_1(p) x_{вх}; \\ d_2(p) x_3 &= m_2(p) x_2; \\ d_3(p) x_4 &= m_3(p) x_3; \\ &\vdots \\ d_s(p) x_{вых} &= m_s(p) x_s. \end{aligned} \right\} \quad (2,1)$$

В этой системе уравнений $d_1(p)$ и $m_1(p)$ представляют собой операторные полиномы соответственно левой и правой частей уравнения первого звена, $d_2(p)$ и $m_2(p)$ — уравнения второго звена и т. д.

Чтобы получить уравнение разомкнутой цепи, из системы уравнений (2,1) необходимо исключить внутренние воздействия x_2, x_3, \dots, x_s . Приравняв произведение левых частей всех уравнений системы (2,1) произведению их правых частей и сократив

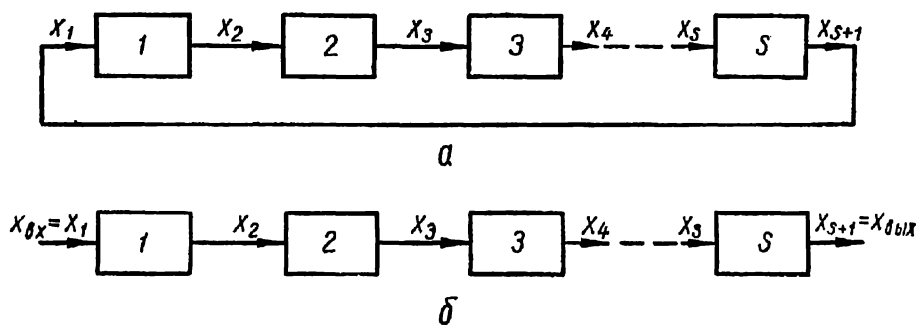


Рис. 36. Элементные схемы САР по отклонению регулируемой величины:

а — замкнутая цепь последовательно включенных звеньев; б — искусственно разомкнутая цепь звеньев.

обе части полученного таким образом уравнения на $x_2, x_3, x_4, \dots, x_s$, найдем*:

$$d_1(p) d_2(p) \dots d_s(p) x_{\text{вых}} = m_1(p) m_2(p) \dots m_s(p) x_{\text{вх}}.$$

Введя для операторных полиномов левой и правой частей последнего уравнения обозначения

$$d_1(p) d_2(p) \dots d_s(p) = D(p); \quad (2,2)$$

$$m_1(p) m_2(p) \dots m_s(p) = M(p), \quad (2,3)$$

уравнение разомкнутой цепи представим в виде

$$D(p) x_{\text{вых}} = M(p) x_{\text{вх}}. \quad (2,4)$$

* Чтобы убедиться в допустимости примененного способа исключения переменных, идентичный результат можно получить, подставив в первое уравнение из второго величину x_2 , а затем — в полученное уравнение из третьего величину x_3 и т. д.

Передаточная функция и коэффициент усиления разомкнутой цепи звеньев. Для передаточной функции разомкнутой цепи звеньев

$$W_p(p) = \frac{M(p)}{D(p)} \quad (2,5)$$

с помощью зависимостей (2,2) и (2,3) получим выражение

$$W_p(p) = W_1(p) W_2(p) \dots W_s(p), \quad (2,6)$$

в котором функции

$$W_1(p) = \frac{m_1(p)}{d_1(p)};$$

$$W_2(p) = \frac{m_2(p)}{d_2(p)};$$

$$W_s(p) = \frac{m_s(p)}{d_s(p)}$$

представляют собой передаточные функции последовательно включенных звеньев системы регулирования.

Приняв в соотношении (2,6) $p = 0$, получим выражения для коэффициента усиления разомкнутой цепи

$$k_p = k_1 k_2 \dots k_s, \quad (2,7)$$

где k_1, k_2, \dots, k_s — коэффициенты усиления первого, второго, ..., s -го звеньев соответственно.

Направления отсчета входной $x_{вх}$ и выходной $x_{вых}$ координат обычно выбирают так, чтобы коэффициент усиления разомкнутой цепи

$$k_p = \frac{x_{вых\infty}}{x_{вх\infty}}$$

был положительной величиной. В этом случае в установившемся состоянии разомкнутой цепи, если оно наступает, величина $x_{вых}$ имеет тот же знак, что и $x_{вх}$.

Как видно из равенств (2,6) и (2,7), передаточная функция и коэффициент усиления разомкнутой цепи равны произведениям соответственно передаточных функций и коэффициентов усиления отдельных последовательно включенных звеньев САР.

Если замкнутую одноконтурную САР (рис. 36, а) разомкнуть не между s -м и первым звеном, а между любой иной парой

соседних звеньев, то произведения, входящие в правые части равенств (2,6) и (2,7), не изменятся. Следовательно, передаточная функция и коэффициент усиления разомкнутой цепи звеньев не зависят от места размыкания САР по отклонению регулируемой величины.

Система регулирования по отклонению регулируемой величины

Входные и выходная величины САР. Уравнение САР устанавливает зависимость выходной величины системы от входных величин. Для любой системы регулирования входными величинами

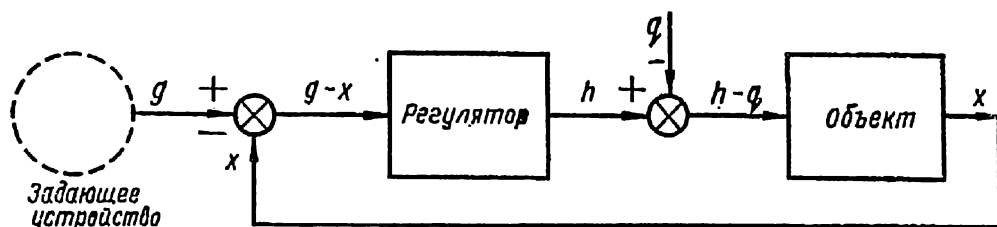


Рис. 37. Элементная схема САР по отклонению регулируемой величины.

являются возмущающие воздействия, а выходной величиной — координата системы, изменения которой в процессе движения системы рассматриваются. Обычно в качестве выходной выбирается регулируемая величина.

Элементная схема. Рассмотрим САР, приведенную на рис. 37. Регулятор и регулируемый объект представлены на схеме как звенья системы. Если же регулятор или объект состоят из нескольких звеньев, то они рассматриваются как сложные звенья. В этом случае их уравнения можно получить из уравнений звеньев, составляющих сложное звено.

На элементной схеме показаны два наиболее существенных возмущающих воздействия на САР: приложенное к объекту возмущающее воздействие q , которое в большинстве случаев представляет собой нагрузку объекта, и задающее воздействие g на регулятор со стороны задающего устройства.

Внешние и внутренние воздействия системы, обозначенные буквами q , g , h и x , представляют собой отклонения соответствующих физических величин от их избранных значений.

К объекту приложены регулирующее h и возмущающее q воздействия. Обычно изменение возмущающего воздействия воспри-

нимается объектом так же, как и некоторое эквивалентное ему изменение регулирующего воздействия. Например, в системе регулирования скорости двигателя (рис. 15) возрастанию нагрузки двигателя эквивалентно уменьшение координаты h (т. е. перемещение задвижки вниз), поскольку в обоих случаях уменьшается избыточный момент*

$$M_{изб} = M_d - M_n.$$

Возмущающее воздействие на объект выразим в тех же единицах, что и регулирующее воздействие, чтобы равные изменения этих величин одинаково действовали на объект. При этом будем считать, что возрастанию возмущающего воздействия эквивалентно такое же по величине уменьшение регулирующего воздействия. Таким образом, результирующее воздействие на регулируемый объект представляет собой разность $h - q$ регулирующего и возмущающего воздействий. Будем предполагать, что величины h и $-q$ вначале суммируются, а затем величина $h - q$ воздействует на объект (рис. 37).

К регулятору приложены задающее воздействие g со стороны задающего устройства и регулируемая величина x — воздействие со стороны объекта. Изменения задающего воздействия эквивалентны соответствующим изменениям регулируемой величины. Например, в системе регулирования скорости (рис. 15) усиление затяжки пружины при смещении упора вниз действует на центробежный маятник так же, как и некоторое уменьшение скорости вращения: в обоих случаях появляется дополнительная сила, приложенная к муфте центробежного маятника и направленная вниз. Задающее воздействие g будем выражать в тех же единицах, в каких измеряется регулируемая величина x .

Представим себе САР, разомкнутую за объектом. Будем считать, что задающее воздействие g на регулятор возрастает, если при его изменении увеличивается установившееся значение регулируемой величины x в рассматриваемой разомкнутой цепи.

В замкнутой САР регулятор должен противодействовать отклонениям регулируемой величины от заданного значения. Следовательно, при уменьшении регулируемой величины на входе разомкнутой цепи после окончания переходного процесса должна возрасти регулируемая величина на выходе. Таким образом, отрицательные значения величины x воспринимаются регулятором так же, как и положительные значения величины g .

Следовательно, результирующее воздействие на регулятор представляет собой разность $g - x$. На элементной схеме условно

показано, что на вход регулятора подается сумма величин g и $-x$, которую создает суммирующее устройство.

Уравнение системы. Уравнение изображенной на рис. 37 САР, выражающее зависимость регулируемой величины x от возмущающих воздействий q и g , можно получить из уравнения объекта

$$D_0(p) x = M_0(p) (h - q) \quad (2,8)$$

и уравнения регулятора

$$D_1(p) h = M_1(p) (g - x), \quad (2,9)$$

в которых $D_0(p)$, $M_0(p)$, $D_1(p)$ и $M_1(p)$ — операторные полиномы уравнений объекта и регулятора.

Исключая из уравнений (2,8) и (2,9) координату h , находим искомое уравнение системы

$$[D(p) + M(p)] x = M(p) g - M_0(p) D_1(p) q, \quad (2,10)$$

где

$$D(p) = D_0(p) D_1(p) \quad (2,11)$$

и

$$M(p) = M_0(p) M_1(p) \quad (2,12)$$

на основании соотношений (2,2) и (2,3) представляют собой операторные полиномы уравнения разомкнутой цепи САР.

Введя обозначения

$$W_0(p) = \frac{M_0(p)}{D_0(p)};$$

$$W_1(p) = \frac{M_1(p)}{D_1(p)};$$

$$W_p(p) = \frac{M(p)}{D(p)} = \frac{M_0(p) M_1(p)}{D_0(p) D_1(p)}$$

для передаточных функций объекта, регулятора и разомкнутой цепи САР, из уравнения (2,10) получим другую форму уравнения системы

$$x = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} g - \frac{W_0(p)}{1 + W_p(p)} q. \quad (2,13)$$

Если движение системы вызывается изменениями одного лишь возмущающего воздействия q на объект регулирования, а задающее воздействие g не отклоняется от избранного значения (что является типичным случаем действия систем автоматической ста-

билизации), то в уравнениях (2,10) и (2,13) следует принять $g = 0$. При этом уравнение системы принимает вид

$$[D(p) + M(p)]x = -M_0(p)D_1(p)q \quad (2,14)$$

или

$$x = -\frac{W_0(p)}{1 + W_p(p)}q. \quad (2,15)$$

Обычно при исследовании динамики САР исходными данными являются уравнения отдельных звеньев (включая уравнения условных суммирующих элементов). Практически для составления уравнения движения замкнутой системы нет необходимости находить предварительно уравнения объекта, регулятора и разомкнутой цепи звеньев. Искомое уравнение можно получить непосредственно из системы уравнений звеньев, исключив из нее все координаты, кроме входной и выходной величин.

Коэффициент статизма рассматриваемой САР, представляющий собой взятое с обратным знаком отношение изменения установившегося значения регулируемой величины к соответствующему изменению возмущающего воздействия (см. стр. 20), определяется зависимостью

$$k_c = -\frac{x_\infty}{q_c}, \quad (2,16)$$

где q_c — некоторое постоянное значение возмущающего воздействия q ;

x_∞ — соответствующее установившееся значение регулируемой величины x .

Соотношение между величинами q и x в установившихся режимах можно получить из уравнения движения системы в операторной форме после подстановки $p = 0$. Из уравнения (2,15) находим

$$x_\infty = -\frac{W_0(0)}{1 + W_p(0)}q_c.$$

Но

$$\begin{aligned} W_0(0) &= k_0; \\ W_p(0) &= k_p = k_0 k_1, \end{aligned}$$

где k_0 , k_1 и k_p — коэффициенты усиления объекта, регулятора и разомкнутой цепи соответственно.

Учитывая последние соотношения, получаем простые зависимости, выражающие коэффициент статизма через коэффициенты усиления k_0 , k_1 , k_p :

$$k_c = \frac{k_0}{k_p + 1}, \quad (2,17)$$

или

$$k_c = \frac{1}{k_1 + \frac{1}{k_0}}. \quad (2,17a)$$

Поскольку при изменении возмущающего воздействия q изменяется регулируемая величина x , коэффициент усиления k_0 объекта отличен от нуля. Выбрать желательную величину этого коэффициента при проектировании САР нельзя. Требуемую величину коэффициента статизма можно получить соответствующим выбором коэффициента усиления k_1 регулятора. Чем больше коэффициент k_1 , тем меньше коэффициент статизма. Как следует из уравнения (2,17 а), для получения астатического регулирования ($k_c = 0$) коэффициент усиления k_1 регулятора должен быть бесконечно большим. Если такой регулятор состоит из последовательно включенных звеньев, то хотя бы одно из них должно иметь бесконечно большой коэффициент усиления*, т. е. должно быть астатическим звеном. Этим поясняется происхождение термина *астатическое звено*.

Режим САР, устанавливающийся после изменения возмущающего воздействия q . При составлении элементной схемы системы (рис. 37) было принято, что возрастанию входной величины разомкнутой цепи (величины $g - x$, приложенной к регулятору) соответствует возрастание установившегося значения выходной (регулируемой величины x). Тем самым направление отсчета входной и выходной величин было выбрано таким, что коэффициент усиления k_p разомкнутой цепи оказался положительным. Поскольку $k_p = k_0 k_1$, то коэффициенты усиления объекта k_0 и регулятора k_1 должны иметь одинаковые знаки. Для определенности будем считать, что направление отсчета регулирующего воздействия h выбрано так, что коэффициенты усиления k_0 и k_1 больше нуля.

В избранном равновесном режиме каждая из величин q , g , h и x равна нулю. Допустим, что при неизменной величине за-

* Это утверждение следует из того, что коэффициент усиления регулятора равен произведению коэффициентов усиления его последовательно включенных звеньев.

дающего воздействия $g = 0$ возмущающее воздействие q возрастает и принимает некоторое постоянное положительное значение $q_c > 0$. Вследствие этого уменьшится регулируемая величина и начнет действовать регулятор.

Через некоторое время процесс регулирования закончится (предполагается, что система устойчива). В новом установившемся режиме, как это следует из зависимости (2,16), регулируемая величина x достигнет установившегося значения

$$x_{\infty} = -k_c q_c.$$

Если регулятор статический ($0 < k_1 < \infty$), то в соответствии с зависимостью (2,17 а) $k_c > 0$. В этом случае $x_{\infty} < 0$. При воздействии на регулятор $g - x = -x_{\infty} > 0$ регулирующее воздействие определяется зависимостью

$$h_{\infty} = k_1 (-x_{\infty}) > 0.$$

Результирующее воздействие на объект теперь равно $h_{\infty} - q_c$, и созданное регулятором регулирующее воздействие h_{∞} в определенной мере компенсирует возмущающее воздействие на объект q_c . Поэтому изменение установившегося значения регулируемой величины будет не так велико, как в случае отсутствия регулятора. Но при статическом регулировании компенсация возмущающего воздействия на объект — неполная, так как $(h_{\infty} - q_c) k_0 = x_{\infty} < 0$ и, следовательно, $h_{\infty} < q_c$.

При астатическом регуляторе ($k_1 = \infty$) $k_c = 0$, и регулируемая величина после окончания переходного процесса принимает прежнее установившееся значение: $x_{\infty} = 0$. Регулирующее воздействие h_{∞} полностью компенсирует возмущающее воздействие q_c , так как $(h_{\infty} - q_c) k_0 = x_{\infty} = 0$, откуда $h_{\infty} = q_c$. В новом установившемся режиме входная величина регулятора $g - x$ равна нулю, так как $x_{\infty} = 0$. В то же время, его выходная величина h имеет конечное значение h_{∞} . Такое действие регулятора может наблюдаться при бесконечно большом значении его коэффициента усиления k_1 .

Система регулирования по возмущению

Элементная схема и уравнение системы. Рассмотрим в качестве примера систему с одним главным возмущающим воздействием на объект, элементная схема которой изображена на рис. 38. К объекту приложены возмущающее q и регулирующее h воздействия. Поскольку регулятор уменьшает колебания регулируемой величины, при изменениях возмущающего воздействия величины

q и h влияют на установившееся значение регулируемой величины x в противоположных направлениях.

Уравнение объекта запишем в виде

$$D_0(p)x = M_{02}(p)h - M_{0q}(p)q, \quad (2,18)$$

или

$$D_0(p)x = M_{02}(p)h + M_{0q}(p)(-q), \quad (2,18a)$$

где $D_0(p)$, $M_{02}(p)$ и $M_{0q}(p)$ — полиномы от p .

Согласно уравнению (2,18a) входными величинами для объекта являются воздействия h и $-q$. В соответствии с этим на элементной схеме условно показано, что возмущающее воздействие q преобразуется элементом перемены знака, обозначенным в виде кружка со знаком минус, в величину, противоположную по знаку, которая уже воздействует на объект.

Будем рассматривать действие системы в условиях неизменности задающего воздействия на регулятор. Поэтому задающий элемент и задающее воздействие не показаны на схеме. Уравнение регулятора имеет вид

$$D_2(p)h = M_2(p)q, \quad (2,19)$$

где $D_2(p)$ и $M_2(p)$ — операторные полиномы.

Исключая из уравнений (2,18) и (2,19) координату h , находим уравнение САР

$$D_0(p)D_2(p)x = [M_{02}(p)M_2(p) - M_{0q}(p)D_2(p)]q. \quad (2,20)$$

Инвариантность САР. В САР по возмущению при некотором подборе параметров регулятора теоретически можно добиться в каждый момент времени полной компенсации изменений возмущающего воздействия на объект за счет соответствующих изменений создаваемого регулятором регулирующего воздействия [17, 28, 55]. В этом случае при изменениях возмущающего воздействия q регулируемая величина x не будет изменяться.

Независимость регулируемой величины от изменений возмущающего воздействия называется инвариантностью. Математическое условие инвариантности рассматриваемой системы по отношению к произвольно изменяющемуся возмущающему воздействию q состоит в тождественном равенстве нулю операторного поли-

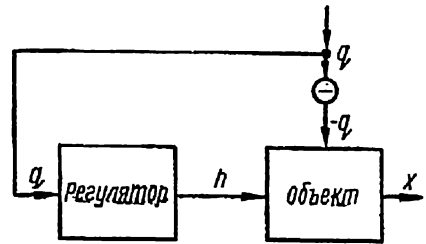


Рис. 38. Элементная схема САР по возмущению.

нома правой части уравнения (2,20) и выражается соотношением

$$M_{02}(p) M_2(p) - M_{0q}(p) D_2(p) = 0$$

или вытекающей из него зависимостью

$$W_2(p) = \frac{M_{0q}(p)}{M_{02}(p)}, \quad (2,21)$$

где $W_2(p) = \frac{M_2(p)}{D_2(p)}$ — передаточная функция регулятора по возмущению.

Комбинированная система регулирования

Элементная схема и уравнение системы. Один из вариантов комбинированной САР по возмущению и по отклонению регулируемой величины приведен на рис. 39. Регулятор 1 осуществляет регулирование по отклонению, регулятор 2 — по возмущению.

Будем рассматривать движение системы при неизменных задающих воздействиях на регуляторы. Регулирующие воздействия на объект со стороны регуляторов 1 и 2 обозначены соответственно через h_1 и h_2 . Уравнения объекта и регуляторов запишутся в виде

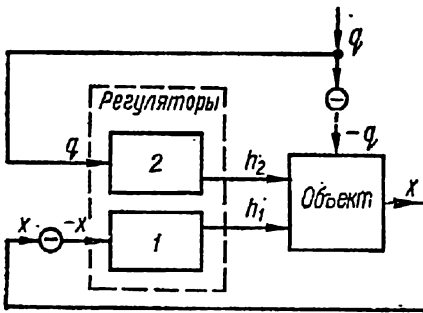


Рис. 39. Элементная схема комбинированной САР.

$$D_0(p) x = -M_{0q}(p) q + M_{01}(p) h_1 + M_{02}(p) h_2; \quad (2,22)$$

$$D_1(p) h_1 = -M_1(p) x; \quad (2,23)$$

$$D_2(p) h_2 = M_2(p) q. \quad (2,24)$$

В этих уравнениях $D_0(p)$, $D_1(p)$, $D_2(p)$, $M_{0q}(p)$, $M_{01}(p)$, $M_{02}(p)$; $M_1(p)$ и $M_2(p)$ представляют собой полиномы от p . Исключая величины h_1 и h_2 , находим уравнение системы

$$\begin{aligned} D_2(p) [D_0(p) D_1(p) + M_{01}(p) M_1(p)] x = \\ = D_1(p) [M_{02}(p) M_2(p) - M_{0q}(p) D_2(p)] q. \end{aligned} \quad (2,25)$$

Из уравнения (2,25) можно получить, как частный случай, уравнение (2,14) системы регулирования по отклонению. Для этого в уравнении (2,25) нужно положить

$$M_2(p) = 0 \text{ и } M_{0q}(p) = M_{01}(p) = M_0(p),$$

а также воспользоваться соотношениями (2,11) и (2,12). Уравнение (2,20) САР по возмущению также является частным случаем уравнения (2,25) комбинированной системы при $M_1(p) = 0$.

Инвариантность системы. Для рассматриваемой комбинированной САР сохраняется условие (2,21) инвариантности относительно произвольно изменяющегося возмущающего воздействия q . Действительно, при выполнении и только при выполнении этого условия правая часть уравнения (2,25) комбинированной системы обращается в нуль для произвольного закона изменения возмущающего воздействия q , и, следовательно, регулируемая величина x оказывается независимой от q .

Если выполняется условие (2,21), при изменении возмущающего воздействия q регулируемая величина x не изменяется, и поэтому регулятор I бездействует. Однако практически точно выполнить условие инвариантности нельзя. Помимо того, на регулируемый объект, кроме главного возмущающего воздействия q , влияют также и другие возмущающие воздействия. Поэтому в инвариантной САР по возмущению практически могут наблюдаться более или менее значительные колебания регулируемой величины. В комбинированной системе эти колебания существенно уменьшаются вследствие действия регулятора I , реагирующего на отклонения регулируемой величины от заданного значения.

§ 2. УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Устойчивость «в малом» и «в большом». Как указывалось в гл. 1, если САР, находившаяся в движении, приходит в условиях постоянства всех возмущающих воздействий к состоянию равновесия с заданным значением регулируемой величины, то такая система называется устойчивой. В противном случае система неустойчива.

САР называют устойчивой «в малом», если устойчивость проявляется после нарушения равновесия системы в результате бесконечно малых изменений возмущающих воздействий. Если устойчивость системы проявляется после того, как ее равновесие было нарушено определенными конечными изменениями возмущающих воздействий, то САР называют устойчивой «в большом».

На практике возмущающие воздействия могут время от времени быстро и значительно изменяться. Поэтому САР должны быть устойчивыми «в большом» при определенных по величине и характеру конечных изменениях возмущающих воздействий.

Но исследование устойчивости «в малом» представляет большой практический интерес, так как во многих случаях на основании его можно сделать вывод об устойчивости «в большом» реальных систем. В дальнейшем будет показано, что устойчивость линейных систем не зависит от величины вызвавшего переходный процесс изменения возмущающего воздействия. Таким образом, для устойчивости линейных САР «в большом» необходимо и достаточно, чтобы система была устойчива «в малом». Для нелинейных систем в общем случае устойчивость «в малом» не означает, что они устойчивы «в большом». Но для многих нелинейных САР на основании исследования устойчивости «в малом», произведенного для определенного режима работы, можно судить и об устойчивости «в большом».

Методика исследования устойчивости «в малом» нелинейных динамических систем (к которым относятся и системы автоматического регулирования) разработана академиком А. М. Ляпуновым в 1892 г. Для исследования устойчивости «в малом» уравнения элементов системы линеаризуются (если это возможно) разложением нелинейных функций в ряд Тейлора и отбрасыванием нелинейных членов разложения, после чего исследуется устойчивость линейной модели САР. А. М. Ляпунов показал, что, если линейная модель устойчива, то нелинейная система устойчива «в малом», в случае неустойчивости линейной модели система неустойчива «в малом».

Таким образом, задача исследования устойчивости САР для наблюдающихся на практике изменений возмущающих воздействий часто сводится к исследованию устойчивости линейной системы (линейной модели нелинейной системы).

Устойчивость линейных САР. При математическом исследовании устойчивости линейной системы необходимо исходить из ее уравнения, например, из уравнения (2,10) или (2,20), или (2,25). Чтобы решить вопрос об устойчивости САР, необходимо исследовать ее движение после того, как возмущающие воздействия примут постоянные значения. Движение системы при неизменных возмущающих воздействиях называется свободным.

Примем в качестве избранного равновесный режим, соответствующий постоянным значениям возмущающих воздействий. При этом правая часть уравнения САР, содержащая возмущающие воздействия и их производные, обращается в нуль, и уравнение свободного движения системы принимает вид

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx}{dt} + a_n x = 0, \quad (2,26)$$

или

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) x = 0, \quad (2,26a)$$

где $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, a_n$ — постоянные коэффициенты.

САР будет устойчива в том и только в том случае, если с течением времени регулируемая величина x достигает установившегося значения, соответствующего избранному режиму и, следовательно, равному нулю (x — отклонение физической величины от ее избранного значения). Математически условие устойчивости можно записать в виде

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x = 0. \quad (2,27)$$

Характеристическое уравнение САР. Для решения уравнения (2,26) свободного движения составляют характеристическое уравнение

$$a_0 r^n + a_1 r^{n-1} + \dots + a_{n-1} r + a_n = 0,$$

в котором r — определяемая характеристическим уравнением неизвестная величина. Если обозначить эту величину вместо буквы r буквой p , то характеристическое уравнение

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0 \quad (2,28)$$

формально можно получить, если приравнять нулю операторный полином левой части уравнения (2,26a) свободного движения системы в операторной форме. Необходимо учитывать, что в уравнениях (2,26a) и (2,28) буквой p обозначены различные величины.

Операторный полином

$$N(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n \quad (2,29)$$

левой части уравнения системы называют характеристической функцией или характеристическим полиномом САР, поскольку, приравняв его нулю, получаем характеристическое уравнение

$$N(p) = 0. \quad (2,30)$$

Решение уравнения свободного движения системы. Решая линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами (2,26) при отсутствии кратных корней характеристического уравнения, находим регулируемую величину x как функцию времени t :

$$x = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots + A_i e^{p_i t} + \dots + A_n e^{p_n t}, \quad (2,31)$$

где $p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n$ — корни характеристического уравнения (2,28);

$A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n$ — постоянные интегрирования.

Постоянные интегрирования зависят от начальных условий и, следовательно, могут принимать различные значения, в зависимости от того, к какому состоянию пришла под влиянием изменения возмущающих воздействий система к моменту времени, который описывается начальными условиями. Устойчивость САР должна проявляться при любых значениях постоянных интегрирования.

Решение (2,31) уравнения свободного движения можно представить в виде суммы n составляющих:

$$x = x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n,$$

причем

$$x_1 = A_1 e^{p_1 t}; x_2 = A_2 e^{p_2 t}; \dots; x_i = A_i e^{p_i t}; \dots; x_n = A_n e^{p_n t}.$$

Для устойчивости САР, т. е. для удовлетворения условия (2,27) при каких угодно значениях постоянных интегрирования, необходимо и достаточно, чтобы каждая составляющая регулируемой величины с течением времени стремилась к нулю. Характер отдельных составляющих x_i регулируемой величины x зависит от вида соответствующего корня p_i характеристического уравнения.

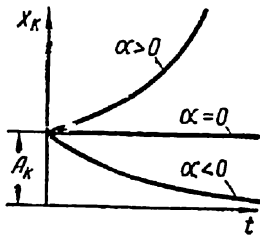


Рис. 40. Графики составляющих регулируемой величины, соответствующих вещественным корням $p_k = \alpha$ характеристического уравнения.

Вещественные корни характеристического уравнения. Некоторому корню $p_k = \alpha$ (где α — вещественная величина) соответствует составляющая регулируемой величины

$$x_k = A_k e^{\alpha t}.$$

На рис. 40 приведены кривые x_k для $\alpha > 0$, $\alpha = 0$ и $\alpha < 0$.

Если $\alpha > 0$, величина x_k бесконечно возрастает. Регулируемая величина x в этом случае стремится к бесконечности. Следовательно, при наличии среди корней характеристического уравнения вещественного положительного корня $p_k = \alpha > 0$ САР неустойчива.

Если $\alpha = 0$, то $x_k = A_k$, т. е. одна из составляющих регулируемой величины принимает постоянное значение A_k , зависящее от начальных условий. Поскольку составляющая x_k не стремится к нулю как к пределу, то наличие среди корней характеристического уравнения нулевого корня $p_k = \alpha = 0$ свидетельствует о

неустойчивости системы. Действительно, если даже все составляющие регулируемой величины, кроме x_k , достигают в пределе нуля, то регулируемая величина x по окончании процесса регулирования примет постоянное значение A_k , зависящее от начальных условий. Следовательно, система приходит к состоянию равновесия, в котором регулируемая величина имеет любое значение, но отличающееся в общем случае от заданного.

И, наконец, если $\alpha < 0$, то величина x_k с течением времени бесконечно приближается к нулю.

Комплексные корни характеристического уравнения. Так как коэффициенты характеристического уравнения $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, a_n$ представляют собой вещественные величины, то каждому комплексному корню этого уравнения должен соответствовать сопряженный комплексный корень. Рассмотрим составляющую

$$x_{l,m} = x_l + x_m$$

регулируемой величины, соответствующую паре комплексных корней

$$p_l = \alpha + j\beta; \quad p_m = \alpha - j\beta,$$

где α и β — вещественные числа, причем $\beta \neq 0$.

Эта составляющая изменяется во времени по закону

$$x_{l,m} = A_l e^{(\alpha + j\beta)t} + A_m e^{(\alpha - j\beta)t}.$$

Такая форма записи неудобна, так как вещественная величина $x_{l,m}$ выражается в виде суммы двух комплексных членов $A_l e^{(\alpha + j\beta)t}$ и $A_m e^{(\alpha - j\beta)t}$, причем постоянные интегрирования A_l и A_m также являются комплексными величинами. Введя новые вещественные постоянные интегрирования $Q_{l,m}$ и $\psi_{l,m}$, после несложных преобразований последнее уравнение можно привести к удобному для использования виду

$$x_{l,m} = Q_{l,m} e^{\alpha t} \sin(\beta t + \psi_{l,m}).$$

Таким образом, паре сопряженных комплексных корней соответствует одна составляющая $x_{l,m}$ регулируемой величины, имеющая характер колебаний с изменяющейся амплитудой $Q_{l,m} e^{\alpha t}$ и постоянной частотой β (рис. 41).

Если $\alpha > 0$, амплитуда колебаний бесконечно возрастает. При $\alpha = 0$ (корни p_l и p_m характеристического уравнения чисто мнимые) этой паре корней соответствует составляющая $x_{l,m}$ регулируемой величины, изменяющаяся по гармоническому закону с постоянной амплитудой $Q_{l,m}$. Следовательно, наличие пары комплексных кор-

ней характеристического уравнения с положительной вещественной частью или чисто мнимых означает, что система неустойчива.

Если же $\alpha < 0$, то составляющая $x_{l,m}$ регулируемой величины с течением времени стремится к нулю.

Условие устойчивости. Составляющая регулируемой величины, соответствующая вещественному корню, стремится к нулю только в том случае, когда вещественный корень от-

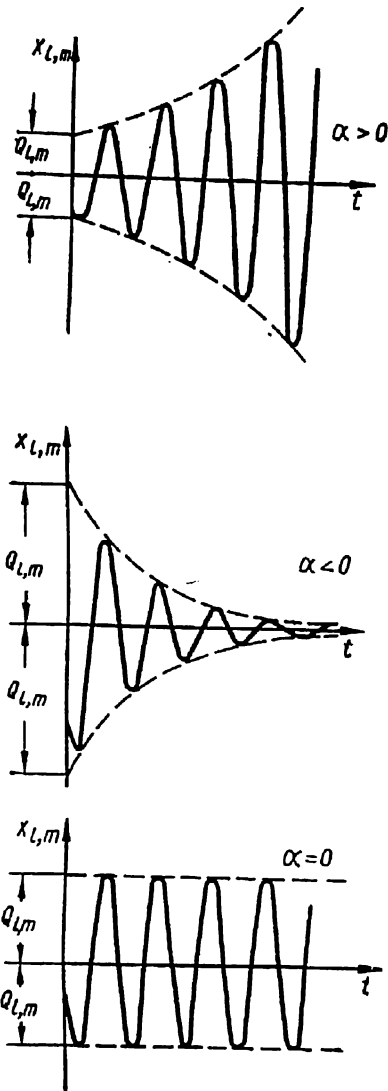


Рис. 41. Графики составляющих регулируемой величины, соответствующих паре комплексных корней $p_{l,m} = \alpha \pm j\beta$ характеристического уравнения.

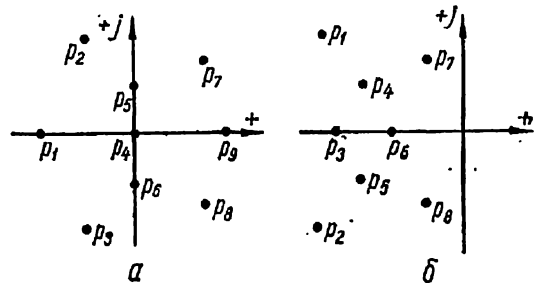


Рис. 42. Изображение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости для системы: а — неустойчивой; б — устойчивой.

рицателен, а составляющая, соответствующая паре комплексных корней — если комплексные корни имеют отрицательную вещественную часть. Поэтому можно сформулировать следующее правило: для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы вещественные части всех корней характеристического уравнения были отрицательными. Это правило можно распространить и на случай наличия кратных корней характеристического уравнения.

В линейной САР при условии отрицательности вещественных частей всех корней характеристического уравнения свободное движение, описываемое уравнением (2,31), затухнет независимо от того, какие по величине изменения возмущающих воздействий

привели систему в состояние движения. Поэтому устойчивости «в малом» и «в большом» для линейной системы являются эквивалентными понятиями.

Изображение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости. Корни характеристического уравнения САР можно изобразить точками на комплексной плоскости (рис. 42). Вещественные корни изображаются точками на вещественной оси. Пара комплексных корней изображается двумя точками, расположенными симметрично относительно вещественной оси. Корни с отрицательной вещественной частью находятся в левой полуплоскости, т. е. слева от мнимой оси, а корни с положительной вещественной частью — в правой полуплоскости. Чисто мнимые корни лежат на мнимой оси, нулевой корень — в начале координат.

Для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения изображались на комплексной плоскости точками в левой полуплоскости (рис. 42, б).

§ 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ.

АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАУСА—ГУРВИЦА

Необходимое условие устойчивости. Умножив обе части характеристического уравнения (2,28) на -1 , можно изменить знаки всех входящих в него коэффициентов на противоположные. Для определенности в дальнейшем будем считать, что характеристическое уравнение приведено к такому виду, когда

$$a_0 > 0. \quad (2,32)$$

Разложив левую часть уравнения (2,28) на множители, характеристическое уравнение системы можно записать в виде

$$a_0 (p - p_1)(p - p_2) \dots (p - p_n) = 0. \quad (2,33)$$

Предположим, что САР устойчива. В этом случае все вещественные корни характеристического уравнения отрицательны, и каждая пара комплексных корней имеет отрицательную вещественную часть.

Отрицательному вещественному корню $p_k = -b$, где $b > 0$, в левой части характеристического уравнения соответствует множитель

$$p - p_k = p + b.$$

Паре комплексных корней с отрицательной вещественной частью $p_{1,m} = -c \pm jd$ (где $c > 0$) соответствует множитель

$$(p - p_1)(p - p_m) = (p + c - jd)(p + c + jd) = p^2 + 2cp + c^2 + d^2.$$

Таким образом, левую часть характеристического уравнения (2,33) можно представить в виде произведения коэффициента a_0 и ряда множителей типа $p + b$ или $p^2 + 2cp + c^2 + d^2$.

Следовательно, для устойчивой системы автоматического регулирования все множители левой части характеристического уравнения имеют положительные коэффициенты. Перемножив все множители левой части этого уравнения, получим полином n -й степени, все коэффициенты которого больше нуля. Этот полином представляет собой левую часть уравнения (2,28).

Следовательно, для устойчивости системы необходимо, чтобы все коэффициенты ее характеристического уравнения были положительными (при $a_0 > 0$):

$$a_1 > 0; a_2 > 0; \quad a_n > 0.$$

Это условие устойчивости является необходимым, но не достаточным: бывают неустойчивые САР со всеми положительными коэффициентами характеристического уравнения.

Методы исследования устойчивости. Об устойчивости линейной системы можно судить по корням характеристического уравнения. Но, чтобы решить характеристические уравнения третьего, четвертого и более высоких порядков, необходимо затратить много времени. По необходимому условию устойчивости можно выявить явно неустойчивые системы, характеристические уравнения которых содержат отрицательные или нулевые коэффициенты, но нельзя определить, устойчива ли система, когда все коэффициенты положительны.

Поэтому для исследования устойчивости линейных систем предложены некоторые методы, на основании которых можно судить о том, имеют ли все корни характеристического уравнения отрицательные вещественные части, не решая характеристического уравнения. Математические выражения условий отрицательности вещественных частей корней характеристического уравнения называются критериями устойчивости.

Для исследования устойчивости линейных систем применяется также метод построения областей устойчивости (метод Д-разбиения) [9, 15, 31, 37].

Некоторые параметры САР, от которых зависят значения коэффициентов ее характеристического уравнения, можно варьировать при конструировании или при настройке системы. Многие параметры системы могут самопроизвольно изменяться с течением времени вследствие изменения физических свойств ее деталей и внешних условий. С помощью метода построения областей устойчивости можно установить и графически изобразить область изменения одного или нескольких параметров, в которой система остается устойчивой. Для одного из частных случаев этот метод был использован еще в 1877 г. основоположником теории автоматического регулирования И. А. Вишнеградским. Как общий метод исследования устойчивости линейных систем построение областей устойчивости было предложено советским ученым Ю. И. Неймарком в 1949 г.

Методы построения областей устойчивости в этой книге не рассматриваются.

Алгебраический критерий устойчивости Рауса — Гурвица. Алгебраический критерий появился ранее других критериев устойчивости. Он выражает условие устойчивости в виде ряда неравенств, соблюдение которых необходимо и достаточно, чтобы вещественные части корней характеристического уравнения были отрицательными. Для составления этих неравенств необходимо выполнить определенные алгебраические действия над коэффициентами характеристического уравнения.

Алгебраический критерий предложен в несколько различной форме Раусом и Гурвицем. Раус сформулировал его в 1875 г. в виде правила, определяющего порядок действий над коэффициентами характеристического уравнения для составления неравенств, выражающих условия устойчивости. Гурвиц независимо от Рауса в 1895 г. выразил подобные неравенства с помощью определителей, элементами которых являются коэффициенты характеристического уравнения.

Алгебраический критерий в форме, предложенной Гурвицем. Если характеристическое уравнение имеет вид (2,28), то определителем Гурвица i -го порядка Δ_i будем называть определитель, составленный по следующему правилу:

в качестве элементов главной диагонали, начиная от левого верхнего и кончая правым нижним, вписываются последовательно коэффициенты характеристического уравнения a_1, a_2, \dots, a_i ;

вверх от элементов главной диагонали вписываются коэффициенты с последовательно возрастающими индексами и нули вместо коэффициентов с индексами, большими, чем n ;

вниз от элементов главной диагонали вписываются коэффициенты с последовательно убывающими индексами и нули вместо коэффициентов с индексами, меньшими нуля.

Алгебраический критерий устойчивости по Гурвицу, в несколько преобразованном виде, формулируется следующим образом: все корни характеристического уравнения (2,28), у которого $a_0 > 0$, имеют отрицательные вещественные части тогда и только тогда, когда положительны все коэффициенты характеристического уравнения *

$$a_1 > 0; a_2 > 0; \quad a_n > 0 \quad (2,34)$$

и положительны все определители Гурвица от 2-го до $(n - 1)$ -го порядка

$$\Delta_2 > 0; \Delta_3 > 0; \quad \Delta_{n-1} > 0. \quad (2,35)$$

Доказательства алгебраического критерия устойчивости не приводятся.

*Применение алгебраического критерия для линейных систем невысокого порядка**.* Определители Гурвица второго и более высоких порядков составляются в случае характеристического уравнения третьей или более высокой степени. Для систем первого и второго порядка условие положительности коэффициентов является не только необходимым, но и достаточным условием устойчивости.

Характеристическое уравнение третьей степени

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0.$$

Условия положительности коэффициентов

$$a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0.$$

Условие положительности определителя Гурвица

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0.$$

Условия устойчивости рассматриваемой системы

$$a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; \Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0. \quad (2,36)$$

* Это условие положительности коэффициентов представляет собой рассмотренное в предыдущем параграфе необходимое условие устойчивости.

** Под порядком САР подразумевают порядок дифференциального уравнения, описывающего ее движение.

Характеристическое уравнение четвертой степени

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0.$$

Условия положительности коэффициентов

$$a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; a_4 > 0.$$

Условия положительности определителей Гурвица

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_3 \Delta_2 - a_1 \begin{vmatrix} a_1 & 0 \\ a_0 & a_4 \end{vmatrix} = a_3 \Delta_2 - a_1^2 a_4 > 0.$$

Если выполняется условие $\Delta_3 > 0$, то при выполнении условий положительности коэффициентов будет также соблюдаться условие $\Delta_2 > 0$.

Окончательно получаем необходимые и достаточные условия устойчивости в виде следующих неравенств:

$$\left. \begin{aligned} & a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; a_4 > 0; \\ & \Delta_3 = a_1 a_2 a_3 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4 > 0. \end{aligned} \right\} \quad (2,37)$$

Характеристическое уравнение пятой степени

$$a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 = 0.$$

Условия положительности коэффициентов

$$a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; a_4 > 0; a_5 > 0.$$

Условия положительности определителей Гурвица

$$\Delta_2 > 0; \Delta_3 > 0; \Delta_4 > 0.$$

Можно убедиться в том, что при выполнении условий $\Delta_2 > 0$ и $\Delta_4 > 0$ и положительности всех коэффициентов характеристического уравнения выполняется условие $\Delta_3 > 0$. Учитывая это, получаем необходимые и достаточные условия устойчивости:

$$\left. \begin{aligned} & a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; a_4 > 0; a_5 > 0; \\ & \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0; \\ & \Delta_4 = (a_1 a_2 - a_0 a_3)(a_3 a_4 - a_2 a_5) - (a_1 a_4 - a_0 a_5)^2 > 0. \end{aligned} \right\} \quad (2,38)$$

Пример 1. Установить, устойчива ли система регулирования, если известно ее характеристическое уравнение

$$p^4 + 2p^3 - 3p^2 + p + 0,5 = 0.$$

Система неустойчива, так как не выполняется необходимое условие положительности коэффициентов характеристического уравнения (коэффициент при p^2 отрицателен).

Пример 2. Установить, устойчива ли система регулирования, если ее характеристическое уравнение имеет вид

$$p^4 + 2p^3 + 3p^2 + 0,5 = 0.$$

Система неустойчива, так как не выполняется условие положительности коэффициентов (коэффициент при p равен нулю).

Пример 3. Установить, устойчива ли система регулирования, если известно ее характеристическое уравнение

$$p^4 + 2p^3 + 3p^2 + p + 0,5 = 0.$$

Воспользуемся алгебраическим критерием. Условие положительности коэффициентов характеристического уравнения соблюдается:

$$a_0 = 1 > 0; a_1 = 2 > 0; a_2 = 3 > 0; a_3 = 1 > 0; a_4 = 0,5 > 0.$$

Условия положительности определителей Гурвица сводятся для характеристического уравнения четвертой степени к условию $\Delta_3 > 0$. Вычисляем определитель Гурвица третьего порядка

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 a_2 a_3 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4 = 2 \cdot 3 \cdot 1 - 1 \cdot 1^2 - 2^2 \cdot 0,5 = 3 > 0.$$

Следовательно, система регулирования устойчива.

Пример 4. Установить, устойчива ли система регулирования, если известно ее характеристическое уравнение

$$p^4 + 2p^3 + 3p^2 + p + 5 = 0.$$

Это уравнение отличается от рассмотренного в предыдущем примере только величиной свободного члена $a_4 = 5$. Необходимое условие положительности коэффициентов выполняется, как и в предыдущем примере. Но условие положительности определителя Δ_3 не соблюдается, поскольку

$$\Delta_3 = 2 \cdot 3 \cdot 1 - 1 \cdot 1^2 - 2^2 \cdot 5 = -15 < 0.$$

Следовательно, система регулирования неустойчива.

§ 4. КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ МИХАЙЛОВА

Рассматриваемый критерий устойчивости линейных САР предложен советским ученым А. В. Михайловым в 1938 г.

Характеристический вектор и характеристическая кривая. Рассмотрим характеристическую функцию

$$N(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n$$

при чисто мнимых значениях аргумента p . Приняв $p = j\omega$ (где ω — вещественная переменная величина), получим

$$N(j\omega) = a_n + j\omega a_{n-1} - \omega^2 a_{n-2} - j\omega^3 a_{n-3} + \dots + j^n \omega^n a_0. \quad (2,39)$$

Обозначив вещественную и мнимую части функции $N(j\omega)$ соответственно через $P(\omega)$ и $jQ(\omega)$, имеем

$$N(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega), \quad (2,40)$$

причем

$$P(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - \dots \quad (2,41)$$

$$Q(\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 - \dots \quad (2,42)$$

Вектор $N(j\omega)$, т. е. вектор, изображающий комплексную функцию $N(j\omega)$, называется характеристическим. Годограф характеристического вектора $N(j\omega)$, т. е. кривая, описываемая концом вектора при изменении независимой переменной величины ω , называется характеристической кривой, или годографом Михайлова.

Свойства характеристического вектора. Характеристическую функцию $N(p)$ можно представить в виде произведения:

$$N(p) = a_0 (p - p_1) (p - p_2) \dots (p - p_n). \quad (2,43)$$

Соответственно этому для характеристического вектора получаем выражение

$$N(j\omega) = a_0 (j\omega - p_1) (j\omega - p_2) \dots (j\omega - p_n). \quad (2,44)$$

Таким образом, характеристический вектор $N(j\omega)$ равен произведению векторов-множителей $(j\omega - p_1), (j\omega - p_2), \dots, (j\omega - p_n)$ и положительного вещественного коэффициента a_0 . Модуль вектора $N(j\omega)$ равен произведению модулей векторов-множителей и коэффициента a_0 , а аргумент — сумме аргументов векторов-множителей.

Из рис. 43 видно, что вектор-множитель $(j\omega - p_s)$, соответствующий s -му корню p_s характеристического уравнения, можно изобразить на комплексной плоскости как разность векторов $j\omega$ и p_s .

Пусть независимая вещественная переменная величина ω изменяется от $-\infty$ до $+\infty$, и точка M конца вектора $j\omega$ проходит снизу вверх по всей мнимой оси. При этом будут изменяться

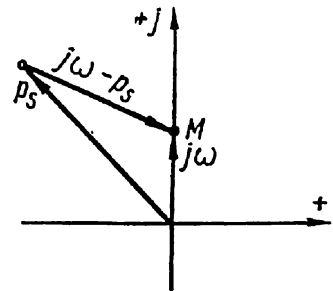


Рис. 43. Изображение вектора-множителя $(j\omega - p_s)$ на комплексной плоскости.

по величине и по фазе векторы-множители и характеристический вектор $N(j\omega)$.

Предположим, что среди корней характеристического уравнения (2,30) имеется корень p_i с отрицательной вещественной частью. Как видно из рис. 44, при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ соответствующий этому корню вектор-множитель $(j\omega - p_i)$ поворачивается против часовой стрелки на угол

$$\Delta \arg(j\omega - p_i) = \pi.$$

Если среди корней характеристического уравнения имеется корень p_k с положительной вещественной частью (рис. 44), то этому корню соответствует множитель $(j\omega - p_k)$, аргумент которого при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ изменяется на отрицательную величину

$$\Delta \arg(j\omega - p_k) = -\pi.$$

Среди корней характеристического уравнения могут быть корни с вещественной частью, равной нулю: чисто мнимые и нулевые корни. Паре чисто мнимых корней $p_{l,m} = \pm j\beta$ (где β — положительное вещественное число) соответствуют множители $(j\omega \mp j\beta)$. Когда величина ω , изменяясь от $-\infty$ до $+\infty$, принимает значение $\omega = -\beta$, множитель $(j\omega + j\beta)$ обращается в нуль. Когда же ω проходит через значение $\omega = \beta$, обращается в нуль множитель $(j\omega - j\beta)$.

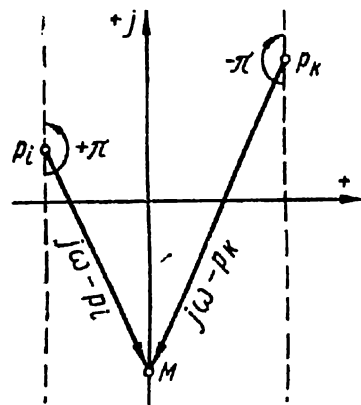


Рис. 44. Векторы-множители, соответствующие корням характеристического уравнения с положительной и отрицательной вещественной частью.

Следовательно, при $\omega = \pm \beta$ характеристический вектор становится равным нулю. Если среди корней характеристического уравнения имеется нулевой корень, то характеристический вектор обращается в нуль при $\omega = 0$.

Если все корни характеристического уравнения имеют отрицательные вещественные части, то при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$ каждый из n векторов-множителей повернется на угол $+\pi$. Вектор-произведение $N(j\omega)$ повернется при этом против часовой стрелки на угол, равный сумме изменений аргументов множителей:

$$\Delta \arg N(j\omega) = n\pi.$$

Допустим теперь, что среди корней характеристического уравнения имеются корни с положительной вещественной частью. В этом случае угол, описываемый характеристическим вектором

$N(j\omega)$ при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$, будет меньше $n\pi$. Если, например, из n корней характеристического уравнения r корней имеют положительные, а остальные — отрицательные вещественные части, то аргумент вектора $N(j\omega)$ изменится на величину

$$\Delta \arg N(j\omega) = (n - r)\pi - r\pi = (n - 2r)\pi.$$

Если имеются корни характеристического уравнения с нулевой вещественной частью, то при некоторых значениях ω характеристический вектор $N(j\omega)$ обращается в нуль, а характеристическая кривая проходит через начало координат.

Критерий устойчивости. Как было установлено, для устойчивости САР необходимо и достаточно, чтобы вещественные части всех корней характеристического уравнения были меньше нуля. Учитывая рассмотренные свойства характеристического вектора, можно утверждать, что САР устойчива тогда и только тогда, когда при изменении вещественной величины ω от $-\infty$ до $+\infty$ характеристический вектор $N(j\omega)$ (будучи все время отличным от нуля) описывает в положительном направлении угол $n\pi$.

Для оценки угла поворота характеристического вектора строят его годограф — характеристическую кривую. Из зависимостей (2,41) и (2,42) следует, что полином $P(\omega)$ является четной функцией ω , а $Q(\omega)$ — нечетной, т. е.

$$\left. \begin{aligned} P(-\omega) &= P(\omega); \\ Q(-\omega) &= -Q(\omega). \end{aligned} \right\} \quad (2,45)$$

Некоторому значению ω' величины ω соответствует на характеристической кривой точка N' , а противоположному по знаку значению $\omega'' = -\omega'$ соответствует точка N'' (рис. 45). Из соотношений (2,45) видно, что точки N' и N'' расположены симметрично относительно вещественной оси. Следовательно, часть характеристической кривой, соответствующая значениям ω от $-\infty$ до 0, является зеркальным отображением относительно веществен-

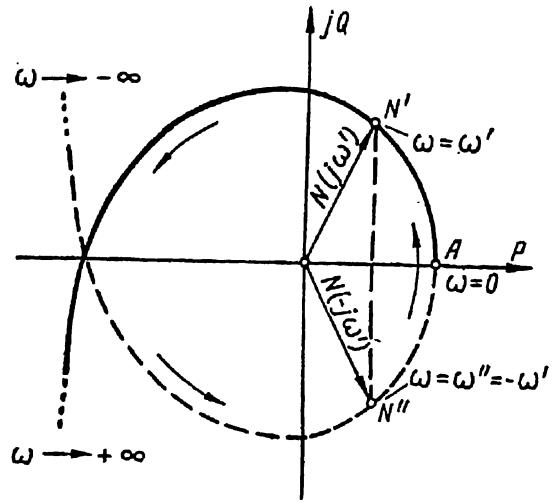


Рис. 45. Симметрия характеристической кривой относительно вещественной оси.

венной оси другой части кривой, соответствующей значениям ω от 0 до $+\infty$.

Таким образом, чтобы решить вопрос об устойчивости САР, достаточно рассмотреть характеристическую кривую при изменении ω от 0 до $+\infty$, которому будет соответствовать поворот характеристического вектора на вдвое меньший угол:

$$\Delta' \arg N(j\omega) = \frac{1}{2} \Delta \arg N(j\omega).$$

Если вещественные части всех корней характеристического уравнения отрицательны, то

$$\Delta' \arg N(j\omega) = n \frac{\pi}{2}, \quad (2,46)$$

если же r корней имеют положительные вещественные части, то

$$\Delta' \arg N(j\omega) = (n - 2r) \frac{\pi}{2}. \quad (2,46a)$$

Таким образом, критерий устойчивости Михайлова, основанный на рассмотрении годографа характеристического вектора, можно сформулировать следующим образом: *для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы при изменении вещественной величины ω от 0 до $+\infty$ характеристический вектор $N(j\omega)$, будучи все время отличным от нуля, повернулся в положительном направлении на угол $n \frac{\pi}{2}$, где n — степень характеристического уравнения.*

Вид характеристической кривой. В дальнейшем будем подразумевать, что характеристическая кривая построена для изменения ω от 0 до $+\infty$. Будем также считать, что все коэффициенты характеристического уравнения больше нуля, поскольку при несоблюдении этого условия САР заведомо неустойчива, и исследование устойчивости по Михайлову становится излишним.

Нулевому значению ω соответствует точка A характеристической кривой на положительной вещественной полуоси (рис. 45), поскольку согласно уравнению (2,39) $N(j0) = a_n > 0$. В точке A характеристическая кривая образует с вещественной осью угол $\frac{\pi}{2}$ и при последующем возрастании ω поднимается вверх, т. е. характеристический вектор начинает двигаться против часовой стрелки. Это следует из соотношений

$$\left. \frac{dP(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=0} = 0 \text{ и } \left. \frac{dQ(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=0} = a_{n-1} > 0,$$

которые можно получить из уравнений (2,41) и (2,42).

Согласно уравнениям (2,41) и (2,42) при бесконечном возрастании ω характеристический вектор бесконечно возрастает по модулю, причем бесконечно большие значения приобретают обе его проекции $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ на координатные оси. Знаки этих проекций при $\omega = +\infty$, а следовательно, и квадрант, в который уходит характеристическая кривая при бесконечном возрастании ω , определяются высшими показателями степени ω в уравнениях (2,41) и (2,42), которые зависят от степени характеристического уравнения. Легко убедиться в том, что для характеристических уравнений 1, 2, 3 и 4-й степени бесконечно удаленные точки характеристической кривой лежат соответственно в 1, 2, 3 и 4-м квадрантах; для характеристического уравнения 5-й степени — в 1-м квадранте и т. д.

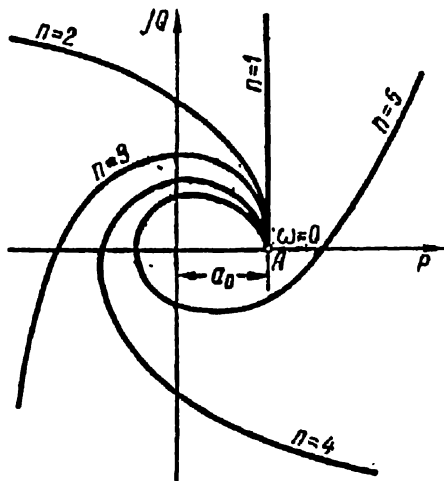


Рис. 46. Примеры характеристических кривых устойчивых систем.

Необходимо отметить, что аргумент характеристического вектора

$N(j\omega)$ при $\omega \rightarrow +\infty$ стремится к пределу, кратному $\frac{\pi}{2}$. В этом можно убедиться, исходя из зависимости

$$\operatorname{tg} \arg N(j\omega) = \frac{Q(\omega)}{P(\omega)},$$

если учесть, что предел отношения $\frac{Q(\omega)}{P(\omega)}$ при $\omega \rightarrow +\infty$, равен 0 или $\pm\infty$, так как $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ являются полиномами от ω различной степени.

Поскольку характеристический вектор устойчивой системы для $\omega = 0$ направлен по вещественной положительной полуоси, а при возрастании ω до $+\infty$ поворачивается на угол $n\frac{\pi}{2}$, то характеристическая кривая устойчивой системы обходит последовательно n квадрантов комплексной плоскости.

Примеры характеристических кривых устойчивых систем для $n = 1 \div 5$ приведены на рис. 46. Кривые построены при условии, что свободные члены a_n характеристических уравнений одинаковы. Особенностью характеристических кривых устойчивых САР

является постоянное увеличение аргумента характеристического вектора по мере возрастания величины ω^* . На рис. 47 приведены характеристические кривые неустойчивых систем для $n = 4$ и $n = 6$.

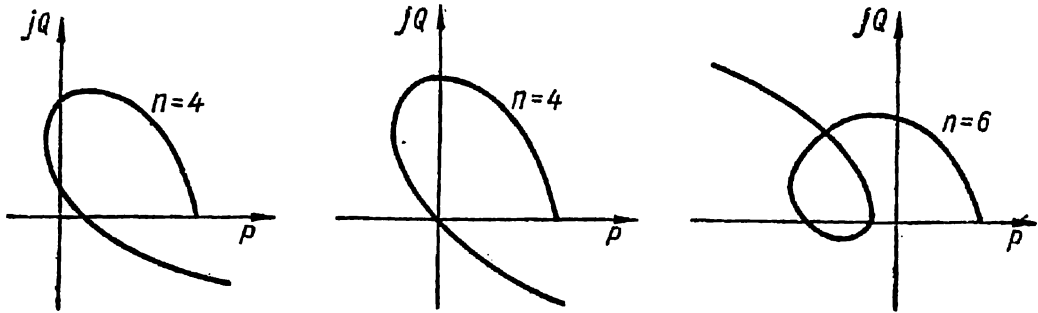


Рис. 47. Примеры характеристических кривых неустойчивых систем.

Пример 5. Построить характеристическую кривую и проверить с помощью критерия Михайлова устойчивость САР, если задано ее характеристическое уравнение

$$14p^5 + 18p^4 + 40p^3 + 45p^2 + 10p + 4 = 0.$$

Для рассматриваемой САР

$$\begin{aligned} N(p) &= 14p^5 + 18p^4 + 40p^3 + 45p^2 + 10p + 4; \\ N(j\omega) &= 18\omega^4 - 45\omega^2 + 4 + j(14\omega^5 - 40\omega^3 + 10\omega); \\ P(\omega) &= 18\omega^4 - 45\omega^2 + 4; \\ Q(\omega) &= (14\omega^4 - 40\omega^2 + 10)\omega. \end{aligned}$$

Вычисляем значения функций $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ для ряда значений ω от 0 до $+\infty$. Результаты вычислений сводим в табл. 1.

Таблица 1

ω	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,5	1,55	1,6	1,65	$+\infty$
$P(\omega)$	4	2,2	0,1	-2,7	-6,2	-9,9	-17,6	-6,2	0	7,0	15	$+\infty$
$Q(\omega)$	0	1,7	1,9	1,6	0,44	-1,6	-7,9	-13,5	-7,7	-0,64	8,2	$+\infty$

Построенная по данным таблицы характеристическая кривая A показана на рис. 48. При изменении ω от 0 до $+\infty$ характеристический вектор все

* Это объясняется увеличением аргументов каждого из векторов-множителей при возрастании ω .

время отличен от нуля и поворачивается на угол $5 \frac{\pi}{2}$ против часовой стрелки*. Учитывая, что в этом примере $n = 5$, на основании критерия Михайлова делаем вывод о том, что система устойчива.

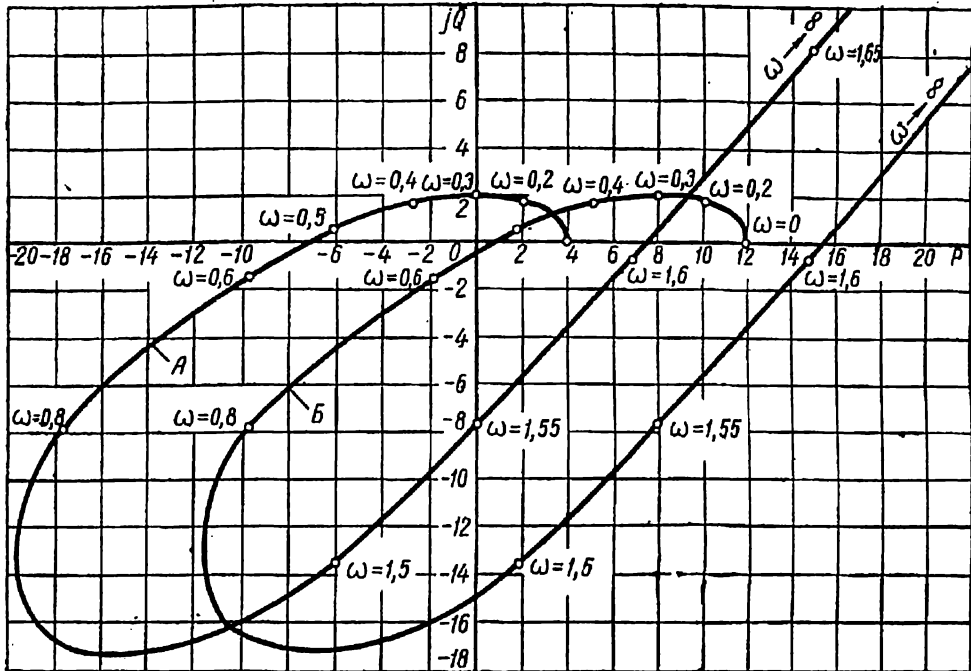


Рис. 48. Характеристические кривые систем регулирования.

Пример 6. Построить характеристическую кривую и проверить с помощью критерия Михайлова устойчивость САР, если задано ее характеристическое уравнение

$$14p^5 + 18p^4 + 40p^3 + 45p^2 + 10p + 12 = 0.$$

В этом примере свободный член характеристического полинома $a_n = a_5 = 12$ вместо $a_n = a_5 = 4$ в предыдущем примере. Остальные коэффициенты характеристического полинома имеют прежние величины. Чтобы получить характеристическую кривую *Б* для рассматриваемого примера, достаточно все точки характеристической кривой *А* сдвинуть вдоль вещественной оси на 8 единиц вправо (рис. 48). Характеристическая кривая *Б* не обходит последовательно пять квадрантов, как в примере 5. Результирующий угол поворота характеристического вектора составляет $+\frac{\pi}{2}$, т. е. меньше $+\frac{5\pi}{2}$. Следовательно, система неустойчива.

* Точку $\omega = +\infty$ нельзя показать на графике. Но из уравнений для $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ видно, что при бесконечном возрастании ω характеристический вектор стремится принять положение, совпадающее с мнимой положительной полуосью.

Исследование устойчивости по корням уравнений $P(\omega) = 0$ и $Q(\omega) = 0$. В связи с тем, что по мере увеличения ω аргумент характеристического вектора устойчивой системы непрерывно возрастает, соответствующая характеристическая кривая поочередно пересекает вещественную и мнимую оси. Общее количество таких пересечений должно быть n (включая пересечение вещественной оси в точке $\omega = 0$), поскольку при изменении ω от 0 до $+\infty$ характеристическая кривая обходит n квадрантов.

Точкам пересечения характеристической кривой с вещественной осью соответствуют значения ω , являющиеся корнями уравнения $Q(\omega) = 0$; точкам пересечения с мнимой осью соответствуют корни уравнения $P(\omega) = 0$. Нетрудно убедиться в том, что характеристическая кривая только в том случае n раз пересекает вещественную и мнимую оси, если все корни уравнений $Q(\omega) = 0$ и $P(\omega) = 0$ вещественны. Чтобы пересечения с вещественной и мнимой осью были поочередными, корни уравнений $P(\omega) = 0$ и $Q(\omega) = 0$ должны быть перемежающимися, т. е. должны чередоваться, если их расставить в порядке возрастания.

Как уже указывалось, при значениях ω , близких к нулю, возрастанию ω соответствует подъем точек характеристической кривой вверх от вещественной положительной полуоси (предполагается, что коэффициенты характеристического уравнения больше нуля). Поэтому, если все корни уравнений $Q(\omega) = 0$ и $P(\omega) = 0$ — вещественные и перемежающиеся, то характеристическая кривая при изменении ω от 0 до $+\infty$ обходит n квадрантов против часовой стрелки. Отсюда вытекает видоизмененная формулировка критерия устойчивости Михайлова: *при соблюдении необходимого условия положительности всех коэффициентов характеристического уравнения для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы все корни уравнений $Q(\omega) = 0$ и $P(\omega) = 0$ были вещественными и перемежающимися.*

Перемежаемость проверяется только для неотрицательных корней уравнений $Q(\omega) = 0$ и $P(\omega) = 0$, поскольку рассматриваются изменения ω от 0 до $+\infty$. Если неотрицательные корни перемежающиеся, то все вещественные корни этих уравнений также перемежающиеся.

Пример 7. Проверить устойчивость системы, рассмотренной в примере 5, воспользовавшись видоизмененной формулировкой критерия Михайлова.

Условие положительности коэффициентов характеристического уравнения соблюдается. Вычисляем квадраты ω_{Q1}^2 , ω_{Q2}^2 и ω_{Q3}^2 корней уравнения

$$Q(\omega) = (14\omega^4 - 40\omega^2 + 10)\omega = 0;$$

$$\omega_{Q1} = 0; \quad \omega_{Q2}^2 = 0;$$

$$\omega_{Q2}^2 = \frac{40 - \sqrt{40^2 - 4 \cdot 14 \cdot 10}}{2 \cdot 14} = \frac{40 - 32,25}{28} = 0,276;$$

$$\omega_{Q3}^2 = \frac{40 + \sqrt{40^2 - 4 \cdot 14 \cdot 10}}{2 \cdot 14} = \frac{40 + 32,25}{28} = 2,58.$$

Находим квадраты ω_{P1}^2 и ω_{P2}^2 корней уравнения

$$P(\omega) = 18\omega^4 - 45\omega^2 + 4 = 0;$$

$$\omega_{P1}^2 = \frac{45 - \sqrt{45^2 - 4 \cdot 18 \cdot 4}}{2 \cdot 18} = \frac{45 - 41,68}{36} = 0,092;$$

$$\omega_{P2}^2 = \frac{45 + \sqrt{45^2 - 4 \cdot 18 \cdot 4}}{2 \cdot 18} = \frac{45 + 41,68}{36} = 2,41.$$

Все корни обоих уравнений вещественные. Вычислять величины корней по их квадратам нет необходимости. Располагаем найденные квадраты корней в порядке их возрастания в табл. 2.

Таблица 2

Номера корней	1	2	3	4	5
Квадраты корней уравнения $Q(\omega) = 0$	$\omega_{Q1}^2 = 0$	—	$\omega_{Q2}^2 = 0,276$	—	$\omega_{Q3}^2 = 2,58$
Квадраты корней уравнения $P(\omega) = 0$	—	$\omega_{P1}^2 = 0,092$	—	$\omega_{P2}^2 = 2,41$	—

Как видно из табл. 2, условие перемежаемости корней соблюдается. Следовательно, система устойчива.

Пример 8. Проверить устойчивость системы, рассмотренной в примере 6, воспользовавшись видоизмененной формулировкой критерия Михайлова.

Все коэффициенты характеристического уравнения положительны. Уравнение $Q(\omega) = 0$ решено в примере 7. Уравнение

$$P(\omega) = 18\omega^4 - 45\omega^2 + 12 = 0$$

отличается от соответствующего уравнения в примере 7. Решая его относительно ω^2 , находим

$$\omega_{P1}^2 = 0,304; \quad \omega_{P2}^2 = 2,2.$$

Все корни обоих уравнений — вещественные. Располагаем найденные квадраты корней в порядке их возрастания в табл. 3.

Таблица 3

Номера корней	1	2	3	4	5
Квадраты корней уравнения $Q(\omega) = 0$	$\omega_{Q1}^2 = 0$	$\omega_{Q2}^2 = 0,276$	—	—	$\omega_{Q3}^2 = 2,58$
Квадраты корней уравнения $P(\omega) = 0$	—	—	$\omega_{P1}^2 = 0,304$	$\omega_{P2}^2 = 2,2$	—

Из табл. 3 видно, что корни уравнений $P(\omega) = 0$ и $Q(\omega) = 0$ не перемежаются. Следовательно, система неустойчива.

§ 5. АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЙ КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Общие сведения. Амплитудно-фазовый критерий используется для исследования устойчивости замкнутых САР. Он основан на рассмотрении амплитудно-фазовой характеристики искусственно разомкнутой цепи звеньев замкнутой системы.

Исследование устойчивости при помощи амплитудно-фазовых характеристик было предложено Найквистом в 1932 г. для усилителей с обратной связью. А. В. Михайлов развил этот метод и показал целесообразность его применения для исследования устойчивости САР. Амплитудно-фазовый критерий называют также критерием Найквиста или Найквиста—Михайлова.

Исходные соотношения. Рассмотрим САР по отклонению регулируемой величины. Это — замкнутая система. Разомкнув ее искусственно, получим разомкнутую цепь звеньев, движение которой описывается уравнением (2,4). Уравнение свободного движения разомкнутой цепи имеет вид

$$D(p) x_{\text{вых}} = 0 \quad (2,47)$$

и ее характеристическое уравнение

$$D(p) = 0. \quad (2,48)$$

Следовательно, $D(p)$ является характеристическим полиномом разомкнутой цепи.

Разомкнутая цепь звеньев может быть устойчива (или неустойчива), но это не означает, что устойчива (или неустойчива) замкнутая САР. Необходимое и достаточное условие устойчивости

разомкнутой цепи состоит в отрицательности вещественных частей всех корней характеристического уравнения (2,48).

Передаточная функция разомкнутой цепи определяется уравнением (2,5). Положив в нем $p = j(\omega)$, находим комплексную частотную функцию разомкнутой цепи

$$W_p(j\omega) = \frac{M(j\omega)}{D(j\omega)}. \quad (2,49)$$

На основании зависимости (2,49) строится амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой цепи.

Движение САР по отклонению описывается уравнением (2,10). Приравняв нулю возмущающие воздействия g и q , получим уравнение свободного движения

$$[D(p) + M(p)]x = 0. \quad (2,50)$$

Характеристическое уравнение системы имеет вид

$$D(p) + M(p) = 0, \quad (2,51)$$

а характеристический полином определяется зависимостью

$$N(p) = D(p) + M(p). \quad (2,52)$$

В используемых на практике САР степень операторного полинома $M(p)$ правой части уравнения (2,4) разомкнутой цепи всегда меньше степени операторного полинома $D(p)$ левой части уравнения. Например, если разомкнутая цепь состоит из нескольких последовательно включенных простых звеньев, то полином $M(p)$ имеет нулевую степень, т. е. обращается в постоянное число. При выводе критерия Найквиста будем считать, что степень полинома $M(p)$ не выше степени полинома $D(p)$. Следовательно, $N(p)$ представляет собой полином от p той же степени, что и $D(p)$.

Доказательство и формулировка критерия устойчивости. Рассмотрим комплексную функцию

$$R(j\omega) = 1 + W_p(j\omega). \quad (2,53)$$

С помощью зависимостей (2,49) и (2,52) получаем

$$R(j\omega) = \frac{N(j\omega)}{D(j\omega)}, \quad (2,54)$$

причем $N(j\omega)$ и $D(j\omega)$ — характеристические векторы соответственно замкнутой САР и разомкнутой цепи ее звеньев.

Аргумент вектора $R(j\omega)$ определяется соотношением

$$\arg R(j\omega) = \arg N(j\omega) - \arg D(j\omega).$$

Найдем угол $\Delta' \arg R(j\omega)$ поворота вектора $R(j\omega)$ при изменении ω от 0 до $+\infty$. Как следует из последнего соотношения,

$$\Delta' \arg R(j\omega) = \Delta' \arg N(j\omega) - \Delta' \arg D(j\omega), \quad (2,55)$$

где $\Delta' \arg N(j\omega)$ и $\Delta' \arg D(j\omega)$ — углы поворота векторов $N(j\omega)$ и $D(j\omega)$ при изменении ω от 0 до $+\infty$.

Если из n корней характеристического уравнения (2,48) разомкнутой цепи λ корней имеют положительные, а остальные отрицательные вещественные части, то аналогично зависимости (2,46 а) имеем

$$\Delta' \arg D(j\omega) = (n - 2\lambda) \frac{\pi}{2}.$$

Если рассматриваемая замкнутая САР устойчива, то

$$\Delta' \arg N(j\omega) = n \frac{\pi}{2},$$

если неустойчива, то

$$\Delta' \arg N(j\omega) < n \frac{\pi}{2}.$$

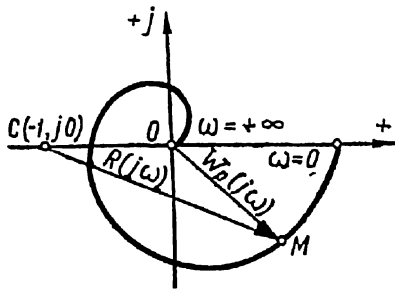


Рис. 49. Изображение на комплексной плоскости векторов $W_p(j\omega)$ и $R(j\omega)$.

На основании зависимости (2,55) и последних соотношений, определяющих углы поворота векторов $D(j\omega)$ и $N(j\omega)$, получаем для системы:
устойчивой

$$\Delta' \arg R(j\omega) = n \frac{\pi}{2} - (n - 2\lambda) \frac{\pi}{2} = \lambda\pi = \frac{\lambda}{2} 2\pi;$$

неустойчивой

$$\Delta' \arg R(j\omega) < \frac{\lambda}{2} \cdot 2\pi.$$

Комплексная частотная функция $W_p(j\omega)$ разомкнутой цепи звеньев для некоторого значения частоты ω изображается на комплексной плоскости вектором \overline{OM} или соответствующей ему точкой M амплитудно-фазовой характеристики (рис. 49). Функцию $R(j\omega)$, определенную уравнением (2,53), можно изобразить вектором \overline{CM} , началом которого является точка $C(-1, j0)$, а концом — точка M амплитудно-фазовой характеристики. Действительно,

$$\overline{CM} = \overline{CO} + \overline{OM} = 1 + W_p(j\omega) = R(j\omega).$$

Если при изменении ω от 0 до $+\infty$ аргумент вектора $\overline{CM} = R(j\omega)$ изменяется на угол $\frac{\lambda}{2} 2\pi$, то это означает, что амплитудно-фазовая характеристика $\frac{\lambda}{2}$ раз обходит в положительном направлении вокруг точки $C(-1, j0)$.

Таким образом, критерий устойчивости можно сформулировать следующим образом: для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой цепи $\frac{\lambda}{2}$ раз обошла в положительном направлении вокруг точки $(-1, j0)$, где λ — число корней характеристического уравнения разомкнутой цепи с положительной вещественной частью.

Такая формулировка амплитудно-фазового критерия применима и тогда, когда среди корней характеристического уравнения разомкнутой цепи имеется нулевой корень. В этом случае при $\omega \rightarrow 0$ амплитудно-фазовая характеристика уходит в бесконечность. Можно доказать, что для оценки устойчивости подобной системы амплитудно-фазовую характеристику следует дополнить дугой бесконечно большого радиуса с центром в начале координат, выходящей из точки $\omega = 0$ характеристики и описывающей в положительном направлении угол $\nu \frac{\pi}{2}$ (где ν — кратность нулевого корня характеристического уравнения разомкнутой цепи), как это показано на рис. 50, *д*, *е* для случая $\nu = 1$. Определяя изменение аргумента вектора $R(j\omega)$, соответствующее изменению частоты ω от 0 до $+\infty$, нужно условно считать, что конец вектора $R(j\omega)$ обходит вначале дополнение амплитудно-фазовой характеристики, а затем — действительную характеристику.

В большинстве случаев характеристическое уравнение разомкнутой цепи звеньев не имеет корней с положительной вещественной частью. При этом $\lambda = 0$, и критерий устойчивости можно сформулировать проще: если характеристическое уравнение разомкнутой цепи звеньев не имеет корней с положительной вещественной частью, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ амплитудно-фазовая характеристика не охватывала точку $(-1, j0)$.

Примеры амплитудно-фазовых характеристик разомкнутых цепей САР приведены на рис. 50. Направления обхода харак-

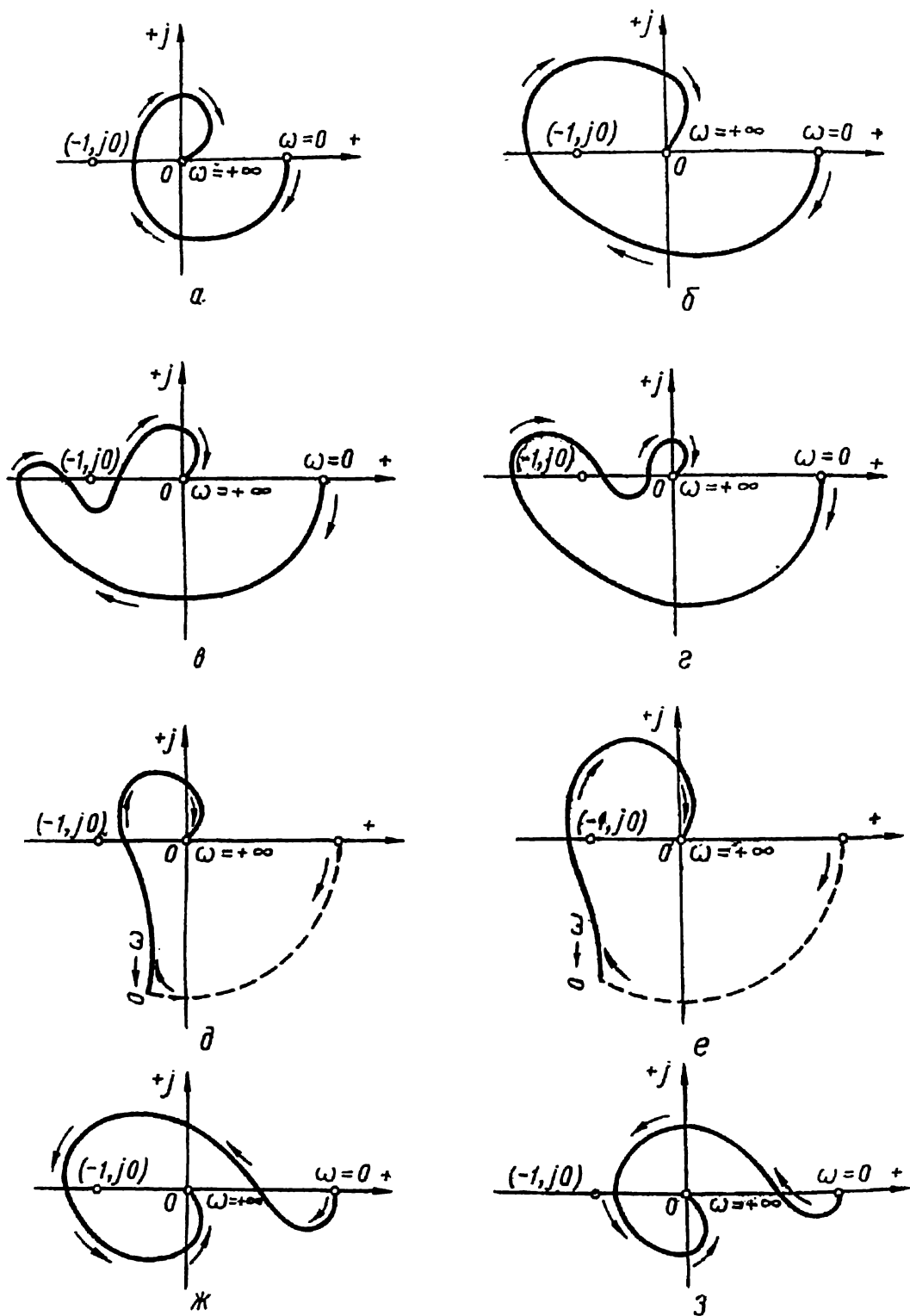


Рис. 50. Примеры амплитудно-фазовых характеристик разомкнутых цепей замкнутых САР:

$a, б, в, г - \lambda = 0; \nu = 0; д, е - \lambda = 0; \nu = 1; ж, з - \lambda = 2; \nu = 0.$

теристик при определении изменения аргумента вектора $R(j\omega)$, соответствующие изменению частоты ω от 0 до $+\infty$, показаны стрелками.

Рассмотрим характеристики (рис. 50, *a — e*) разомкнутых цепей, характеристические уравнения которых не имеют корней с положительными вещественными частями ($\lambda = 0$). Характеристики на рис. 50, *a, в, д* не охватывают точки $(-1, j0)$, т. е. $\Delta' \arg R(j\omega) = 0$; следовательно, системы устойчивы.

Характеристики на рис. 50, *б, г, е* охватывают точку $(-1, j0)$ один раз в отрицательном направлении, т. е. $\Delta' \arg R(j\omega) = -2\pi$; следовательно, системы неустойчивы.

Характеристики, приведенные на рис. 50, *ж* и *з*, относятся к разомкнутым цепям, характеристические уравнения которых имеют два корня с положительной вещественной частью ($\lambda = 2$). Характеристика, показанная на рис. 50, *ж*, обходит точку $(-1, j0)$ в положительном направлении один раз, т. е. $\Delta' \arg R(j\omega) = 2\pi = \frac{\lambda}{2} 2\pi$. Следовательно, замкнутая система устойчива. Характеристика на рис. 50, *з* не охватывает точки $(-1, j0)$, следовательно, при $\lambda = 2$ замкнутая система неустойчива.

Определение вида корней характеристического уравнения разомкнутой цепи звеньев. Количество λ корней с положительной вещественной частью и ν нулевых корней легко определить, если разомкнутая цепь состоит из нескольких последовательно включенных звеньев, свойства которых известны.

Характеристическое уравнение (2,48) разомкнутой цепи в соответствии с соотношением (2,2) можно представить в виде

$$d_1(p) d_2(p) \cdot d_s(p) = 0.$$

Отсюда следует, что корнями характеристического уравнения разомкнутой цепи являются все корни характеристических уравнений

$$d_1(p) = 0; \quad d_2(p) = 0; \quad \cdot; \quad d_s(p) = 0$$

последовательно включенных звеньев, из которых состоит разомкнутая цепь. Корни характеристических уравнений звеньев или вид этих корней (в данном случае интерес представляют знаки вещественных частей и наличие нулевых корней) определяются чрезвычайно просто, так как степень характеристических уравнений звеньев обычно невелика и в большинстве случаев не превышает второй.

∞	0
5	$0,032 + j0,089$
4	$-0,031 + j0,25$
3	$-0,57 + j0,28$
2	$-0,75 - j0,56$
1	$-0,12 - j1,54$
0,5	$1,17 - j2,06$
0,1	$3,16 - j0,81$
0	3,33
ω	$W_p(j\omega)$

Пример 9. Элементная схема САР по отклонению регулируемой величины изображена на рис. 51. Уравнения звеньев 1—3 имеют вид

$$(p^2 + 2p + 10)x_2 = 2x_1;$$

$$(2p + 1)x_3 = 50x_2;$$

$$(p + 3)x_4 = x_3.$$

Проверить устойчивость системы при помощи амплитудно-фазового критерия.

Размыкаем мысленно замкнутую цепь воздействием, например, между третьим и первым звеньями и находим уравнение разомкнутой цепи звеньев. Приравнивая произведение левых частей уравнений звеньев произведению правых частей, получаем

$$(p^2 + 2p + 10)(2p + 1)(p + 3)x_4 = 100x_1.$$

Следовательно,

$$D(p) = (p^2 + 2p + 10)(2p + 1)(p + 3) = 2p^4 + 11p^3 + 37p^2 + 76p + 30;$$

$$M(p) = 100;$$

$$W_p(p) = \frac{100}{2p^4 + 11p^3 + 37p^2 + 76p + 30};$$

$$W_p(j\omega) = \frac{100}{2\omega^4 - 37\omega^2 + 30 + j\omega(76 - 11\omega^2)}.$$

Вычисляем значения комплексной частотной функции для ряда значений ω от 0 до $+\infty$. Результаты вычислений сводим в табл. 4.

Построенная по полученным данным амплитудно-фазовая характеристика A приведена на рис. 52.

Рассматривая характеристические уравнения звеньев

$$p^2 + 2p + 10 = 0;$$

$$2p + 1 = 0;$$

$$p + 3 = 0,$$

убеждаемся, что все их корни имеют отрицательные вещественные части. Следовательно, вещественные части всех корней характеристического уравнения разомкнутой цепи

$$D(p) = (p^2 + 2p + 10)(2p + 1)(p + 3) = 0$$

отрицательны ($\lambda = 0$, $\nu = 0$), т. е. разомкнутая цепь устойчива. Таким образом, для устойчивости замкнутой системы амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой цепи не должна охватывать точку $(-1, j0)$, что и соблюдается в данном случае. Следовательно, САР устойчива.

Пример 10. Проверить устойчивость системы, отличающейся от рассмотренной в примере 9 тем, что уравнение второго звена имеет вид

$$(2p + 1)x_3 = 100x_2.$$

В этом случае коэффициент усиления второго звена и соответственно коэффициент усиления разомкнутой цепи вдвое выше, чем в предыдущем примере.

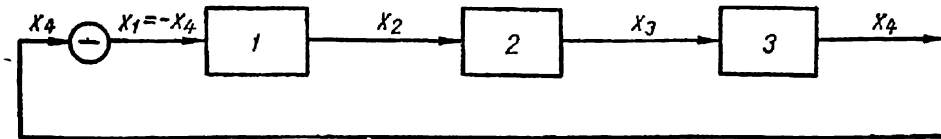


Рис. 51. Элементная схема системы.

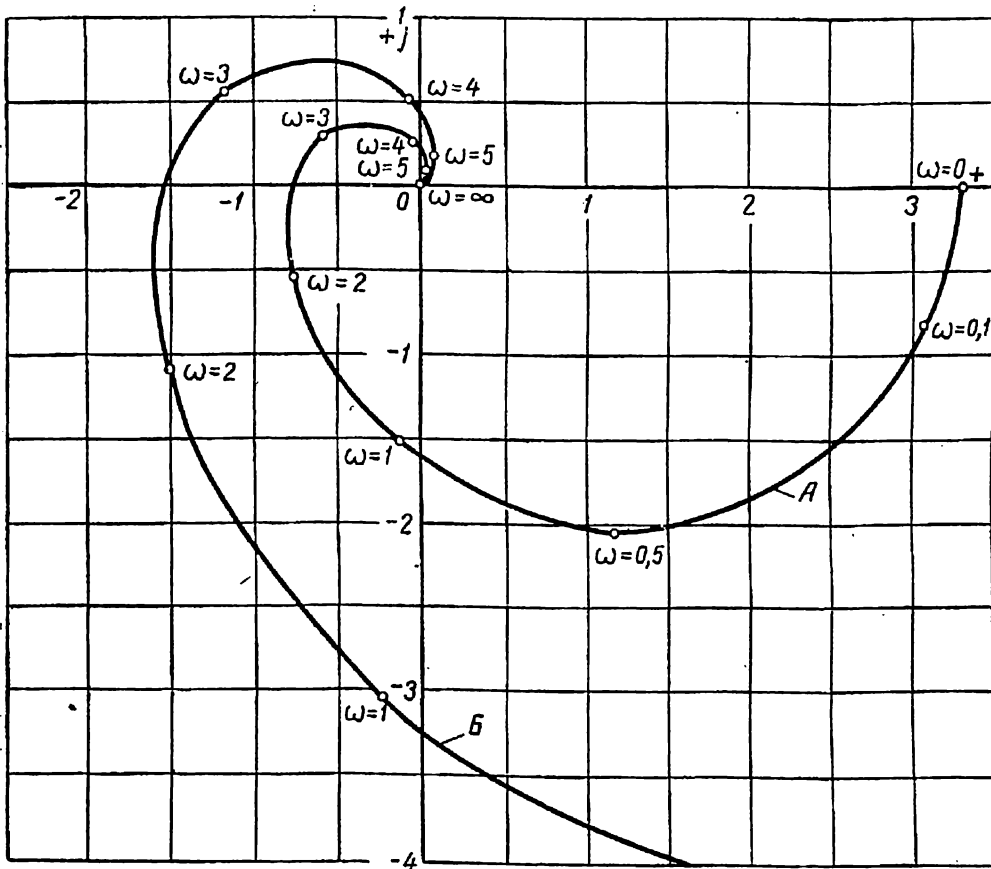


Рис. 52. Амплитудно-фазовые характеристики разомкнутых цепей замкнутых систем.

Комплексная частотная функция разомкнутой цепи принимает вид

$$W_p(j\omega) = \frac{200}{2\omega^4 - 37\omega^2 + 30 + j\omega(76 - 11\omega^2)},$$

т. е. для каждого значения ω вдвое возрастает по модулю по сравнению с комплексной частотной функцией из предыдущего примера. Поэтому можно

построить амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой цепи по характеристике A , относящейся к примеру 9, перенеся точки на вдвое большее расстояние от начала координат (кривая B на рис. 52).

Поскольку амплитудно-фазовая характеристика B охватывает точку $(-1, j0)$, замкнутая система неустойчива.

§ 6. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ОТКЛОНЕНИЮ, ПО ВОЗМУЩЕНИЮ И КОМБИНИРОВАННЫХ

Применение различных критериев устойчивости. Амплитудно-фазовый критерий предназначен для исследования устойчивости замкнутых систем, которыми являются системы автоматического регулирования по отклонению регулируемой величины. Исходным материалом для такого исследования является уравнение искусственно разомкнутой цепи звеньев. В то же время алгебраический критерий и критерий Михайлова, использующие в качестве исходного материала для исследования устойчивости характеристическое уравнение системы, можно применить для любых САР.

Если устойчивость определяется без цифровых вычислительных машин, то алгебраический критерий используется обычно при степенях характеристического уравнения не выше четвертой или пятой, так как с увеличением степени резко возрастает объем вычислительной работы. Кроме того, влияние параметров отдельных звеньев на устойчивость систем высокого порядка оценить на основании алгебраического критерия очень трудно. Однако при использовании для расчетов быстродействующих цифровых вычислительных машин можно применять алгебраический критерий устойчивости и для характеристических уравнений высокого порядка.

Критерий Михайлова широко используется для исследования устойчивости систем четвертого и более высоких порядков. Если известны уравнения звеньев системы, то целесообразнее применять критерий Михайлова по сравнению с амплитудно-фазовым критерием, так как характеристическую кривую построить легче, чем амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой цепи. Однако в некоторых случаях успешно используются видоизмененные формулировки амплитудно-фазового критерия.

На основании критериев амплитудно-фазового и Михайлова можно оценить влияние отдельных звеньев на устойчивость системы и решить вопрос о том, какие свойства должно иметь звено, чтобы система оказалась устойчивой.

Если разомкнутая цепь звеньев устойчива, то амплитудно-фазовую характеристику выполненной САР можно построить по экспериментальным данным. Для этого искусственно устраняют воз-

действие одного из элементов замкнутой системы на последующий и на вход полученной таким образом разомкнутой цепи подаются гармонические воздействия различной частоты, измеряя при этом амплитуду и фазу стационарных колебаний на выходе. По значениям комплексной частотной функции при различных частотах ω строится амплитудно-фазовая характеристика, которая может быть использована для оценки устойчивости замкнутой САУ. Таким образом, с помощью амплитудно-фазового критерия на основании опытных данных можно исследовать устойчивость замкнутых систем, параметры элементов которых неизвестны.

Устойчивость регулируемых объектов и регуляторов. Движение регулируемого объекта описывалось уравнениями (2,8), (2,18) или (2,22). Принимая входные величины объекта равными нулю, находим уравнение свободного движения

$$D_0(p)x = 0$$

и характеристическое уравнение

$$D_0(p) = 0. \quad (2,56)$$

Для регуляторов, описываемых уравнениями (2,9), (2,19), (2,23) и (2,24), уравнения свободного движения имеют вид

$$\begin{aligned} D_1(p)h_1 &= 0; \\ D_2(p)h_2 &= 0, \end{aligned}$$

а характеристические уравнения

$$D_1(p) = 0; \quad (2,57)$$

$$D_2(p) = 0. \quad (2,58)$$

Чтобы объект (регулятор) был устойчивым, все корни его характеристического уравнения должны иметь отрицательные вещественные части. Устойчивость объекта (регулятора) можно оценить, определив корни характеристического уравнения или воспользовавшись критериями устойчивости (алгебраическим или Михайлова).

Очень часто регулируемые объекты и регуляторы являются сложными звеньями, состоящими из нескольких последовательно включенных звеньев направленного действия. Оценить устойчивость сложных звеньев такого вида значительно проще, если знать следующее их свойство: если сложное звено представляет собой последовательную цепь звеньев направленного действия, то для его устойчивости необходимо и достаточно, чтобы каждое из последовательно включенных звеньев было устойчивым. Справедливость

этого утверждения основана на том, что характеристическая функция сложного звена равна произведению характеристических функций составляющих его звеньев, и, следовательно, корни характеристического уравнения сложного звена являются корнями характеристических уравнений звеньев, из которых оно состоит.

Устойчивость систем регулирования по отклонению. Движение систем регулирования по отклонению описывается уравнением (2,10), а свободное движение — уравнением

$$[D(p) + M(p)]x = 0.$$

Характеристическое уравнение системы имеет вид

$$N(p) = D(p) + M(p) = 0$$

или, с учетом соотношений (2,11) и (2,12),

$$N(p) = D_0(p)D_1(p) + M_0(p)M_1(p) = 0. \quad (2,59)$$

Из характеристического уравнения (2,59) системы видно, что его корни не являются в общем случае корнями характеристических уравнений (2,56) и (2,57) объекта и регулятора. Кроме характеристических полиномов $D_0(p)$ и $D_1(p)$ объекта и регулятора, корни уравнения (2,59) зависят от полиномов $M_0(p)$ и $M_1(p)$.

Следовательно, по устойчивости объекта и регулятора нельзя судить об устойчивости рассматриваемой системы. Для оценки устойчивости необходимо рассматривать систему в целом. Зная характеристическое уравнение (2,59) системы, можно воспользоваться алгебраическим критерием или критерием Михайлова или, исходя из уравнения (2,4) разомкнутой цепи, применить амплитудно-фазовый критерий.

Практически для исследования устойчивости по Раусу—Гурвицу или по Михайлову уравнение свободного движения и характеристическое уравнение замкнутой системы можно получить непосредственно из уравнений отдельных звеньев.

Устойчивость систем регулирования по возмущению. Из уравнения (2,20) системы получаем уравнение свободного движения

$$D_0(p)D_2(p)x = 0$$

и характеристическое уравнение системы

$$N(p) = D_0(p)D_2(p) = 0. \quad (2,60)$$

Корни характеристического уравнения системы (2,60) являются корнями характеристических уравнений объекта (2,56) и регулятора (2,58). Таким образом, для устойчивости рассматриваемой

системы необходимо и достаточно, чтобы были устойчивы в отдельности объект и регулятор.

Этот вывод подтверждается следующими простейшими рассуждениями. Предположим, что объект и регулятор (рис. 38) устойчивы. Если возмущающее воздействие q после некоторых изменений примет постоянное значение, то вследствие устойчивости регулятора по окончании переходного процесса в нем регулирующее воздействие h также примет постоянное значение. После этого оба воздействия на объект ($-q$ и h) — постоянные величины, и объект придет к состоянию равновесия с постоянным значением регулируемой величины x ; следовательно, система устойчива. При неустойчивости объекта или регулятора новое состояние равновесия с заданным значением регулируемой величины не наступит, и система окажется неустойчивой.

Устойчивость комбинированных систем регулирования. Комбинированная система, показанная на рис. 39, описывается уравнением (2,25), из которого вытекает уравнение свободного движения

$$D_2(p) [D_0(p) D_1(p) + M_{01}(p) M_1(p)] x = 0$$

и характеристическое уравнение системы

$$D_2(p) [D_0(p) D_1(p) + M_{01}(p) M_1(p)] = 0. \quad (2,61)$$

Если в этой системе отключить от объекта регулятор 2, что равносильно обращению в нуль операторного полинома $M_2(p)$ в уравнениях (2,24) и (2,25), то она превратится в САР по отклонению*. Нетрудно убедиться в том, что входящее в характеристическое уравнение (2,61) комбинированной системы выражение

$$D_0(p) D_1(p) + M_{01}(p) M_1(p)$$

представляет собой характеристический полином полученной САР по отклонению, а произведения

$$D(p) = D_0(p) D_1(p);$$

$$M(p) = M_{01}(p) M_1(p)$$

являются операторными полиномами соответственно левой и правой частей уравнения разомкнутой цепи данной САР по отклонению.

* На рис. 37 приведена рассмотренная САР по отклонению регулируемой величины для распространенного, но частного случая, когда некоторое изменение возмущающего воздействия на объект эквивалентно соответствующему изменению регулирующего воздействия. Поэтому можно считать, что к объекту приложена одна входная величина $h-q$. Система, полученная из представленной на рис. 39 комбинированной САР, относится к более общему случаю, когда входные величины объекта h_1 и q имеют различный характер.

Из характеристического уравнения (2,61) комбинированной САР видно, что она устойчива, если вещественные части всех корней функций от p

$$D_2(p) \text{ и } D_0(p) D_1(p) + M_{01}(p) M_1(p) = D(p) + M(p)$$

отрицательны. Следовательно, для устойчивости рассматриваемой комбинированной системы необходимо и достаточно, чтобы были устойчивыми регулятор 2 и замкнутая часть комбинированной системы (т. е. САР по отклонению регулируемой величины, полученная в результате отключения регулятора 2 от объекта).

Такой же вывод можно получить на основании несложных рассуждений. Предположим, что внешнее воздействие q (рис. 39) после некоторых изменений приняло определенное постоянное значение. Для устойчивости системы необходимо, чтобы регулятор 2 был устойчивым, так как иначе регулирующее воздействие h_2 будет непрерывно изменяться. Допустим, что регулятор 2 устойчив, т. е., по окончании переходного процесса в нем воздействия на объект h_2 и $-q$ окажутся неизменными. Следовательно, замкнутая часть системы будет находиться в состоянии свободного движения и придет к равновесию, если она устойчива. Таким образом, устойчивость регулятора 2 и замкнутой части системы — необходимое и достаточное условие устойчивости комбинированной системы.

Устойчивость замкнутой части комбинированной системы можно проверить с помощью любого из критериев устойчивости.

§ 7. КАЧЕСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ.

УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ САР БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЕЕ СТРУКТУРЫ

Требования к динамическим свойствам САР. Система регулирования имеет определенные динамические свойства, характеризующие ее движение при изменениях возмущающих воздействий.

Устойчивость является необходимым, но не достаточным условием пригодности системы регулирования в отношении ее динамических свойств. Необходимо также, чтобы длительность переходных процессов в устойчивой САР, наибольшие отклонения регулируемой величины от заданного значения и некоторые другие показатели удовлетворяли заданным требованиям.

Совокупность показателей, характеризующих поведение системы регулирования в переходном процессе, вызванном определенным возмущением, называется качеством процесса регулирования, или качеством регулирования.

Чтобы оценить качество регулирования, рассматривают движение системы, вызванное изменением возмущающего воздействия по некоторому заданному закону. Для системы автоматической стабилизации чаще всего задаются скачкообразным законом изменения возмущающего воздействия. При эксплуатации систем автоматической стабилизации такой закон обычно является типичным и одним из наиболее неблагоприятных для протекания процесса регулирования.

Показатели качества регулирования. На рис. 53 показана возможная кривая изменения регулируемой величины x в переход-

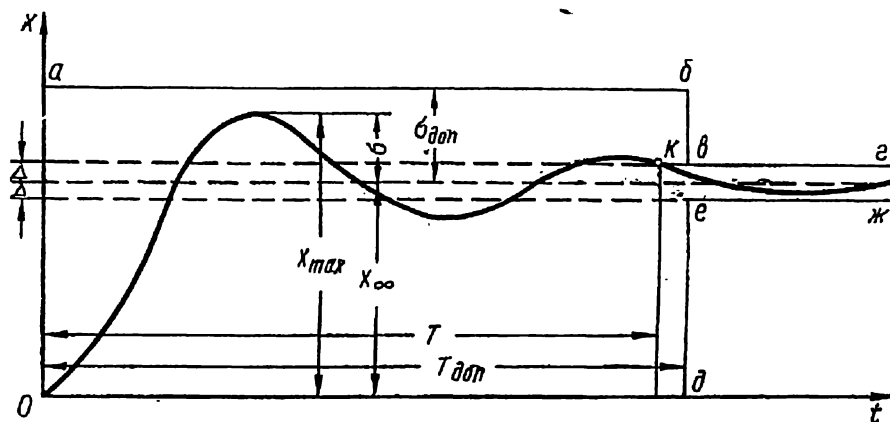


Рис. 53. График изменения регулируемой величины x в процессе регулирования и некоторые показатели качества регулирования.

ном процессе после заданного скачкообразного изменения возмущающего воздействия, происшедшего в момент $t=0$. Регулируемая величина x отсчитывается от ее значения в избранном равновесном режиме, существовавшем до изменения возмущающего воздействия.

Рассматриваемый график относится к колебательному процессу регулирования, в течение которого регулируемая величина, приближаясь к новому установившемуся значению, проходит через теоретически бесконечное количество максимумов и минимумов. В других случаях может наблюдаться аperiodический процесс регулирования, если регулируемая величина изменяется в функции времени монотонно или имеет некоторое ограниченное количество максимумов и минимумов.

Обозначим через x_∞ значение регулируемой величины, устанавливающееся после окончания процесса регулирования. Во многих случаях стремятся к тому, чтобы установившиеся значения регулируемой величины не зависели от возмущающего воздействия,

т. е. чтобы характеристика регулирования была астатической. Величину x_{∞} , показывающую, насколько новое установившееся значение регулируемой величины отклоняется от установившегося значения, наблюдавшегося до изменения возмущающего действия, называют статическим отклонением регулируемой величины и рассматривают как один из показателей качества регулирования.

Другим показателем качества регулирования является перерегулирование, которое представляет собой наибольшее отклонение регулируемой величины x от нового установившегося значения x_{∞} , противоположное по знаку первоначальному отклонению (т. е. отклонению в момент $t = 0$). В рассматриваемом случае (рис. 53) перерегулирование определяется зависимостью

$$\sigma = x_{\max} - x_{\infty},$$

где x_{\max} — наибольшее мгновенное значение регулируемой величины в процессе регулирования.

Если процесс регулирования имеет апериодический монотонный характер, то перерегулирование отсутствует, т. е. $\sigma = 0$.

Процесс регулирования считается практически законченным в тот момент времени, начиная с которого отклонение регулируемой величины от нового установившегося значения не превышает по модулю заданную малую положительную величину Δ (точка k на рис. 53). Промежуток времени T от начала до окончания процесса регулирования, называемый временем регулирования, также является важным показателем качества регулирования.

Необходимо, чтобы перерегулирование σ и время регулирования T не превышали максимально допустимых величин $\sigma_{\text{доп}}$ и $T_{\text{доп}}$. Это означает, что кривая переходного процесса не должна выходить за пределы, ограниченные на рис. 53 ломаными линиями ab и de .

Большое количество значительных по амплитуде колебаний регулируемой величины в процессе регулирования может быть недопустимым или нежелательным. Показателем качества, характеризующим колебательность процесса регулирования, может служить количество x колебаний регулируемой величины, равное количеству отклонений регулируемой величины в сторону перерегулирования за время T протекания процесса регулирования.

Применяются и другие показатели качества регулирования, которые в этой книге не рассматриваются.

Исследование качества регулирования. Различают прямые и косвенные методы исследования качества регулирования.

Прямые методы заключаются в решении дифференциального уравнения движения САР и построении графика переходного процесса. Удовлетворительные по точности результаты для многих нелинейных систем можно получить, решив уравнение линейного приближения системы. Но и в этом случае при решении уравнения появляются значительные трудности, быстро растущие по мере увеличения степени характеристического уравнения. Поэтому при исследовании качества регулирования прямыми методами все более широко применяются цифровые и аналоговые электронные вычислительные машины.

Косвенными методами можно оценить качество регулирования, не решая дифференциальное уравнение движения системы. В этой книге косвенные методы исследования качества регулирования не рассматриваются.

Улучшение динамических свойств САР. Под улучшением динамических свойств понимают достижение устойчивости систем, которые ранее были неустойчивыми, или повышение показателей качества регулирования устойчивых систем. Иногда требуемого улучшения динамических свойств удается достичь лишь изменением параметров элементов САР, например, коэффициента усиления разомкнутой цепи звеньев замкнутой системы регулирования.

В более сложных случаях изменяют структуру систем, т. е. вид ее звеньев, их количество и схему соединений. Достижение устойчивости или улучшение качества регулирования изменением структуры САР называют их коррекцией. Обычно коррекцию осуществляют, дополняя систему специальными элементами — корректирующими устройствами.

Критический коэффициент усиления. Во многих САР по отклонению можно изменять коэффициент усиления одного из последовательно включенных звеньев и тем самым изменять коэффициент k_p усиления разомкнутой цепи звеньев. При увеличении коэффициента усиления k_p и неизменных других постоянных величинах, входящих в уравнение разомкнутой цепи, может нарушиться устойчивость замкнутой САР. И наоборот, неустойчивая замкнутая система во многих случаях превращается в устойчивую, если уменьшается коэффициент усиления k_p разомкнутой цепи.

Например, замкнутая одноконтурная система автоматического регулирования, рассмотренная в примерах 9 и 10, устойчива при

$$k_p = k'_p = \frac{100}{30} \approx 3,33$$

и неустойчива, если

$$k_p = k_p'' = \frac{200}{30} \approx 6,67.$$

Предельное значение коэффициента усиления разомкнутой цепи, при достижении и превышении которого ранее устойчивая замкнутая система автоматического регулирования становится неустойчивой, называется критическим коэффициентом усиления.

Если рассматриваемая система автоматического регулирования устойчива, амплитудно-фазовая характеристика пересекает отрицательную вещественную полуось правее, а если неустойчива — левее точки $(-1, j0)$ (рис. 52). Критическому коэффициенту усиления соответствует пересечение с отрицательной вещественной полуосью в точке $(-1, j0)$.

Пример 11. Определить критический коэффициент усиления для системы автоматического регулирования, рассмотренной в примерах 9 и 10.

Уравнение разомкнутой цепи для произвольных значений ее коэффициента усиления k_p можно записать в виде

$$(2p^4 + 11p^3 + 37p^2 + 76p + 30) x_4 = 30k_p x_1,$$

откуда

$$W_p(j\omega) = \frac{30k_p}{2\omega^4 - 37\omega^2 + 30 + j\omega(76 - 11\omega^2)}.$$

Из этого уравнения видно, что амплитудно-фазовая характеристика пересекает вещественную ось при двух значениях ω

$$\omega_1 = 0 \text{ и } \omega_2 = \sqrt{\frac{76}{11}} = 2,63.$$

Если коэффициент усиления разомкнутой цепи принимает критическое значение $k_{кр}$, то частоте $\omega = \omega_2$ соответствует комплексная частотная функция $W_p(j\omega_2) = -1$. Зная величину $\omega_2 = 2,63$, из уравнения

$$\frac{30k_{кр}}{2\omega^4 - 37\omega^2 + 30} = -1$$

находим $k_{кр} = 4,33$. Как и следовало ожидать,

$$k_p' < k_{кр} < k_p''.$$

Улучшение динамических свойств САР по отклонению изменением коэффициента усиления k_p . Коэффициент усиления k_p разомкнутой цепи звеньев замкнутой САР влияет не только на устойчивость, но и на показатели качества регулирования.

В процессе регулирования устойчивой САР по отклонению при относительно большой величине коэффициента усиления k_p могут возникнуть медленно затухающие колебания регулируемой вели-

чины, в результате чего некоторые показатели качества (перерегулирование, время регулирования, количество колебаний регулируемой величины) окажутся неудовлетворительными. С уменьшением коэффициента усиления k_p улучшаются эти показатели.

В то же время от коэффициента усиления разомкнутой цепи зависит в соответствии с соотношением (2,17) коэффициент статизма САР, а следовательно, и статическое отклонение регулируемой величины. В большинстве случаев необходимо обеспечить малую зависимость установившегося значения регулируемой величины от возмущающего воздействия на объект, т. е. малую величину коэффициента статизма. В этом смысле желательно, чтобы коэффициент усиления разомкнутой системы был по возможности большим (обычно он измеряется десятками, сотнями, а иногда — тысячами единиц).

В некоторых случаях изменением коэффициента усиления k_p можно обеспечить устойчивость САР и достичь удовлетворительных значений различных показателей качества регулирования.

Если критический коэффициент усиления относительно мал, то такой способ улучшения динамических свойств обычно оказывается неприемлемым, так как устойчивость системы обеспечивается только при чрезмерно больших значениях коэффициента статизма.

§ 8. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Структурная устойчивость систем. САР, устойчивости которой можно достигнуть изменением параметров звеньев, из которых она состоит, при сохранении ее структуры (например, уменьшением коэффициентов усиления звеньев одноконтурной системы), называется структурно устойчивой. Система, которую нельзя сделать устойчивой без изменения структуры, называется структурно неустойчивой. Для устойчивости системы необходимо, но недостаточно, чтобы она обладала структурной устойчивостью.

Проверим структурную устойчивость одноконтурной САР, состоящей из апериодических звеньев с уравнениями типа

$$(T\rho + 1)x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}},$$

колебательных звеньев с уравнениями типа

$$(T_1^2\rho^2 + T_2\rho + 1)x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}},$$

и двух интегрирующих звеньев с уравнениями типа

$$T\rho x_{\text{вых}} = k_{\text{и}}x_{\text{вх}}.$$

Операторные полиномы левой и правой частей уравнения разомкнутой цепи звеньев этой системы будут иметь вид

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-2} p^2;$$

$$M(p) = K,$$

где a_0, a_1, \dots, a_{n-2} и K — постоянные величины.

Для замкнутой системы получаем характеристическое уравнение

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-2} p^2 + K = 0,$$

из которого видно, что система структурно неустойчива независимо от значений параметров звеньев, так как коэффициент при p равен нулю.

Можно также доказать структурную неустойчивость любой одноконтурной замкнутой системы, в состав которой входят простые устойчивые звенья и два (или более) интегрирующие или неустойчивые аperiodические звена.

Использование амплитудно-фазовых характеристик для оценки динамических свойств замкнутых систем. При исследовании динамических свойств замкнутых систем и поисках средств для улучшения этих свойств можно использовать амплитудно-фазовые характеристики разомкнутых цепей. Эти характеристики применяют не только для исследования устойчивости замкнутых систем, но и для оценки качества процесса регулирования.

Построение амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой цепи по характеристикам звеньев замкнутой одноконтурной системы. Если замкнутая одноконтурная САР состоит из s звеньев, то согласно соотношению (2,6) комплексная частотная функция разомкнутой цепи определяется зависимостью

$$W_p(j\omega) = W_1(j\omega) W_2(j\omega) \dots W_s(j\omega), \quad (2,62)$$

в которой $W_1(j\omega), W_2(j\omega), \dots, W_s(j\omega)$ — комплексные частотные функции первого, второго, ..., s -го звеньев.

Как видно из уравнения (2,62), для каждого значения частоты ω модуль комплексной частотной функции разомкнутой цепи равен произведению модулей, а аргумент — сумме аргументов комплексных частотных функций отдельных звеньев. Этим правилом пользуются для построения амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой цепи по амплитудно-фазовым характеристикам отдельных звеньев*. Из такого построения можно получить наглядное

* На амплитудно-фазовых характеристиках звеньев должны быть отмечены точки, соответствующие ряду значений частоты ω .

представление о влиянии типа и параметров звеньев на устойчивость и качество САР.

Последовательное включение в цепь звеньев замкнутой системы апериодического звена. Будем рассматривать разомкнутую цепь звеньев замкнутой системы как некоторое сложное звено. Назовем его первым звеном и обозначим его передаточную функцию через $W_1(p)$. Посмотрим, как изменится амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой цепи при включении последовательно с первым звеном второго, передаточная функция которого $W_2(p)$ (рис. 54). После такого усложнения структуры САР комплексная частотная функция разомкнутой цепи выразится уравнением

$$W_p(j\omega) = W_1(j\omega) W_2(j\omega). \quad (2,63)$$

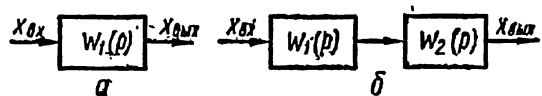


Рис. 54. Схемы разомкнутой цепи звеньев замкнутой системы:

Рассмотрим случай, когда разомкнутая цепь звеньев и замкнутая система были до введения второго звена устойчивыми.

a — исходная, представленная в виде одного (первого) звена; b — с включенным последовательно дополнительным (вторым) звеном.

Если второе звено является апериодическим, то в соответствии с зависимостью (1,81)

$$W_2(j\omega) = \frac{k}{1 + j\omega T} = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} e^{-j \operatorname{arctg} \omega T}. \quad (2,64)$$

Из уравнения (2,64) видно, что при введении в цепь звеньев апериодического звена векторы комплексной частотной функции поворачиваются в отрицательном направлении (по часовой стрелке) на угол $\operatorname{arctg} \omega T$, а их модули изменяются в $\frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}$ раз.

Построение амплитудно-фазовой характеристики III разомкнутой цепи после введения в нее добавочного (второго) апериодического звена по характеристикам I и II первого и второго звеньев показано на рис. 55*. Характеристика I не охватывает точку $(-1, j0)$, следовательно, замкнутая система устойчива. После добавления второго звена амплитудно-фазовая характеристика, в результате поворота ее точек на угол $-\operatorname{arctg} \omega T$ вокруг начала координат, может приблизиться к точке $(-1, j0)$ или даже охватить ее (рис. 55). Приближение амплитудно-фазовой харак-

* Коэффициент усиления добавочного апериодического звена принят равным единице.

теристики разомкнутой цепи звеньев устойчивой системы к точке $(-1, j0)$ условно оценивают как ухудшение устойчивости системы. Если амплитудно-фазовая характеристика охватывает эту точку, то система становится неустойчивой.

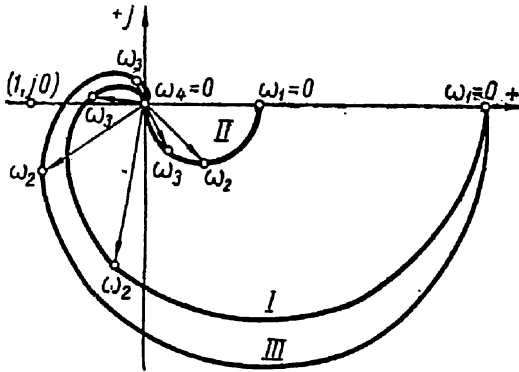


Рис. 55. Амплитудно-фазовые характеристики разомкнутой цепи, в которую вводится апериодическое звено.

Таким образом, введение в цепь звеньев апериодического звена может отрицательно сказаться на устойчивости замкнутой системы.

Последовательное включение в цепь звеньев интегрирующего звена. В этом случае согласно зависимости (1,95)

$$W_2(j\omega) = -j \frac{k_H}{\omega} = \frac{k_H}{\omega} e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (2,65)$$

Из уравнений (2,63) и (2,65) следует, что для построения амплитудно-фазовой характеристики *III* разомкнутой цепи с введенным в нее интегрирующим звеном достаточно повернуть на 90° по часовой стрелке амплитудно-фазовую характеристику *I* первого звена в положение *I'*, а затем изменить в $\frac{k_H}{\omega}$ раз модули радиусов-векторов точек повернутой характеристики *I'* (рис. 56).

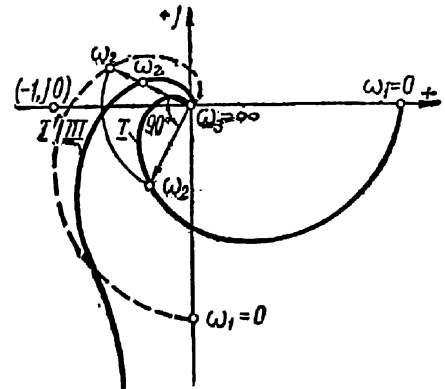


Рис. 56. Амплитудно-фазовые характеристики разомкнутой цепи, в которую вводится интегрирующее звено.

В результате поворота амплитудно-фазовой характеристики *I* в положение *I'* точка пересечения ее с отрицательной полуосью значительно удаляется от начала координат, вследствие чего амплитудно-фазовая характеристика *III* разомкнутой цепи может приблизиться к точке $(-1, j0)$ или охватить ее. Следовательно, при добавлении в цепь звеньев интегрирующего звена, как и апериодического, могут ухудшиться устойчивость или неустойчивость системы.

Если в одноконтурную замкнутую САР, состоящую из простых устойчивых звеньев, ввести два интегрирующие звена, то система становится структурно неустойчивой.

Последовательное включение в цепь звеньев дифференцирующего звена. Если в цепь звеньев замкнутой системы включить последовательно дифференцирующее звено, описываемое уравнением (1,117) или (1,122), то коэффициент усиления k_p разомкнутой цепи обратится в нуль (предполагается, что в последовательной цепи звеньев нет интегрирующих звеньев с бесконечно большим коэффициентом усиления). Подобная САР не может работать, так как в любом установившемся режиме выходная величина дифференцирующего звена в соответствии с уравнением (1,117) или (1,122) всегда равна нулю независимо от значения регулируемой величины. Это означает, что регулирующее воздействие на объект равно нулю во всех установившихся режимах, поскольку дифференцирующее звено вводится в последовательную цепь звеньев регулятора.

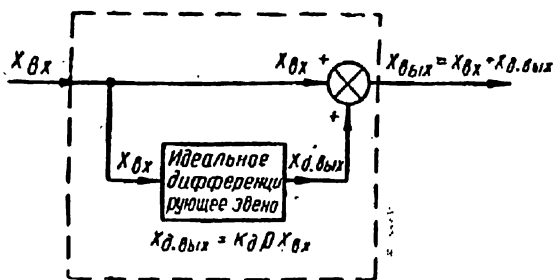


Рис. 57. Схема дифференцирующего звена, описываемого уравнением $x_{\text{вых}} = (1 + k_d p) x_{\text{вх}}$.

Поэтому последовательно в цепь звеньев (рис. 54) введем дифференцирующее звено, описываемое уравнением

$$x_{\text{вых}} = k_d \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}}, \quad (2,66)$$

или в операторной форме

$$x_{\text{вых}} = (k_d p + 1) x_{\text{вх}}. \quad (2,66a)$$

Коэффициент усиления этого дифференцирующего звена равен единице. Нетрудно убедиться, что такое звено можно получить, просуммировав входную и выходную величины идеального дифференцирующего звена, описываемого уравнением (1,117), как это показано на рис. 57. В рассматриваемом случае

$$W_2(j\omega) = 1 + j\omega k_d = \sqrt{1 + \omega^2 k_d^2} e^{j \arctg \omega k_d}. \quad (2,67)$$

Из выражения (2,67) видно, что при введении в цепь звеньев такого дифференцирующего звена векторы комплексной частотной функции поворачиваются в положительном направлении (про-

тив часовой стрелки) на угол $\operatorname{arctg} \omega k_d$, и их модули изменяются в $\sqrt{1 + \omega^2 k_d^2}$ раз. Создаваемый дифференцирующим звеном поворот точек амплитудно-фазовой характеристики вокруг начала координат против часовой стрелки обычно благоприятствует повышению устойчивости системы, уменьшению перерегулирования и времени регулирования.

Сравнивая выражения (2,64) и (2,67) для комплексных частотных функций апериодических и дифференцирующих звеньев, видим, что воздействия этих звеньев на амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой цепи имеют противоположный характер. Если принять, что исходная амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой цепи изображается на рис. 55 кривой III, то после введения в цепь дифференцирующего звена, описываемого уравнением (2,66), амплитудно-фазовая характеристика может приобрести вид кривой I.

Положительное влияние дифференцирующего звена на устойчивость замкнутой системы можно проиллюстрировать на следующем примере. Одноконтурная система, в состав которой, кроме апериодических и колебательных звеньев, входят два интегрирующих звена, структурно неустойчива. Но при наличии дифференцирующего звена система оказывается структурно устойчивой, так как в операторный полином $M(p)$ правой части уравнения разомкнутой цепи войдет член, содержащий p в первой степени.

Коррекция САР. Различают два основных вида коррекции САР: последовательную и параллельную. При последовательной коррекции корректирующее устройство включается последовательно с регулятором или между двумя смежными звеньями регулятора. Параллельная коррекция осуществляется введением обратной связи, охватывающей одно или несколько звеньев системы.

Рассмотрим некоторые способы коррекции замкнутых систем.

Последовательная коррекция. В качестве последовательных корректирующих устройств используются звенья различных типов, но чаще всего — дифференцирующие звенья, при введении которых в цепь звеньев замкнутой САР можно значительно улучшить динамические свойства системы.

Если движение дифференцирующего звена описывается уравнением (2,66), то выходная величина $x_{\text{вых}}$ зависит от входной $x_{\text{вх}}$ и ее первой производной $\frac{dx_{\text{вх}}}{dt}$. В некоторых случаях применяется последовательная коррекция с использованием более сложных дифференцирующих звеньев, у которых выходная величина

$x_{\text{вых}}$ зависит также от второй производной $\frac{d^2 x_{\text{вх}}}{dt^2}$ входной величины $x_{\text{вх}}$.

Параллельная коррекция. Пусть некоторое звено (часть системы) имеет плохие для САР динамические свойства. Параллельная коррекция системы заключается в охвате этого (исходного) звена обратной связью так, чтобы звено с обратной связью приобрело желательные динамические свойства (рис. 58).

После введения обратной связи к исходному звену, кроме воздействия $x_{\text{вх}}$ предыдущего звена системы, приложено воздействие $x_{\text{о.с}}$ параллельного корректирующего устройства — обратной связи. Условимся, что одинаковые по величине изменения воздействий $x_{\text{вх}}$ и $x_{\text{о.с}}$ равноценны по своему действию на исходное звено. В этом случае результирующая входная величина исходного звена определяется соотношением

$$x_{\text{1вх}} = x_{\text{вх}} + x_{\text{о.с}} \quad (2,68)$$

или

$$x_{\text{1вх}} = x_{\text{вх}} - x_{\text{о.с}}, \quad (2,68a)$$

причем знак, стоящий перед величиной $x_{\text{о.с}}$, зависит от способа подключения обратной связи ко входу исходного звена. Уравнение звена, видоизмененное в результате введения обратной связи, можно получить из уравнений исходного звена, обратной связи и уравнения (2,68) или (2,68a).

В качестве параллельных корректирующих устройств применяются жесткие и гибкие отрицательные обратные связи; положительные обратные связи применяются относительно редко.

Уравнения жесткой и простейшей гибкой обратных связей можно соответственно представить в виде

$$x_{\text{о.с}} = k_{\text{о.с}} x_{\text{вых}}; \quad (2,69)$$

$$(T_{\text{о.с}} p + 1) x_{\text{о.с}} = k_{\text{д.о.с}} p x_{\text{вых}}, \quad (2,70)$$

где $k_{\text{о.с}}$, $k_{\text{д.о.с}}$ и $T_{\text{о.с}}$ — постоянные коэффициенты.

В первом случае обратная связь является пропорциональным, а во втором — реальным дифференцирующим звеном. Если постоянной времени $T_{\text{о.с}}$ пренебречь, простейшую гибкую обрат-

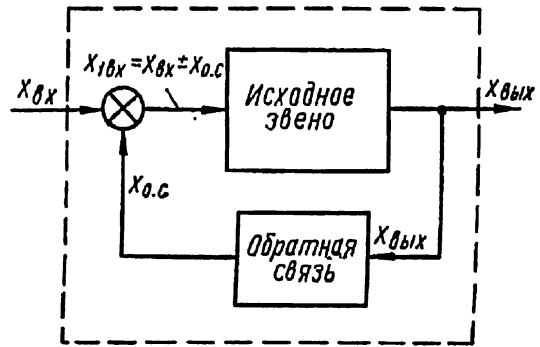


Рис. 58. Схема параллельной коррекции.

ную связь можно рассматривать как идеальное дифференцирующее звено, представив ее уравнение в виде

$$x_{o.c} = k_{д. о. с} p x_{вых}. \quad (2,70a)$$

Охват аperiodического звена жесткой обратной связью. Уравнение устойчивого аperiodического (в данном случае исходного звена) запишется в виде

$$(Tp + 1) x_{вых} = k x_{вх}. \quad (2,71)$$

Жесткая обратная связь описывается уравнением (2,69). Для определенности рассмотрим случай, когда коэффициенты усиления k и $k_{о.с}$ имеют одинаковые знаки, например, $k > 0$ и $k_{о.с} > 0$. Чтобы получить отрицательную обратную связь, свяжем выход устройства обратной связи со входом аperiodического звена в соответствии с зависимостью (2,68 а).

Из уравнений (2,68 а), (2,69) и (2,71) получаем уравнение звена с обратной связью

$$\left(\frac{T}{1 + k k_{о.с}} p + 1 \right) x_{вых} = \frac{k}{1 + k k_{о.с}} x_{вх}, \quad (2,72)$$

в котором $1 + k k_{о.с} > 1$. Из уравнения (2,72) видно, что при охвате устойчивого аperiodического звена жесткой обратной связью не изменяется тип звена, но уменьшаются постоянная времени и коэффициент усиления в $(1 + k k_{о.с})$ раз. Такое изменение параметров аperiodического звена может быть использовано для параллельной коррекции, так как во многих случаях улучшает динамические свойства системы. При этом необходимо учитывать, что с уменьшением коэффициента усиления звена и соответствующим уменьшением коэффициента усиления разомкнутой цепи коэффициент статизма системы может стать недопустимо большим.

Охват аperiodического звена гибкой обратной связью. Из уравнений (2,68 а), (2,70) и (2,71) находим уравнение звена, образовавшегося путем охвата устойчивого аperiodического звена отрицательной гибкой обратной связью,

$$[(Tp + 1)(T_{о.с}p + 1) + k k_{д. о. с} p] x_{вых} = k x_{вх}.$$

Пренебрегая постоянной времени $T_{о.с}$, получаем уравнение звена с обратной связью в более простом виде

$$[(T + k k_{д. о. с}) p + 1] x_{вых} = k x_{вх}. \quad (2,73)$$

После введения обратной связи тип звена остался прежним. Коэффициент усиления также не изменился, чего и следовало ожидать, поскольку гибкая обратная связь не влияет на свойства звена в установившихся режимах. Изменилась лишь постоянная времени, которая возросла на величину $kk_{д.о.с} > 0$ (при условии, что коэффициенты k и $k_{д.о.с}$ имеют одинаковые знаки).

Если изменить знак воздействия гибкой обратной связи на апериодическое звено, что приведет к замене уравнения (2,68 а) уравнением (2,68), то уравнение звена с обратной связью примет вид

$$[(T - kk_{д.о.с})p + 1]x_{вых} = kx_{вх}, \quad (2,74)$$

гибкая обратная связь окажется положительной и будет ускорять переходный процесс в звене.

При больших значениях коэффициента $k_{д.о.с}$, когда $T - kk_{д.о.с} < 0$, звено с обратной связью становится неустойчивым апериодическим, т. е. введение обратной связи изменяет тип звена. Замена устойчивого апериодического звена неустойчивым обычно ухудшает динамические свойства САР. Но при правильно выбранной величине коэффициента $k_{д.о.с}$ охват апериодического звена положительной и отрицательной гибкой обратными связями, изменяющий постоянную времени звена, можно использовать для параллельной коррекции системы.

Охват интегрирующего звена жесткой обратной связью. Воспользовавшись уравнениями (2,68 а), (2,69) и уравнением интегрирующего звена

$$px_{вых} = k_{и}x_{1вх}, \quad (2,75)$$

находим уравнение интегрирующего звена с отрицательной жесткой обратной связью

$$\left(\frac{1}{k_{и}k_{о.с}}p + 1\right)x_{вых} = \frac{1}{k_{о.с}}x_{вх}. \quad (2,76)$$

Следовательно, в результате охвата звена обратной связью, образовалось апериодическое звено с постоянной времени $\frac{1}{k_{и}k_{о.с}}$ и коэффициентом усиления $\frac{1}{k_{о.с}}$. Рассматриваемое изменение структуры системы является распространенным видом параллельной коррекции.

Примером использования такого метода коррекции является центробежный регулятор скорости непрямого действия (см. § 3 гл. 1). Если двигатель, скорость которого регулируется, представляет собой интегрирующее или неустойчивое апериодическое звено, то изображенная на рис. 12 САР структурно неустойчива, так как

в цепи звеньев системы имеются два звена из числа интегрирующих и неустойчивых аperiodических (двигатель и гидравлический серводвигатель с золотником).

При введении жесткой обратной связи, охватывающей гидравлический серводвигатель с золотником (рис. 15), последний становится устойчивым аperiodическим звеном, а система — структурно-устойчивой. Одновременно с этим коэффициент усиления регулятора приобретает конечную величину, в результате чего согласно соотношению (2,17 а) коэффициент статизма системы становится больше нуля, и установившиеся значения скорости вращения зависят от нагрузки двигателя.

Охват интегрирующего звена гибкой обратной связью. Исходя из уравнений (2,68 а), (2,70) и (2,75), находим уравнение интегрирующего звена, охваченного отрицательной гибкой обратной связью,

$$p(T_{o.c} p + 1 + k_n k_{д. о. с}) x_{вых} = k_n (T_{o.c} p + 1) x_{вх} \quad (2,77)$$

и его передаточную функцию

$$W(p) = \frac{k_n}{p} (T_{o.c} p + 1) \frac{1}{T_{o.c} p + 1 + k_n k_{д. о. с}} \quad (2,78)$$

Передаточную функцию (2,78) можно рассматривать, как произведение трех множителей. Первый множитель $\frac{k_n}{p}$ представляет собой передаточную функцию исходного интегрирующего звена, второй

$$T_{o.c} p + 1$$

— передаточную функцию дифференцирующего звена, и третий

$$\frac{1}{T_{o.c} p + 1 + k_n k_{д. о. с}}$$

— передаточную функцию аperiodического звена. Следовательно, охват интегрирующего звена гибкой обратной связью влияет на динамику САР так же, как и включение последовательно с этим звеном дифференцирующего и аperiodического звеньев. В некоторых случаях такой метод с успехом используется для параллельной коррекции системы.

Вновь обратимся к примеру САР скорости двигателя (рис. 12). При охвате гидравлического серводвигателя с золотником гибкой обратной связью можно устранить структурную неустойчивость системы* как бы вследствие введения в цепь звеньев дифферен-

* Рассматривается случай, когда двигатель является интегрирующим или неустойчивым аperiodическим звеном.

цирующего звена. Коэффициент усиления охваченного обратной связью звена, а следовательно, и регулятора в целом, остается бесконечно большим. В соответствии с зависимостью (2,17 а) рассматриваемая система обеспечивает астатическое регулирование, чего нельзя было достичь при коррекции с помощью жесткой обратной связи. Регуляторы скорости вращения с гибкой обратной связью называются изодромными регуляторами скорости.

Введение регулирования по возмущению в систему регулирования по отклонению регулируемой величины. Как особый метод коррекции следует рассматривать введение дополнительных элементов в САР по отклонению регулируемой величины для регулирования по возмущению. В результате этого система превращается в комбинированную.

Таким методом можно значительно повысить качество регулирования. В некоторых случаях удается достичь (или приблизиться к достижению) инвариантности системы по отношению к одному или нескольким возмущающим воздействиям. Но даже в том случае, когда нет надобности или возможности осуществить инвариантность при переходе к комбинированной системе, можно значительно уменьшить отклонения регулируемой величины от заданного значения в процессе регулирования. Это обусловлено тем, что в комбинированной системе имеется регулятор, реагирующий на изменения главного возмущающего воздействия, которые предшествуют изменениям регулируемой величины. Одновременно в комбинированной системе можно значительно уменьшить статические отклонения регулируемой величины.

В § 6 этой главы отмечалось, что устойчивость замкнутой части является необходимым условием устойчивости комбинированной системы. При дополнении САР по отклонению регулируемой величины звеньями, предназначенными для регулирования по возмущению, не изменяется замкнутая часть системы и, следовательно, не повышается устойчивость системы. Однако, в комбинированной системе можно значительно уменьшить коэффициент усиления k_p разомкнутой цепи замкнутой части системы* и повысить таким способом ее устойчивость.

* В САР по отклонению коэффициент усиления k_p должен быть относительно большим, чтобы зависящий от него согласно формуле (2,17) коэффициент статизма не оказался чрезмерно большим. Но в комбинированных системах можно получить малый коэффициент статизма и даже астатическое регулирование при относительно небольшом коэффициенте усиления.

Контрольные вопросы и упражнения

1. Элементная схема САР по отклонению регулируемой величины приведена на рис. 59 (возмущающие воздействия не показаны). Уравнения звеньев 1 — 4 имеют вид

$$(0,01p + 1) x_2 = 2x_1;$$

$$(0,1p + 1) x_3 = 5x_2;$$

$$(p + 1)x_4 = x_3;$$

$$(10p + 1)x_5 = x_4,$$

причем

$$x_1 = -x_5.$$

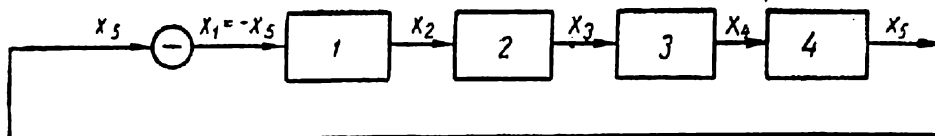


Рис. 59. Элементная схема САР.

Составьте уравнение разомкнутой цепи звеньев.

Составьте уравнение свободного движения системы:

1) непосредственно из уравнений звеньев;

2) исходя из уравнения разомкнутой цепи.

Составьте характеристические уравнения разомкнутой цепи и замкнутой системы.

2. Характеристическое уравнение САР имеет вид

$$p^3 + 5p^2 + 24p + 20 = 0.$$

Исследуйте устойчивость системы по корням характеристического уравнения.

У к а з а н и е. Воспользоваться делимостью характеристического полинома на $p + 1$.

3. Уравнение разомкнутой цепи замкнутой САР имеет вид

$$0,1 \frac{d^3 x_{\text{ВЫХ}}}{dt^3} + 2 \frac{d^2 x_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + 4 \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = 99x_{\text{ВХ}}.$$

Исследуйте устойчивость системы при помощи алгебраического критерия, критерия Михайлова и амплитудно-фазового критерия.

4. Уравнение свободного движения САР имеет вид

$$(p^5 + p^4 + 6p^3 + p^2 + 5p + 1) x = 0.$$

Исследуйте устойчивость системы с помощью алгебраического критерия и видоизмененной формулировки критерия Михайлова.

5. Можно ли по устойчивости звеньев одноконтурной системы судить об устойчивости разомкнутой цепи и об устойчивости системы?

6. В чем заключаются условия устойчивости для САР по отклонению регулируемой величины, по возмущению и комбинированных?

7. Решите задачу, поставленную в примере 11, воспользовавшись алгебраическим критерием устойчивости.

8. Предложите три способа коррекции одноконтурной замкнутой системы, содержащей два интегрирующих звена.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

ОБ АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Автоматическим регулированием возбуждения (АРВ) называется осуществление воздействий на систему возбуждения синхронной машины с помощью автоматических устройств (устройств автоматического регулирования возбуждения).

Первые устройства АРВ, появившиеся еще в конце прошлого века, применялись для поддержания заданного значения напряжения на выводах синхронных генераторов. В современных мощных энергосистемах основной функцией АРВ является повышение устойчивости, а следовательно, и надежности работы электрических систем.

На основании исследований советских ученых в области устойчивости электрических систем получены следующие выводы о свойствах, которые должны иметь устройства АРВ:

1. При значительных снижениях напряжения или возрастаниях тока нагрузки синхронного генератора или компенсатора устройства АРВ должны форсировать возбуждение, т. е. быстро увеличивать напряжение на обмотке возбуждения, следствием чего является возрастание тока возбуждения и э. д. с. синхронной машины. Форсировка возбуждения положительно влияет на статическую и динамическую устойчивость электрических систем.

В Советском Союзе устройствами АРВ, форсирующими возбуждение, во время Великой Отечественной войны и в первые послевоенные годы были оснащены практически все синхронные генераторы и компенсаторы, работающие в электрических системах. В это время за границей было распространено неправильное мнение о нецелесообразности повышения тока возбуждения синхронных машин сверх номинального. Советские ученые и инженеры пошли по пути подъема напряжения и тока возбуждения

генератора при форсировке до максимальных величин, которые может кратковременно создать система возбуждения [54]. Желательно, чтобы устройства АРВ форсировали возбуждение до максимума уже при снижении напряжения на выводах синхронной машины на 5—10% относительно его величины в предшествующем нормальном режиме. Можно применять и более грубые устройства АРВ, действующие при снижениях напряжения на 15—20%. Если во время форсировки возбуждения напряжение генератора поднимается до значения, близкого к нормальной рабочей величине, действие форсировки должно прекратиться. Максимальная продолжительность форсировки устанавливается заводом-изготовителем синхронной машины.

2. Устройства АРВ должны без зоны нечувствительности изменять ток возбуждения синхронного генератора или компенсатора при изменениях нагрузки, поддерживая заданное значение напряжения. При таком действии устройств АРВ существенно повышается статическая устойчивость электрической системы, поскольку возрастание мощностей электропередач сопровождается автоматическим увеличением э. д. с. синхронных генераторов и компенсаторов.

3. Синхронные генераторы и компенсаторы, работающие на относительно длинные сильно нагруженные линии электропередачи, должны иметь регуляторы возбуждения сильного действия (устройства АРВ сильного действия).

В отличие от обычных устройств АРВ (устройств АРВ нормального действия) регуляторы возбуждения сильного действия относительно сильно изменяют регулирующее воздействие на объект регулирования — синхронную машину с ее системой возбуждения — при относительно малых изменениях режима работы синхронной машины. При этом регуляторы сильного действия должны реагировать на производные некоторых параметров режима синхронного генератора или компенсатора. Электрическая система, в которой используются такие регуляторы, может работать в режиме искусственной устойчивости с более высокими предельными величинами передаваемых по линиям мощностей, чем в случае использования устройств АРВ без зоны нечувствительности нормального действия [7, 8]. Регуляторы возбуждения сильного действия значительно повышают как статическую, так и динамическую устойчивость электрических систем.

Основные функции, выполняемые АРВ в энергетических системах. Кроме повышения устойчивости электрических систем, АРВ выполняет в энергосистеме следующие функции.

1. Поддерживает заданное значение напряжения на выводах генератора. Используемые для этого устройства АРВ повышают качество электрической энергии и облегчают или заменяют действия дежурного персонала по регулированию напряжения.

2. Автоматически распределяет реактивную нагрузку между параллельно работающими синхронными генераторами. Эта функция АРВ и устройства, осуществляющие ее, будут рассмотрены в § 3 этой главы.

3. Улучшает условия самозапуска асинхронных электродвигателей и ускорение восстановления напряжения после отключения короткого замыкания. Если мощность самозапускающихся асинхронных электродвигателей соизмерима с мощностью синхронных генераторов, от которых двигатели питаются, то при отсутствии АРВ самозапуск протекает при значительно пониженном напряжении на выводах генераторов. Устройства АРВ облегчают самозапуск электродвигателей, форсируя возбуждение.

Восстановление напряжения в электрической системе или в ее части после ликвидации мощного короткого замыкания вследствие самозапуска электродвигателей может протекать в течение значительного периода времени, что ведет к тяжелым последствиям для энергетической системы и ее потребителей. При форсировке возбуждения генераторов вследствие ускорения самозапуска электродвигателей значительно сокращается продолжительность процесса восстановления напряжения.

4. Облегчает пуск короткозамкнутых асинхронных двигателей, соизмеримых по мощности с генераторами. Если маломощная электросиловая установка питает наряду с другой нагрузкой асинхронный электродвигатель, мощность которого составляет значительную часть мощности генератора (при параллельной работе нескольких генераторов — их суммарной мощности), то пусковой ток двигателя относительно велик и может в некоторых случаях превышать номинальный ток генератора. В таких случаях пуск электродвигателя вследствие значительного снижения питающего напряжения может затянуться или вовсе не произойти.

При наличии устройства АРВ, форсирующего возбуждение генератора, создается возможность пуска асинхронного двигателя, мощность которого близка к мощности генератора, и значительно сокращается продолжительность пуска.

5. Улучшает условия самосинхронизации синхронных генераторов. Устройства АРВ форсируют возбуждение работающих генераторов электростанции во время самосинхронизации включаемого в работу генератора. Вследствие этого напряжение на

сборных шинах электростанции поддерживается на более высоком уровне, и генератор втягивается в синхронизм быстро и надежно.

6. Улучшает действие релейных защит с выдержкой времени. Если короткое замыкание возникает в точке, отделенной от генераторов электрической системы относительно небольшим реактивным сопротивлением, то при отсутствии АРВ ток короткого замыкания с течением времени значительно уменьшается (затухает) и принимает установившееся значение, зависящее от предаварийного режима работы генераторов.

Неопределенность величин токов короткого замыкания, произошедшего вблизи генераторов, и малые установившиеся значения этих токов в часы минимальной нагрузки электрической системы затрудняют четкую работу релейной защиты с выдержкой времени. В этих случаях выполнение надежной, чувствительной и избирательно действующей релейной защиты существенно облегчается при наличии устройств АРВ синхронных генераторов. Вследствие форсировки возбуждения увеличивается установившаяся величина тока короткого замыкания и устраняется ее зависимость от токов возбуждения генераторов в предаварийном режиме.

7. Ограничивает повышение напряжения гидрогенераторов при их разгоне. Во избежание гидравлического удара при быстром закрытии направляющего аппарата гидротурбин регуляторы скорости последних выполняются относительно медленно действующими. Вследствие этого скорость вращения гидроагрегатов после внезапного сброса нагрузки (например, в результате отключения части нагрузки электрической системы) может возрасти на 25—30% сверх номинальной [30].

При повышении скорости вращения генератора (а также возбuditеля и подвозбудителя) напряжение на его выводах может возрасти до опасного значения. Чтобы избежать повреждения изоляции генераторов и других элементов электрической системы, при повышении напряжения, вызванном разгоном гидроагрегатов, АРВ должно быстро уменьшать ток возбуждения генераторов (осуществлять развозбуждение).

Для сохранения питания потребителей гидрогенераторы при развозбуждении не отключаются от сети. Развозбуждение должно автоматически прекращаться, если напряжение генератора опускается до величины, близкой к нормальной.

Системы возбуждения синхронных генераторов

Важнейшие требования к системам возбуждения. Система возбуждения представляет собой комплекс машин и аппаратов, питающий обмотку возбуждения (обмотку ротора) синхронного генератора постоянным током. При автоматическом регулировании возбуждения генератора устройство АРВ воздействует на систему возбуждения. Протекание процесса АРВ в значительной мере зависит от свойств системы возбуждения.

Чтобы устройства АРВ быстро и эффективно изменяли ток возбуждения генераторов, системы возбуждения должны иметь:

- 1) достаточно высокий потолок напряжения;
- 2) достаточную скорость нарастания напряжения на обмотке возбуждения генератора при форсировке возбуждения.

Потолок напряжения системы возбуждения. Наибольшее возрастание напряжения на обмотке возбуждения генератора при форсировке можно характеризовать кратностью форсировки

$$k_{\phi} = \frac{U_{в. п}}{U_{в. н}}, \quad (3,1)$$

где $U_{в. п}$ — максимальное (потолочное) значение напряжения возбуждения генератора;

$U_{в. н}$ — номинальное значение напряжения возбуждения генератора.

Согласно ГОСТ 533—51 и ГОСТ 5616—50 системы возбуждения должны обеспечивать кратность форсировки для турбогенераторов не менее 2,0, для гидрогенераторов — не менее 1,8. Для генераторов, питающих потребителей через протяженные линии электропередачи, эти требования ГОСТ недостаточны. Например, системы возбуждения гидрогенераторов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина обеспечивают четырехкратный потолок напряжения ($k_{\phi} = 4$).

Скорость нарастания напряжения системы возбуждения при форсировке. Для обеспечения устойчивости электрических систем (в особенности при передаче больших мощностей на дальние расстояния) системы возбуждения должны достаточно быстро реагировать на воздействия устройств АРВ, изменяя требуемым образом напряжение на обмотке возбуждения генератора. Такое свойство систем возбуждения называется быстродействием или быстроотзывчивостью. Для устойчивости электрической системы необходимо, чтобы напряжение на обмотке возбуждения генератора в процессе форсировки возбуждения возрастало достаточно быстро.

При возбуждении синхронных генераторов от генераторов постоянного тока (возбудителей) подъем напряжения на обмотке ротора генератора задерживается вследствие замедленного нарастания тока в обмотке возбуждения возбудителя, обладающей значительной индуктивностью. Кривая нарастания напряжения возбудителя при форсировке возбуждения показана на рис. 60.

Как видно из рис. 60, скорость нарастания напряжения возбудителя в процессе форсировки непрерывно изменяется. Поэтому

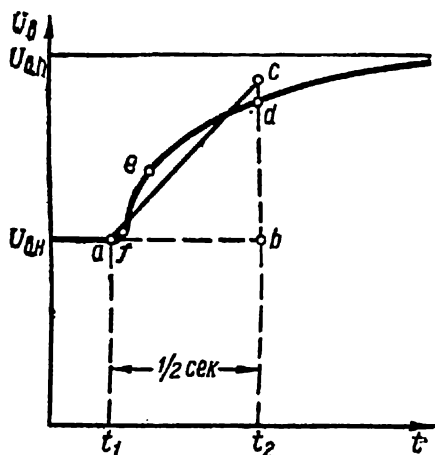


Рис. 60. К определению номинальной скорости нарастания напряжения возбудителя.

быстроотзывчивость возбудителей оценивается номинальной скоростью нарастания напряжения возбудителя — усредненной величиной скорости за промежуток времени, равный 0,5 сек с момента начала форсировки возбуждения, отмеченного на рис. 60 точкой *a*. В соответствии с приложением к ГОСТ 183—55 при определении номинальной скорости нарастания напряжения возбудителя фактическая кривая *afed* изменения напряжения возбудителя $U_{в}$ за время $\Delta t = 0,5$ сек заменяется прямой *ac*, построенной так, чтобы площадь треугольника *abc* была равна площади *abdefa*. Номинальная скорость нара-

стания напряжения возбудителя определяется как $\frac{bc}{\Delta t U_{в.н}} = \frac{2bc}{U_{в.н}}$ относительных единиц напряжения возбудителя в секунду (за единицу напряжения принимается номинальное напряжение возбуждения $U_{в.н}$).

Можно доказать, что прямая *ac* выражает некоторый фиктивный закон нарастания напряжения возбудителя, обеспечивающий приблизительно такое же возрастание потокосцеплений обмотки возбуждения синхронного генератора в течение 0,5 сек, как и при изменении напряжения в соответствии с кривой *afed*.

Системы возбуждения синхронных генераторов, работающих на протяженные линии электропередачи, имеют высокую быстроотзывчивость. Переходный процесс нарастания напряжения таких систем заканчивается в течение относительно короткого промежутка времени (для машинной системы возбуждения гидрогенераторов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина это время составляет

0,2—0,3 сек). В этом случае усреднение скорости нарастания напряжения за 0,5 сек не имеет смысла, и для оценки быстроотзывчивости нужно использовать другие показатели. В случае экспоненциальной формы кривой напряжения U_B быстроотзывчивость системы возбуждения можно характеризовать постоянной времени нарастания напряжения.

Виды систем возбуждения синхронных генераторов. Системы возбуждения синхронных генераторов разделяются на системы независимого возбуждения (питающие обмотку ротора генератора от постороннего источника тока) и самовозбуждения (питающие обмотку ротора генератора через выпрямитель и, в случае необходимости,— через трансформаторы электрическим током, вырабатываемым самим синхронным генератором *).

Системы независимого возбуждения в свою очередь могут питать обмотку ротора синхронного генератора от одного или двух генераторов постоянного тока — возбудителей (электромашинная система возбуждения) или от выпрямителей, подключенных к вспомогательному синхронному генератору (выпрямительная система независимого возбуждения).

Широко применяется простая и надежная электромашинная система возбуждения в виде возбудителя, расположенного на одном валу с синхронным генератором **.

В Советском Союзе она используется для турбогенераторов мощностью до 150 Мвт включительно и многих гидрогенераторов.

Применение возбудителей, располагаемых на одном валу с синхронным генератором, ограничено невозможностью выбора желательной скорости вращения возбудителя, затруднениями, возникающими при конструировании крупных возбудителей для генераторов большой мощности, трудностью достижения достаточно высоких значений потолка и скорости нарастания напряжения возбуждения. Поэтому во многих случаях на электростанциях применяются возбудители, связанные с валом генератора при помощи редуктора, возбудители с приводом от электродвигателя и другие системы возбуждения. В последние годы применяются системы самовозбуждения и независимого возбуждения от выпрямителей.

* При параллельной работе генераторов система самовозбуждения потребляет часть мощности, вырабатываемой всеми генераторами электрической системы.

** Точнее, вал возбудителя связан соединительной муфтой с валом генератора.

Простейшие системы электромашинного возбуждения. На рис. 61 приведены схемы электромашинных систем возбуждения с возбудителем, расположенным на валу генератора или отдельно. Более простой и надежной является показанная на рис. 61, а схема с самовозбуждением возбудителя (обычно применяется схема параллельного самовозбуждения возбудителя).

Схема с независимым возбуждением возбудителя (рис. 61, б) сложнее, так как содержит подвозбудитель. Можно показать, что эта схема имеет большую быстроотзывчивость, чем предыдущая (при условии, что в сопоставляемых схемах используются иден-

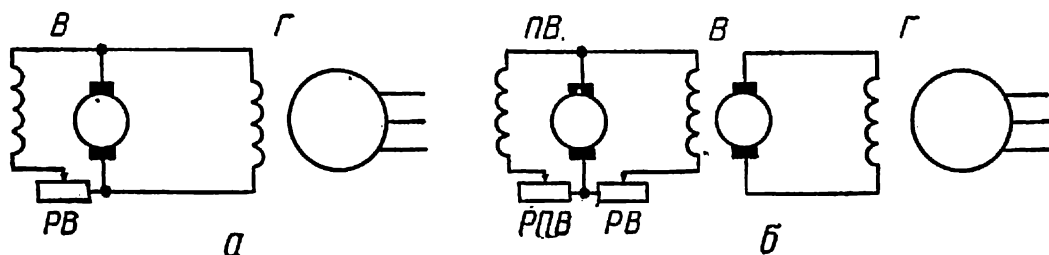


Рис. 61. Схемы возбуждения синхронного генератора от возбудителя: Г — синхронный генератор; В — возбудитель; ПВ — подвозбудитель; РВ и РПВ — реостаты в цепи возбуждения возбудителя и подвозбудителя.

тичные возбудители). Схему с независимым возбуждением применяют относительно редко для возбуждения тихоходных гидрогенераторов при расположении возбудителя и подвозбудителя на одном валу с гидрогенератором. Обмотка возбуждения такого тихоходного возбудителя имеет сравнительно большую индуктивность, что затрудняет достижение требуемой быстроотзывчивости системы возбуждения.

Системы самовозбуждения и независимого возбуждения синхронных генераторов от выпрямителей применяют в энергосистемах для крупных гидро- и турбогенераторов. Наиболее важными преимуществами выпрямительных систем возбуждения являются высокая быстроотзывчивость и кратность форсировки, возможности выполнения систем возбуждения генераторов любой мощности из стандартных изделий электротехнической промышленности и эффективного использования выпрямителей для быстрого развозбуждения.

Недостатком систем возбуждения от выпрямителей является пока еще недостаточно высокая надежность их работы: Выпрямительная система возбуждения может выйти из строя не только в результате повреждения выпрямителей, но и при нарушении

работы вспомогательных устройств (устройств охлаждения выпрямителей и др.).

Ток возбуждения синхронного генератора в системах возбуждения от выпрямителей можно регулировать изменением моментов отпирания управляемых выпрямителей или изменением напряжения, подведенного к неуправляемым выпрямителям.

Система самовозбуждения крупных турбогенераторов. Рассмотрим в качестве примера выпрямительную систему возбужде-

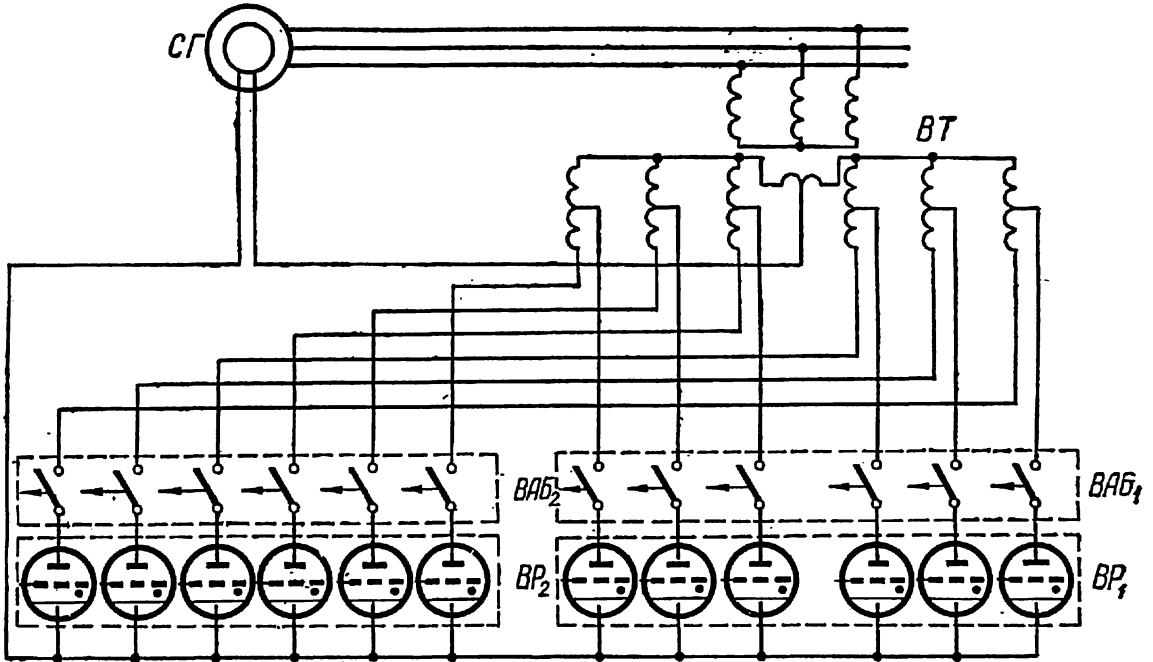


Рис. 62. Принципиальная схема самовозбуждения турбогенератора типа ТГВ-200.

ния, примененную харьковским заводом «Электротяжмаш» имени В. И. Ленина для турбогенераторов мощностью 200 Мвт и выше. Система разработана Всесоюзным научно-исследовательским институтом электромеханики (ВНИИЭМ) и представляет собой систему самовозбуждения синхронных генераторов от управляемых ртутных выпрямителей. Схема самовозбуждения турбогенераторов типа ТГВ-200 мощностью 200 Мвт приведена на рис. 62.

Обмотка ротора синхронного генератора СГ питается от двух шестифазных управляемых выпрямителей ВР₁ и ВР₂. Со стороны переменного тока выпрямители подключены через быстродействующие анодные выключатели ВАБ₁ и ВАБ₂ к выпрямительному трансформатору ВТ с включением обмоток по схеме звезда/две обратные звезды с уравнительным реактором.

Быстродействующие анодные выключатели отключают отдельные вентили в случае их повреждения или возникновения обратного зажигания, после чего выпрямитель продолжает работать с неполным комплектом вентиляей.

Для управления выпрямителями к сеткам вентиляей подводится отрицательное напряжение, на которое в требуемый момент накладываются пики положительного отпирающего напряжения. Момент отпираия вентиляей характеризуется значением угла регулирования. Средняя величина выпрямленного напряжения изменяется при изменении угла регулирования, для чего пики отпирающего напряжения сдвигаются во времени относительно переменного напряжения, питающего выпрямитель. Выпрямитель управляется устройством АРВ.

Выпрямитель BP_1 , который можно назвать рабочим, подключен к промежуточным выводам вторичной обмотки трансформатора BT , рассчитаным на напряжение 525 в и создает основную часть тока возбуждения генератора в нормальных режимах работы.

Выпрямитель BP_2 , называемый форсировочным, подключен к конечным выводам вторичной обмотки трансформатора BT , рассчитанным на напряжение 1050 в. В нормальных режимах он работает с большим углом регулирования и создает дополнительную составляющую тока возбуждения генератора, что необходимо для подогрева анодов его вентиляей. При форсировке возбуждения выпрямитель BP_2 полностью отпирается. Форсировочный выпрямитель BP_2 используется также для быстрого развозбуждения генератора при подъеме его напряжения, вызванном внезапным сбросом нагрузки. В этом случае устройство АРВ переводит выпрямитель BP_2 в инверторный режим, при котором напряжение на обмотке ротора имеет отрицательное среднее значение.

§ 2. РЕЛЕЙНЫЕ УСТРОЙСТВА ФОРСИРОВКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАЗВОЗБУЖДЕНИЯ. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Для обеспечения устойчивости электрических систем при значительных снижениях напряжения на выводах генераторов, вызванных внешними короткими замыканиями или увеличением тока нагрузки, необходимо в кратчайший срок форсировать возбуждение соответствующих генераторов до максимально возможной величины.

При наличии машинных возбудителей наиболее просто и надежно напряжение возбуждения форсируется до потолочного значения релейными устройствами, являющимися простейшими уст-

ройствами АРВ. Такие устройства АРВ называются устройствами релейной форсировки возбуждения или устройствами быстродействующего возбуждения (УБВ).

Действие устройства релейной форсировки заключается в частичном или полном шунтировании сопротивления в цепи обмотки возбуждения возбудителя синхронной машины при снижении напряжения на ее выводах. В этом случае ток возбуждения, а следовательно, и напряжение возбуждения генератора возрастают до потолочного значения, причем скорость нарастания напряжения возбудителя определяется в основном быстроотзывчивостью системы возбуждения. Время срабатывания релейного устройства, шунтирующего сопротивление, мало, поэтому устройство является быстродействующим.

Упрощенные принципиальные схемы устройств релейной форсировки возбуждения для системы прямого возбуждения с параллельным самовозбуждением возбудителя изображены на рис. 63, а и б.

Реле понижения напряжения $РН_1$ и $РН_2$ через трансформаторы напряжения генератора $ТН_1$ и $ТН_2$ включены на одно из линейных напряжений. Контакты реле $РН_1$ и $РН_2$ соединены между собой последовательно и включены в цепь обмотки контактора форсировки $КФ$ (рис. 63, б) последовательно с блок-контактом $В$ выключателя генератора.

При номинальном напряжении генератора контакты $РН_1$ и $РН_2$ разомкнуты и, следовательно, разомкнут контакт $КФ$, шунтирующий полностью или частично сопротивление $r_{р, в}$ в цепи возбуждения возбудителя. Если напряжение генератора понижается и достигает величины напряжения срабатывания реле $РН_1$ и $РН_2$, реле срабатывают и их контакты замыкаются. Через замкнутый блок-контакт выключателя $В$ (выключатель включен) замыкается цепь обмотки контактора форсировки и он своими контактами форсирует возбуждение.

Реле напряжения $РН_1$ и $РН_2$ подключены к различным трансформаторам напряжения. Поэтому предотвращается ложное срабатывание устройства релейной форсировки при перегорании одного из предохранителей трансформатора напряжения, которое может быть опасным для генератора или питаемой им нагрузки.

Блок-контакт выключателя $В$ предназначен для устранения действия устройства форсировки возбуждения до момента включения генератора в систему или после его отключения.

Реле понижения напряжения схем УБВ в большинстве случаев включаются на одно линейное напряжение. При этом устройство

релейной форсировки, возбуждения надежно действует в случае трехфазного короткого замыкания и двухфазного короткого замыкания между фазами, на которое включены реле PH_1 и PH_2 . Для обеспечения форсировки возбуждения при всех видах двух-

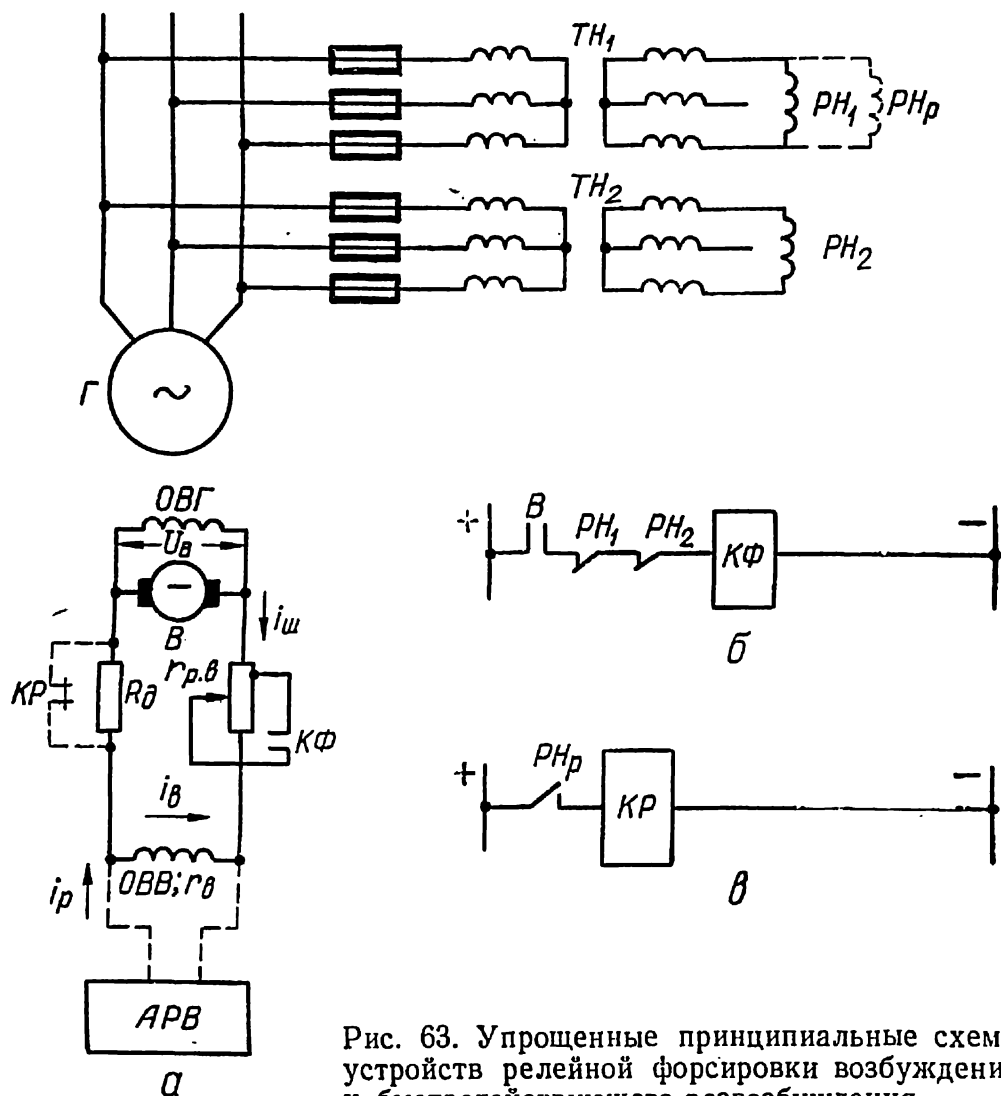


Рис. 63. Упрощенные принципиальные схемы устройств релейной форсировки возбуждения и быстродействующего развозбуждения.

фазных коротких замыканий реле понижения напряжения схем УБВ на генераторах включаются в разные фазы или они подключаются к трансформаторам напряжения через фильтр прямой последовательности. В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются реле напряжения с встроенным активно-емкостным фильтром прямой последовательности.

Вследствие простоты и высокой эффективности устройства релейной форсировки возбуждения широко применяются в энерго-

системах Советского Союза. Согласно правилам устройств электроустановок [46] в настоящее время все синхронные генераторы и компенсаторы, независимо от наличия других устройств АРВ, должны быть оборудованы устройствами релейной форсировки возбуждения. Кроме того, схемами УБВ предусматривается возможность перевода действия этих устройств на резервный возбудитель при замене им основного возбудителя. Для генераторов и синхронных компенсаторов мощностью менее 2500 квт, работающих в системах средней и большой мощности, правилами устройств электроустановок допускается применение только УБВ без других устройств АРВ.

Минимальное понижение напряжения на выводах генератора, при котором начинает действовать релейная форсировка возбуждения, определяется коэффициентом возврата реле понижения напряжения. С учетом этого коэффициента и необходимости надежного прекращения действия форсировки при восстановлении напряжения генератора до номинального значения (контакты реле размыкаются) максимальное напряжение срабатывания реле PH_1 и PH_2 должно быть

$$U_{p. н} \leq \frac{1}{k_b k_n} U_n = 0,85 U_n, \quad (3,2)$$

где k_b — коэффициент возврата реле напряжения ($k_b = 1,1$);

k_n — коэффициент надежности ($k_n = 1,05$);

U_n — напряжение на вторичной обмотке трансформатора напряжения при номинальном напряжении генератора.

Таким образом, релейная форсировка возбуждения начинает действовать при снижении напряжения на величину, равную или большую 15% номинального напряжения генератора.

Величина шунтируемого сопротивления R_ϕ в цепи обмотки возбуждения возбудителя при релейной форсировке определяется из условия обеспечения необходимого потолочного значения напряжения возбуждения. Согласно схеме, приведенной на рис. 63, а,

$$R_\phi = \frac{U_{в. п} - r_{в. п} i_{в. п}}{i_{в. п} - i_{р. п}} \quad (3,3)$$

Ток возбуждения обмотки возбудителя $i_{в. п}$ в режиме форсировки определяется из нагрузочной характеристики возбудителя по заданному потолочному напряжению возбудителя $U_{в. п}$, а ток от других устройств АРВ $i_{р. п}$ — по характеристикам соответствующих устройств АРВ. Если $R_\phi = 0$, то необходимо полностью шунтировать сопротивление.

Устройство быстродействующего развозбуждения, устанавливаемое на гидрогенераторах, предназначено для ограничения напряжения на его выводах при разгоне гидроагрегата и необходимости сохранения питания подключенных к гидростанции нагрузок.

С повышением напряжения устройства АРВ автоматически развозбуждают генератор — уменьшают до минимума (или до нуля) выходной ток, протекающий по обмотке возбуждения возбудителя генератора; некоторые системы АРВ при повышении напряжения размагничивают возбудитель генератора изменением направления выходного тока.

При частичном сбросе нагрузки, когда скорость вращения гидрогенератора повышается на 25—30% от номинальной, развозбуждающее действие основных устройств АРВ недостаточно, так как с увеличением скорости вращения напряжение на выводах генератора резко возрастает. Поэтому гидрогенераторы дополнительно оборудуются релейными устройствами быстродействующего развозбуждения, состоящими из реле повышения напряжения $RН_p$, подключаемого к одному из генераторных трансформаторов напряжения, и контактора развозбуждения $KР$, имеющего размыкающие контакты, которые шунтируют добавочное сопротивление R_d в цепи обмотки возбуждения возбудителя (рис. 63, а).

При повышении напряжения генератора срабатывает реле $RН_p$ и замыкает свои контакты в цепи питания обмотки контактора развозбуждения $KР$, который размыкает свои контакты и вводит в цепь обмотки возбуждения возбудителя добавочное сопротивление R_d . Вследствие этого ток возбуждения возбудителя уменьшается, и генератор развозбуждается.

Минимальное повышение напряжения генератора, при котором он развозбуждается, определяется коэффициентом возврата реле $RН_p$ и необходимостью прекращения действия устройства развозбуждения, если напряжение принимает номинальное значение. В этом случае $k_b = 0,8$; $k_n = 1,05$ и напряжение срабатывания реле $RН_p$ должно быть

$$U_{RН_p} \geq \frac{k_n}{k_b} U_n = 1,3U_n.$$

Таким образом, УБР начинает действовать при повышении напряжения генераторов на 30% или больше U_n .

Необходимо учитывать, что УБР не всегда предотвращает появление значительных перенапряжений на зажимах статора. Поэтому гидрогенераторы дополнительно оборудуются защитой от перенапряжений с уставкой $(1,5 — 1,7) U_n$, которая действует на

отключение выключателя и гашение поля. Для ускорения процесса развозбуждения величину добавочного сопротивления R_d необходимо выбирать как можно большей, но с увеличением R_d возрастает перенапряжение на обмотке возбуждения возбудителя, определяемое скоростью уменьшения магнитного потока.

Добавочное сопротивление R_d определяется из условия достижения на генераторе номинального напряжения при повышенной скорости вращения, наличии соответствующего воздействия на возбуждение устройства АРВ и полном сбросе нагрузки (холостой ход).

По характеристике холостого хода генератора определяется ток ротора $i_{p. x. н.}$, соответствующий номинальному напряжению генератора при номинальной скорости вращения. Если считать, что зависимость между напряжением холостого хода $U_{г. х.}$, током ротора $i_{p. х.}$ и скоростью его вращения n линейная

$$U_{г. х.} \equiv i_{p. х.} n, \quad (3,4)$$

то необходимое значение тока ротора при развозбуждении

$$i_{p. х. p} = \frac{i_{p. х. н.}}{\gamma}, \quad (3,5)$$

где $\gamma = \frac{n_p}{n}$ — кратность повышения скорости вращения гидрогенератора при разгоне.

Напряжение возбудителя при развозбуждении

$$U_{в. х. p} = r_p i_{p. х. p}, \quad (3,6)$$

где r_p — сопротивление обмотки ротора генератора.

По нагрузочной характеристике возбудителя и величине $U_{в. х. p}$ определяется ток возбуждения возбудителя $i'_{в. х. p}$, обеспечивающий напряжение $U_{в. х. p}$ при номинальной скорости вращения гидроагрегата. Для линейной зависимости между напряжением возбудителя, током его возбуждения и скоростью вращения, аналогичной выражению (3,4), ток возбуждения возбудителя при развозбуждении

$$i_{в. х. p} = \frac{i'_{в. х. p}}{\gamma}. \quad (3,7)$$

Из схемы, приведенной на рис. 63, а, легко определить величину добавочного сопротивления, обеспечивающего развозбуждение генератора,

$$R_d = \frac{U_{в. х. p} - r_v i_{в. х. p}}{i_{в. х. p} - i_{p. p}} - r_{p. в.}, \quad (3,8)$$

где $i_{p. p}$ — ток выхода АРВ при развозбуждении.

Для системы прямого возбуждения с независимым возбуждением возбудителя от подвозбудителя добавочное сопротивление

$$R_d = \frac{U_{в. п. р}}{i_{в. х. р} - i_{р. р}} - r_{р. в}, \quad (3,9)$$

где $U_{в. п. р}$ — напряжение подвозбудителя при развозбуждении.

При определении напряжения $U_{в. п. р}$ необходимо учитывать, что напряжение подвозбудителя примерно пропорционально квадрату скорости его вращения.

Краткие сведения об автоматических регуляторах возбуждения. Устройства АРВ непрерывного действия называются автоматическими регуляторами возбуждения. По принципу действия автоматические регуляторы возбуждения делятся на три группы:

1) регуляторы, действующие по отклонению регулируемой величины (напряжения генератора) — автоматические регуляторы напряжения (АРН);

2) регуляторы, действующие по возмущению (ток статора генератора, угол сдвига фаз между напряжением и током генератора и др.) — устройства компаундирования;

3) комбинированные регуляторы, действующие и по отклонению регулируемой величины и по возмущению.

По конструктивному выполнению автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) разделяются на электрические и электромеханические. Электрические регуляторы содержат только электрические и электромагнитные элементы, а электромеханические — кроме указанных элементов, содержат устройства с подвижными частями и разъемными контактами.

По способу воздействия на возбуждение генератора с электромашиной системой возбуждения АРВ делятся на две группы:

1) регуляторы, изменяющие возбуждение генератора изменением сопротивления в цепях обмоток возбуждения возбудителей (электромеханические регуляторы). При регулировании возбуждения АРВ могут плавно изменять сопротивление $r_{р. в}$ (рис. 64, а) или периодически шунтировать части этого сопротивления (рис. 64, б);

2) регуляторы, изменяющие возбуждение генераторов введением в обмотки возбуждения их возбудителей дополнительных токов, зависящих от отклонения регулируемой величины или от возмущения, или одновременно от отклонения регулируемой величины и от возмущения (электрические регуляторы).

Дополнительные токи, создаваемые такими регуляторами, могут вводиться в основную (рис. 65, а) или дополнительную (рис. 65, б) обмотку возбуждения возбудителя генератора.

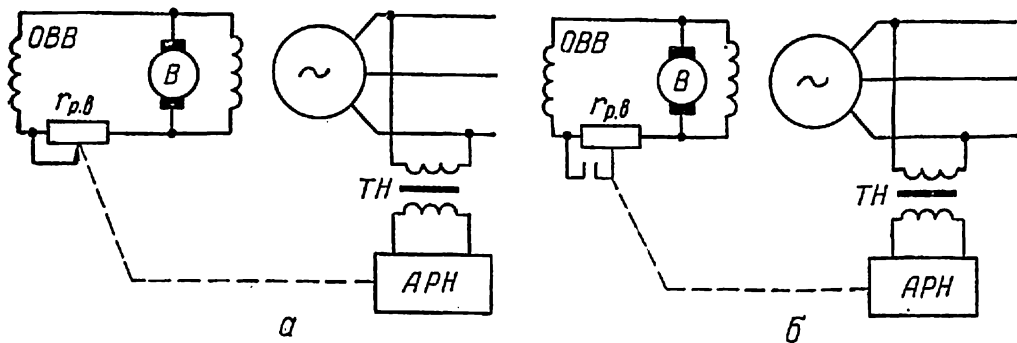


Рис. 64. Принципиальные схемы включения АРН, изменяющих сопротивление в цепях обмоток возбуждения возбудителей.

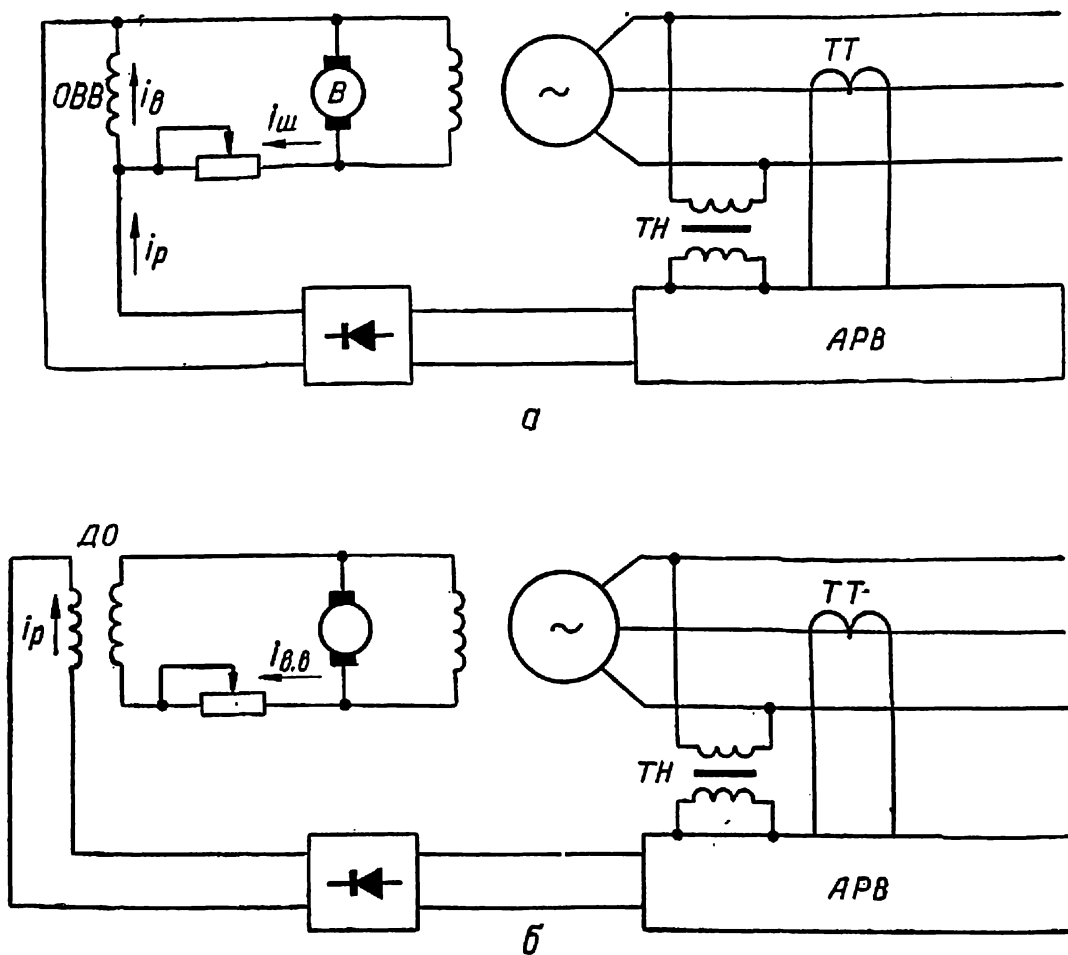


Рис. 65. Принципиальные схемы включения электрических АРН.

АРВ генераторов с выпрямительной системой возбуждения воздействуют на устройство управления выпрямителей или изменяют величину выпрямляемого напряжения. В последнем случае применяются электрические регуляторы.

В энергосистемах применяются электрические регуляторы возбуждения. Такие регуляторы в большинстве случаев выполняются с использованием магнитных усилителей.

§ 3. МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Принцип действия и конструкция. Магнитные усилители — электромагнитные устройства, использующие зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов на переменном токе от величины подмагничивающего (постоянного) магнитного поля и усиливающие входной сигнал, создающий или изменяющий это подмагничивающее поле [47].

Принцип действия магнитного усилителя рассмотрим на простейшем дроссельном усилителе, схема которого показана на рис. 66. Простейший дроссельный магнитный усилитель выполняется из двух одинаковых замкнутых ферромагнитных сердечников с несколькими обмотками, количество которых зависит от конкретной схемы усилителя.

Магнитный усилитель питается переменным напряжением, а управляется — постоянным током. Обмотки, по которым протекает переменный ток, называются рабочими, а по которым протекает постоянный ток — подмагничивающими. Подмагничивающие обмотки, к которым подводится предназначенный для усиления сигнал, называются управляющими.

Магнитный усилитель питается переменным напряжением, а управляется — постоянным током. Обмотки, по которым протекает переменный ток, называются рабочими, а по которым протекает постоянный ток — подмагничивающими. Подмагничивающие обмотки, к которым подводится предназначенный для усиления сигнал, называются управляющими.

В простейшем дроссельном магнитном усилителе (рис. 66) рабочая и подмагничивающая обмотки состоят из двух катушек, расположенных на различных сердечниках. К рабочей обмотке w_{\sim} через сопротивление нагрузки, в котором необходимо изменить ток (мощность), подводится переменное синусоидальное напряжение. Если по сопротивлению нагрузки должен протекать постоянный ток, то оно включается через двухполупериодный

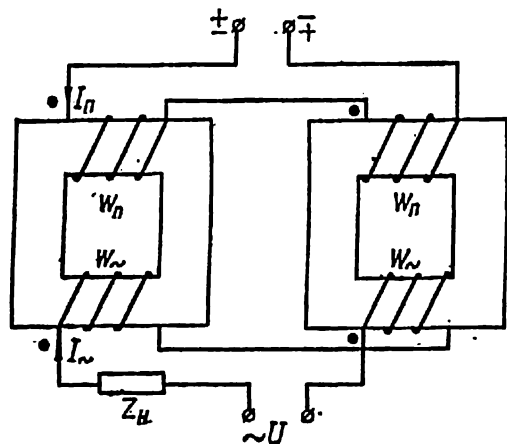


Рис. 66. Схема дроссельного магнитного усилителя.

выпрямитель *. К подмагничивающей обмотке ω_n (в этой схеме она является и управляющей обмоткой) подводится постоянное напряжение (ток), предназначенное для усиления.

Катушки рабочей обмотки магнитного усилителя, расположенные на каждом из сердечников, могут соединяться между собой последовательно или параллельно, но всегда так, чтобы э. д. с., индуцируемые переменным магнитным потоком в катушках подмагничивающей обмотки, находились в противофазе. Таким образом практически устраняется трансформаторная связь между рабочей и подмагничивающей обмотками.

Величина питающего переменного напряжения и параметры усилителя (габариты, количество витков рабочей обмотки) выбираются так, что при отсутствии постоянного подмагничивающего тока в обмотке ω_n переменная составляющая магнитной индукции в сердечниках усилителя меньше индукции насыщения. В этом случае магнитная проницаемость материала сердечника велика, велико индуктивное сопротивление рабочей обмотки, и ток нагрузки мал.

При протекании постоянного тока через подмагничивающую обмотку вследствие появления постоянной составляющей индукции сердечники насыщаются, магнитная проницаемость материала сердечника, а следовательно, и индуктивное сопротивление рабочей обмотки резко уменьшаются, и ток в нагрузке возрастает.

Таким образом, изменением постоянного тока подмагничивающей (управляющей) обмотки можно управлять током нагрузки. Параметры рабочей и управляющей обмоток и габариты сердечников можно подобрать так, что при незначительном изменении мощности в управляющей обмотке мощность нагрузки изменится значительно, т. е. мощность будет усиливаться.

Выполнение магнитного усилителя на двух сердечниках обусловлено необходимостью устранения трансформаторной связи между рабочей и подмагничивающей обмотками. При наличии обычной трансформаторной связи между рабочей и подмагничивающей обмотками ток рабочей обмотки индуцирует значительные токи в подмагничивающих обмотках, и усилитель превращается в трансформатор.

Обычно количество витков подмагничивающих обмоток ω_n значительно больше количества витков рабочих обмоток ω_r , вследствие чего в катушках подмагничивающих обмоток, распо-

* В трехфазных магнитных усилителях, состоящих из трех дроссельных усилителей, применяются выпрямители, включенные по схеме Ларионова.

ложенных на различных сердечниках, индуктируются значительные по величине э. д. с.

Для устранения больших индуктированных э. д. с. в подмагничивающих обмотках магнитные усилители выполняются из двух сердечников, на каждом из которых расположены катушки рабочих обмоток, а подмагничивающая обмотка охватывает два сердечника.

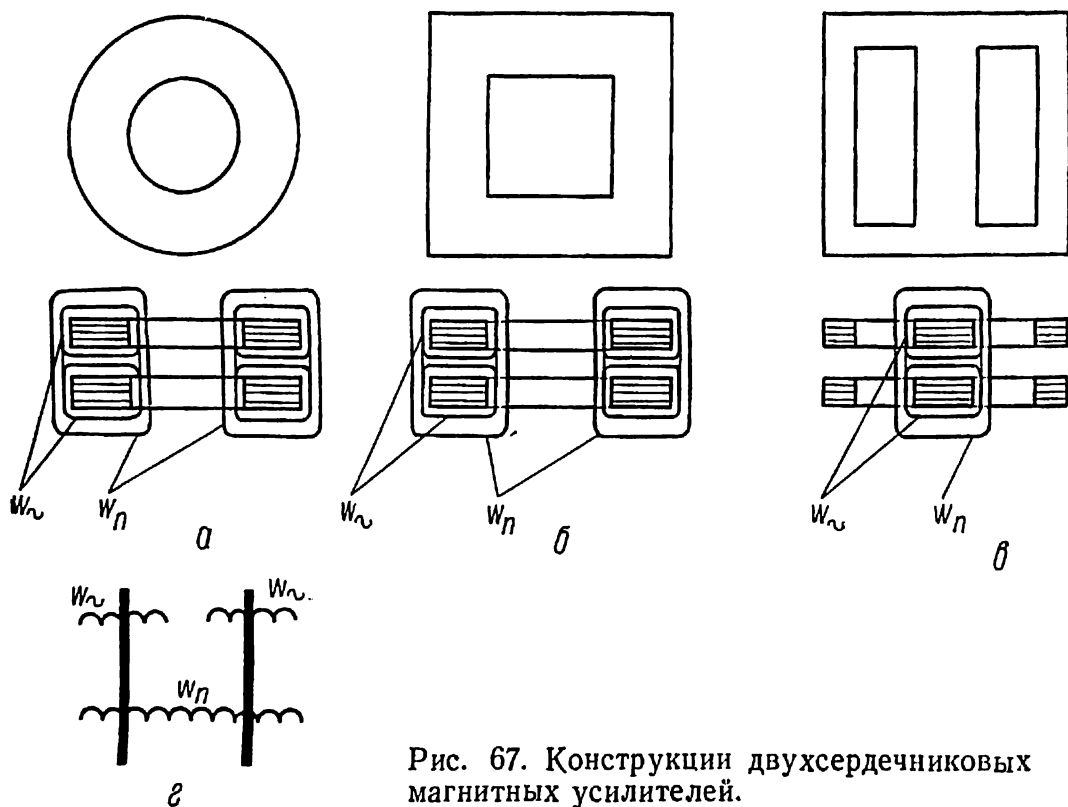


Рис. 67. Конструкции двухсердечниковых магнитных усилителей.

Конструкции такого магнитного усилителя с тороидальным, двухстержневым и трехстержневым сердечниками соответственно изображены на рис. 67, а, б, в.

В схемах автоматических устройств двухсердечниковый магнитный усилитель согласно ГОСТ 7624—62 изображается так, как это показано на рис. 67; г.

Катушки рабочих обмоток можно соединять последовательно или параллельно, но так, чтобы суммарная переменная составляющая магнитного потока, сцепленная с подмагничивающими обмотками, была скомпенсирована.

Принципиально магнитный усилитель можно выполнить и на одном трехстержневом сердечнике, если катушки рабочей обмотки

расположить на крайних стержнях, а подмагничивающей обмотки — на среднем стержне (рис. 68).

Катушки рабочей обмотки включаются согласованно между собой, вследствие чего переменная составляющая магнитного потока замыкается через крайние стержни и, следовательно, трансформаторная связь между рабочей и подмагничивающей обмотками отсутствует.

Из теории магнитных усилителей известно, что его коэффициент усиления и выходная мощность пропорциональны объему стали той части сердечника, по которой замыкается переменная составляющая магнитного потока. Так как в односердечниковом трехстержневом магнитном усилителе переменная составляющая магнитного потока замыкается только по крайним стержням, то для получения одной и той же выходной мощности при одинаковых коэффициентах усиления в таком усилителе потребуется больший объем стали, чем в усилителях с двумя сердечниками (рис. 67). Поэтому односердечниковые трехстержневые усилители применяются ограниченно.

Принцип действия различных типов магнитных усилителей будем уяснять на трехстержневой конструкции магнитного усилителя. Действительные конструкции магнитного усилителя изображены на рис. 67.

Нагрузочная характеристика. Удельная намагничивающая сила $a\omega_n$, создаваемая током I_n подмагничивающей обмотки,

$$a\omega_n = \frac{\omega_n I_n}{l_n},$$

где l_n — средняя длина линии постоянной составляющей магнитной индукции.

Зависимость тока нагрузки магнитного усилителя от удельной намагничивающей силы подмагничивающей (управляющей) обмотки называется нагрузочной характеристикой магнитного усилителя. Нагрузочная характеристика рассматриваемого дроссельного магнитного усилителя изображена на рис. 69.

Из рис. 69 видно, что обычные дроссельные магнитные усилители имеют следующие особенности:

1) дроссельные магнитные усилители нечувствительны к поляр-

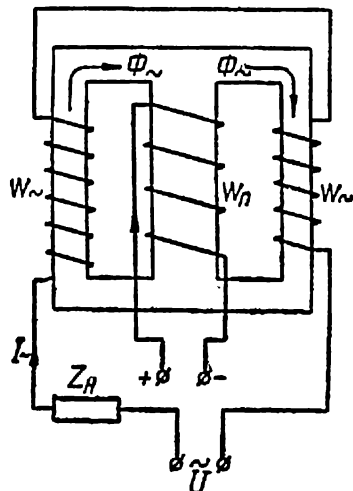
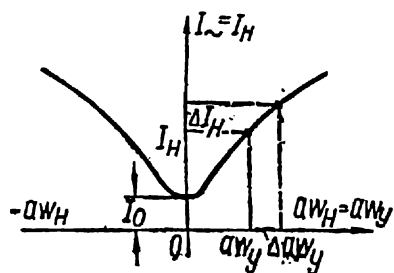


Рис. 68. Схема магнитного усилителя на трехстержневом сердечнике.

ности подмагничивающего тока — для одного и того же значения подмагничивающего тока независимо от его полярности ток нагрузки и фаза его первой гармоники остаются неизменными;

2) при отсутствии подмагничивающего тока через нагрузку усилителя протекает ток I_0 , который называется током холостого хода.

Коэффициент усиления. Коэффициентом усиления магнитного усилителя по мощности называется отношение приращения мощности в нагрузке к приращению мощности в управляющей (подмагничивающей) обмотке, соответствующему изменению мощности нагрузки, при условии, что это изменение стремится к нулю (рис. 69):



$$k_p = \frac{dP_H}{dP_y} \approx \frac{\Delta P_H}{\Delta P_y} \quad (3,10)$$

Рис. 69. Нагрузочная характеристика дроссельного магнитного усилителя без обратной связи.

Если активное сопротивление нагрузки R_H , а сопротивление управляющей обмотки R_y , то коэффициент усиления магнитного усилителя

$$k_p \approx \frac{R_H [(I_H + \Delta I_H)^2 - I_H^2]}{R_y [(I_y + \Delta I_y)^2 - I_y^2]} \approx \frac{R_H I_H \Delta I_H}{R_y I_y \Delta I_y} \quad (3,11)$$

Из выражения (3,11) видно, что вследствие нелинейности нагрузочной характеристики магнитного усилителя его коэффициент усиления зависит от управляющего (подмагничивающего) тока.

В большинстве случаев магнитный усилитель характеризуется средним коэффициентом усиления по мощности

$$k_{p \text{ ср}} = \frac{P_{H \text{ max}} - P_0}{P_{y \text{ max}}} = \frac{R_H (I_{H \text{ max}}^2 - I_0^2)}{R_y I_{y \text{ max}}^2} \quad (3,12)$$

где $I_{H \text{ max}}$ — максимальный ток в сопротивлении нагрузки при максимальном управляющем токе $I_{y \text{ max}}$.

Магнитный усилитель с обратной связью. Одним из эффективных средств повышения коэффициента усиления магнитного усилителя является применение внешней и внутренней обратных связей.

Внешняя обратная связь. Для уяснения сущности внешней обратной связи рассмотрим односердечниковый трехстержневой

магнитный усилитель, показанный на рис. 70. В этом усилителе кроме управляющей обмотки w_y на среднем стержне расположена обмотка обратной связи $w_{o.c.}$, через которую протекает выпрямленный ток нагрузки. Сопротивление нагрузки в зависимости от условий работы усилителя может включаться до или после выпрямителя.

Обмотка $w_{o.c.}$ служит для создания внешней обратной связи. Намагничивающая сила постоянного тока в этом случае численно равна алгебраической сумме удельных намагничивающих сил обмоток управляющей и обратной связи:

$$a\omega_n = a\omega_{o.c.} \pm a\omega_y = \frac{I_{o.c.}w_{o.c.}}{l_n} \pm \frac{I_y w_y}{l_n}, \quad (3,13)$$

где l_n — средняя длина линии магнитного потока подмагничивания.

Если намагничивающие силы обмоток управляющей и обратной связи направлены согласованно, то при увеличении управляющего тока увеличиваются ток нагрузки и намагничивающая сила обратной связи. Следовательно, дополнительно увеличивается ток нагрузки. Такая обратная связь называется положительной. Таким образом, одну и ту же мощность в нагрузке усилителя можно получить при меньшем управляющем токе, чем в усилителе без обратной связи, и, следовательно, коэффициент усиления магнитного усилителя с положительной обратной связью значительно больше, чем усилителя без обратной связи.

Если намагничивающие силы обмоток обратной связи и управляющей направлены встречно, коэффициент усиления усилителя уменьшается. Такая обратная связь называется отрицательной.

Так как среднее значение тока в обмотке обратной связи

$$I_{o.c.} = k_B I_{\sim},$$

то намагничивающая сила обмотки обратной связи при последовательном соединении катушек рабочей обмотки

$$a\omega_{o.c.} = k_B \frac{w_{o.c.}}{l_n} I_{\sim} = k_B \frac{w_{o.c.}}{w_{\sim}} \frac{l_{\sim}}{l_n} a\omega_{\sim}, \quad (3,14)$$

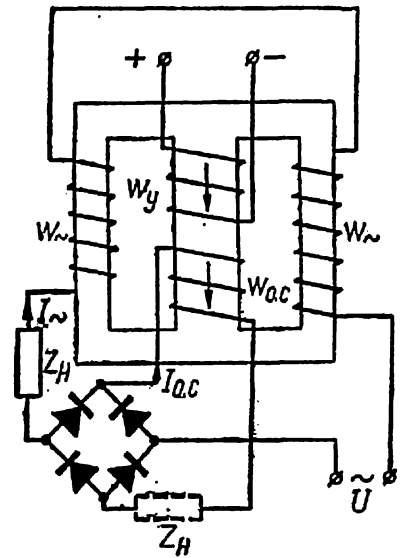


Рис. 70. Схема дроссельного магнитного усилителя с внешней обратной связью.

где k_b — коэффициент выпрямления выпрямителя;
 $a\omega_{\sim}$ — эффективное значение намагничивающей силы рабочей обмотки;
 l_{\sim} — средняя длина линии переменной составляющей магнитного потока;
 I_{\sim} — ток в катушке рабочей обмотки.

При параллельном соединении катушек рабочей обмотки ток, создающий обратную связь (ток нагрузки), вдвое больше тока катушки рабочей обмотки, следовательно,

$$a\omega_{o.c} = 2k_b \frac{\omega_{o.c}}{\omega_{\sim}} \cdot \frac{l_{\sim}}{l_n} a\omega_{\sim}$$

Отношение намагничивающей силы обмотки обратной связи к среднему значению намагничивающей силы катушки рабочей обмотки называется коэффициентом обратной связи. В двухсердечниковых магнитных усилителях $l_{\sim} = l_n$ и коэффициент обратной связи при соединении рабочих обмоток: последовательном

$$k_{o.c} = \frac{a\omega_{o.c}}{a\omega_{cp}} = k_b k_f \frac{\omega_{o.c}}{\omega_{\sim}}; \quad (3,15)$$

параллельном

$$k_{o.c} = 2k_b k_f \frac{\omega_{o.c}}{\omega_{\sim}}, \quad (3,16)$$

где k_f — коэффициент формы кривой тока рабочей обмотки.

Для построения нагрузочной характеристики усилителя с обратной связью, воспользовавшись соотношением

$$I_{o.c} = \frac{k_{o.c}}{k_f} \frac{\omega_{\sim}}{l_{\sim}} I_{\sim}, \quad (3,17)$$

из равенства (3,17) определим зависимость между намагничивающей силой постоянного тока и током рабочей обмотки при различных намагничивающих силах управления

$$a\omega_n = \frac{k_{o.c}}{k_f} \frac{\omega_{\sim}}{l_{\sim}} I_{\sim} \pm a\omega_y. \quad (3,18)$$

Эта зависимость в координатах $(a\omega_n, I_{\sim})$ изображается семейством параллельных прямых, тангенс угла наклона которых относительно оси I_{\sim} пропорционален коэффициенту обратной связи (рис. 71, а). Зависимость тока рабочей обмотки от полной намагничивающей силы постоянного тока в тех же координатах изо-

бражается нагрузочной характеристикой усилителя без обратной связи (кривая 1 на рис. 71, а).

Зависимость между током рабочей обмотки и управляющей намагничивающей силой усилителя с обратной связью (нагрузочную характеристику магнитного усилителя с обратной связью)

$$I_{\sim} = f(a\omega_y)$$

можно построить по точкам пересечения прямых (3,18) с нагрузочной характеристикой усилителя без обратной связи (кривая 2

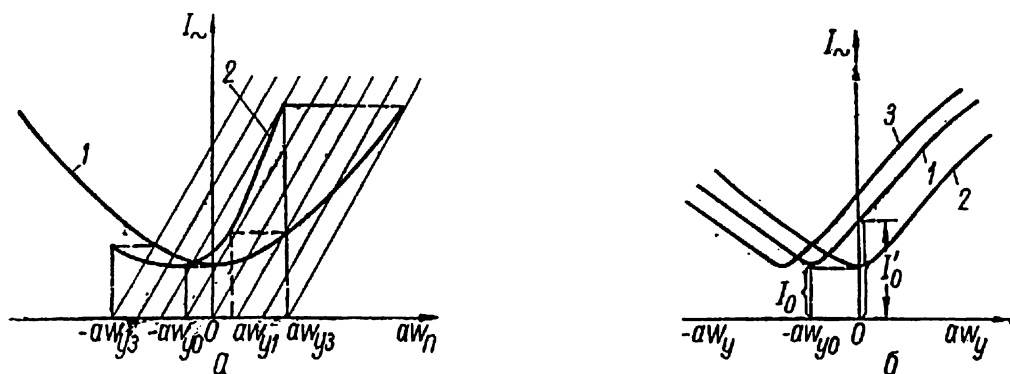


Рис. 71. Нагрузочные характеристики дроссельных магнитных усилителей с обратной связью.

на рис. 71, а). Нагрузочная характеристика дроссельного магнитного усилителя с обратной связью определяется кривой 1 на рис. 71, б. Из этой характеристики видно, что при наличии обратной связи ток холостого хода усилителя I'_0 возрастает по сравнению с током холостого хода усилителя без обратной связи I_0 , а минимальный ток усилителя, равный I_0 , будет при некоторой отрицательной намагничивающей силе, создаваемой управляющим током. Магнитный усилитель с обратной связью имеет несимметричную нагрузочную характеристику и, следовательно, чувствителен к полярности сигнала. С увеличением $k_{o.c}$ при положительной обратной связи возрастает I'_0 и увеличивается коэффициент усиления магнитного усилителя.

В магнитных усилителях систем автоматического регулирования $k_{o.c} < 1$.

Для уменьшения тока в нагрузке магнитного усилителя при отсутствии тока в управляющей обмотке часто предусматривается обмотка смещения, которая располагается так же, как и управляющая обмотка, и по которой протекает постоянный ток $I_{см}$, создающий намагничивающую силу, равную $a\omega_{y0}$. В этом случае

нагрузочная характеристика усилителя с обратной связью, изображенная в координатах $(I_{\sim}, a\omega_y)$ сместится вправо на величину $a\omega_{y0}$ и при $a\omega_y = 0$ ток усилителя будет минимальным (кривая 2 на рис. 71, б). Обмотка смещения также используется для выбора режима работы магнитного усилителя при $a\omega_y = 0$. Например, можно подобрать такой ток смещения, что для $a\omega_y = 0$ крутизна характеристики усилителя будет максимальной (кривая 3 на рис. 71, б).

Внутренняя обратная связь.

Обратную связь в магнитном усилителе можно осуществить без обмотки $\omega_{\text{в.с.}}$. Для этого ис-

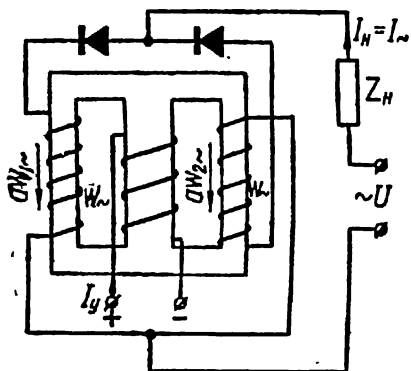


Рис. 72. Схема дроссельного магнитного усилителя с внутренней обратной связью и выходом на переменном токе.

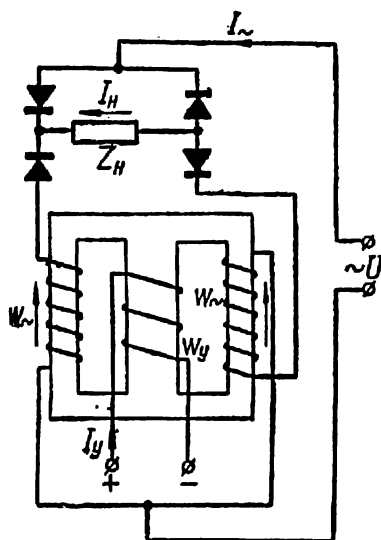


Рис. 73. Схема дроссельного магнитного усилителя с внутренней обратной связью и выходом на постоянном токе.

пользуются рабочие обмотки усилителя, по которым протекают одновременно переменная составляющая тока и выпрямленный ток обратной связи. Такой магнитный усилитель (рис. 72) называется усилителем с внутренней обратной связью. В этом усилителе по сопротивлению нагрузки протекает переменный ток. На рис. 73 приведена схема магнитного усилителя с внутренней обратной связью и выходом на постоянном токе.

Для уяснения принципа действия магнитного усилителя с внутренней обратной связью рассмотрим кривые мгновенных значений намагничивающих сил $a\omega_{1\sim}$ и $a\omega_{2\sim}$ первой и второй катушек рабочей обмотки усилителя.

Мгновенные значения $a\omega_{1\sim}$ и $a\omega_{2\sim}$ в функции времени при синусоидальном напряжении питания изображены на рис. 74, а, причем $a\omega_{1\sim}$ и $a\omega_{2\sim}$ сдвинуты во времени на $\frac{T}{2}$.

Каждое из мгновенных значений намагничивающих сил $a\omega_{1\sim}$ и $a\omega_{2\sim}$ можно рассматривать как алгебраическую сумму переменной периодической функции времени $a\omega_{\sim}$ с амплитудой, равной половине AW_M , и такой же периодической функции $a\omega_{\sim}''$, но выпрямленной двухполупериодным выпрямителем (рис. 74, б).

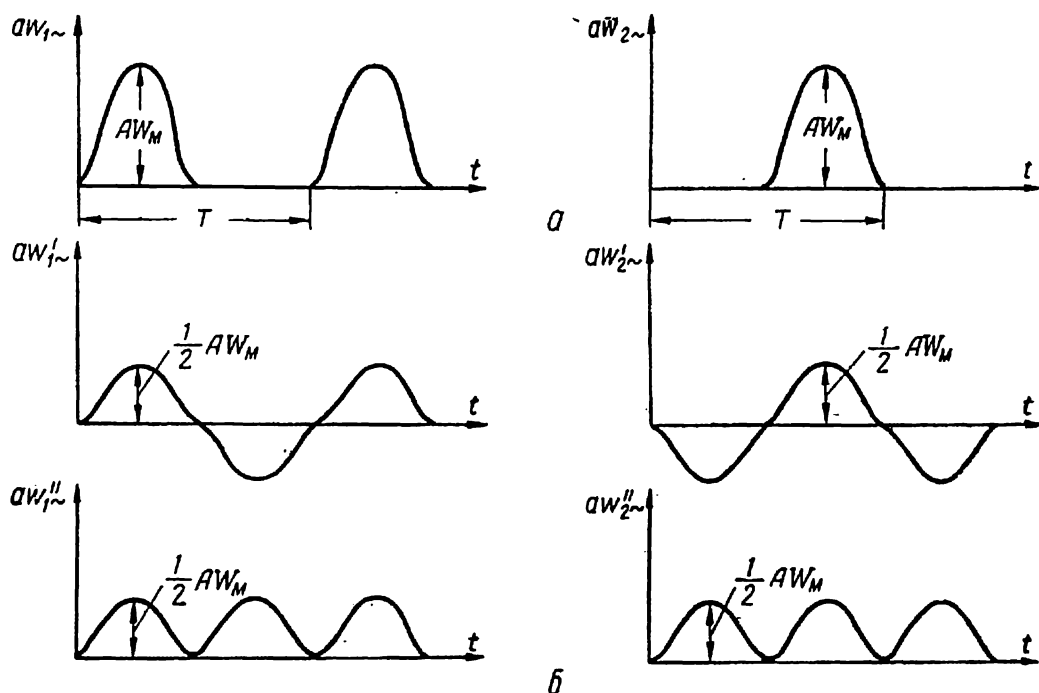


Рис. 74. Кривые намагничивающих сил магнитного усилителя с внутренней обратной связью.

Переменные составляющие намагничивающих сил $a\omega_{1\sim}'$ и $a\omega_{2\sim}'$ находятся в противофазе и создают переменную составляющую магнитного потока, замыкающую через крайние стержни сердечника.

Выпрямленные составляющие $a\omega_{1\sim}''$ и $a\omega_{2\sim}''$ вызывают магнитные потоки, замыкающиеся через средний стержень, и тем самым создают дополнительное подмагничивание магнитного усилителя, т. е. выполняют функцию обратной связи.

При наличии управляющего тока повышается переменная составляющая намагничивающей силы, следовательно, намагничивающая сила обратной связи и коэффициент усиления усилителя резко возрастают. Так как переменная составляющая намагничивающей силы и намагничивающая сила обратной связи создаются одинаковыми токами одной и той же обмотки, то при идеальных

выпрямителях ($k_b = \frac{1}{k_f}$) коэффициент обратной связи такого усилителя равен единице. В реальных выпрямителях $k_b < \frac{1}{k_f}$ и k_o несколько меньше единицы.

Двухтактные (реверсивные) магнитные усилители. В системах автоматического регулирования часто применяются магнитные усилители, чувствительные к полярности сигнала. В некоторых случаях усилители не должны иметь тока холостого хода ($I_0 = 0$). Магнитные усилители, чувствительные к полярности сигнала, называются двухтактными.

Двухтактные магнитные усилители содержат два дроссельных усилителя (с обратной связью или без нее), обмотки которых соединены между собой определенным образом.

В системах автоматического регулирования применяются двухтактные магнитные усилители с выходом на переменном и постоянном токе. В двухтактных магнитных усилителях с выходом на

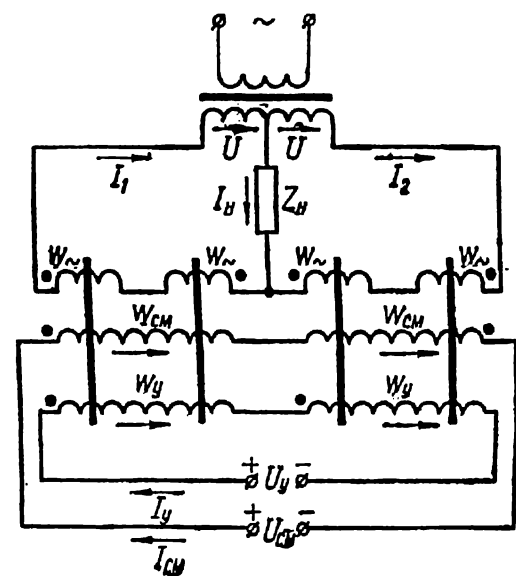


Рис. 75. Схема дифференциального магнитного усилителя.

переменном токе при изменении полярности управляющего тока изменяется на противоположную фаза первой гармоники выходного тока (тока нагрузки), а если управляющий сигнал отсутствует, ток выхода равен нулю. В двухтактных усилителях с выходом на постоянном токе с изменением полярности управляющего сигнала изменяется направление выходного тока.

Имеются три вида двухтактных магнитных усилителей с выходом на переменном токе:

- 1) дифференциальный магнитный усилитель;
- 2) мостовой магнитный усилитель;
- 3) трансформаторный магнитный усилитель.

Дифференциальный магнитный усилитель. Схема дифференциального магнитного усилителя изображена на рис. 75. Сопротивление нагрузки Z_n включается между средней точкой питающего трансформатора и точкой соединения рабочих обмоток отдельных дроссельных усилителей.

Двухтактные магнитные усилители в большинстве случаев имеют обмотку смещения. В некоторых случаях, когда двухтактный усилитель состоит из двух дроссельных усилителей с обратной связью, обмотка смещения может отсутствовать. Катушки управляющей обмотки усилителя, расположенные на двух дроссельных усилителях, соединены между собой так, что при одном направлении управляющего тока в одном дросселе намагничивающие силы, создаваемые управляющей обмоткой и обмоткой смещения, суммируются, а в другом дросселе — вычитаются.

Если направление управляющего тока изменяется на обратное, намагничивающие силы суммируются в другом дросселе, а вычитаются — в первом.

Из схемы, приведенной на рис. 75, видно, что ток нагрузки равен разности токов двух дроссельных усилителей:

$$I_n = I_1 - I_2.$$

При отсутствии управляющего тока, одинаковых дросселях, равных между собой питающих напряжениях и намагничивающих силах постоянного тока (тока смещения):

$$I_1 = I_2,$$

следовательно,

$$I_n = 0.$$

Если протекает управляющий ток, намагничивающая сила постоянного тока одного дросселя увеличивается, а другого — уменьшается, ток I_1 возрастает, а ток I_2 уменьшается и в сопротивлении нагрузки появляется ток определенной величины и фазы.

При изменении направления управляющего тока режимы дросселей соответственно меняются, и фаза тока нагрузки (первой гармоники) изменяется на противоположную.

Мостовой магнитный усилитель. Схема мостового магнитного усилителя показана на рис. 76, а. Соединение обмоток постоянного тока (управляющая обмотка и обмотка смещения) ничем не отличается от соединения этих обмоток в дифференциальном магнитном усилителе.

Катушки рабочих обмоток двух дроссельных усилителей (I' , I'' , II' и II'') соединены между собой так, что они создают симметричный индуктивный мост, причем противоположные плечи моста образуются катушками рабочей обмотки одного и того же дроссельного усилителя (рис. 76, б). В диагональ ab моста включено сопротивление нагрузки Z_n , а в диагональ cd подводится

напряжение питания. При $I_y = 0$ индуктивные сопротивления всех плеч моста равны между собой (намагничивающие силы постоянного тока, создаваемые током смещения и напряжения питания, равны), мост сбалансирован, и ток нагрузки равен нулю.

При наличии тока в управляющей обмотке намагничивающая сила, создаваемая обмотками постоянного тока одного дроссельного усилителя, увеличивается, а другого — уменьшается, индуктивные сопротивления одной пары противоположных плеч моста

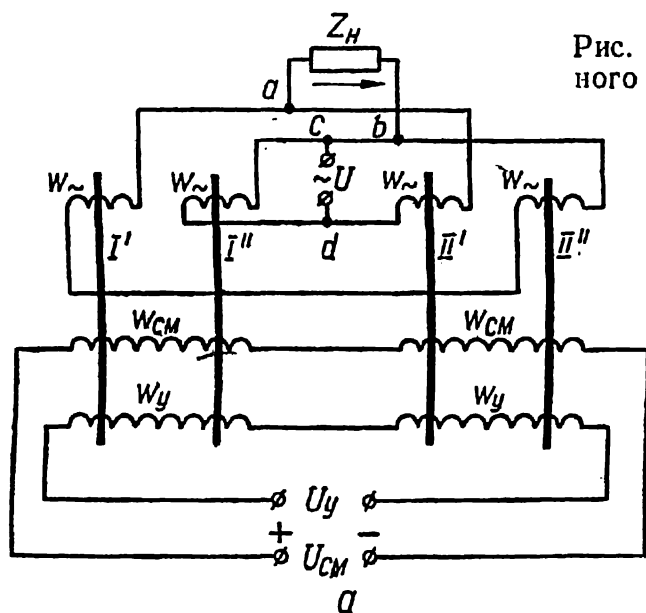
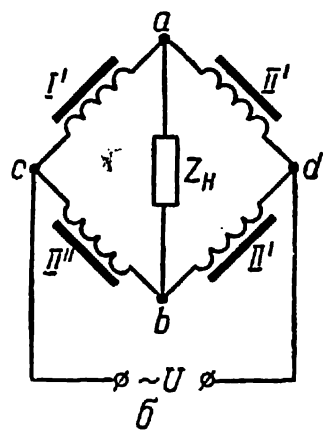


Рис. 76. Схема мостового магнитного усилителя.



(например, I' и I'') уменьшаются, а другой пары (например, II' и II'') — увеличиваются, баланс моста нарушается, и через сопротивление нагрузки протекает ток определенной величины и фазы. При изменении направления тока в управляющей обмотке фаза тока нагрузки (первой гармоники) изменится на противоположную.

Трансформаторный магнитный усилитель. Схема трансформаторного магнитного усилителя изображена на рис. 77. В этой схеме катушки обмоток рабочей и постоянного тока соединены так же, как и в дифференциальном магнитном усилителе. Помимо основной рабочей обмотки, дроссельные усилители имеют обмотки переменного тока w_n , расположенные на тех же стержнях, что и катушки основной рабочей обмотки, но электрически не связанные с ними. Обмотки w_n на каждом дроссельном усилителе соединены между собой так же, как и рабочие обмотки дросселя, но обмотки w_n разных дросселей соединены между собой после-

довательно, так что индуктированные в них э. д. с. находятся в противофазе.

От обмотки w_n питается сопротивление нагрузки усилителя. Если $I_y = 0$, э. д. с., индуктируемые в катушках w_n двух дросселей, равны между собой, и ток нагрузки равен нулю.

При наличии тока в управляющей обмотке одна из э. д. с. (например, в дросселе I) увеличивается, а другая (например, в дросселе II) — уменьшается, и в нагрузке появляется ток определенной фазы. При изменении направления управляющего тока фаза тока нагрузки (первой гармоники) меняется на противоположную.

Рассмотренные двухтактные магнитные усилители широко применяются для управления реверсивными двигателями переменного тока, используемыми в качестве исполнительных элементов регуляторов. Действительно, если в рассмотренных схемах в качестве сопротивления нагрузки включить одну из обмоток двухфазного асинхронного двигателя или якорь коллекторного двигателя переменного тока с независимым возбуждением, то при изменении полярности управляющего тока меняется фаза выходного тока усилителя и осуществляется бесконтактный реверс двигателя.

Двухтактный магнитный усилитель с выходом на постоянном токе. Имеется много различных схем двухтактных магнитных усилителей с выходом на постоянном токе. К. п. д. наиболее совершенных схем достигает лишь 50%. Рассмотрим только одну схему двухтактного магнитного усилителя с выходом на постоянном токе, имеющую повышенный к. п. д. (до 50%). Эта схема в последнее время широко применяется в различных устройствах автоматического регулирования. Рассматриваемый двухтактный магнитный усилитель состоит из двух дроссельных магнитных усилителей с внутренней обратной связью и выходом на постоянном токе (рис. 73).

Для использования этих усилителей в схеме двухтактного усилителя на каждом сердечнике дроссельного магнитного уси-

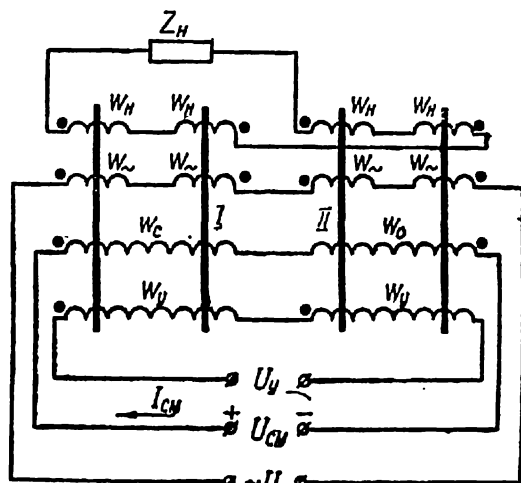


Рис. 77. Схема трансформаторного магнитного усилителя.

лителя размещаются две одинаковые катушки рабочих обмоток. Каждая пара этих катушек, расположенных на различных стержнях дроссельного усилителя, соединяются между собой по схеме, приведенной на рис. 73, и питаются переменным напряжением U от отдельных обмоток трансформатора питания.

Таким образом, на двух сердечниках создаются два одинаковых электрически не связанных дроссельных магнитных уси-

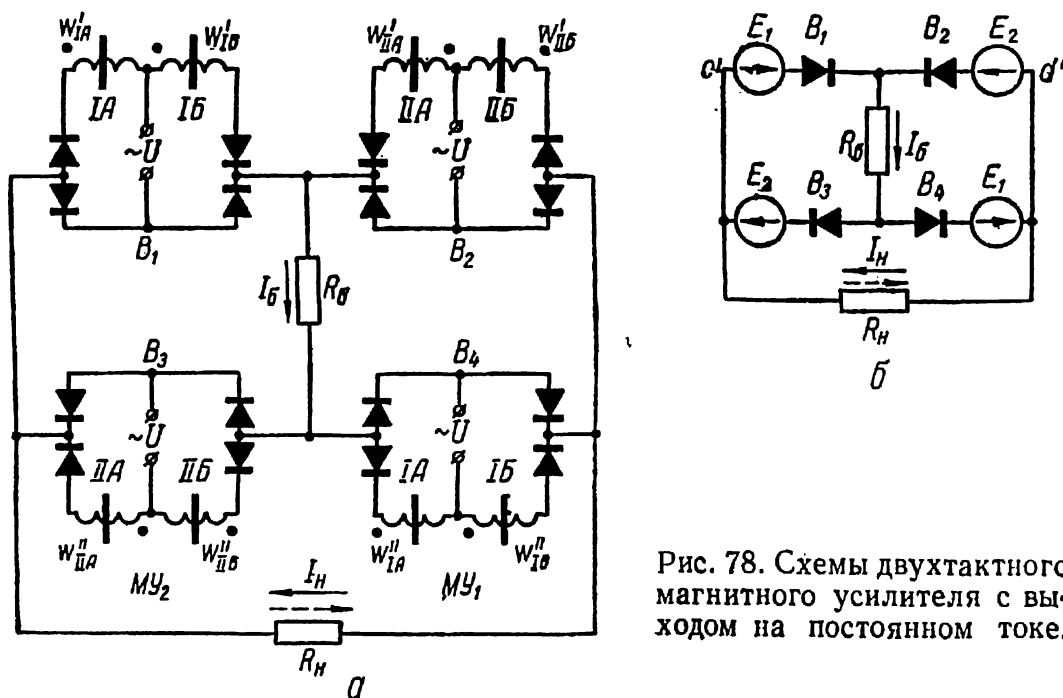


Рис. 78. Схемы двухтактного магнитного усилителя с выходом на постоянном токе.

лителя с выходом на постоянном токе, которые управляются одновременно одним током общей управляющей обмотки (или токами нескольких управляющих обмоток), охватывающей два сердечника.

Упрощенная схема двухтактного магнитного усилителя с выходом на постоянном токе показана на рис. 78 (трансформатор питания и управляющие обмотки магнитного усилителя на схеме не показаны). Сердечники IA и IB принадлежат дроссельному магнитному усилителю $МУ_1$, а сердечники IIA и IIB — усилителю $МУ_2$.

Управляющие обмотки дроссельных магнитных усилителей соединены между собой так, что для определенного направления управляющего тока намагничивающая сила, создаваемая этим током, в одном из дроссельных усилителей (например, в $МУ_1$),

направлена согласованно с намагничивающей силой внутренней обратной связи, а в другом усилителе (MU_2) — встречно. При изменении направления тока в управляющей обмотке направление управляющей намагничивающей силы изменяется на обратное и соответственно изменяются режимы магнитных усилителей MU_1 и MU_2 .

Рассмотрим принцип действия магнитного усилителя, изображенного на рис. 78, а. Из теории магнитных усилителей известно, что дроссельный магнитный усилитель с обратной связью можно рассматривать как источник управляемого напряжения E .

Напряжение E при неизменном сопротивлении нагрузки пропорционально выходному току усилителя и его зависимость от управляющей намагничивающей силы определяется нагрузочной характеристикой дроссельного магнитного усилителя с обратной связью (рис. 71, б).

Таким образом, дроссельный магнитный усилитель MU_1 можно представить двумя равными управляемыми источниками напряжения E_1 , включенными последовательно с выпрямителями B_1 и B_4 , а усилитель MU_2 — источниками напряжения E_2 , включенными через выпрямители B_2 и B_3 .

Схема замещения двухтактного магнитного усилителя с выходом на постоянном токе изображена на рис. 78, б.

При отсутствии управляющего тока напряжения E_1 и E_2 равны между собой, вследствие симметрии схемы потенциалы точек c и d одинаковы, и, следовательно, ток нагрузки I_n в сопротивлении нагрузки R_n равен нулю.

В этом случае ток I_6 протекает только в балластном сопротивлении R_6 . При наличии управляющего тока одно из напряжений (например, E_1) увеличивается, а другое (E_2) — уменьшается, потенциал точки d увеличивается, а точки c — уменьшается, и в сопротивлении нагрузки появляется ток (сплошная стрелка на рис. 78, б). Если полярность управляющего тока изменяется на обратную, знак разности потенциалов на сопротивлении нагрузки и направление тока нагрузки (штриховая стрелка) меняются на противоположные. Ток в балластном сопротивлении R_6 сохраняет прежнее направление.

Рассмотренный двухтактный магнитный усилитель с выходом на постоянном токе, как и другие аналогичные усилители, может работать только при наличии балластного сопротивления. Если $R_6 = 0$, источники E_1 и E_2 в каждой половине схемы на рис. 78, б замыкаются накоротко, и ток в сопротивлении нагрузки R_n для любых значений E_1 и E_2 будет равен нулю. При $R_6 = \infty$ вслед-

ствии наличия выпрямителей $B_1—B_4$ ток I_n также равен нулю для любых значений напряжений E_1 и E_2 .

Таким образом, ток в нагрузке может протекать только в том случае, когда $0 < R_6 < \infty$. Исследованиями установлено, что максимальный к. п. д. схемы (50%) достигается при равенстве балластного сопротивления и сопротивления нагрузки.

§ 4. КОМПАУНДИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПО ТОКУ С КОРРЕКЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Компаундирование синхронных генераторов. Устройство компаундирования по току

Компаундированием синхронных генераторов называется разновидность АРВ, при которой осуществляется непрерывная функциональная зависимость тока возбуждения генератора от тока нагрузки.

Различают компаундирование по току и фазовое компаундирование синхронных генераторов. Устройства компаундирования по току осуществляют зависимость тока возбуждения только от величины тока нагрузки, а устройства фазового компаундирования — от величины тока нагрузки и его фазового сдвига относительно напряжения генератора.

Компаундирование синхронных генераторов можно рассматривать как автоматическое регулирование напряжения по возмущению. При фазовом компаундировании главными возмущающими воздействиями являются ток нагрузки и его сдвиг по фазе относительно напряжения генератора, при компаундировании по току — только ток нагрузки.

Синхронные генераторы, снабженные устройствами компаундирования, называются компаундированными.

Первые попытки осуществить компаундирование синхронных генераторов были сделаны еще в конце прошлого столетия. Но лишь в 1940 г. в Советском Союзе впервые были разработаны и изготовлены удачные конструкции компаундированных синхронных генераторов. Это были самовозбуждающиеся генераторы малой мощности с использованием фазового компаундирования для автоматического регулирования напряжения при изменениях тока нагрузки и коэффициента мощности. После Великой Отечественной войны такие генераторы начали широко применяться.

Исследованиями, выполненными в Институте электродинамики* АН УССР, было установлено, что компаундирование синхронных генераторов может быть использовано как эффективное, простое и надежное средство для повышения

* Ранее — Институт электротехники АН УССР.

устойчивости электрических систем [19]. В годы Великой Отечественной войны в институте были разработаны устройства компаундирования по току, а впоследствии — и фазового компаундирования. В настоящее время такие устройства широко используются в энергетических системах Советского Союза и зарубежных стран для АРВ синхронных генераторов с машинными возбудителями.

Принцип действия устройства компаундирования по току. Устройство компаундирования состоит из полупроводникового выпря-

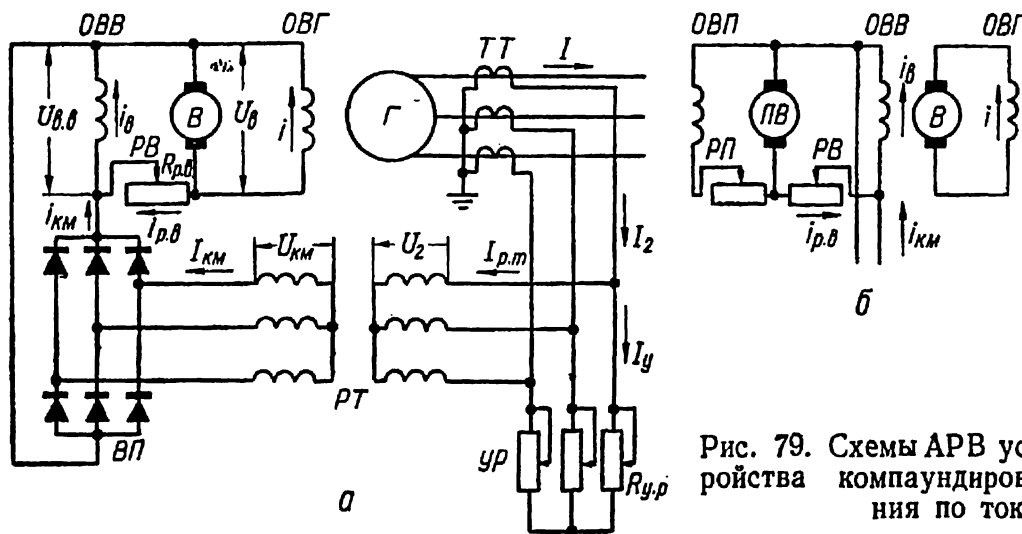


Рис. 79. Схемы АРВ устройства компаундирования по току:

Г — синхронный генератор; *ОВГ* — обмотка возбуждения синхронного генератора; *В* — возбудитель; *ОВВ* — обмотка возбуждения возбудителя; *ПВ* — подвозбудитель; *ОВП* — обмотка возбуждения подвозбудителя; *РВ* — реостат возбуждения возбудителя; *РП* — реостат возбуждения подвозбудителя; *ТТ* — трансформаторы тока; *ВП* — выпрямитель полупроводниковый; *РТ* — разделительный трансформатор; *УР* — установочный реостат.

мителя, разделительного трансформатора и установочного реостата (рис. 79). Часть I_y вторичного тока I_2 трансформаторов тока ответвляется в установочный реостат. Другая часть $I_{р.т}$ поступает в первичную обмотку разделительного трансформатора, вторичная обмотка которого питает переменным током $I_{км}$ полупроводниковый выпрямитель. Последний подпитывает обмотку возбуждения возбудителя выпрямленным током $i_{км}$. Ток i_v возбуждения возбудителя является суммой двух составляющих

$$i_v = i_{р.в} + i_{км},$$

где $i_{р.в}$ — ток, поступающий в обмотку возбуждения возбудителя от якоря возбудителя (рис. 79,а) или подвозбудителя (рис. 79,б) через реостат возбуждения возбудителя;

$i_{км}$ — ток компаундирования (выходной ток устройства компаундирования).

Действие компаундирования проявляется лишь при токах нагрузки, превышающих некоторую величину $I_{п.к}$, называемую порогом компаундирования. При $I < I_{п.к}$ выпрямитель $ВП$ заперт (выпрямленный ток $i_{км} = 0$), так как напряжение $U_{км}$ на зажимах переменного тока выпрямителя слишком мало, чтобы преодолеть напряжение $U_{в.в}$ обмотки возбуждения $ОВВ$ возбудителя $В$, противодействующее протеканию выпрямленного тока. Но в условиях нормальной эксплуатации генераторы работают с током нагрузки, значительно превышающим порог компаундирования.

Если $I > I_{п.к}$, то с увеличением тока нагрузки возрастают токи $i_{км}$ и $i_{в}$. Вследствие этого при любом увеличении (уменьшении) тока нагрузки увеличивается (уменьшается) ток i возбуждения генератора.

Действие устройства компаундирования при форсировке возбуждения. При авариях в электрической системе, сопровождающихся глубоким снижением напряжения на выводах генератора, ток $i_{км}$ компаундирования определяется возрастанием тока I статора генератора и повышением напряжения $U_{в.в}$ на обмотке возбуждения возбудителя вследствие действия релейного устройства форсировки возбуждения (УБВ).

Во многих случаях вследствие повышения напряжения $U_{в.в}$ выпрямитель $ВП$ полностью запирается ($i_{км} = 0$). Если контактор форсировки полностью шунтирует сопротивление реостата возбуждения ($R_{\phi} = 0$), то ток $i_{в}$ возбуждения возбудителя определяется напряжением $U_{в}$ возбудителя и не зависит от действия устройства компаундирования даже при $i_{км} > 0$. Только в том случае, когда одновременно соблюдаются условия $R_{\phi} > 0$ и $i_{км} > 0$, устройство компаундирования влияет на величину тока возбуждения возбудителя при действии УБВ, что необходимо учитывать, определяя сопротивление R_{ϕ} в соответствии с соотношением (3, 3).

Компаундирование увеличивает скорость нарастания напряжения возбудителя при форсировке. Это объясняется значительным и практически мгновенным повышением напряжения на обмотке возбуждения возбудителя после резкого возрастания тока статора еще до того, как релейное устройство зашунтирует часть сопротивления в цепи возбуждения возбудителя. Вследствие наличия сверхпереходной и переходной составляющих тока статора повышается эффективность действия устройства компаундирования в начале процесса форсировки возбуждения.

Зависимость напряжения компаундированного синхронного генератора от нагрузки. При неизменном положении реостата возбуждения R_B и установочного реостата $R_{y.p}$ (рис. 79) зависимость напряжения U генератора от тока I нагрузки (для постоянной величины коэффициента мощности) изображена кривой 1 на рис. 80. Она представляет собой характеристику регулирования напряжения в рассматриваемой САР по возмущению.

Точка a на кривой 1 (рис. 80) определяется величиной сопротивления $R_{p.в}$ реостата возбуждения (рис. 79). При малых величинах тока нагрузки ($I > I_{п.к}$) характеристика регулирования совпадает с внешней характеристикой 2 генератора, выражающей зависимость между величинами U и I при постоянстве токов возбуждения генератора и возбудителя (участок ab на рис. 80). Если $I > I_{п.к}$, характеристика регулирования проходит выше внешней характеристики.

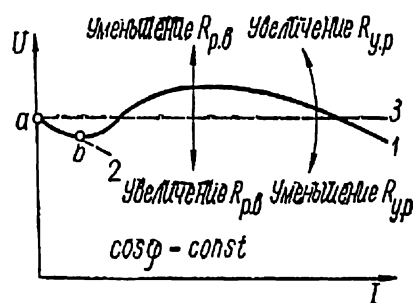


Рис. 80. График зависимости напряжения синхронного генератора от тока нагрузки при $\cos \varphi = \text{const}$.

Как видно из рис. 80, характеристика регулирования 1 значительно отклоняется в обе стороны от прямой 3, представляющей собой прямую $U = \text{const}$. Это объясняется тем, что фактическая зависимость тока компаундирования от тока нагрузки, осуществляемая устройством компаундирования, отличается от зависимости, необходимой для поддержания постоянного напряжения на выводах генератора.

Если сопротивление $R_{p.в}$ реостата возбуждения изменяется, все точки характеристики регулирования перемещаются вверх или вниз. При изменении сопротивления $R_{y.p}$ установочного реостата характеристика регулирования как бы поворачивается относительно точки a , соответствующей холостому ходу генератора, в то время, как точка a и близлежащие точки характеристики, для которых $I < I_{п.к}$, не изменяют своего положения (рис. 80).

Если при постоянной величине тока нагрузки коэффициент мощности принимает различные значения, то ток возбуждения генератора остается постоянным, так как устройство компаундирования на изменения коэффициента мощности не реагирует. Поэтому вследствие увеличения (уменьшения) коэффициента мощности нагрузки повышается (снижается) напряжение генератора. На рис. 81 приведены характеристики регулирования для трех различных коэффициентов мощности: номинального $\cos \varphi_n$, наи-

большого в условиях нормальной эксплуатации $\cos \varphi_{\max}$ и наименьшего $\cos \varphi_{\min}$.

Назначение разделительного трансформатора и установочного реостата. Разделительный трансформатор PT устраняет электрическую связь цепей возбуждения генератора со вторичными обмотками трансформаторов тока TT , имеющими заземленную точку (рис. 79). Кроме того, соответствующим выбором коэффициента трансформации разделительного трансформатора достигается требуемое соотношение между частью $I_{p.т}$ тока трансформатора тока и током $I_{км}$, питающим выпрямитель $ВП$.

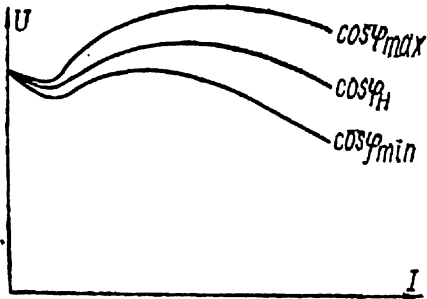


Рис. 81. Характеристики регулирования компаундированного синхронного генератора для различных коэффициентов мощности.

Иногда применяются устройства компаундирования по току без установочного реостата ($R_{y.p} = \infty$). Но обычно применяются устройства компаундирования с установочным реостатом, имеющие следующие преимущества:

1) установочный реостат удобно использовать для плавной настройки устройства компаундирования при его наладке;

2) установочный реостат можно также применять для плавного ввода

в работу и плавного вывода из работы устройства компаундирования при работе генератора;

3) при выходе из строя УБВ устройство компаундирования с установочным реостатом создает более значительную форсировку возбуждения, чем устройство компаундирования без установочного реостата [19], что имеет значение для повышения устойчивости электрических систем.

Коррекция напряжения компаундированного синхронного генератора. При компаундировании синхронного генератора значительно уменьшается зависимость напряжения от тока нагрузки. Но, как видно из рис. 81, колебания напряжения вследствие возможных в нормальной эксплуатации изменений тока нагрузки и коэффициента мощности остаются все же большими. Для достаточно точного поддержания заданных значений напряжения компаундированного генератора (рис. 79) при изменениях нагрузки нельзя обойтись без ручного регулирования или автоматического регулирования напряжения по отклонению.

Ручное регулирование дежурный персонал электростанции осу-

ществляет, изменяя время от времени сопротивление R_p в реостата возбуждения возбудителя. При компаундировании облегчается работа персонала по регулированию напряжения, так как колебания напряжения, обусловленные изменениями нагрузки, значительно смягчаются вследствие действия устройства компаундирования.

Автоматическое регулирование напряжения компаундированного генератора по отклонению производится регуляторами напряжения, предназначенными для совместной работы с устройствами компаундирования и называемыми корректорами напряжения. Синхронный генератор с возбудителем, устройство компаундирования и регулятор напряжения составляют в целом комбинированную САР по возмущению и по отклонению регулируемой величины. В энергосистемах Советского Союза в настоящее время устройства компаундирования применяются только с корректорами напряжения.

Электромагнитный корректор напряжения типа ЭМК

Принципиальная схема компаундирования с электромагнитным корректором напряжения типа ЭМК. Широко распространены корректоры напряжения, работающие на электромагнитном принципе.

В конце сороковых годов в Советском Союзе было налажено производство электромагнитных корректоров напряжения типа ЭМК, разработанных Институтом электротехники АН УССР. Корректоры аналогичной конструкции были использованы заводом «Электросила» для панелей автоматического регулирования возбуждения синхронных машин. В настоящее время корректоры типа ЭМК (и аналогичные им) не изготавливаются, но эксплуатируются на некоторых электростанциях.

Схема компаундирования с электромагнитным корректором ЭМК [19] приведена на рис. 82. Устройство компаундирования подпитывает основную обмотку возбуждения возбудителя *ОВВ*, а корректор питает дополнительную обмотку возбуждения *ДОВ*. При отсутствии у возбудителя дополнительной обмотки возбуждения корректор может быть подключен к обмотке возбуждения параллельно устройству компаундирования.

В рассматриваемой схеме выходной ток электромагнитного корректора ЭМК усиливает результирующую намагничивающую силу обмоток возбуждения возбудителя. Такое включение корректора используется наиболее часто и называется согласованным.

Поскольку электромагнитный корректор должен реагировать

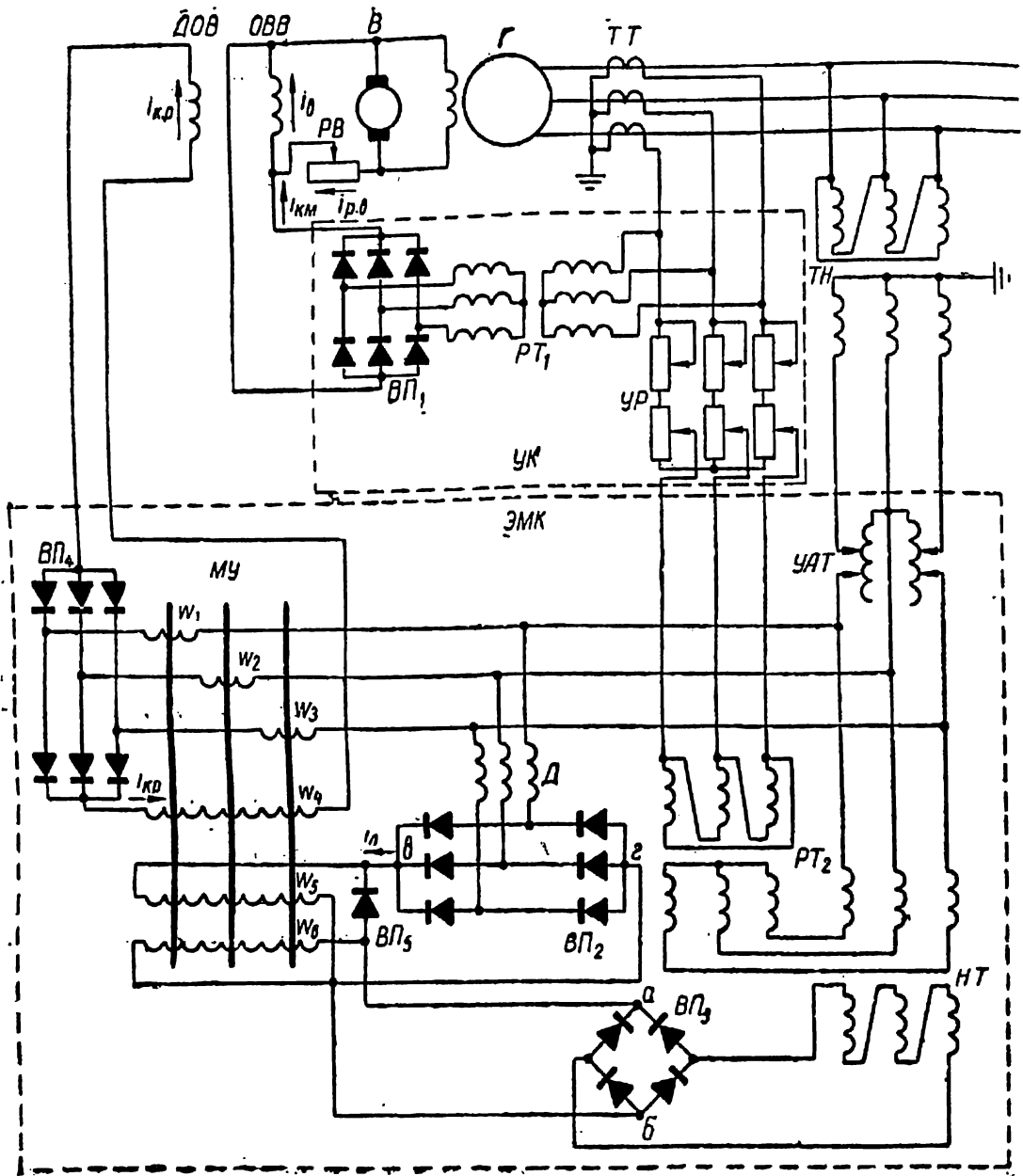


Рис. 82. Схема компаундирования с согласованно включенным электромагнитным корректором напряжения типа ЭМК:

ТН — трансформатор напряжения; *ОВВ* и *ДОВ* — основная и дополнительная обмотки возбуждения возбудителя; *УК* — устройство компаундирования; *РТ₁* — разделительный трансформатор компаундирования; *ЭМК* — электромагнитный корректор напряжения; *УАТ* — установочный автотрансформатор; *Д* — линейный дроссель; *НТ* — нагретый трансформатор; *РТ₂* — разделительный трансформатор корректора; *МУ* — трехфазный магнитный усилитель; *ВП₁* — *ВП₂* — селеновые выпрямители.

на величину напряжения генератора, он присоединяется ко вторичным обмоткам трансформаторов напряжения. Первичные обмотки трансформаторов напряжения соединены по схеме треугольника, вследствие чего каждая из этих обмоток оказывается включенной на линейное напряжение генератора. В этом случае номинальная мощность трансформаторов напряжения используется полностью.

Основными элементами корректора являются измерительный, исполнительный и задающий элементы.

Измерительный элемент реагирует на напряжение генератора и создает воздействие на исполнительный элемент. Основными частями измерительного элемента являются линейный и нелинейный элементы. Кроме того, в состав измерительного элемента входят также блокирующий выпрямитель $ВП_5$ и устройство установки статизма, состоящее из разделительного трансформатора $РТ_2$, корректора и дополнительных движков установочного реостата, от которых питается первичная обмотка этого трансформатора. Первоначально рассмотрим действие измерительного элемента без блокирующего выпрямителя и устройства установки статизма, предполагая, что цепь выпрямителя $ВП_5$ разомкнута, трансформатор $РТ_2$ отсутствует, а первичная обмотка трансформатора $НТ$ соединена в звезду.

Линейный элемент состоит из трехфазного дросселя $Д$ и селенового выпрямителя $ВП_2$. Через обмотки дросселя выпрямитель питается от вторичных зажимов установочного автотрансформатора $УАТ$. Полное сопротивление дросселя можно считать постоянным, так как его магнитопровод не насыщен и выполнен с воздушным зазором. Характеристика линейного элемента (рис. 83), выражающая зависимость его выходного тока (выпрямленного тока дросселя) i_d от напряжения U генератора, изображается практически прямой линией.

Нелинейный элемент состоит из трехфазного пятистержневого насыщенного трансформатора $НТ$ и выпрямителя $ВП_3$. Обмотки

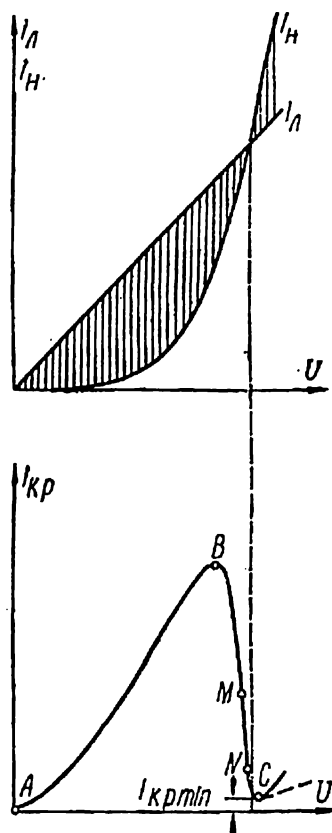


Рис. 83. Характеристики линейного и нелинейного элементов корректора (вверху) и характеристика корректора (внизу).

трансформатора *HT* расположены на трех основных стержнях трансформатора. Два крайних стержня свободны от обмоток.

Первичная обмотка насыщенного трансформатора *HT* присоединена к установочному автотрансформатору *УАТ*; вторичная обмотка соединена в разомкнутый треугольник. При относительно низком напряжении на выходе установочного автотрансформатора *УАТ* трансформатор *HT* не насыщен, магнитные потоки в трех основных стержнях синусоидальны и симметричны, напряжение на выходных зажимах трансформатора *HT* и выходной ток i_n нелинейного элемента равны нулю.

Если напряжение установочного автотрансформатора становится относительно высоким, сердечник трансформатора *HT* насыщается. В магнитных потоках основных стержней и в напряжениях фаз первичной и вторичной обмоток появляются третьи и кратные трем гармоники, содержание которых быстро повышается при возрастании напряжения генератора. Гармонические составляющие напряжения тройной и кратной трем частоты в фазах вторичной обмотки совпадают по фазе. Поэтому на выходных зажимах трансформатора *HT* создается переменное напряжение тройной частоты, вследствие чего появляется выходной ток i_n нелинейного элемента. Как видно из характеристики нелинейного элемента, выражающей зависимость тока i_n от напряжения U генератора (рис. 83), ток i_n резко возрастает с увеличением напряжения U . Кратные трем гармонические составляющие магнитных потоков в основных стержнях замыкаются через крайние стержни.

Характеристики линейного и нелинейного элементов на рис. 83 приведены для определенного положения движков установочного автотрансформатора.

Выходной величиной измерительного элемента, воздействующей на исполнительный элемент, является разность $i_l - i_n$ токов линейного и нелинейного элементов. На рис. 83 она изображается отрезками прямых, параллельных оси ординат, заключенных между характеристиками линейного и нелинейного элементов. Характеристики линейного и нелинейного элементов подбираются так, что в нормальных режимах работы генератора вторичное напряжение U_y установочного автотрансформатора мало отличается от напряжения, соответствующего точке пересечения характеристик. При этом вследствие относительно небольших изменений напряжения генератора будут относительно большими изменения разности токов $i_l - i_n$.

Исполнительный элемент корректора создает в дополнительной обмотке *ДОВ* возбуждения возбудителя ток $i_{кр}$, зависящий

от разности токов $i_{л} — i_{н}$. Этот элемент представляет собой трехфазный магнитный усилитель МУ с выходом на постоянном токе и внешней обратной связью и состоит из трех одинаковых дроссельных магнитных усилителей и трехфазного селенового выпрямителя ВП₄.

Обмотки $\omega_1 — \omega_3$ переменного тока магнитного усилителя питаются от установочного автотрансформатора УАТ.

По подмагничивающим обмоткам ω_5 и ω_6 протекают соответственно токи $i_{л}$ и $i_{н}$ линейного и нелинейного элементов (при условии, что блокирующий выпрямитель ВП₅ отсутствует). Эти управляющие обмотки имеют равные количества витков и включены встречно. Отсюда видно, что трехфазный магнитный усилитель реагирует на разность токов $i_{л} — i_{н}$. Подмагничивающая обмотка ω_4 является обмоткой обратной связи и питается выпрямленным током $i_{кр}$ трехфазного выпрямителя, т. е. током нагрузки магнитного усилителя. Обмотка обратной связи включена согласованно с управляющей обмоткой ω_5 и встречно с управляющей обмоткой ω_6 .

Характеристика корректора. На рис. 83 приведена зависимость тока корректора $i_{кр}$ от напряжения генератора U , называемая характеристикой корректора.

Если напряжение генератора постепенно увеличивается от нуля*, ток корректора $i_{кр}$ также растет, достигая максимума (точка В на рис. 83) вблизи точки максимума разности токов $i_{л} — i_{н}$. При дальнейшем увеличении напряжения генератора уменьшается намагничивающая сила управляющих обмоток, в результате чего ток корректора снижается (увеличение напряжения, питающего обмотки переменного тока, несколько противодействует снижению тока корректора).

Когда напряжение генератора повысится настолько, что результирующая намагничивающая сила всех подмагничивающих обмоток обратится в нуль (в этом случае разность токов $i_{л} — i_{н}$ примет небольшое отрицательное значение), ток корректора достигнет минимума (точка С на рис. 83). При дальнейшем увеличении напряжения генератора и соответствующем возрастании (по абсолютной величине) разности токов управляющих обмоток увеличиваются (по абсолютной величине) результирующая намагничивающая сила подмагничивающих обмоток и ток корректора.

* Предполагается, что напряжение генератора можно изменять независимо от действия корректора.

В режимах работы электромагнитного корректора, которые описываются частью характеристики, лежащей левее точки C (рис. 83), обратная связь магнитного усилителя является положительной. Части характеристики, расположенной правее точки C , соответствует отрицательная обратная связь. Поэтому крутизна ниспадающей части характеристики корректора (левее точки C) значительно больше крутизны восходящей части (правее точки C).

Действие электромагнитного корректора в целом. В нормальных режимах работы генератора используется некоторый участок (например, участок MN на рис. 83) круто падающей части характеристики корректора. Допустим, что при изменении возмущающих воздействий на объект (например, при изменении нагрузки генератора, повышении температуры обмоток возбуждения генератора и возбудителя и т. д.) уменьшается напряжение генератора. Но вследствие снижения напряжения в пределах ниспадающей части характеристики корректора возрастают ток корректора, напряжение возбудителя и ток возбуждения генератора. Поэтому при наличии корректора напряжение уменьшится на меньшую величину, чем в случае отсутствия корректора. Нетрудно видеть, что при повышении напряжения генератора корректор снижает ток возбуждения генератора и уменьшает возрастание напряжения.

Вследствие большой крутизны рабочего участка MN характеристики корректора при относительно малых изменениях напряжения генератора изменения тока корректора будут значительными. Поэтому корректор эффективно противодействует изменениям напряжения генератора. При значительных изменениях возмущающих воздействий напряжение генератора остается почти постоянным.

Блокирующий выпрямитель. Напряжение синхронного генератора может в некоторых случаях (например, при временном повышении частоты в электрической системе) превысить величину, соответствующую минимуму характеристики корректора (рис. 83). В этом случае корректор будет работать неправильно, поскольку при возрастании (снижении) напряжения увеличивается (уменьшается) ток корректора.

Чтобы предотвратить значительный подъем характеристики корректора правее точки C , в схему введен блокирующий выпрямитель B_5 (рис. 84). Управляющие обмотки магнитного усилителя ω_5 и ω_6 выполнены идентично и имеют одинаковые сопротивления. В обычных условиях работы корректора $i_L - i_H$ потенциал точки a меньше потенциала точки b , и блокирующий выпрямитель заперт.

Если напряжение генератора поднимется до такого значения, при котором $i_n > i_{л}$, потенциал точки a будет выше потенциала точки b , и в цепи блокирующего выпрямителя потечет ток $i_{б.в}$. Поскольку сопротивление вентиля в проводящем состоянии невелико, напряжения на управляющих обмотках w_5 и w_6 (а следовательно, и токи в этих обмотках) будут близки по величине. Поэтому результирующая намагничивающая сила управляющих обмоток магнитного усилителя будет по абсолютной величине значительно меньше, чем при отсутствии блокирующего выпрямителя. Следовательно, блокирующий выпрямитель намного уменьшает возрастание тока корректора при увеличении напряжения сверх величины, соответствующей минимуму его выходного тока (штриховая кривая на рис. 83).

Естественные характеристики регулирования напряжения устройством компаундирования с корректором. Напряжение синхронного генератора зависит от двух наиболее существенных возмущающих воздействий: тока нагрузки и коэффициента мощности. Рассмотрим характеристики регулирования напряжения, выражающие зависимость напряжения синхронного генератора (регулируемой величины) от тока нагрузки при постоянной величине коэффициента мощности. Будем рассматривать характеристики регулирования при работе корректора без устройства установки статизма, которые называются естественными характеристиками регулирования.

Устройство компаундирования, предназначенное для работы с согласованно включенным корректором, настраивается так, что для постоянного значения тока корректора при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной напряжение генератора несколько уменьшается. Если действует корректор, то такому изменению нагрузки соответствует значительно меньшее снижение напряжения генератора, что объясняется возрастанием тока корректора. Естественный статизм этой системы регулирования напряжения (т. е. статизм при отключенном устройстве установки статизма), соответствующий номинальному значению коэффициента мощности и изменению тока нагрузки от нуля до номинальной величины, имеет положительный знак и обычно не превышает 1—2%.

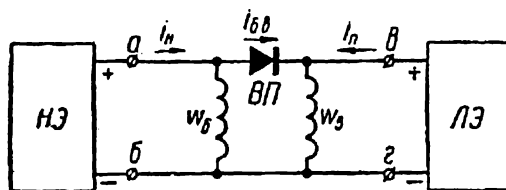
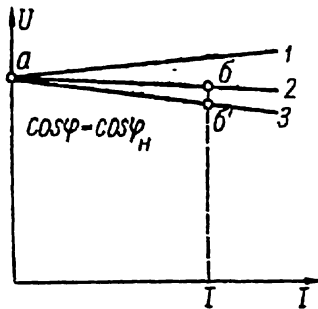


Рис. 84. Схема включения блокирующего выпрямителя ВП:
ЛЭ — линейный элемент; НЭ — нелинейный элемент.

Естественная характеристика регулирования 2 (рис. 85) представляет собой кривую, незначительно отличающуюся от горизонтальной прямой.

Устройство установки статизма предназначено для получения необходимого наклона характеристики регулирования, т. е. требуемого статизма системы.

При наличии устройства установки статизма напряжение на фазе первичной обмотки насыщенного трансформатора определяется соотношением



$$\dot{U}_{н.т} = \dot{U}_y - \Delta \dot{U}.$$

В этом выражении U_y и ΔU — вторичные фазовые напряжения установочного автотрансформатора и разделительного трансформатора корректора, причем напряжение U_y измеряется между вторичным зажимом установочного автотрансформатора и нейтральной точкой искусственной симметричной нагрузки. По величине напряжение ΔU мало по сравнению с напряжением U_y . Оно пропорционально напряжению на дополнительных движках

Рис. 85. Характеристики регулирования напряжения.

установочного реостата, которое можно приближенно считать пропорциональным току нагрузки генератора. Устройство установки статизма влияет на работу корректора только при наличии тока нагрузки генератора, так как в случае холостого хода $\Delta U = 0$.

Если необходимо регулировать напряжение со статизмом больше естественного (для номинального коэффициента мощности), то при наладке системы регулирования возбуждения обмотки трансформатора PT_2 (рис. 82) соединяют так, что для номинального коэффициента мощности угол между векторами \dot{U}_y и $\Delta \dot{U}$ тупой. В этом случае при токе нагрузки, не равном нулю, устройство установки статизма увеличивает напряжение $U_{н.т} = |\dot{U}_y - \Delta \dot{U}|$ и ток i_n нелинейного элемента, а следовательно, уменьшает намагничивающую силу управляющих обмоток магнитного усилителя, ток $i_{кр}$ корректора и напряжение генератора. Поэтому точке $б$ естественной характеристики регулирования 2 (рис. 85) соответствует точка $б'$ характеристики регулирования при включенном устройстве установки статизма. Характеристика регулирования приобретает более крутой наклон (кривая 3 на рис. 85), статизм САР увеличивается.

Для получения статизма меньше естественного, например, отрицательного (кривая 1 на рис. 85), угол между векторами \dot{U}_y и $\Delta \dot{U}$

должен быть острым, что достигается соответствующим выбором схемы включения обмоток трансформатора PT_2 (рис. 82).

Необходимо учитывать, что при изменении коэффициента мощности нагрузки меняется наклон характеристики регулирования. Это обусловлено, с одной стороны, изменением естественной характеристики регулирования и, с другой стороны, что гораздо более важно, — изменением угла между векторами \dot{U}_y и $\Delta\dot{U}$.

Устройство установки статизма настраивается выбором схемы соединений обмоток разделительного трансформатора корректора

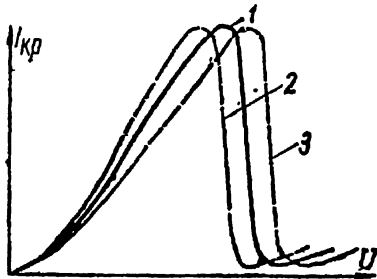


Рис. 86. Характеристики корректора.

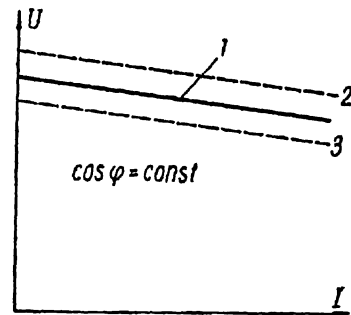


Рис. 87. Характеристики регулирования.

и дополнительными движками установочного реостата компаундирования.

Задающий элемент корректора служит для изменения в процессе эксплуатации синхронного генератора заданных значений напряжения, т. е. для смещения характеристики регулирования вверх или вниз. Задающим элементом корректора является установочный автотрансформатор $УАТ$ (рис. 82), состоящий из двух однофазных автотрансформаторов, включенных открытым треугольником. Величина тока корректора определяется напряжением U_y на выходе установочного автотрансформатора.

Если увеличить коэффициент трансформации установочного автотрансформатора, то прежним значениям напряжения U_y и тока корректора $i_{кр}$ будет соответствовать меньшее значение напряжения U генератора. При этом характеристика 1 корректора (кроме неподвижной точки $U = 0$) смещается влево (кривая 2 на рис. 86). И, наоборот, с уменьшением коэффициента трансформации исходная характеристика 1 смещается вправо (кривая 3).

При перемещении характеристики корректора влево напряжение генератора снижается, и исходная характеристика регулиро-

вания I смещается вниз (кривая 3 на рис. 87). Если характеристика корректора перемещается вправо, напряжение генератора повышается, и характеристика регулирования смещается вверх (кривая 2).

Корректор напряжения завода «Электросила»

Корректор устанавливается на панели автоматического регулирования возбуждения типа ЭПА-305, предназначенной для регулирования возбуждения турбогенераторов с машинными возбудителями. Рассмотрим основные отличия этого корректора (рис. 88) от корректора типа ЭМК (рис. 82).

Измерительный элемент. Дроссель линейного элемента и насыщенный трансформатор нелинейного элемента в рассматриваемом корректоре напряжения заменены одним насыщенным трехфазным измерительным трансформатором $ТИ$. Его первичный ток нелинейно зависит от напряжения генератора, а вторичное напряжение практически является линейной функцией напряжения генератора. Выходное напряжение измерительного элемента представляет собой разность выпрямленного напряжения вторичной обмотки измерительного трансформатора $ТИ$ и падения напряжения на сопротивлении R_3 от выпрямленного тока первичной обмотки. Это напряжение используется для питания управляющей обмотки ω_3 магнитного усилителя через сопротивление R_4 . Зависимость тока в управляющей обмотке от напряжения генератора такая же, как зависимость намагничивающей силы управляющих обмоток от напряжения генератора в корректоре типа ЭМК (при отсутствии блокирующего выпрямителя).

Устройство установки статизма выполнено принципиально так же, как у корректора типа ЭМК. Функции трансформатора PT_2 (рис. 82) в корректоре завода «Электросила» выполняет промежуточный трансформатор $ТП$ (рис. 88).

Исполнительный блок. Магнитный усилитель рассматриваемого корректора однофазный, с внутренней обратной связью. Имеется также обмотка ω_4 внешней обратной связи, намагничивающая сила которой направлена встречно намагничивающей силе каждой из рабочих обмоток ω_1 и ω_2 . При наладке системы АРВ количество витков обмотки ω_4 подбирают так, чтобы получить необходимую крутизну рабочего участка характеристики корректора, зависящую от коэффициента усиления магнитного усилителя. Нагрузкой магнитного усилителя является первичная обмотка ω_1 выходного трансформатора корректора $ТК$, служащего для согласования параметров обмотки возбуждения возбудителя с параметрами магнит-

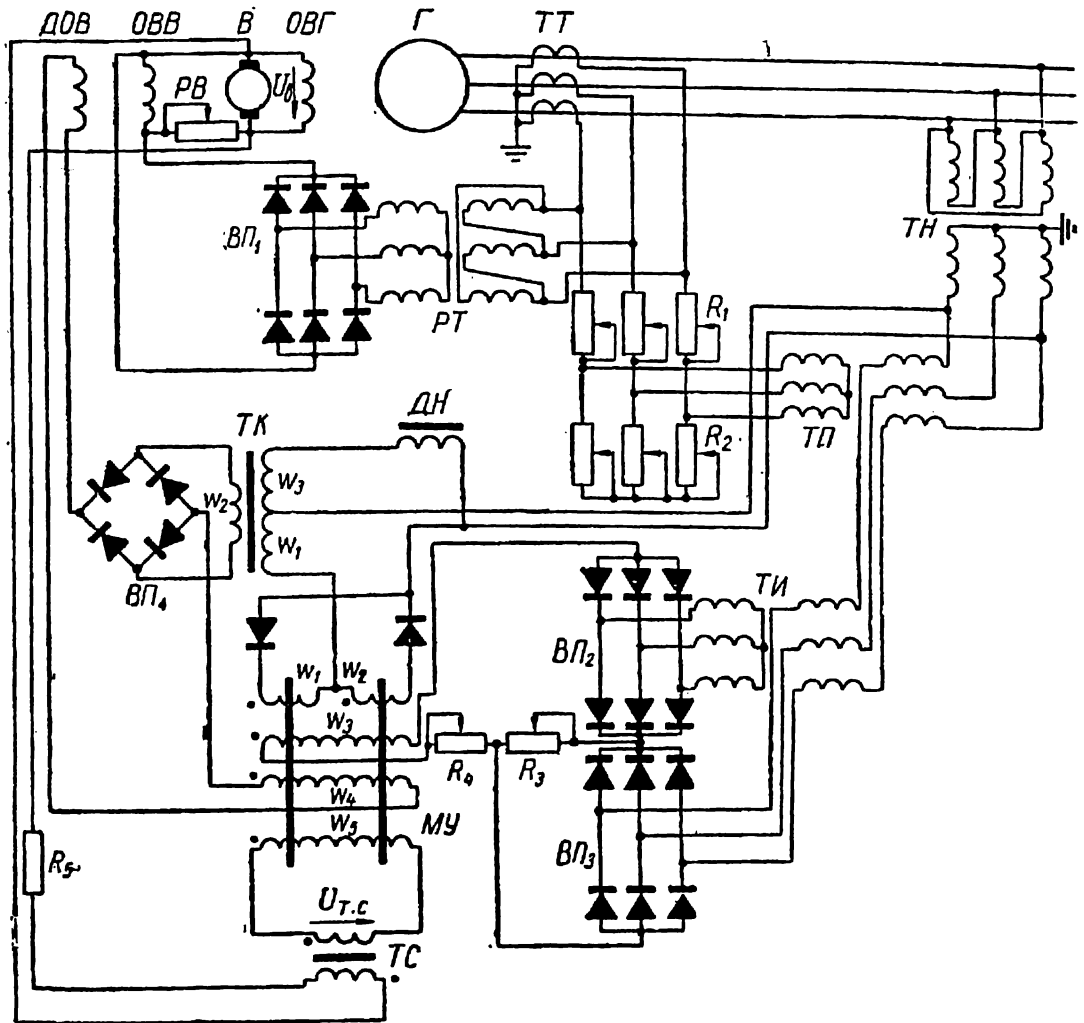


Рис. 88. Схема компаундирования с корректором напряжения завода «Электросила»:

ТИ — трансформатор измерительный; *ТП* — трансформатор промежуточный; *ТС* — трансформатор стабилизирующий; *ТК* — выходной трансформатор корректора; *ДН* — дроссель насыщающийся; *ВЛ₁* — *ВЛ₄* — полупроводниковые выпрямители; *R₁* — *R₄* — сопротивления.

ного усилителя. Вторичная обмотка w_2 трансформатора *ТК* питает выходной выпрямитель *ВЛ₄* корректора.

Обмотка w_3 трансформатора *ТК* предназначена для устранения подъема характеристики корректора правее круто падающего участка. Она включена через насыщающийся дроссель *ДН* встречно по отношению к обмотке w_1 трансформатора *ТК*. Ток, протекающий через обмотку w_3 , при нормальных значениях напряжения генератора относительно невелик; в области повышенных напряжений генератора он значительно растет с увеличением напряже-

ния. Вследствие наличия обмотки ω_3 трансформатора TK минимальное значение тока корректора снижается, а в области повышенных напряжений ток корректора почти не зависит от напряжения.

Характеристика рассматриваемого корректора сходна с характеристикой корректора типа ЭМК (рис. 83), но улучшена в области повышенных напряжений.

Задающий элемент. В качестве задающего элемента корректора используется регулируемое сопротивление R_3 . При увеличении этого сопротивления возрастает падение напряжения на нем, в результате чего снижаются выходное напряжение измерительного элемента, ток корректора и напряжение генератора.

Стабилизирующий трансформатор. Для повышения устойчивости и улучшения качества регулирования предусматривается гибкая обратная связь, осуществляемая с помощью стабилизирующего трансформатора $ТС$.

На первичную обмотку трансформатора $ТС$ подается напряжение U_B возбуждателя, а напряжение со вторичной обмотки поступает на подмагничивающую обмотку ω_5 магнитного усилителя. Следовательно, обратная связь охватывает магнитный усилитель с выходным трансформатором корректора TK и выпрямителем $ВП_4$, а также возбуждатель B . Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора $ТС$ вместе с включенным последовательно сопротивлением R_5 относительно велико, вследствие чего протекающий в обмотке ток в каждый момент времени пропорционален напряжению U_B . Магнитопровод стабилизирующего трансформатора не насыщен и выполнен с воздушным зазором; его магнитное сопротивление практически является постоянным. Стабилизирующий трансформатор работает в режиме, близком к режиму холостого хода, т. е. намагничивающая сила, создаваемая током во вторичной обмотке, мала по сравнению с намагничивающей силой первичной обмотки. Следовательно, магнитный поток Φ в сердечнике можно считать пропорциональным напряжению U_B возбуждателя:

$$\Phi = k' U_B,$$

где k' — коэффициент пропорциональности.

Напряжение $U_{т.с}$ на вторичной обмотке стабилизирующего трансформатора пропорционально производной от магнитного потока Φ и, следовательно, выражается зависимостью

$$U_{т.с} = k_{т.с} \frac{dU_B}{dt}, \quad (3,19)$$

где $k_{т.с}$ — постоянный коэффициент.

В установившихся режимах напряжение $U_{т.с}$ и ток в обмотке ω_5 магнитного усилителя равны нулю, т. е. стабилизирующий трансформатор не воздействует на магнитный усилитель.

Обмотка ω_5 магнитного усилителя подключена к вторичным выводам трансформатора ТС так, чтобы при возрастании напряжения возбудителя намагничивающая сила обмотки ω_5 размагничивала, а при уменьшении напряжения возбудителя — подмагничивала магнитопровод магнитного усилителя. Поэтому изменения напряжения возбудителя замедляются, что благоприятно отражается на устойчивости и качестве процесса регулирования.

Для рассмотренного корректора типа ЭМК стабилизирующий трансформатор (на рис. 82 не показан) приходилось заказывать отдельно, если без него устойчивость САР не обеспечивалась. Это было связано с тем, что стабилизирующий трансформатор имеет значительные габариты и вес.

В то же время габариты и вес стабилизирующего трансформатора завода «Электросила» относительно невелики, что обусловлено относительно небольшой мощностью, потребляемой подмагничивающей обмоткой ω_5 магнитного усилителя.

§ 5. УПРАВЛЯЕМОЕ ФАЗОВОЕ КОМПАУНДИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН С КОРРЕКЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Принцип действия фазового компаундирования. Устройство фазового компаундирования осуществляет зависимость тока возбуждения генератора от тока нагрузки и угла сдвига фаз φ между током и напряжением генератора.

Для уяснения принципа действия фазового компаундирования рассмотрим упрощенную векторную диаграмму синхронного генератора, изображенную на рис. 89.

Из диаграммы (рис. 89) видно, что заданную величину фазного напряжения генератора U_r можно получить в том случае, если для определенных значений I_r и φ э. д. с.

$$E_d = |U_r + jx_d I_r|, \quad (3,20)$$

где I_r — фазный ток генератора;

x_d — синхронное реактивное сопротивление генератора;

E_d — э. д. с. генератора за синхронным реактивным сопротивлением, т. е. э. д. с., которая индуктировалась бы в фазе статора при заданных скорости вращения ротора и токе возбуждения, но для $I_r = 0$.

Для поддержания заданной величины напряжения U_r при изменении тока I_r и угла φ величина э. д. с. E_d должна изменяться согласно зависимости (3,20).

На рис. 89 штрихом определена э. д. с. E_d , обеспечивающая постоянство напряжения U_r при прежнем значении тока I_r и другом значении угла φ_1 . Очевидно, что с увеличением угла φ (в случае $U_r = \text{const}$) э. д. с. E_d возрастает, а с уменьшением фазового угла — уменьшается. Для постоянной скорости вращения

ротора генератора э. д. с. E_d однозначно определяется магнитным потоком в воздушном зазоре при $I_r = 0$. Этот магнитный поток, в свою очередь, зависит от тока возбуждения генератора и, следовательно, э. д. с. E_d однозначно определяется током возбуждения.

Предположим, что магнитная цепь генератора не насыщена, и между потоком и током возбуждения существует линейная зависимость. В этом случае э. д. с. E_d пропорциональна току возбуждения генератора

$$E_d = k i_p,$$

где i_p — ток возбуждения генератора;
 k — коэффициент пропорциональности.

Рис. 89. Упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора.

Согласно выражению (3,20) для поддержания постоянного значения напряжения генератора при любых изменениях тока нагрузки I_r и фазового угла φ необходимо, чтобы ток возбуждения генератора изменялся по следующему закону:

$$i = \frac{1}{k} E_d = \frac{1}{k} |U_r + jx_d I_r|. \quad (3,21)$$

Напряжение генератора будет поддерживаться постоянным при изменении тока возбуждения по закону (3,21) только для ненасыщенных машин.

Зависимость (3,21) можно осуществить, если обмотки возбуждения генератора питать через выпрямители от трехобмоточного трансформатора. Такое питание обмотки возбуждения возможно только в генераторах небольшой мощности, в которых мощность, потребляемая обмоткой возбуждения, невелика.

В таких генераторах малой мощности примерно до 100 квт, называемых самовозбуждающимися генераторами, с помощью

одного фазового компаундирования можно добиться относительно точного регулирования напряжения.

Неточность регулирования напряжения устройством фазового компаундирования этих генераторов определяется в основном насыщением машины, которое неизбежно. Вследствие насыщения магнитной системы зависимость между э. д. с. E_d и током возбуждения генератора становится нелинейной, и при осуществлении зависимости (3,21) не выполняется необходимое для $U_r = \text{const}$ равенство (3,20).

Необходимая точность регулирования напряжения самовозбуждающихся генераторов малой мощности, снабженных устройством фазового компаундирования, осуществляется соответствующим подбором параметров устройства и дополнительными элементами.

В генераторах с машинными возбудителями устройство фазового компаундирования подпитывает обмотку возбуждения возбудителя или полностью ее питает.

Упрощенная принципиальная схема устройства фазового компаундирования для генераторов с машинным возбудителем приведена на рис. 90. Трансформатор фазового компаундирования $T\Phi K$ работает в режиме трансформатора тока, т. е. токи его входных (первичных) обмоток I_1 и I_2 практически не зависят один от другого, а также от режима магнитной цепи трансформатора и нагрузки выходной обмотки ω_3 и определяется токами питающих устройств (трансформатора тока TT и трансформатора напряжения $TН$). Этот режим обеспечивается тем, что обмотка ω_1 питается от трансформатора тока, ток которого зависит только от тока генератора, а обмотка ω_2 питается от трансформатора напряжения через большое балластное сопротивление z_6 , значительно превышающее эквивалентное сопротивление трансформатора $T\Phi K$, замеренное со стороны зажимов обмотки ω_2 . В этом случае ток I_2 практически линейно и однозначно зависит от напряжения на обмотке трансформатора напряжения. При таком включении ток выходной обмотки I_3 определяется геометрической суммой намагничивающих сил, создаваемых токами входных обмоток I_1 и I_2 .

Уравнение намагничивающихся сил трансформатора имеет вид

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 + I_3\omega_3 = I_0\omega_1, \quad (3,22)$$

где I_0 — намагничивающий ток трансформатора, приведенный к обмотке ω_1 .

Для ненасыщенного сердечника трансформатора, т. е. когда

$$I_0\omega_1 \ll I_1\omega_1 + I_2\omega_2.$$

легко определить, что выходной ток

$$i_{\phi.к} = k_B |I_3| = \frac{k_B}{\omega_3} |\dot{I}\omega_1 + \dot{I}_2\omega_2|, \quad (3,23)$$

где k_B — коэффициент выпрямления выпрямителя.

При $z_6 = 0$ равенства (3,22) и (3,23) справедливы, однако ток I_2 зависит не только от напряжения U_2 , но и от режима магнитной

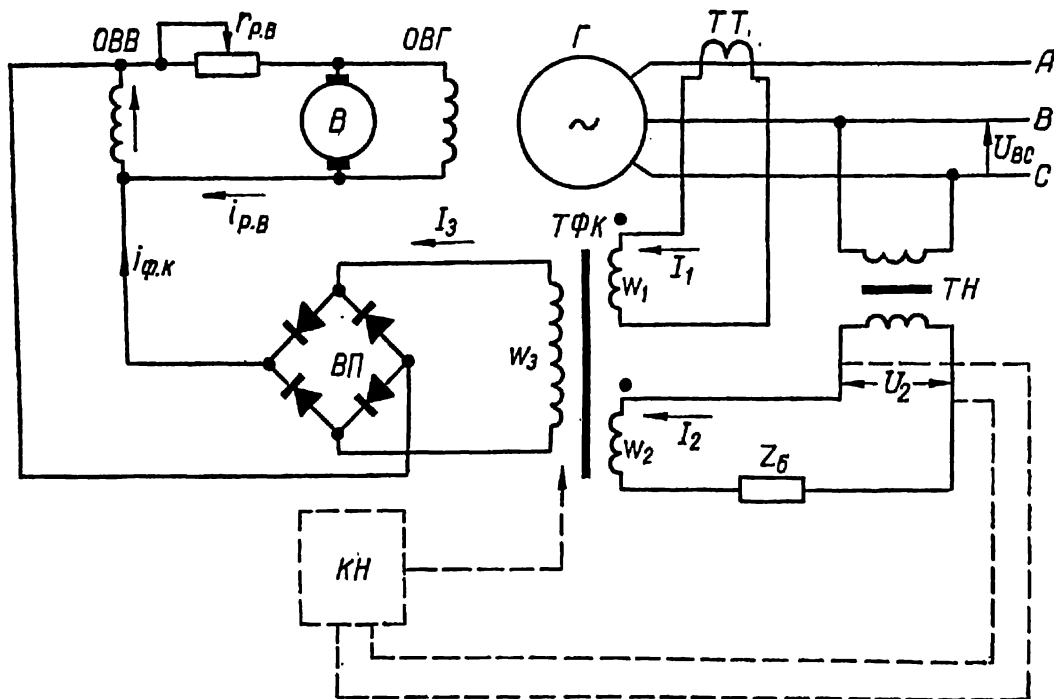


Рис. 90. Упрощенная принципиальная схема фазового компаундирования для генераторов с машинным возбудителем.

цепи, токов I_1 и I_3 , сопротивления нагрузки обмотки w_3 . Следовательно, выходной ток I_3 определяется только напряжением U_2 и сопротивлением нагрузки обмотки w_3 .

Действительно, основной магнитный поток в трансформаторе ТФК при $z_6 = 0$ определяется только напряжением U_2 и, следовательно, э. д. с., индуктируемая в обмотке w_3 , зависит лишь от напряжения U_2 .

Так как обмотка w_1 питается от трансформатора тока фазы А, а обмотка w_2 — от трансформатора напряжения, включенного на линейное напряжение U_{BC} , то обеспечивается фазировка токов I_1 и I_2 , необходимая для правильной работы устройства фазового компаундирования. Устройство фазового компаундирования будет

работать правильно в том случае, если с увеличением угла сдвига фаз между напряжением и током генератора при индуктивном режиме выходной ток $i_{\text{ф.к}}$ увеличивается. Эту зависимость выходного тока $i_{\text{ф.к}}$ от угла φ легко получить, если сфазировать токи I_1 и I_2 так, чтобы при $\varphi = 0$ ток I_1 опережал ток I_2 на 90° .

Если обмотки ω_1 и ω_2 включены так, как на схеме, приведенной на рис. 90, необходимая фазировка выполняется.

По упрощенной схеме (рис. 90), векторной диаграмме напряжений и токов генератора (рис. 91) и выражению (3,23) легко определить, что

$$i_1 = \frac{i_A}{N_i} = \frac{i_r}{N_i};$$

$$i_2 = \frac{\dot{U}_{BC}}{N_u z_6} = \frac{\sqrt{3} \dot{U}_A}{j N_u z_6} = \frac{\sqrt{3} \dot{U}_r}{j N_u z_6};$$

$$i_{\text{ф.к}} = \frac{\sqrt{3} k_B \omega_2}{N_u R_6 \omega_3} \left| \dot{U}_r + j \frac{\omega_1 N_u R_6}{\sqrt{3} \omega_2 N_i} i_r \right|,$$

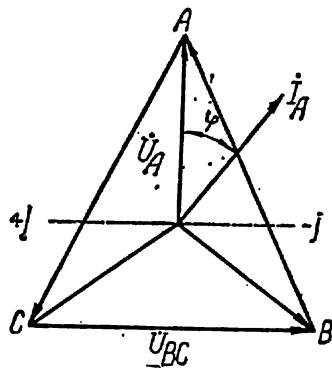


Рис. 91. Векторная диаграмма напряжений и токов генератора.

где N_u и N_i — коэффициенты трансформации трансформаторов напряжения и тока.

Если подобрать параметры схемы так, чтобы

$$\frac{\sqrt{3} k_B \omega_2}{N_u R_6 \omega_3} = \frac{1}{k};$$

$$\frac{\omega_1 N_u R_6}{\sqrt{3} \omega_2 N_i} = x_d,$$

то выходной ток устройства фазового компаундирования определится зависимостью (3,21):

$$i_{\text{ф.к}} = \frac{1}{k} |\dot{U}_r + j x_d i_r|,$$

при которой в случае отсутствия насыщения и тока самовозбуждения возбудителя напряжение генератора остается примерно постоянным для любых токов нагрузки и коэффициентов мощности генератора.

В действительности, вследствие насыщения возбудителя и генератора, а также вследствие того что ток $i_{\text{ф.к}}$ составляет только

часть тока возбуждения возбудителя, э. д. с. E_d не будет пропорциональна выходному току компаундирования, и напряжение генератора при различных значениях I_r и φ не будет оставаться постоянным. Поэтому для поддержания напряжения генератора на заданном уровне во всех возможных эксплуатационных режимах устройство фазового компаундирования должно дополняться регулятором напряжения (корректором), действующим по отклонению напряжения (KN на рис. 90).

Так как устройства фазового компаундирования осуществляют зависимость тока возбуждения от двух возмущающих воздействий (тока нагрузки и его угла сдвига по фазе относительно напряжения), то колебания напряжения при изменениях этих возмущающих воздействий в случае фазового компаундирования будут значительно меньшими, чем при компаундировании по току. Поэтому коррекция напряжения при наличии устройства фазового компаундирования осуществляется проще, чем при наличии устройства компаундирования по току, и сам корректор напряжения фазового компаундирования оказывается менее мощным и, следовательно, более быстродействующим, чем корректор напряжения в устройствах компаундирования по току.

Коррекция напряжения в устройствах фазового компаундирования может осуществляться так же, как и в устройствах компаундирования по току с помощью отдельного корректора напряжения, действующего непосредственно на основную или дополнительную обмотку возбуждения возбудителя. При наличии компаундирования по току такой способ коррекции напряжения оправдывается тем, что для коррекции требуется значительная мощность. Если имеется устройство фазового компаундирования, для коррекции напряжения необходима значительно меньшая мощность. Поэтому напряжение целесообразно корректировать, воздействуя на выходной трансформатор устройства фазового компаундирования, т. е. изменяя его характеристики.

Воздействие корректора напряжения KN на трансформатор $TФК$ показано штрихом на рис. 90. Корректор напряжения должен воздействовать на устройство фазового компаундирования так, чтобы при неизменной геометрической сумме намагничивающих сил входных обмоток трансформатора $TФК$ выходной ток $i_{ф.к}$ изменялся в пределах, необходимых для поддержания напряжения генератора на заданном уровне. Такое изменение выходного тока устройства фазового компаундирования можно осуществить автоматическим изменением коэффициента трансформации трансформатора $TФК$ (изменением количества витков выходной обмотки)

или изменением режима магнитной цепи трансформатора (изменением степени насыщения сердечника).

Автоматически изменять коэффициент трансформации очень сложно, при этом нельзя получить необходимое быстродействие. Поэтому такой способ изменения выходного тока устройства фазового компаундирования применять нерационально.

Изменение режима магнитной цепи трансформатора по своему действию равносильно непрерывному изменению коэффициента трансформации в определенных пределах, его легко можно осуществить автоматически с необходимым быстродействием. Поэтому коррекция по напряжению устройств фазового компаундирования осуществляется изменением режима магнитной цепи выходного трансформатора.

Рассмотрим влияние режима магнитной цепи на работу трансформатора. Основной магнитный поток трансформатора, через который передается энергия из первичной обмотки во вторичную, создается частью первичного тока I_0 , называемой намагничивающим током.

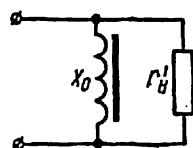


Рис. 92. Упрощенная схема замещения трансформатора ТФК.

Если сердечник трансформатора ненасыщен, его магнитное сопротивление мало, и для создания основного магнитного потока требуется малая намагничивающая сила, т. е. незначительный намагничивающий ток. Поэтому можно пренебречь величиной намагничивающего тока трансформатора ТФК (рис. 90), сердечник которого предполагался ненасыщенным. С ростом магнитной индукции в сердечнике трансформатора, т. е. с увеличением степени его насыщения, магнитное сопротивление сердечника возрастает и, следовательно, увеличивается намагничивающая сила, создающая основной магнитный поток.

Таким образом, с увеличением степени насыщения сердечника трансформатора возрастает намагничивающий ток и, следовательно, при неизменном первичном токе уменьшается вторичный (выходной) ток трансформатора. Это наглядно видно из рассмотрения упрощенной схемы замещения трансформатора, изображенной на рис. 92. Схема замещения трансформатора составлена в предположении, что потоки рассеяния и потери в обмотках и сердечнике отсутствуют.

Сопротивлением χ_0 определяется величина намагничивающего тока трансформатора при данном токе первичной обмотки I_1 и приведенном к первичной обмотке сопротивлении нагрузки r_n .

Из схемы замещения трансформатора легко определить при-

веденный к первичной обмотке. выходной ток трансформатора

$$I'_2 = \frac{x_0}{\sqrt{(r'_H)^2 + x_0^2}} I_1.$$

С увеличением степени насыщения сердечника намагничивающий ток I_0 возрастает, сопротивление x_0 уменьшается и согласно полученному выражению при $I_1 = \text{const}$ выходной ток I_2 уменьшается.

Таким образом, изменение степени насыщения сердечника при $I_1 = \text{const}$ трансформатора равносильно изменению его коэффициента трансформации.

Степень насыщения сердечника трансформатора относительно просто можно изменить, подмагничивая его постоянным током. В этом случае для устранения трансформаторной связи между цепями постоянного и переменного токов магнитопровод трансформатора целесообразно выполнять из двух сердечников аналогично магнитопроводу магнитных усилителей. Если постоянный подмагничивающий ток зависит от напряжения генератора, то с помощью такого подмагничивания легко осуществляется коррекция фазового компаундирования по напряжению.

В 1956 г. на основе управляемого фазового компаундирования с коррекцией по напряжению Институтом электротехники АН УССР был разработан быстродействующий регулятор возбуждения [61], который в настоящее время широко применяется в энергосистемах Советского Союза и в отдельных электрических установках.

§ 6. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ РЕГУЛЯТОР ВОЗБУЖДЕНИЯ С УПРАВЛЯЕМЫМ ФАЗОВЫМ КОМПАУНДИРОВАНИЕМ

В настоящее время отечественная промышленность выпускает несколько разновидностей регуляторов возбуждения с управляемым фазовым компаундированием. Рассмотрим один из вариантов такого регулятора.

Принципиальная схема регулятора. Регулятор (рис. 93) состоит из двух основных узлов:

устройства фазового компаундирования;
электромагнитного корректора напряжения, управляющего устройством фазового компаундирования.

Эти два узла смонтированы в одном кожухе и, таким образом, регулятор конструктивно представляет собой один блок.

Устройство фазового компаундирования состоит из многообмоточного универсального трансформатора с подмагничиванием УТП,

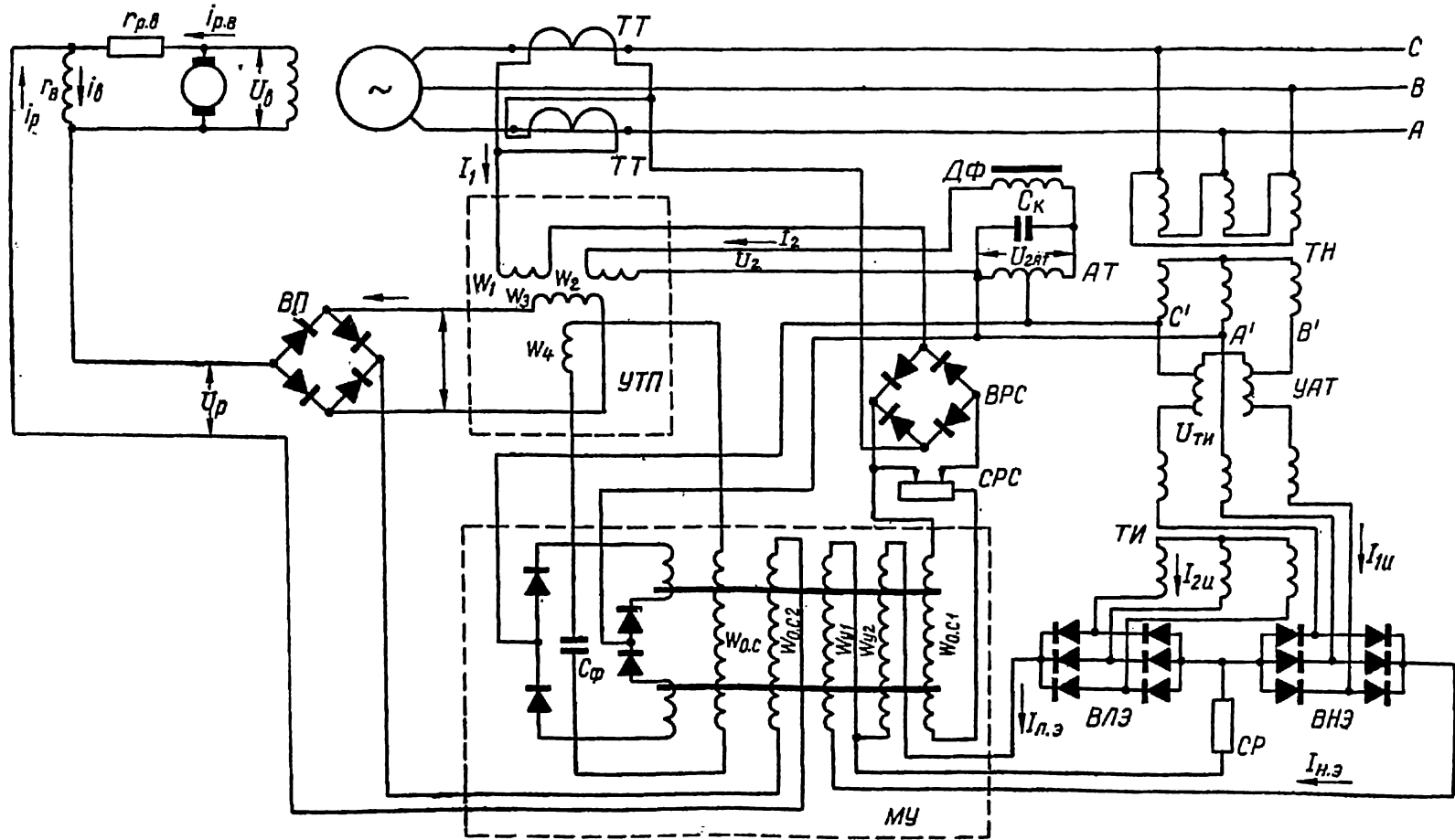


Рис. 93. Принципиальная схема регулятора возбуждения с управляемым фазовым компаундированием.

представляющего собой выходной трансформатор, дросселя $ДФ$ и автотрансформатора $АТ$.

Электромагнитный корректор напряжения состоит из измерительного органа $ТИ$ и промежуточного магнитного усилителя $МУ$, выход которого включен на подмагничивающую (управляющую) обмотку $УТП$.

Рассмотрим предварительно конструкцию, назначение и принцип действия каждого элемента в отдельности, а затем действие регулятора в целом.

Универсальный трансформатор с подмагничиванием УТП является основным элементом устройства фазового компаундирования и, следовательно, регулятора в целом.

Конструктивно он выполнен в виде многообмоточного трансформатора, и его магнитопровод состоит из двух трехстержневых сердечников. Необходимость такой конструкции выходного трансформатора устройства фазового компаундирования обоснована в следующем параграфе. Конструкция $УТП$ изображена на рис. 94. Все обмотки $УТП$ расположены на средних стержнях магнитопровода, причем обмотки переменного тока ω_1 — ω_3 охватывают два сердечника, а обмотка подмагничивания ω_4 состоит из двух катушек, включенных последовательно и охватывающих каждый сердечник в отдельности.

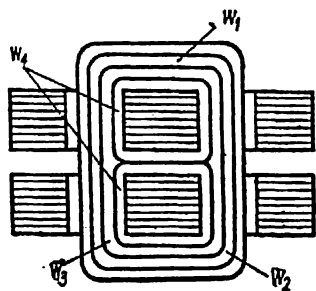


Рис. 94. Конструкция УТП.

Конструктивно он выполнен в виде многообмоточного трансформатора, и его магнитопровод состоит из двух трехстержневых сердечников. Необходимость такой конструкции выходного трансформатора устройства фазового компаундирования обоснована в следующем параграфе. Конструкция $УТП$ изображена на рис. 94. Все обмотки $УТП$ расположены на средних стержнях магнитопровода, причем обмотки переменного тока ω_1 — ω_3 охватывают два сердечника, а обмотка подмагничивания ω_4 состоит из двух катушек, включенных последовательно и охватывающих каждый сердечник в отдельности.

Катушки подмагничивающей обмотки ω_4 включены между собой так, что исключается трансформаторная связь между обмоткой подмагничивания и обмотками переменного тока.

Обмотки переменного тока ω_1 и ω_2 представляют собой первичные обмотки трансформатора, а обмотка ω_3 — вторичную (выходную) обмотку. Первичная обмотка ω_1 (первичная последовательная обмотка) чаще всего питается от трансформаторов тока двух фаз, причем она включается на разность токов двух фаз генератора (например, A и C)^{*}.

Первичная обмотка ω_2 (первичная параллельная обмотка) через автотрансформатор $АТ$ и дроссель $ДФ$ питается от ли-

^{*} Иногда для более четкой работы компаундирования при несимметричных коротких замыканиях осуществляется компаундирование от трех фаз. В описываемых регуляторах $УТП$ имеет две первичные последовательные обмотки и при трехфазном компаундировании одна из них включается на сумму токов двух фаз, а вторая — на ток третьей фазы с противоположной полярностью, т. е. на ток $-I_3$.

нейного напряжения трансформатора напряжения $TН$ (например, $U_{B'C'}$).

Выходная обмотка ω_3 через силовой выпрямитель BC включена на обмотку возбуждения возбудителя.

Дроссель $ДФ$ имеет воздушный зазор и представляет собой балластное сопротивление в цепи первичной параллельной обмотки, необходимое для работы $УТП$ в режиме трансформатора тока со стороны обмотки ω_2 . Этот дроссель $ДФ$ создает фазовый сдвиг между током I_2 в параллельной обмотке $УТП$ и приложенным напряжением $U_{B'C'}$, равный примерно 60° . Фазировка питающих цепей $УТП$ должна быть выполнена с учетом этого дополнительного фазового сдвига.

В предыдущем параграфе указывалось, что для правильной работы устройства фазового компаундирования фазировка питающих цепей должна быть выполнена так, чтобы при коэффициенте мощности генератора $\cos \varphi = 1$ ток I_1 опережал ток I_2 на 90° . В схеме, приведенной на рис. 93, это требование выполняется. В этом легко убедиться, рассмотрев векторную диаграмму токов и напряжений питающих цепей $УТП$ (рис. 95), построенной для $\cos \varphi = 1$. Из векторной диаграммы видно, что при угле сдвига фаз между $\dot{U}_{B'C'} = \dot{U}_{BC} - \dot{U}_{CA}$ и I_2 , равном 60° , ток I_1 опережает ток I_2 на 90° .

Если обмотка ω_1 включена на разность токов фаз A и B или B и C , то необходимо предусматривать другую фазировку, т. е. включать обмотку ω_2 на другое напряжение.

Автотрансформатор $АТ$ предназначен для повышения напряжения в цепи первичной параллельной обмотки ω_2 трансформатора $УТП$. Это необходимо для того, чтобы при требуемой чувствительности устройства фазового компаундирования по напряжению дроссель $ДФ$ имел достаточно высокое сопротивление, значительно превышающее эквивалентное сопротивление трансформатора $УТП$, замеренное со стороны зажимов обмотки ω_2 .

Если сопротивление дросселя $ДФ$ будет мало, то трансформатор $УТП$ не будет работать в режиме трансформатора тока.

Особенно важно обеспечить этот режим при холостом ходе и малых нагрузках генератора, когда напряжение регулируется током I_2 .

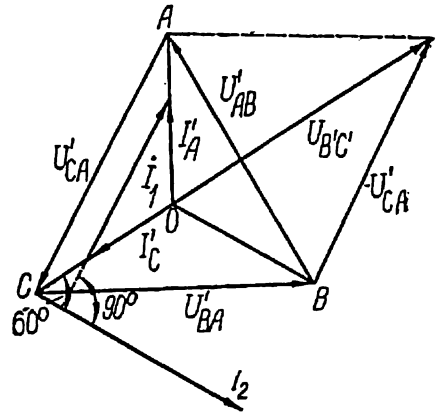


Рис. 95. Векторная диаграмма токов и напряжений питающих цепей $УТП$.

Кроме того, с помощью автотрансформатора AT можно подобрать такое напряжение в цепи обмотки ω_2 , при котором выдерживаются необходимые в случае фазового компаундирования соотношения между токами в последовательной и параллельной обмотках трансформатора $УТП$ [см. выражение (3,21)].

Конденсатор C_k компенсирует реактивную мощность в цепи первичной параллельной обмотки ω_2 , при этом значительно разгружается трансформатор напряжения $ТН$.

Измерительный орган корректора ТИ выполнен в виде насыщающегося трехфазного дросселя-трансформатора, питающегося через установочный автотрансформатор $УАТ$ от трансформатора напряжения $ТН$. Последовательно с первичной обмоткой трансформатора $ТН$ через выпрямитель $ВНЭ$ включена управляющая обмотка ω_{y1} магнитного усилителя $МУ$. Вторичная обмотка $ТИ$, являющаяся линейным элементом измерительного органа, через выпрямитель $ВЛЭ$ питает вторую ω_{y2} управляющую обмотку $МУ$. Управляющие обмотки магнитного усилителя ω_{y1} и ω_{y2} выполнены одинаковыми и включены так, что намагничивающие силы, создаваемые токами этих обмоток $I_{н.э}$ и $I_{л.э}$, противоположны одна другой.

Между общими точками управляющих обмоток и выпрямителей $ВЛЭ$ и $ВНЭ$ включено регулировочное сопротивление $СР$.

Рассмотрим принцип действия измерительного органа корректора, исходя из физического представления процесса, происходящего в насыщающемся дросселе-трансформаторе $ТИ$ при изменении приложенного к нему напряжения.

Э. д. с., индуктируемая во вторичной обмотке $ТИ$, пропорциональна основному магнитному потоку $\Phi_{0н}$, и, следовательно, при постоянном сопротивлении нагрузки (управляющая обмотка ω_{y2} магнитного усилителя) ток в ней $I_{2н}$ также пропорционален $\Phi_{0н}$.

Если эквивалентное сопротивление трансформатора, замеренное со стороны первичной обмотки при отключенной обмотке ω_{y2} , значительно больше сопротивления управляющей обмотки магнитного усилителя ($R_{y1} = R_{y2}$), а активное сопротивление и сопротивление рассеяния первичной обмотки не велики, то основным магнитный поток пропорционален приложенному напряжению $U'_{т.н}$. Такое соотношение выполняется, если коэффициент трансформации трансформатора $ТИ$

$$N_{т.н} \gg 1.$$

Напряжение $U'_{т.н}$ пропорционально напряжению генератора U_r и, следовательно, ток вторичной обмотки пропорционален напря-

жению генератора. Поэтому вторичная обмотка дроссель-трансформатора является линейным элементом измерительного органа корректора.

При относительно небольших напряжениях основной магнитный поток $\Phi_{0н}$ невелик, и сердечник трансформатора не насыщен. В этом случае намагничивающий ток трансформатора $TИ$ мал и практически изменяется пропорционально потоку $\Phi_{0н}$, т. е. приложенному напряжению. Ток в первичной обмотке трансформатора $TИ$

$$I_{1н} = I_{0н} - I_{2н}, \quad (3,24)$$

где $I_{0н}$ — намагничивающий ток трансформатора $TИ$;

$I_{2н}$ — ток вторичной обмотки, приведенный к первичной обмотке.

Поэтому токи $|I'_{2н}|$ и $I_{1н}$ изменяются также пропорционально напряжению генератора. Параметры трансформатора $TИ$ выбраны так, что для ненасыщенного сердечника трансформатора

$$|I_{1н}| < |I_{2н}|.$$

С увеличением напряжения генератора сердечник дроссель-трансформатора $TИ$ насыщается, намагничивающий ток $I_{0н}$ резко возрастает, причем нарушается линейная зависимость между током $I_{0н}$ и потоком $\Phi_{0н}$. Поэтому ток $|I_{1н}|$ резко возрастает и для некоторого значения напряжения становится равным току $|I_{2н}|$, а затем — больше его, т. е. при напряжениях, соответствующих насыщению сердечника,

$$|I_{1н}| > |I_{2н}|.$$

Ток $I_{2н}$ в случае насыщения сердечника, как и до насыщения, пропорционален потоку $\Phi_{0н}$.

Линейная зависимость между потоком $\Phi_{0н}$ и приложенным напряжением (напряжением генератора) нарушается вследствие влияния падения напряжения на сопротивлении R_{y1} , которое резко возрастает из-за значительного увеличения тока $I_{1н}$.

Поэтому линейная зависимость между током I_2 и напряжением U_r при насыщении сердечника нарушается, и рост тока I_2 с увеличением напряжения замедляется. Это отклонение от линейной зависимости невелико, так как сопротивление R_{y1} остается по-прежнему значительно меньше эквивалентного сопротивления дроссель-трансформатора.

Так как ток $I_{1н}$ пропорционален выпрямленному току $I_{н.э.}$, ток $I_{2н}$ — току $I_{л.э.}$, то характеристики измерительного органа

корректора определяются изменениями токов $I_{1н}$ и $I_{2н}$ в функции напряжения U_2 .

Характеристики измерительного органа, построенные с учетом рассмотренных явлений, происходящих в трансформаторе $ТИ$ при изменении напряжения, показаны на рис. 96.

Если принять, что намагничивающая сила обмотки ω_{y1} положительна, то из рис. 96 видно, что при $U_r < U_1$ и $I_{н.э} < I_{л.э}$ алгебраическая сумма управляющих намагничивающих сил магнитного усилителя отрицательна. Если $U_r = U_1$, алгебраическая сумма

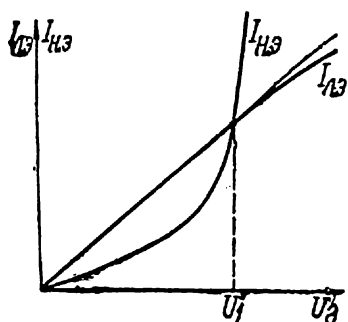


Рис. 96. Характеристики измерительного органа корректора регулятора возбуждения с управляемым фазовым компаундированием.

управляющих намагничивающих сил равна нулю, а при $U_r > U_1$ и $I_{н.э} > I_{л.э}$ алгебраическая сумма намагничивающих сил магнитного усилителя положительна.

Таким образом, при изменении напряжения генератора изменяются величина и знак управляющей намагничивающей силы магнитного усилителя и, следовательно, изменяется его выходной ток, воздействующий на режим работы трансформатора $УТП$ фазового компаундирования.

Регулировочное сопротивление $СР$ предназначено для одновременного изменения токов $I_{л.э}$ и $I_{н.э}$, величины которых требуются различными в зависимости от характеристик возбудителя и генератора,

а также от схем включения трансформаторов тока и напряжения. Величина $СР$ устанавливается при наладке регулятора.

Установочный автотрансформатор $УАТ$ выполняет те же функции, что и в электромагнитном корректоре устройства компаундирования по току.

Промежуточный магнитный усилитель $МУ$ является усиленным элементом корректора регулятора. Он выполнен с внутренней и внешней обратными связями и его выход на постоянном токе. Такая комбинированная обратная связь увеличивает коэффициент усиления усилителя. Для улучшения выходных характеристик магнитного усилителя параллельно его выходу включена сглаживающая емкость $С_{\phi}$.

Обмотка ω_{y1} , по которой протекает ток $I_{н.э}$ нелинейного элемента корректора, включена так, что намагничивающая сила, создаваемая этим током, направлена согласно с намагничивающей силой внутренней обратной связи. Намагничивающая сила, создаваемая в обмотке ω_{y2} током $I_{л.э}$ направлена против намагничи-

вающей силы внутренней обратной связи усилителя. Поэтому, если $I_{н.э} > I_{л.э}$, внутренняя обратная связь положительна, а при $I_{н.э} < I_{л.э}$ — отрицательна. Помимо основных управляющих обмоток ω_{y1} и ω_{y2} , магнитный усилитель имеет обмотку $\omega_{o.c1}$, создающую в регуляторе обратную связь по току статора генератора, и обмотку $\omega_{o.c2}$, осуществляющую обратную связь по току выхода регулятора.

Характеристика электромагнитного корректора представляет собой зависимость тока выхода магнитного усилителя от напряжения генератора при неизменном коэффициенте трансформации установочного автотрансформатора.

Нагрузочная характеристика магнитного усилителя с комбинированной внутренней и внешней обратными связями аналогична характеристике магнитного усилителя с внешней обратной связью, применяемого в корректоре ЭМК напряжения.

Из сопоставления рис. 83 и 96 видно, что выходные характеристики измерительных органов корректора рассматриваемого регулятора и ЭМК одинаковы. Отличие заключается только в том, что в ЭМК управляющая обмотка магнитного усилителя, по которой протекает ток нелинейного элемента, создает намагничивающую силу, направленную встречно намагничивающей силе обратной связи, а в корректоре регулятора с управляемым фазовым компаундированием аналогичная обмотка создает намагничивающую силу, согласованную с обратной связью.

Поэтому при напряжении, меньшем напряжения U_1 (рис. 96), результирующая намагничивающая сила, создаваемая токами линейного и нелинейного элементов, направлена против намагничивающей силы обратной связи, и выходной ток магнитного усилителя мал. Для напряжений, больших U_1 , управляющая намагничивающая сила совпадает по направлению с намагничивающей силой обратной связи, и выходной ток магнитного усилителя резко возрастает. Примерная характеристика корректора приведена на рис. 97. Максимальная разность токов линейного и нелинейного элементов при $U_1 < U_1$ (рис. 96) в рассматриваемом корректоре невелика, и выходной ток корректора при напряжениях меньше U_0 (рис. 97) достаточно мал. Поэтому нет необходимости применять блокирующий вентиль.

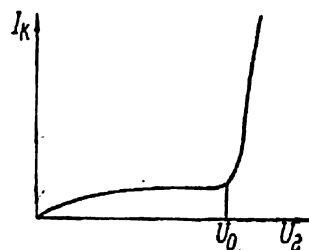


Рис. 97. Выходная характеристика корректора регулятора возбуждения с управляемым фазовым компаундированием.

Характеристики регулятора. Выходной ток регулятора зависит не только от напряжения генератора, но и от тока нагрузки и коэффициента мощности. Поэтому его работа описывается не одной характеристикой, а семейством характеристик, причем каждая из характеристик этого семейства соответствует определенному режиму работы генератора.

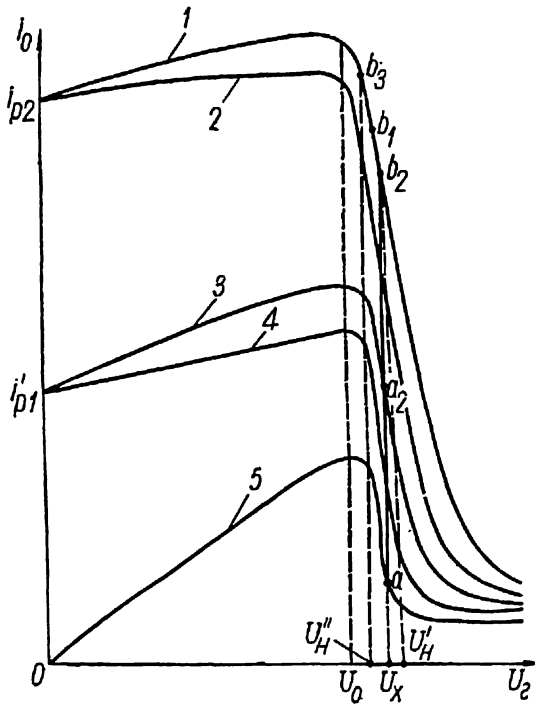


Рис. 98. Характеристики регулятора напряжения с управляемым фазовым компаундированием.

Рассмотрим предварительно характеристику регулятора, т. е. зависимость выходного тока регулятора от напряжения при холостом ходе генератора. В этом случае намагничивающая сила первичных обмоток трансформатора УТП создается только током I_2 , пропорциональным напряжению генератора.

При напряжениях генератора, меньших U_0 (рис. 97), выходной ток корректора регулятора очень мал и он практически не влияет на режим работы универсального трансформатора фазового компаундирования. Поэтому, если $U_2 \leq U_0$, выходной ток трансформатора УТП, а следовательно, и выходной ток регулятора изменяются пропорционально напряжению генератора.

При дальнейшем увеличении напряжения генератора, когда $U_r > U_0$, выходной ток корректора резко возрастает, вследствие чего насыщается сердечник трансформатора УТП.

Несмотря на то что с увеличением напряжения генератора первичная намагничивающая сила, создаваемая током I_2 , возрастает, при насыщении сердечника трансформатора УТП током корректора, когда $U_r > U_0$, выходной ток регулятора резко уменьшается. Это обусловлено тем, что эффект уменьшения выходного тока из-за насыщения сказывается значительно сильнее, чем рост тока I_2 . Характеристика регулятора при холостом ходе генератора изображена кривой 5 на рис. 98.

Рассмотрим теперь характеристику регулятора при некотором токе статора генератора. Предположим, что ток генератора составляет 50% номинального значения, коэффициент мощности гене-

ратора равен $\cos \varphi_1$. Очевидно, что в этом случае первичная намагничивающая сила трансформатора *УТП* создается геометрической суммой намагничивающих сил обмоток ω_1 и ω_2 и зависит от геометрической суммы токов I_1 и I_2 , пропорциональных соответственно току и напряжению генератора.

При построении характеристики будем предполагать, что ток генератора и коэффициент мощности остаются неизменными, а напряжение генератора изменяется от нуля до некоторого значения.

Если $U_r = 0$, намагничивающая сила первичных обмоток определяется током I_1 , соответствующим 50% номинального тока генератора, и, следовательно, выходной ток регулятора будет равен некоторому значению i_{p1} . При увеличении напряжения от 0 до U_0 геометрическая сумма намагничивающих сил первичных обмоток трансформатора *УТП* будет возрастать, так как увеличивается, начиная от 0, ток I_2 , пропорциональный напряжению генератора. Следовательно, для $U_r < U_0$, пока ток выхода корректора мал и сердечник трансформатора *УТП* не насыщен, выходной ток регулятора также будет возрастать, начиная от значения i_{p1} . Так как намагничивающая сила, создаваемая током I_2 обмотки ω_2 трансформатора *УТП* складывается геометрически с намагничивающей силой обмотки ω_1 , то возрастание выходного тока корректора с увеличением напряжения будет значительно меньшим, чем при холостом ходе генератора. Для $U_r > U_0$, как и при холостом ходе генератора, вследствие насыщения трансформатора *УТП*, вызванного током корректора, выходной ток регулятора резко уменьшается. Характеристика регулятора для 50%-ной нагрузки с некоторым $\cos \varphi_1$ изображена кривой 4 на рис. 98.

При другом $\cos \varphi_2 < \cos \varphi_1$, но прежнем токе статора, равном 50% номинального тока, и $U_r = 0$ выходной ток регулятора остается неизменным и равным i_{p1} . С увеличением напряжения от 0 до U_0 геометрическая сумма первичных намагничивающих сил *УТП* при $\cos \varphi_2$ вследствие увеличения угла сдвига фаз между ними будет возрастать более резко, чем для $\cos \varphi_1$, в результате чего наклон характеристики регулятора $U_r \leq U_0$ будет большим, чем для $\cos \varphi_1$. Если $U_r > U_0$, вследствие насыщения трансформатора *УТП*, выходной ток вновь начинает резко уменьшаться. Характеристика регулятора при $\cos \varphi_2 < \cos \varphi_1$ и 50%-ном токе генератора изображена кривой 3 на рис. 98.

Аналогично можно построить характеристики при 100%-ном токе генератора, равном номинальному значению. На рис. 98 эти характеристики изображены кривыми 2 (для $\cos \varphi_1$) и 1 (для $\cos \varphi_2$).

Взаимное расположение характеристик может изменяться с помощью специальных внешних обратных связей.

Обратная связь по току статора генератора предназначена для смещения характеристик регулятора по оси U относительно характеристики холостого хода 5. Эта обратная связь осуществляется посредством выпрямителя ВРС, включенного последовательно с обмоткой ω_1 трансформатора УТП, и подмагничивающей обмотки $\omega_{0.c1}$ промежуточного магнитного усилителя. Степень обратной связи регулируется сопротивлением СРС. Обмотка $\omega_{0.c1}$ промежуточного магнитного усилителя включена так, что намагничивающая сила, создаваемая в ней выпрямленным током, пропорциональным току генератора, направлена согласованно с намагничивающей силой внутренней обратной связи магнитного усилителя. Вследствие согласованного включения обмотки обратной связи $\omega_{0.c1}$ с внутренней обратной связью магнитного усилителя резкое увеличение тока выхода магнитного усилителя будет при напряжениях, меньших U_0 , и, следовательно, насыщение УТП и снижение его выходного тока также будет при напряжениях, меньших U_0 .

Таким образом, обратная связь по току статора генератора смещает характеристики регулятора влево относительно характеристики холостого хода 5.

Обратная связь по току выхода регулятора предназначена для изменения фазочувствительности регулятора, т. е. для изменения взаимного расположения характеристик при одинаковых нагрузках, но различных коэффициентах мощности генератора (например, кривых 1 и 2 или 3 и 4 на рис. 98).

Эта обратная связь создается обмоткой $\omega_{0.c2}$ магнитного усилителя, включенной последовательно в выходную цепь регулятора. Обмотка $\omega_{0.c2}$ включена так, что намагничивающая сила, создаваемая в ней током выхода регулятора, направлена против намагничивающей силы внутренней обратной связи магнитного усилителя.

Вследствие встречного включения обмотки $\omega_{0.c2}$ и внутренней обратной связи магнитного усилителя увеличение его выходного тока, а следовательно, и резкое снижение тока выхода регулятора будет при напряжениях, больших U_0 . Таким образом, обратная связь по току выхода регулятора смещает характеристики регулятора (включая и характеристику 5) вдоль оси U в сторону его увеличения. При одной и той же нагрузке генератора обратная связь тем больше смещает характеристику, чем меньше коэффициент мощности генератора, так как с его уменьшением возрастает выходной ток регулятора.

Вследствие зависимости выходного тока регулятора от коэффициента мощности генератора обратная связь по току выхода регулятора смещает характеристики регулятора на различные величины по оси U (а следовательно, и по оси i_p) в зависимости от коэффициента мощности и, таким образом, изменяет фазочувствительность регулятора.

Помимо этого, при наличии обратной связи по току статора генератора обратная связь по выходному току увеличивает крутизну характеристик регулятора.

Увеличение крутизны характеристик при наличии двух обратных связей объясняется следующим образом. Намагничивающие силы обмоток обратных связей $\omega_{o.c1}$ и $\omega_{o.c2}$ направлены встречно одна другой, причем обратная связь по току генератора создает намагничивающую силу, действующую согласованно с внутренней обратной связью магнитного усилителя. Для некоторых значений напряжения и тока генератора, когда выходной ток регулятора данного режима максимален, обратные связи частично (или полностью) компенсируют одна другую.

При увеличении напряжения и неизменном токе генератора выходной ток регулятора, а также компенсирующее действие соответствующей ему обратной связи будут резко уменьшаться, вследствие чего создается дополнительное подмагничивание магнитного усилителя некомпенсированной обратной связью по току генератора. В результате этого дополнительного подмагничивания увеличится выходной ток магнитного усилителя и, следовательно, более резко уменьшится выходной ток регулятора, чем при равных условиях без обратной связи по току выхода регулятора.

Работа регулятора возбуждения в целом. При холостом ходе генератора трансформатор $УТП$ питается только от трансформатора напряжения генератора, и характеристика регулятора изображается кривой 5 (рис. 98). Соответствующей установкой сопротивления в цепи самовозбуждения возбудителя $r_{p.в}$, а также регулировочного сопротивления регулятора $СР$ и установочного автотрансформатора $УАТ$ можно добиться, как и в корректоре ЭМК, чтобы при необходимом напряжении холостого хода генератора выходной ток регулятора имел определенное значение.

Величина выходного тока регулятора и возможные пределы его изменения должны быть достаточными для возможности регулирования напряжения на холостом ходу и при малой (10—15% номинальной) нагрузке. На рис. 98 режим работы регулятора при холостом ходе генератора характеризуется точкой a на кривой 5. При этом регулятор будет поддерживать заданное напряжение

холостого хода генератора в пределах естественного статизма (аналогично ЭМК), определяемого кривой 5. Таким образом, параллельная первичная обмотка ω_2 трансформатора УТП предназначена не только для создания чувствительности регулятора к коэффициенту мощности генератора, но и для регулирования напряжения на холостом ходу и при малых нагрузках генератора.

При работе генератора под нагрузкой (например, 100%-ной номинальной) и заданном коэффициенте мощности (например, $\cos \varphi_2$) трансформатор УТП питается от трансформаторов тока и напряжения, и характеристика регулятора изображается кривой 1 (рис. 98).

Предположим, что при изменении нагрузки генератора от нуля до 100% напряжение генератора остается неизменным и равным напряжению холостого хода $U_{г. х}$. В этом случае для неизменных по сравнению с режимом холостого хода сопротивлений $r_{р. в}$, $СР$ и положения УАТ ток выхода регулятора изменится до величины, определяемой точкой b_1 на характеристике регулятора 1.

В частном случае при соответствующем взаимном расположении характеристик может оказаться, что для такого выходного тока регулятора ток возбуждения возбудителя генератора достигнет величины, необходимой для поддержания заданного напряжения $U_{г. х}$ при 100%-ной нагрузке и коэффициенте мощности $\cos \varphi_2$. Следовательно, регулятор будет поддерживать напряжение генератора постоянным.

Если для выходного тока регулятора, определяемого точкой b_1 на кривой 1, ток возбуждения возбудителя окажется больше того, который должен быть при заданных нагрузке, $\cos \varphi_2$ и напряжении $U_{г. х}$, то напряжение генератора с ростом нагрузки будет увеличиваться и достигнет значения $U'_н > U_{г. х}$, при котором величина выходного тока регулятора будет определяться точкой b_2 .

Если выходной ток регулятора, определяемый точкой b_1 , будет меньше значения, необходимого при заданных нагрузке и $\cos \varphi_2$ для поддержания напряжения генератора $U_{г. х}$, то напряжение генератора с увеличением нагрузки уменьшится до величины $U''_н < U_{г. х}$, а выходной ток регулятора достигнет значения, определяемого точкой b_2 .

Аналогичная картина будет при других нагрузках и коэффициентах мощности генератора.

Таким образом, в зависимости от взаимного расположения характеристик регулятор может регулировать напряжение по определенным законам при изменении нагрузки, т. е. может иметь различные характеристики регулирования.

Характеристика регулирования представляет собой зависимость между напряжением и током генератора, осуществляемую системой регулирования напряжения. В зависимости от настройки регулятора эти характеристики могут быть не одинаковыми для различных значений $\cos \varphi_r$. Характеристики регулирования определяются точками пересечения характеристик регулятора (рис. 98), соответствующих различным токам генератора и заданному $\cos \varphi$ (например, кривых 1, 3, 5) с прямой ab_1 (ab_2 или ab_3). Например, точке b_2 соответствуют $I_r = I_n$ и $U_r = U_n$, а точке b_3 — $I_r = I_n$ и $U_r = U_n''$.

Различные характеристики регулирования (рис. 99) можно получить, изменяя взаимное расположение характеристик регулятора, что достигается соответствующей настройкой внешних обратных связей. Изменяя настройку внешних обратных связей регулятора, можно регулировать напряжение с нулевым (кривая 1 на рис. 99), отрицательным (кривая 2) или положительным (кривая 3) статизмами.

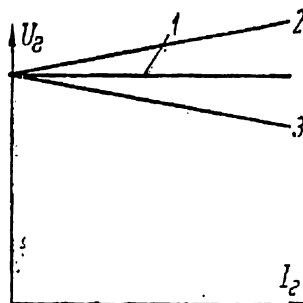


Рис. 99. Характеристики регулирования напряжения регулятором с управляемым фазовым компаундированием.

Форсировочная способность регулятора с управляемым фазовым компаундированием при глубоких снижениях напряжения (до 15%) и коротких замыканиях выше, чем в устройствах компаундирования по току с электромагнитным корректором. Это объясняется тем, что для получения заданного напряжения при холостом ходе генератора и номинальной нагрузке соответствующие коэффициенты трансформации трансформатора УТП устанавливаются с учетом наличия подмагничивающего тока от корректора напряжения.

При резких снижениях напряжения и коротких замыканиях выходной ток корректора резко уменьшается или становится равным нулю, что равносильно резкому изменению коэффициента трансформации УТП. Выходной ток трансформатора УТП возрастает значительно больше, чем в устройствах компаундирования по току, где коэффициент трансформации выходного трансформатора остается неизменным.

Разновидности регуляторов возбуждения с управляемым фазовым компаундированием. В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются несколько типов регуляторов возбуждения с управляемым фазовым компаундированием [26]. Минский электротехнический завод изготавливает регуляторы типа РВА-62 для мощных генераторов до 100 тыс. квт. Схема регулятора РВА-62

почти не отличается от рассмотренной в этом параграфе. Отличие заключается в том, что в регуляторе РВА-62 предусмотрено устройство частотной коррекции, которое устраняет зависимость характеристики регулирования от частоты в системе.

Выпускаются также и другие регуляторы возбуждения с управляемым фазовым компаундированием: РНА-60 для генераторов мощностью до 12 тыс. *квт*, УБК-МА для генераторов низкого напряжения мощностью до 1500 *квт*, УБК-0 для генераторов низкого напряжения мощностью до 100—200 *квт*.

В отношении качества регулирования напряжения устройства управляемого фазового компаундирования имеют значительно лучшие характеристики, чем устройства компаундирования по току с коррекцией напряжения.

Фазочувствительность схем фазового компаундирования позволила создать маломощный корректор напряжения и это обеспечило высокое быстродействие системы регулирования. Габариты и вес устройств управляемого фазового компаундирования значительно меньше, чем устройств токового компаундирования с ЭМК. Этими преимуществами и обусловлено широкое применение регуляторов возбуждения, работающих по принципу управляемого фазового компаундирования в энергосистемах Советского Союза, и постепенное вытеснение ими устаревших в настоящее время устройств компаундирования по току.

§ 7. РЕГУЛЯТОРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

В настоящее время имеется несколько разновидностей регуляторов возбуждения сильного действия для различных типов генераторов с электромашинной и ионной системами возбуждения. Эти регуляторы, разработанные Всесоюзным электротехническим институтом им. В. И. Ленина (ВЭИ), успешно работают на некоторых электростанциях Советского Союза [8].

Рассмотрим схему регулятора возбуждения сильного действия для турбогенераторов типа ТГВ-200 с ионной системой возбуждения, которые установлены на многих отечественных тепловых электростанциях.

Регулятор возбуждения генераторов с ионной системой возбуждения действует на систему управления ионных выпрямителей и тем самым автоматически изменяет среднее значение выпрямленного тока (тока возбуждения генератора) в соответствии с заданным законом регулирования.

Из курса промышленной электроники известно, что среднее значение выпрямленного тока управляемого ионного выпрямителя можно менять, изменяя фазу напряжения на первичной обмотке сеточного трансформатора относительно анодного напряжения. Для этого в системе управления управляемого ионного выпрямителя предусматривается статический фазорегулятор (ФС). Упрощенная схема статического фазорегулятора мостового типа изображена на рис. 100, а.

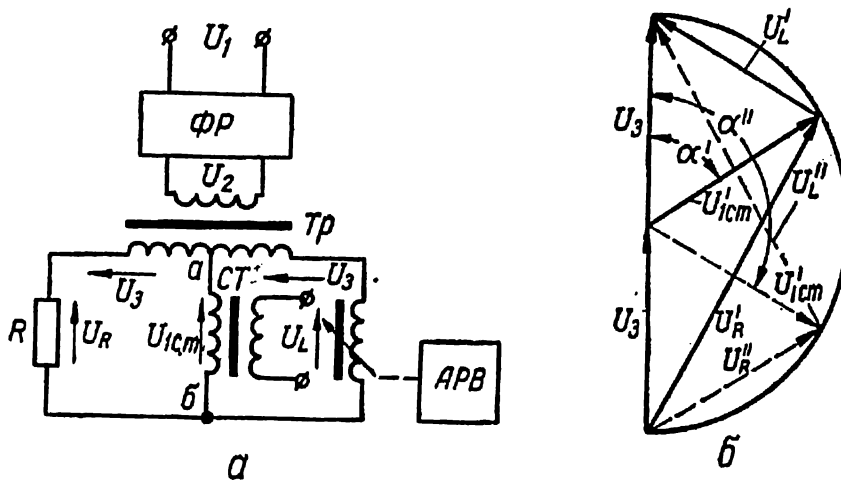


Рис. 100. Упрощенная схема и векторная диаграмма напряжений статического фазорегулятора.

Статический фазорегулятор представляет собой мостовую схему, составленную из двух вторичных полуобмоток питающего трансформатора Tr , активного сопротивления R и переменной индуктивности L . Первичная обмотка сеточного трансформатора CT включена в диагональ $аб$ мостовой схемы.

К первичной обмотке питающего трансформатора Tr через поворотный фазорегулятор ΦP подводится напряжение U_2 . Напряжение U_1 на входе поворотного фазорегулятора синфазно с анодным напряжением ионного выпрямителя.

На рис. 100, б изображена векторная диаграмма напряжений мостового статического фазорегулятора, построенная при условии, что ток в первичной обмотке трансформатора CT значительно меньше токов в плечах моста R и L , для значений переменной индуктивности L' (сплошные линии) и L'' (штриховые линии), причем $L' < L''$. Из векторной диаграммы (рис. 100, б) видно, что с изменением величины индуктивности L меняется угол сдвига фаз α между напряжением U_3 и напряжением на первичной обмотке

сеточного трансформатора $U_{1c.т}$, причем действующее значение напряжения $U_{1c.т}$ остается неизменным.

Так как фаза напряжения U_b определяется фазой анодного напряжения и положением поворотного фазорегулятора ΦP , при изменении индуктивности меняется угол сдвига фаз между анодным и сеточным напряжениями выпрямителя и, следовательно, изменяется среднее значение выпрямленного тока.

С помощью поворотного фазорегулятора ΦP можно настроить статический фазорегулятор ΦC определенным образом.

В качестве переменной индуктивности L применяется магнитный усилитель с внутренней обратной связью. Управляющая обмотка магнитного усилителя фазорегулятора питается выходным током автоматического регулятора возбуждения APB . Вследствие изменения выходного тока APB , вызванного изменением воздействий на его входе, меняется эквивалентная индуктивность рабочих обмоток магнитного усилителя и, следовательно, ток возбуждения генератора.

Измерительный элемент напряжения регулятора возбуждения сильного действия турбогенератора ТГВ-200. Схема измерительного элемента напряжения регулятора сильного действия генератора ТГВ-200 приведена на рис. 101. Измерительный элемент напряжения представляет собой нелинейный симметричный мост, составленный из двух линейных сопротивлений R_n и двух групп полупроводниковых стабилитронов St (нелинейных сопротивлений).

К диагонали ab нелинейного моста через разделительный трансформатор Tr_1 и потенциал-регулятор PP подводится выпрямленное трехфазным выпрямителем BC напряжение, пропорциональное напряжению генератора,

$$U_b = kU_r,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

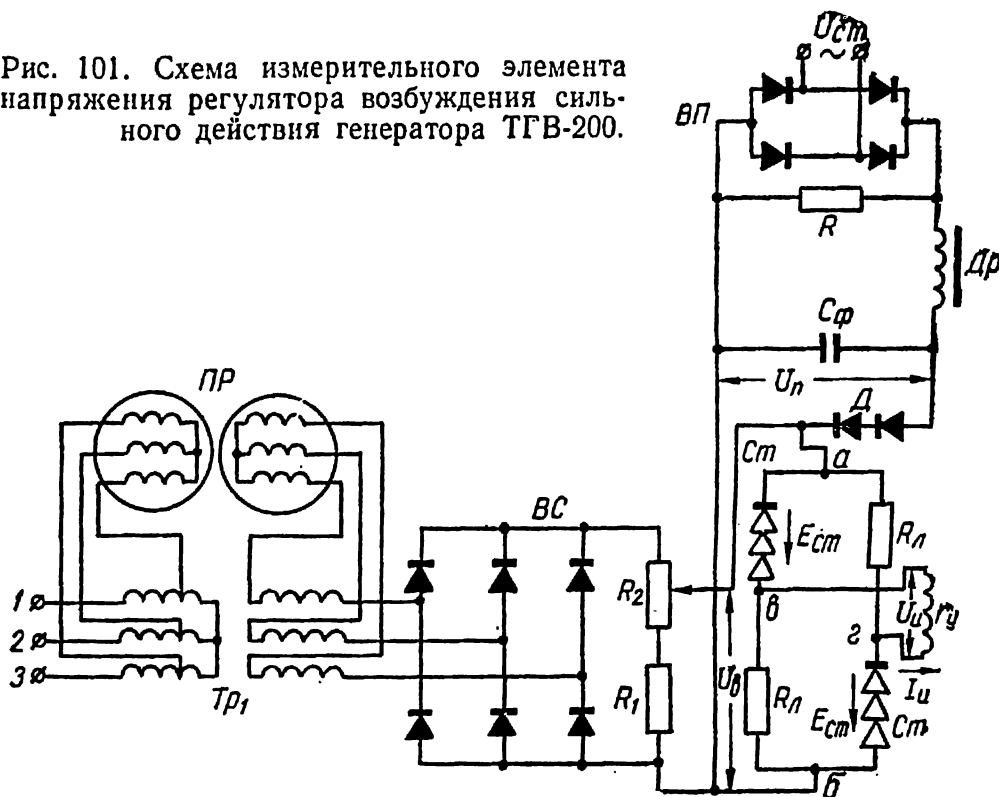
Зажимы первичной обмотки трансформатора Tr_1 подключаются ко вторичной обмотке трансформатора напряжения генератора, который на рис. 101 не показан. Выходным током измерительного элемента I_n , действующим на усилитель регулятора возбуждения, является ток в сопротивлении r_y , включенном в диагональ моста vg .

Кроме напряжения U_b , к диагонали ab нелинейного моста через диоды D подводится подпорное напряжение U_n , получаемое после выпрямления выпрямителем BC и сглаживания фильтром Dr, C_f стабильного переменного напряжения $U_{ст}$.

Прежде чем рассматривать работу и характеристики измерительного элемента напряжения, напомним основные свойства полу-

проводниковых стабилитронов. При напряжениях на электродах стабилитрона, меньших напряжения пробоя $E_{ст}$, стабилитрон заперт, и ток через него практически не проходит. Если напряжение на электродах стабилитрона достигает величины, равной $E_{ст}$, возникает пробой стабилитрона, и через него начинает про-

Рис. 101. Схема измерительного элемента напряжения регулятора возбуждения сильного действия генератора ТГВ-200.



текать ток. При изменении тока стабилитрона в широких пределах падение напряжения на нем практически остается неизменным и равным величине $E_{ст}$.

Если последовательно со стабилитроном включить линейное сопротивление, то при напряжении на зажимах такой последовательной цепи, большем $E_{ст}$, напряжение на стабилитроне практически остается равным $E_{ст}$ независимо от величины питающего напряжения. В этом случае стабилитрон можно рассматривать как источник стабильного (эталонного) напряжения. Величину эталонного напряжения можно изменять, включая последовательно различное количество стабилитронов.

При снижении напряжения до величины, меньшей напряжения пробоя, пробой стабилитрона самоустранивается.

Учитывая описанные свойства полупроводниковых стабилизаторов, легко определить зависимость между напряжением генератора U_{Γ} и выходным током измерительного элемента напряжения регулятора возбуждения сильного действия, т. е. построить его характеристику. Предположим сначала, что подпорное напряжение $U_{\Pi} = 0$. В этом случае, если напряжение генератора изменяется от нуля до некоторого значения $U_{\Gamma, \text{ст}}$, при котором напряжение $U_{\text{в}} = E_{\text{ст}} \frac{2R_{\text{л}} + r_{\text{у}}}{R_{\text{л}} + r_{\text{у}}}$ (стабилизаторы заперты), выходной ток измерительного элемента пропорционален напряжению генератора:

$$I_{\text{и}} = \frac{kU_{\Gamma}}{2R_{\text{л}} + r_{\text{у}}}.$$

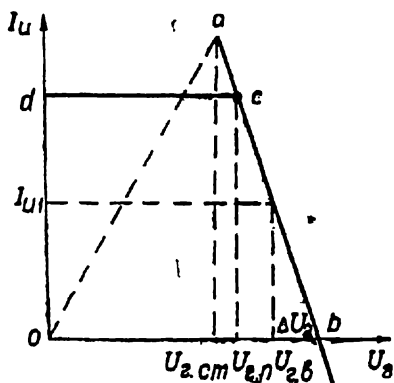


Рис. 102. Характеристика измерительного элемента регулятора возбуждения сильного действия генератора ТГВ-200.

Эта зависимость изображена на рис. 102 прямой линией oa . При $U_{\Gamma} \geq U_{\Gamma, \text{ст}}$ возникает пробой стабилизаторов нелинейного моста, и выходной ток измерительного элемента изменяется по закону

$$I_{\text{и}} = \frac{2E_{\text{ст}} - kU_{\Gamma}}{r_{\text{у}}},$$

изображенному на рис. 102 прямой ab .

Таким образом, при отсутствии подпорного напряжения характеристика измерительного элемента изображается ломаной линией oab (рис. 102). Если $U_{\Gamma} > U_{\Gamma, \text{ст}}$, то с увеличением напряжения генератора ток выхода измерительного элемента уменьшается и при значительном увеличении напряжения ($U_{\Gamma} > U_{\Gamma, \text{в}}$) изменяет свое направление. Так как выходной ток регулятора, изменяющий ток возбуждения генератора, примерно повторяет закон изменения выходного тока измерительного элемента, то в этом случае при $U_{\Gamma} > U_{\Gamma, \text{ст}}$ регулятор возбуждения будет работать правильно.

Если напряжение генератора $U_{\Gamma} < U_{\Gamma, \text{ст}}$, то с уменьшением напряжения генератора уменьшается и выходной ток измерительного элемента и, следовательно, регулятор возбуждения при таких напряжениях будет работать неправильно.

Вследствие наличия подпорного напряжения устраняется неправильная работа регулятора возбуждения при резких снижениях напряжения генератора. Действительно, для напряжений генератора, меньших некоторого значения $U_{\Gamma, \text{п}}$ (где $U_{\Gamma, \text{п}} = \frac{U_{\Pi}}{k}$), на-

пряжение питания нелинейного моста равно напряжению U_n и не зависит от напряжения генератора.

Если напряжение $U_{г.п} > U_{г.ст}$, то при $U_g < U_{г.п}$ ток I_n будет оставаться неизменным, и характеристика измерительного элемента для диапазона изменения напряжения от 0 до $U_{г.п}$ изобразится горизонтальной прямой cd (рис. 102).

Таким образом, при наличии подпорного напряжения характеристика регулятора изображается ломаной dca , и исключается неправильная работа регулятора возбуждения в случае резких снижений напряжения. Мост настраивается сопротивлением R_1 . С помощью потенциал-регулятора $ПР$ изменяется уставка измерительного элемента.

Схема регулятора возбуждения сильного действия генератора ТГВ-200. Регулятор возбуждения ТГВ-200 реагирует на отклонение напряжения генератора ΔU_g , первые производные от напряжения $\frac{dU_g}{dt}$ и от частоты $\frac{df}{dt}$. Так как первая производная от частоты приблизительно изменяется по такому же закону, как и вторая производная от угла вылета ротора δ , то действует на нее регулятор примерно так же, как на вторую производную от угла δ . Схема регулятора возбуждения сильного действия показана на рис. 103. В качестве усилительного элемента регулятора применен двухкаскадный двухтактный магнитный усилитель с выходом на постоянном токе, имеющий повышенный к. п. д. (рис. 78). Первый каскад усилителя $У_1$ является общим для управления рабочей и форсировочными группами ионных выпрямителей системы возбуждения генератора. Рабочей группой ионных выпрямителей управляет усилитель $У_p$ (являющийся вторым каскадом магнитного усилителя), а форсировочной группой выпрямителей — усилитель $У_\phi$. Выходные усилители $У_p$ и $У_\phi$ управляют соответствующими статическими фазорегуляторами рабочих и форсировочных групп выпрямителей. Для улучшения характеристик усилителей между первым и вторым каскадами магнитных усилителей применены сглаживающие фильтры ($C_{\phi 1}$, Dp_1) и добавочные сопротивления $R_{д1}$. Действие регулятора возбуждения сильного действия может быть эффективным только при его высоком быстродействии. Для повышения быстродействия регулятора магнитные усилители питаются от источника напряжения 450 гц (цепи питания на схеме не показаны).

На первом каскаде магнитного усилителя $У_1$ имеются, кроме контрольных и обмоток смещения (на схеме не показаны), три управляющие обмотки I — III и обмотка IV для введения жесткой

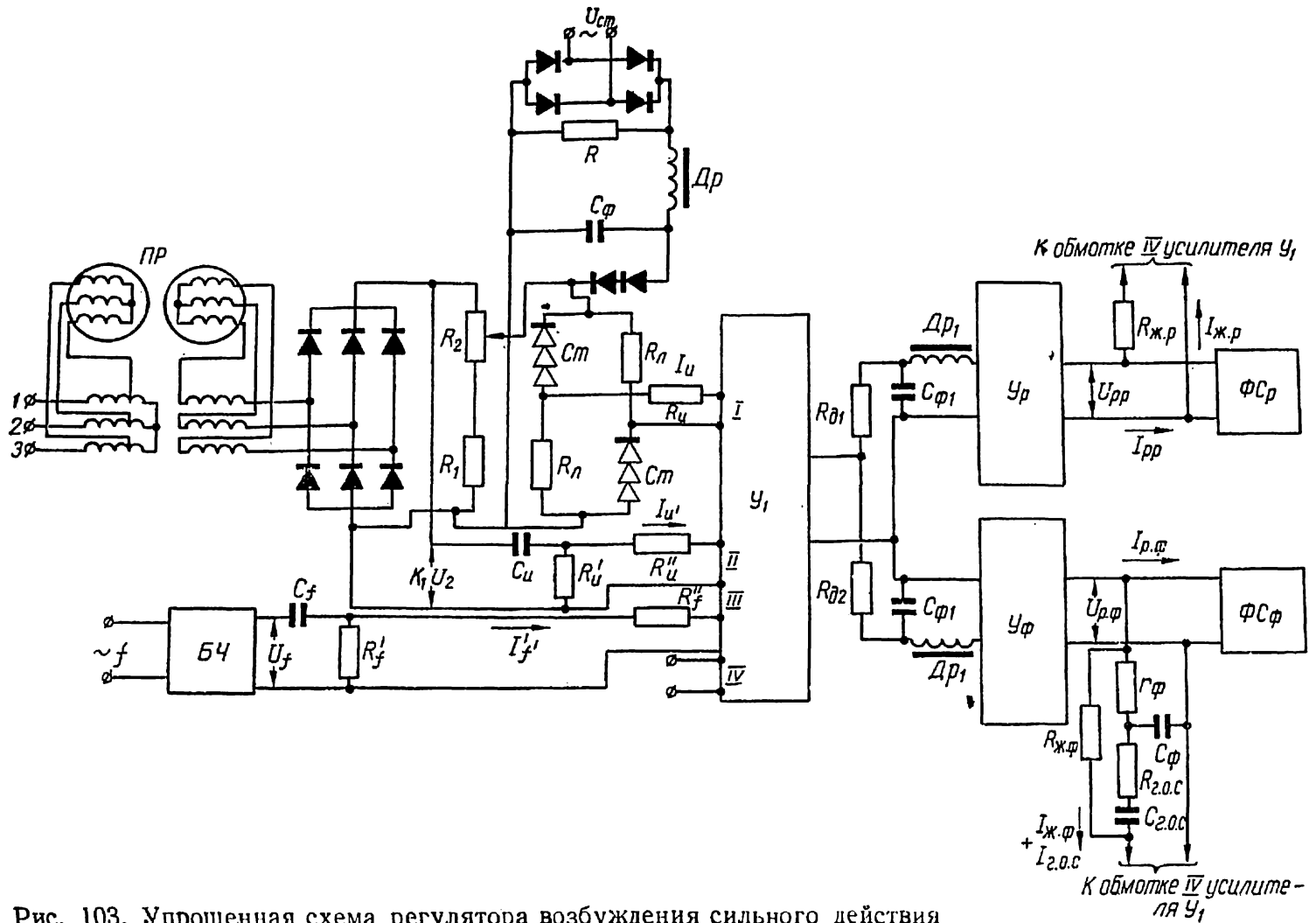


Рис. 103. Упрощенная схема регулятора возбуждения сильного действия генератора ТГВ-200.

и гибкой отрицательных обратных связей по напряжениям выхода регулятора (магнитных усилителей). В управляющей обмотке *I* протекает выходной ток нелинейного моста измерительного элемента напряжения, пропорциональный отклонению напряжения генератора ΔU_{Γ} от данного значения $U_{в. \Gamma}$ (рис. 102). К цепи обмотки *II* через дифференцирующую цепь C_{II} R'_{II} подводится выпрямленное напряжение $k_1 U_{\Gamma}$ (где k_1 — коэффициент пропорциональности), пропорциональное напряжению генератора.

Из схемы, приведенной на рис. 103, видно, что ток в обмотке *II* в этом случае определяется дифференциальным уравнением

$$k_1 \frac{R'_{II} C_{II}}{R'_{II} + R''_{II} + R_{II}} \frac{dU_{\Gamma}}{dt} = I_{II'} + \frac{R'_{II} (R''_{II} + R_{II}) C}{R'_{II} + R''_{II} + R_{II}} \cdot \frac{dI_{II'}}{dt},$$

где R_{II} — сопротивление управляющей обмотки *II*.

Из этого уравнения видно, что при

$$\frac{R'_{II} (R''_{II} + R_{II}) C}{R'_{II} + R''_{II} + R_{II}} \frac{dI_{II'}}{dt} \ll I_{II'}$$

ток $I_{II'}$ в обмотке *II* примерно пропорционален первой производной от напряжения U_{Γ} . К обмотке *III* через аналогичную дифференцирующую цепь C_f R'_f подводится напряжение U_f , пропорциональное частоте и снимаемое с выхода специального блока преобразования частоты *БЧ*. При таком питании обмотки *III* ток в ней $I_{f'}$ примерно пропорционален первой производной от частоты $\frac{df}{dt}$.

Суммарная намагничивающая сила управляющих обмоток магнитного усилителя определяется суммой трех слагаемых, соответственно пропорциональных отклонению напряжения генератора ΔU_{Γ} , первой производной от напряжения генератора $\frac{dU_{\Gamma}}{dt}$ и первой производной от частоты $\frac{df}{dt}$. Таким образом, выходной ток регулятора пропорционален сумме этих слагаемых и, следовательно, регулятор реагирует на величины ΔU_{Γ} , $\frac{dU_{\Gamma}}{dt}$, $\frac{df}{dt}$.

Для стабильности характеристик магнитного усилителя в нем предусмотрена жесткая отрицательная обратная связь по выходному напряжению усилителя, создаваемая при подключении управляющей обмотки *IV* к выходным зажимам усилителей $У_p$ (через сопротивление $R_{ж. p}$) и $У_{\phi}$ (через сопротивление $R_{ж. \phi}$).

Статические фазорегуляторы ΦC_p и ΦC_{ϕ} настроены так, что при нормальных эксплуатационных отклонениях напряжения ток

возбуждения генератора изменяется только за счет тока выпрямителей рабочей группы, а при резких снижениях напряжения вступает в работу и форсировочная группа выпрямителей. Это достигается тем, что в нормальных эксплуатационных режимах форсировочная группа вентиля работает с большими углами регулирования.

Для улучшения качества регулирования, помимо жесткой отрицательной обратной связи, в регуляторе предусматривается гибкая обратная связь, которая создается подключением обмотки IV к выходным зажимам усилителя $У_{\phi}$ через дифференцирующую цепь $R_{г.о.с}$ $C_{г.о.с}$. Чтобы в цепь гибкой обратной связи не поступала переменная составляющая выходного напряжения усилителя $U_{р.ф}$, гибкая обратная связь включается через сглаживающий фильтр r_{ϕ} , c_{ϕ} .

Блок компаундирования по току. Для обеспечения статической характеристики регулирования напряжения в регуляторе возбуждения сильного действия предусмотрен блок компаундирования по току (БКТ). Схема блока компаундирования по току и схема включения его в измерительные цепи регулятора изображена на рис. 104.

Блок компаундирования по току состоит из двух промежуточных трансформаторов тока $ПТТ_A$ и $ПТТ_C$ и активных сопротивлений R , включаемых в цепи вторичных обмоток трансформатора напряжения $TН$. Зажимы АРВ 1—3 являются зажимами первичной обмотки разделительного трансформатора T_1 измерительного элемента (рис. 101).

Можно показать, что при таком включении блока компаундирования по току напряжение прямой последовательности на зажимах 1—3

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{N_u} \left(U_{г1} + j \frac{\sqrt{3} N_u R}{N_i N_{т.н}} I_{г1} \right),$$

где $U_{г1}$ и $I_{г1}$ — прямые последовательности напряжения и тока генератора;

N_u , N_i , $N_{т.н}$ — коэффициенты трансформации трансформаторов $TН$, $ТТ$ и $ТТП$.

Если $U_{г1} \gg \frac{\sqrt{3} N_u R}{N_i N_{т.н}} I_{г1}$, величину напряжения U_1 можно определить по выражению

$$U_1 = \frac{1}{N_u} \left(U_{г1} + \frac{\sqrt{3} N_u R}{N_{г1} N_{т.н}} I_{г1р} \right),$$

где $I_{г1р}$ — реактивная составляющая тока прямой последовательности.

При выпрямлении трехфазного напряжения выпрямителями BC_1 , включенными по схеме Ларионова (рис. 101), в случае относительно небольшой несимметрии, что в данном случае справедливо, среднее значение выпрямленного напряжения пропорционально напряжению прямой последовательности.

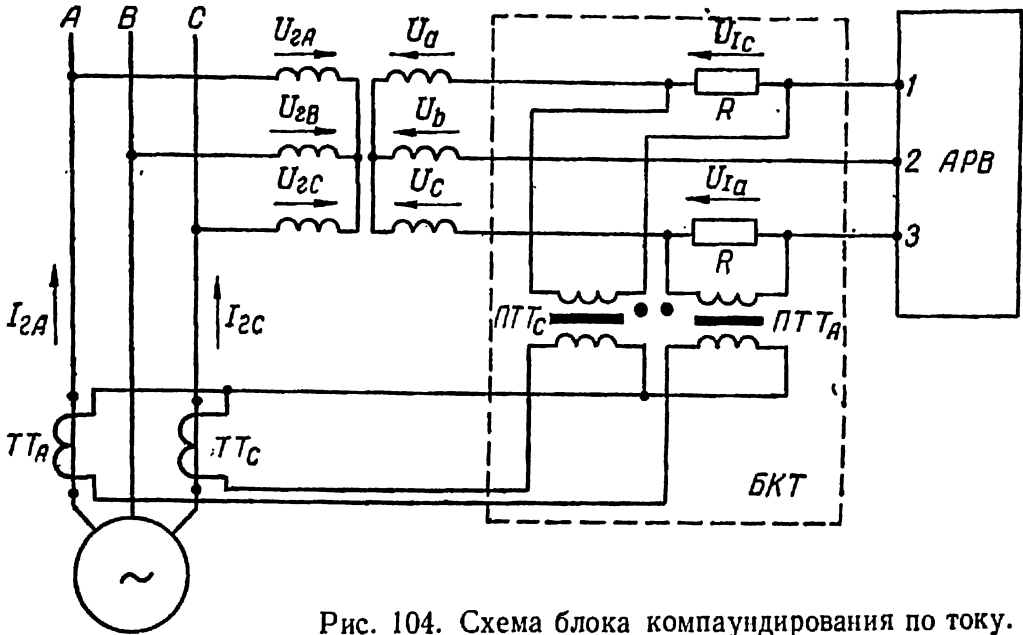


Рис. 104. Схема блока компаундирования по току.

Таким образом, при наличии блока компаундирования по току к измерительному элементу напряжения подводится выпрямленное напряжение, пропорциональное сумме напряжения генератора прямой последовательности и некоторого напряжения, пропорционального реактивной составляющей тока генератора прямой последовательности. В этом случае регулятор имеет статическую характеристику регулирования по реактивному току. Величина статизма регулируется сопротивлением R .

§ 8. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

При любом изменении тока возбуждения синхронного генератора, работающего параллельно с другими генераторами, изменяется его реактивная мощность. Поэтому вопросы автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов

неразрывно связаны с вопросами регулирования и распределения реактивной мощности в энергосистемах.

Поток реактивной энергии через линию электропередачи определяется в основном разностью уровней напряжений в начале и конце линии. Распределение перетоков реактивной энергии по линиям передач энергосистемы определяется уровнями напряжений в различных ее точках.

Эти уровни напряжений в значительной степени зависят от действия систем АРВ.

Потоки реактивной энергии вызывают дополнительные активные потери в оборудовании и линиях передачи энергосистемы и, таким образом, задача регулирования и распределения потоков реактивной энергии тесно связана с вопросами экономичности работы энергосистем.

Экономичность работы энергосистемы зависит в основном от режима ее работы по активной нагрузке, однако вследствие неправильного ведения режима системы по реактивной нагрузке может значительно удорожаться производство электроэнергии и снизиться надежность работы системы в целом. Поэтому вопросам выбора оптимального распределения реактивных мощностей между отдельными станциями и линиями передачи и автоматизации ведения режима энергосистемы по реактивной нагрузке в настоящее время уделяется большое внимание. Эти вопросы должны решаться комплексно с учетом некоторых факторов, определяющих работу энергетических систем [33]. Рассмотрим только вопросы автоматического регулирования и распределения реактивной нагрузки между генераторами одной станции.

Отстройка регулирования реактивной мощности от регулирования активной нагрузки. Так как при параллельной работе величина реактивных составляющих токов синхронных генераторов определяется величиной их токов возбуждения, то реактивные нагрузки отдельных генераторов определяются характеристиками регулирования регуляторов напряжения.

Как уже указывалось (рис. 99), характеристиками регулирования регулятора возбуждения определяется зависимость между величиной регулируемого напряжения и полным током генератора при заданном коэффициенте мощности.

Пусть регулятор возбуждения настроен так, что его характеристика регулирования для некоторого значения коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ изображается прямой I (рис. 105). В этом случае напряжение на выводах генератора зависит от величины его активной нагрузки и при изменении активной мощности генератора

будет изменяться его реактивная мощность. Например, если для некоторой активной нагрузки генератора и коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ напряжение на его выводах и ток определялись величинами U_1 и I_1 , то при изменении активной мощности генератора (активной составляющей тока) полный ток, коэффициент мощности и напряжение генератора примут новые значения U_2 , I_2 и $\cos \varphi_2$.

В этом случае зависимость между напряжением U_2 и полным током генератора I_2 определяется точкой на характеристике регулирования, соответствующей новому значению коэффициента мощности $\cos \varphi_2$ (прямая 2 на рис. 105). В общем случае, если регулятор возбуждения не настроен определенным образом, реактивные составляющие токов генератора и реактивные мощности при различных значениях активной нагрузки будут неодинаковыми, т. е. $I_1 \sin \varphi_1 \neq I_2 \sin \varphi_2$.

Для экономичной и надежной работы энергетических систем регулирование и распределение активной нагрузки между генераторами и станциями, которое осуществляется воздействием на первичные двигатели, должны производиться в зависимости от режима работы системы и других факторов. Вопросы регулирования и распределения активной нагрузки между генераторами и станциями будут подробно рассмотрены в гл. 4.

Оптимальные регулирование и распределение между генераторами реактивной мощности определяются иными закономерностями, поэтому целесообразно независимо регулировать активную и реактивную нагрузки генератора. Для независимого регулирования и распределения между генераторами реактивной нагрузки необходима специальная настройка регуляторов возбуждения, при которой величина регулируемого напряжения для любых коэффициентов мощности зависит только от реактивной составляющей тока. В этом случае семейство характеристик регулирования, построенных в координатах напряжение — полный ток генератора для различных коэффициентов мощности, преобразуется в одну прямую (кривую), построенную в координатах напряжение — реактивная составляющая тока генератора.

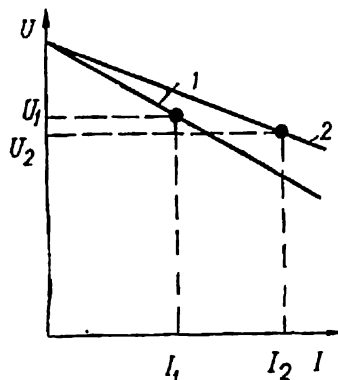


Рис. 105. Характеристики регулирования напряжения при различных активных нагрузках генератора и отсутствии отстройки регулятора от изменений активной нагрузки.

Характеристики регулирования в координатах напряжение — реактивный ток генератора. Рассмотрим семейство характеристик регулирования в координатах напряжение — полный ток генератора при различных коэффициентах мощности (рис. 106): $\cos \varphi_0$, $\cos \varphi_1$, $\cos \varphi_2$, $\cos \varphi_3$, $\cos \varphi'_1$, $\cos \varphi'_2$, $\cos \varphi'_3$. Чтобы при изменении активной нагрузки генератора не изменялась его реактивная мощность, напряжение генератора не должно зависеть от активной составляющей тока генератора.

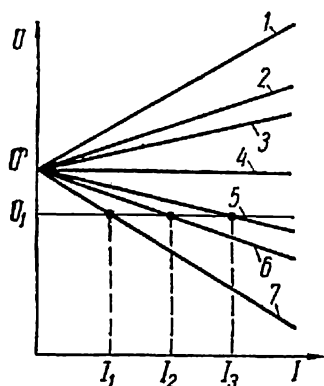


Рис. 106. Характеристики регулирования напряжения при различных коэффициентах мощности генератора.

Напряжение и активная составляющая тока генератора независимы, если для чисто активной нагрузки генератора характеристика регулирования астатическая, т. е. при условии, что прямая 4 на рис. 106 соответствует коэффициенту мощности генератора $\cos \varphi_0 = 1$. В этом случае характеристики 5—7 с положительными коэффициентами статизма соответствуют индуктивным коэффициентам мощности, а характеристики 1—3 с отрицательными коэффициентами статизма — емкостным.

Семейство характеристик регулирования (рис. 106) преобразуется в координатах напряжение U — реактивный ток генератора I_p в одну прямую, если для определенного значения напряжения (например, U_1) реактивные составляющие тока, найденные по любой характеристике регулирования, будут иметь одно и то же значение, т. е.

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = I_2 \sin \varphi_2 = I_3 \sin \varphi_3 = \dots = I_n \sin \varphi_n. \quad (3,25)$$

Если выполняется условие (3,25), значение реактивного тока, соответствующее определенному значению напряжения, можно найти по любой характеристике регулирования (рис. 106) и, следовательно, построить характеристику регулирования в координатах U , I_p . При построении характеристики необходимо учитывать, что емкостным коэффициентам мощности соответствует отрицательное значение реактивного тока I_p .

Примерная характеристика регулирования в координатах U , I_p изображена на рис. 107. В большинстве случаев эта характеристика практически линейна. В дальнейшем характеристику регулирования в координатах U , I_p будем называть просто характеристикой регулирования без специальных оговорок. Согласно

рис. 107 уравнение характеристики регулирования имеет вид

$$U = U' - k_c I_p, \quad (3,26)$$

где U — напряжение на выводах генератора при определенном значении реактивного тока I_p ;

U' — напряжение на выводах генератора при холостом ходе или активной нагрузке ($\cos \varphi = 1$);

k_c — абсолютное значение коэффициента статизма регулятора, *ом*.

Величина коэффициента статизма

$$k_c = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{tg} \alpha,$$

где m_U — масштаб напряжений, *в*;

m_I — масштаб тока, *а*.

Соотношение между соответствующими изменениями напряжения и реактивного тока согласно выражению (3,26) и рис. 107 определяется уравнением

$$\Delta U + k_c \Delta I_p = 0. \quad (3,27)$$

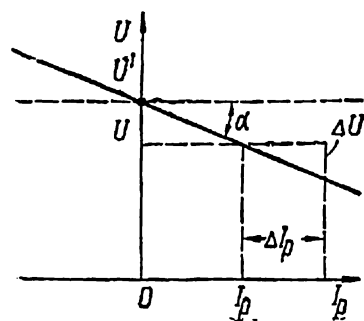


Рис. 107. Характеристика регулирования напряжения в координатах U, I_p .

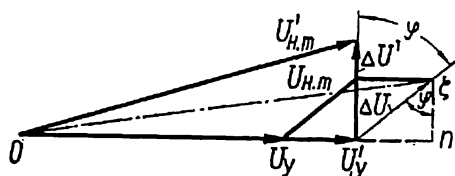
Настройка электромагнитного корректора напряжения, при которой характеристики регулирования определяются уравнением (3,26), достигается выбором схемы соединений обмоток разделительного трансформатора PT_2 (см. рис. 39). Обмотки трансформатора PT_2 соединяются так, что для коэффициента мощности генератора $\cos \varphi = 1$ его вторичное фазовое напряжение ΔU опережает по фазе на $\frac{\pi}{2}$ напряжение U_y на вторичных зажимах установочного автотрансформатора. Векторная диаграмма напряжений, действующих в фазе первичной обмотки насыщенного трансформатора HT измерительного элемента корректора в этом случае показана на рис. 108 сплошными стрелками.

Из векторной диаграммы (рис. 108) видно, что при $\Delta U \ll U_y$ (§ 5 гл. 3) и $\cos \varphi = 1$ фазовое напряжение первичной обмотки насыщенного трансформатора $U'_{н.т}$ практически равно напряжению на установочном автотрансформаторе U_y и не зависит от величины ΔU . Так как напряжение ΔU пропорционально току генератора, то при чисто активной нагрузке напряжение на измерительном элементе электромагнитного корректора не зависит от тока. Поэтому напряжение генератора, регулируемое корректором, в этом

случае остается постоянным в пределах его естественной характеристики регулирования для любого значения активного тока генератора, в том числе и при холостом ходе.

Если $\cos \varphi < 1$ и ток генератора отстает по фазе от напряжения на угол φ , то, так как фаза вторичного напряжения трансформатора PT_2 жестко определяется фазой тока генератора, напряжение ΔU также будет отставать по фазе от напряжения $\Delta U'$ на угол φ .

В этом случае напряжение фазы первичной обмотки насыщенного трансформатора HT определяется комплексом $\dot{U}_{н.т}$ (штриховая прямая на рис. 108) и его действующее значение с достаточной точностью в масштабе векторной диаграммы определяется отрезком on , т.е.



$$U_{н.т} = U'_y + \Delta U \sin \varphi. \quad (3,28)$$

Рис. 108. Векторная диаграмма напряжений, действующих в первичной обмотке трансформатора и измерительного элемента электромагнитного корректора напряжения.

Если движки автотрансформатора остались в том же положении, что и при $\cos \varphi = 1$, то $U_{н.т} > U'_{н.т}$.

При увеличении напряжения на насыщенном трансформаторе HT корректор подействует в сторону уменьшения напряжения генератора до такой величины, для которой напряжение $U_{н.т}$ вновь станет примерно равным величине $U'_{н.т}$. Вследствие уменьшения напряжения генератора понизится напряжение на выходных зажимах установочного автотрансформатора до величины U_y (рис. 108).

Напряжение $U'_{н.т}$ примерно равно напряжению U'_y , которое действует на выходных зажимах установочного автотрансформатора при чисто активной нагрузке или холостом ходе генератора. Следовательно, для установившегося режима после воздействия корректора на возбуждение генератора уравнение (3,28) примет вид

$$U'_{н.т} = U'_y = U_y + \Delta U \sin \varphi. \quad (3,29)$$

Если положение движков автотрансформатора остается неизменным, напряжение U'_y пропорционально напряжению генератора U' в случае чисто активной нагрузки или холостого хода, а напряжение U_y — напряжению генератора U при данном коэффициенте мощности, т. е.

$$\left. \begin{aligned} U'_y &= k_1 U'; \\ U_y &= k_1 U, \end{aligned} \right\} \quad (3,30)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности, определяемый коэффициентом трансформации трансформатора напряжения корректора.

Напряжение ΔU пропорционально току генератора:

$$\Delta U = k_2 I, \quad (3,31)$$

где k_2 — коэффициент, имеющий размерность сопротивления и зависящий от положения дополнительных движков установочного реостата компаундирования, а также коэффициентов трансформации тока и разделительного трансформатора PT_2 .

Подставив выражения (3,30) и (3,31) в уравнение (3,29) и учитывая, что $I \sin \varphi = I_p$, получим уравнение характеристики регулирования в виде

$$U = U' - k_c I_p,$$

где $k_c = \frac{k_2}{k_1}$ — абсолютное значение коэффициента статизма.

Полученное уравнение полностью соответствует уравнению характеристики регулирования (3,26) и, следовательно, при настройке электромагнитного корректора с помощью устройства установки статизма обеспечивается независимое регулирование реактивной мощности генератора.

Аналогично можно показать, что, если схема соединений разделительного трансформатора такая, что для $\cos \varphi = 1$ напряжение ΔU отстает по фазе от напряжения U_y , то уравнение характеристики регулирования примет вид

$$U = U' + k_c I_p. \quad (3,32)$$

Следовательно, при индуктивном режиме с увеличением реактивного тока напряжение на выводах генератора будет повышаться, а при емкостном режиме — понижаться. В этом случае электромагнитный корректор осуществляет регулирование с отрицательным статизмом по реактивному току.

Величина статизма в обоих случаях регулируется перемещением дополнительных движков установочного реостата компаундирования, и в частном случае регулятор может иметь астатическую настройку.

В регуляторе с управляемым фазовым компаундированием настройка, обеспечивающая выполнение условия (3,25), при котором удовлетворяется уравнение (3,26), производится с помощью внешних обратных связей по току генератора и току выхода регулятора.

С помощью внешних обратных связей можно получить любую настройку регулятора: статическую с различными знаками статизма и астатическую. При статической характеристике регулирования каждому значению напряжения на выводах генератора

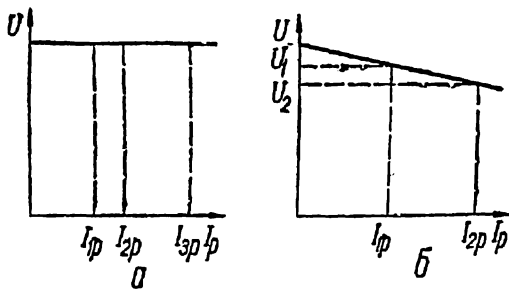


Рис. 109. Характеристики регулирования напряжения.

соответствует вполне определенное значение реактивной составляющей тока (рис. 109, б). Если регулятор имеет астатическую настройку, то для определенного значения напряжения реактивная составляющая тока может иметь любое произвольное значение в пределах, определяемых параметрами генератора (рис. 109, а).

Регулирование реактивной

мощности генератора, работающего на шины неизменного напряжения. При работе генератора на шины неизменного напряжения во всех режимах напряжение на его выводах остается постоянным и равным напряжению шин $U_{ш}$. В этом случае в нормальных эксплуатационных режимах система АРВ не регулирует напряжение, а регулирует только реактивную мощность.

Так как при астатической характеристике регулирования, настроенной на определенное напряжение, реактивный ток генератора может принимать произвольное значение, то в этом случае регулировать реактивную нагрузку генератора нельзя. Регулирование реактивной мощности генератора в этом случае возможно только при статической настройке регулятора напряжения.

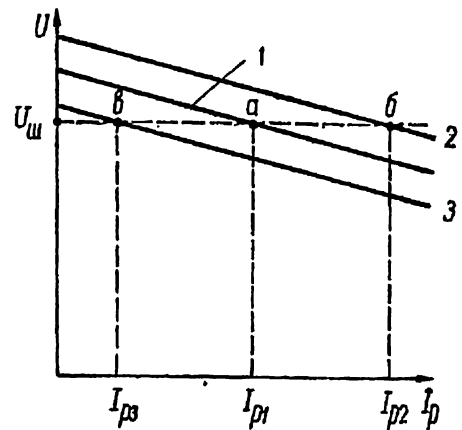


Рис. 110. Характеристики регулирования напряжения при работе генератора на шины неизменного напряжения.

Предположим, что статическая характеристика регулятора возбуждения генератора представляет собой прямую 1 на рис. 110. При такой настройке регулятора возбуждения и отсутствии зоны нечувствительности реактивный ток генератора имеет значение I_{p1} и определяется точкой *a* пересечения обобщенной характеристики 1 с горизонтальной прямой $U = U_{ш}$:

Если воздействовать на установочный автотрансформатор регулятора возбуждения (электромагнитного корректора) в сторону увеличения тока возбуждения генератора, то характеристика сместится параллельно вверх (прямая 2 на рис. 110). В этом случае реактивный ток генератора увеличится до значения I_{p2} и будет определяться точкой пересечения b характеристики 2 с прямой $U = U_{ш}$. При воздействии на установочный автотрансформатор регулятора в противоположную сторону характеристика регулирования сместится вниз (прямая 3), и реактивный ток генератора снизится до значения I_{p3} .

Таким образом, реактивный ток (реактивная мощность) отдельного генератора, работающего на шины неизменного напряжения, регулируется воздействием на установочный автотрансформатор регулятора возбуждения. Это воздействие может производиться автоматически или вручную.

Зона нечувствительности регулятора вносит погрешность в регулирование реактивной мощности. При наличии зоны нечувствительности регулятора и неизменном напряжении генератора $U = U_{ш}$ величина его реактивного тока может быть любой в диапазоне $2\Delta I_{p,н}$, ограниченном точками пересечения a и b горизонтальной прямой $U = U_{ш}$ и прямыми 1' и 1'', определяющими границы зоны нечувствительности регулятора $\pm\Delta U_{н}$ (рис. 111). величиной $\pm\Delta I_{p,н}$ определяется погрешность регулирования реактивного тока (реактивной нагрузки) генератора, обусловленная наличием зоны нечувствительности регулятора возбуждения. Величина погрешности возрастает с увеличением зоны нечувствительности.

Из рис. 111 видно, что при уменьшении статизма регулятора (прямая 2) и прежней зоны нечувствительности $\Delta U_{н}$ (прямые 2 и 2') погрешность регулирования реактивного тока $\Delta I_{2p,н}$, определяемая точками a_2 и b_2 , также возрастает по сравнению с погрешностью $\Delta I_{1p,н}$.

Автоматическое регулирование и распределение реактивной нагрузки между генераторами, включенными на общие шины. Рассмотрим работу группы генераторов, включенных непосредственно на общие шины и снабженных автоматическими регуляторами возбуждения АРВ (рис. 112.)

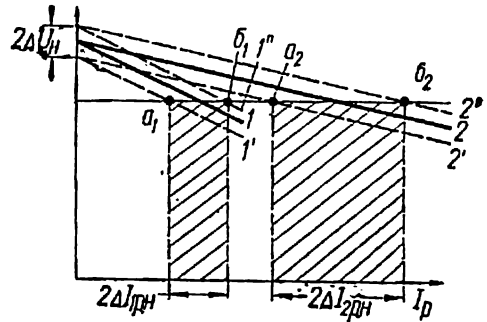


Рис. 111. Характеристики регулирования напряжения при наличии зоны нечувствительности.

Предположим, что все регуляторы не имеют зоны нечувствительности и обладают статическими характеристиками регулирования с различными коэффициентами статизма k_{ci} и настройками по напряжениям U'_i при холостом ходе или активной нагрузке (рис. 113).

Для некоторого напряжения на шинах $U_{ш1}$ реактивные (индуктивные) токи каждого генератора имеют определенные значения:

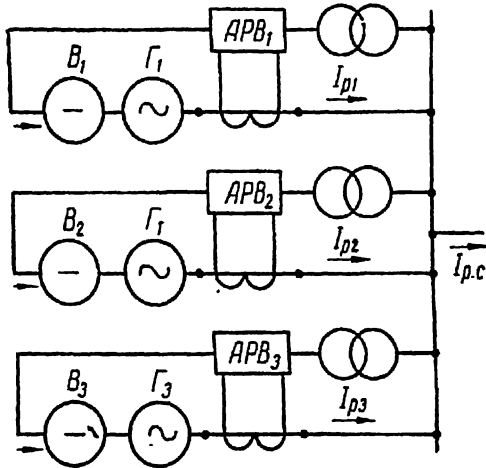


Рис. 112. Схема включения АРВ группы генераторов, работающих на общие шины.

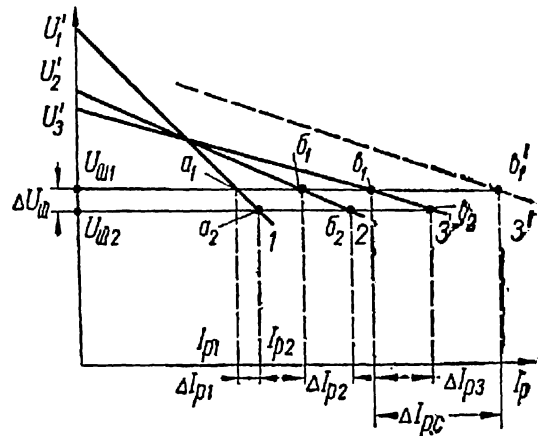


Рис. 113. Характеристики регулирования напряжения генераторов, включенных непосредственно на общие шины.

ния: $I_{р1}$, $I_{р2}$, $I_{р3}$, ..., $I_{рn}$ и суммарный реактивный ток группы n генераторов

$$I_{р.с} = \sum_{i=1}^n I_{рi}.$$

Если суммарная реактивная нагрузка группы генераторов увеличится, то возрастет и суммарный реактивный ток группы генераторов на величину $\Delta I_{р.с}$. Вследствие увеличения реактивного тока уменьшится напряжение на шинах, регуляторы возбуждения придут в действие, увеличивая токи возбуждения генераторов и восстанавливая напряжение на их выводах. Так как регуляторы в рассматриваемом случае имеют статические характеристики, то после окончания процесса регулирования напряжение на шинах не восстановится до прежнего уровня $U_{ш1}$, а достигнет несколько меньшего значения $U_{ш2}$.

Таким образом, регуляторы со статическими характеристиками регулирования не поддерживают постоянной величину напряже-

ния на шинах станции и в этом случае при изменении реактивного тока на $\Delta I_{p.c}$ изменится напряжение на ΔU .

Из рис. 113 видно, что, если напряжение изменилось на величину ΔU , изменения реактивных токов генераторов ΔI_{pi} имеют вполне определенные значения. Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^n \Delta I_{pi} = \Delta I_{p.c}. \quad (3,33)$$

Легко видеть, что чем меньше статизм регулятора, тем на большую величину изменяется реактивный ток генератора и, следовательно, тем большую часть приращения суммарного реактивного тока генераторов он компенсирует. Покажем, что приращение суммарного реактивного тока (реактивной нагрузки) группы генераторов (станций), работающих на общие шины, распределяется между генераторами обратно пропорционально коэффициентам статизма их регуляторов возбуждения. Для этого воспользуемся уравнением характеристики регулирования в приращениях напряжения и реактивного тока (3,27).

Так как изменение напряжения ΔU одинаково для всех генераторов, включенных на общие шины, то уравнения характеристик регулирования для каждого регулятора можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \Delta U + k_{c1} \Delta I_{p1} &= 0; \\ \Delta U + k_{c2} \Delta I_{p2} &= 0; \\ \Delta U + k_{ci} \Delta I_{pi} &= 0; \\ \Delta U + k_{cn} \Delta I_{pn} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3,34)$$

Разделив каждое из уравнений (3,34) на соответствующий коэффициент статизма k_{ci} и сложив их с учетом выражения (3,33), получим

$$\Delta U = - \frac{\Delta I_{p.c}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_{ci}}}; \quad (3,35)$$

$$\Delta I_{pi} = \frac{\Delta I_{p.c}}{k_{ci} \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_{ci}}}. \quad (3,36)$$

Из выражения (3,36) видно, что изменение реактивного тока l -го генератора ΔI_{r_l} при изменении суммарного реактивного тока $\Delta I_{p.c}$ обратно пропорционально коэффициенту статизма k_{cl} регулятора возбуждения.

Уравнение (3,35) подтверждает, что напряжение на общих шинах генераторов с изменением реактивного тока при статических характеристиках регулирования не остается постоянным, причем изменение напряжения ΔU тем меньше, чем меньше величины коэффициентов статизма регуляторов.

Таким образом, регуляторы возбуждения со статическими характеристиками регулирования автоматически пропорционально распределяют реактивные токи (реактивные мощности) между генераторами, включенными на общие шины, но напряжение на шинах при этом изменяется в пределах, определяемых коэффициентами статизма регуляторов. Необходимо учитывать, что зона нечувствительности регуляторов вносит погрешность в закон распределения реактивных токов (3,36), которая зависит от величины зоны нечувствительности и коэффициентов статизма.

Чтобы восстановить напряжение до значения $U_{ш1}$ (которое было на шинах до изменения реактивного тока), необходимо воздействовать на установочный автотрансформатор одного или нескольких регуляторов и сместить характеристику (характеристики) регулирования вдоль оси реактивного тока в сторону его увеличения. Если, например, сместить характеристику регулирования регулятора третьего генератора вправо на величину $\Delta I_{p.c}$ (штриховая прямая $3'$ на рис. 113), то все изменение реактивного тока $\Delta I_{p.c}$ будет скомпенсировано этим генератором, реактивные токи остальных генераторов не изменятся, и, следовательно, напряжение на шинах генератора останется на прежнем уровне $U_{ш1}$. Напряжение на шинах останется также неизменным, если сместить вправо характеристики нескольких регуляторов на такие значения, чтобы их суммарное смещение равнялось изменению суммарного тока $\Delta I_{p.c}$.

Напряжение можно обеспечить неизменным и при астатической настройке одного или нескольких регуляторов. Если астатическую настройку имеет только один регулятор, напряжение на шинах поддерживается неизменным, реактивные токи всех генераторов, регуляторы которых имеют статические характеристики регулирования, не изменяются, а изменение суммарного тока компенсируется только генератором с астатически настроенным регулятором возбуждения. Если астатическую настройку имеют регуляторы двух и больше генераторов, то напряжение также под-

держивается неизменным, но распределение реактивных токов между этими генераторами будет неопределенным. Поэтому нельзя применять несколько регуляторов с астатическими характеристиками регулирования при работе генераторов на общие шины без специальных устройств автоматического распределения реактивных токов (нагрузок).

Регулирование и распределение реактивной нагрузки между генераторами, включенными на общие шины через повысительные трансформаторы. При работе генераторов на общие шины через повысительные трансформаторы (рис. 114) напряжения на выводах отдельных генераторов в общем случае различны. Если пренебречь активным падением напряжения в трансформаторе, то векторная диаграмма блока генератор—трансформатор имеет вид, изображенный на рис. 115. Диаграмма построена для величин, приведенных к вторичной обмотке высокого напряжения.

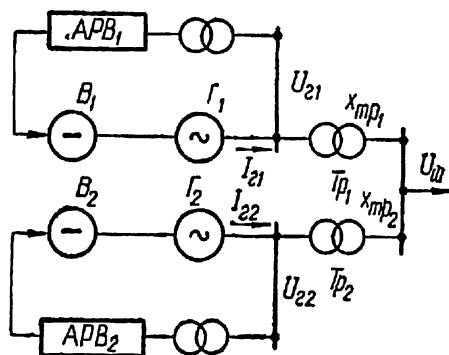


Рис. 114. Схема включения АРВ генераторов, подключенных к общим шинам через повысительные трансформаторы.

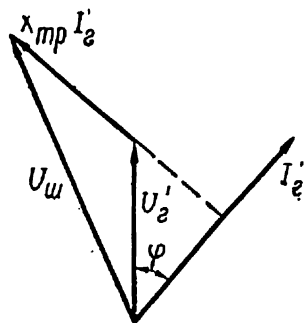


Рис. 115. Упрощенная векторная диаграмма блока генератор — трансформатор.

Учитывая, что падение напряжения в трансформаторе значительно меньше приведенного напряжения генератора $U'_г$, из векторной диаграммы (рис. 115) легко определить зависимость между напряжением на выводах генератора и на шинах высокого напряжения

$$U_{ш} = U'_г - I'_{г.р} x_t, \quad (3,37)$$

где $I'_{г.р}$ — приведенное значение тока генератора; x_t — реактивное сопротивление трансформатора.

Из уравнения (3,37) видно, что в блоке генератор — трансформатор зависимость между напряжением шин и током генератора определяется уравнением, аналогичным уравнению статической характеристики регулирования.

Таким образом, если даже генератор снабжен регулятором с астатической настройкой, при которой поддерживается $U'_г = \text{const}$, характеристика регулирования блока генератор—транс-

форматор в целом является статической, причем коэффициент статизма этой характеристики равен сопротивлению трансформатора x_T .

В этом случае при астатической настройке регуляторов напряжение на шинах с изменением реактивного тока не будет оставаться постоянным, а изменение суммарного реактивного тока будет распределяться между отдельными блоками обратно пропорционально сопротивлениям трансформаторов x_T .

Относительные сопротивления трансформаторов достигают величины порядка 10%, вследствие чего изменения напряжения на шинах высокого напряжения могут достигать такой же величины относительно напряжения холостого хода. Для уменьшения изменения напряжения на шинах высокого напряжения целесообразно производить статическую настройку регулятора возбуждения с отрицательным статизмом. В этом случае напряжение на генераторе определяется равенством (3,32) (рис. 116), а напряжение на шинах

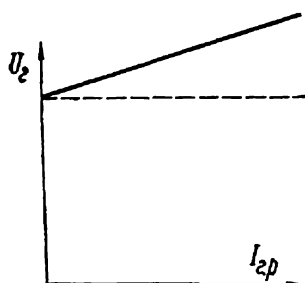


Рис. 116. Характеристика регулирования напряжения с отрицательным статизмом.

$$U_{ш} = U'_r - (x_T - k'_c) I_{г. р}, \quad (3,38)$$

где k'_c — коэффициент статизма регулятора, приведенный к напряжению $U_{ш}$.

Из уравнения (3,38) видно, что при отрицательном статизме k_c характеристики регулирования регулятора возбуждения генератора коэффициент статизма характеристики регулирования блока равен $x_T - k'_c$, т. е. он уменьшается и, следовательно, изменения напряжения на шинах высокого напряжения, вызванные изменением реактивного тока, уменьшаются.

Уменьшение изменения напряжения на шинах высокого напряжения объясняется тем, что регулятор, имеющий статическую характеристику с отрицательным статизмом, своим действием частично компенсирует падение напряжения в трансформаторе. Если регулятор настроить так, что $k_c = x_T$, то напряжение на шинах будет поддерживаться постоянным, однако характеристики регулирования блоков при этом становятся астатическими и распределение реактивных нагрузок между ними произвольно.

Компенсация потери напряжения в трансформаторе и линии передачи. Если генератор непосредственно или через повысительный трансформатор питает тупиковую подстанцию, связанную с ним линией передачи (рис. 117), то, пренебрегая активным сопротивлением линии и трансформатора, легко установить зави-

симость между приведенными напряжениями генератора U'_r и шинами подстанции U_n , т. е.

$$U_n = U'_r - (x_T + x_L)I'_{r.p.},$$

где x_L — реактивное сопротивление линии передачи.

Для компенсации потери напряжения в трансформаторе и линии передачи и поддержания, таким образом, неизменного напряжения на шинах приемной подстанции при любой реактивной

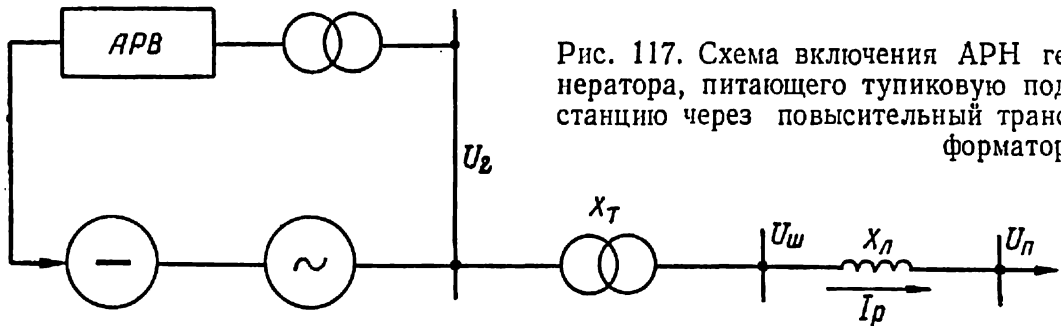


Рис. 117. Схема включения АРН генератора, питающего тупиковую подстанцию через повысительный трансформатор.

нагрузке необходимо иметь статическую настройку регулятора возбуждения с отрицательным коэффициентом статизма

$$k'_c = x_T + x_L. \quad (3,39)$$

Групповое регулирование возбуждения. Для регулирования реактивной мощности в энергосистеме, экономичного распределения потоков реактивной энергии между отдельными станциями и линиями передачи, а также компенсации падений напряжений в линиях и поддержания определенных уровней напряжений в различных точках системы целесообразно регулировать возбуждение отдельных генераторов станции централизованно, т. е. как единого агрегата. Такое регулирование называется групповым.

Применение группового регулирования возбуждения особенно эффективно на многоагрегатных электростанциях с однотипными агрегатами. При групповом регулировании возбуждения устанавливается один общий измерительный орган напряжения, который одновременно воздействует на исполнительные органы системы регулирования возбуждения каждого генератора в отдельности. В этом случае исключается погрешность регулирования, вызванная неидентичностью индивидуальных измерительных органов генераторов, и значительно упрощается необходимая настройка системы регулирования возбуждения станции в целом (астатическая, статическая с различными знаками статизма и др.).

Для экономичного распределения реактивной нагрузки между отдельными генераторами станции система группового регулирования возбуждения дополняется специальным устройством распределения реактивных токов. При однотипных генераторах это устройство уравнивает реактивные токи генераторов независимо от их активных нагрузок.

§ 9. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Устойчивость регулирования напряжения в замкнутых системах регулирования возбуждения синхронных генераторов в значительной степени определяется режимом их работы. В случае изолированной работы генератора условия устойчивости регулирования напряжения в режиме холостого хода оказываются более тяжелыми, чем при работе генератора на нагрузку. Это подтверждается теоретическим анализом и экспериментом и объясняется тем, что при одних и тех же колебаниях тока возбуждения возбудителя колебания напряжения на выводах генератора, работающего на холостом ходу, больше, чем на выводах нагруженного генератора.

Таким образом, при холостом ходе генератора коэффициенты усиления возбудителя и генератора, являющихся звеньями САР возбуждения, больше, чем в случае работы генератора на нагрузку. Следовательно, коэффициент усиления разомкнутой САР возбуждения при холостом ходе генератора больше, чем у нагруженного генератора, и этим объясняется ухудшение условий устойчивости процесса регулирования напряжения на холостом ходу.

Если синхронные генераторы работают параллельно, устойчивость регулирования возбуждения органически связана с электромеханическими переходными процессами, определяющими устойчивость относительного движения параллельно работающих машин станции. Установлено, что в отношении устойчивости регулирования напряжения и устойчивости относительного движения параллельно работающих машин наиболее тяжелым режимом является также холостой ход группы параллельно работающих генераторов, не связанных с системой.

При параллельной работе однотипные генераторы на холостом ходу, изолированные от энергосистемы и снабженные одинаковыми системами АРВ (групповая симметрия группы работающих

машин), можно рассматривать как один эквивалентный генератор, имеющий одну систему АРВ и работающий изолированно в режиме холостого хода. Для некоторых режимов необходимо дополнительно рассматривать устойчивость регулирования напряжения внутри группы параллельно работающих машин [60].

Холостой ход изолированно работающего генератора является наиболее тяжелым в отношении устойчивости регулирования возбуждения, поэтому рассмотрим только этот случай, предполагая, что регулирование осуществляется электромагнитным устройством. Следует учитывать, что необходимые и достаточные условия устойчивости при холостом ходе машин без связи с системой в общем случае всех возможных режимов энергосистемы являются условиями только необходимыми, но не достаточными.

Если группа генераторов работает параллельно с системой через относительно длинную линию передачи, на устойчивость регулирования возбуждения этих генераторов существенно влияют электромеханические процессы, происходящие в системе при изменении возбуждения и активной нагрузки отдельных генераторов и системы в целом. Поэтому возможны такие режимы энергосистем, для которых система АРВ, устойчивая на холостом ходу изолированно работающего генератора, окажется неустойчивой при его параллельной работе с энергосистемой.

В зависимости от способа включения регулятора возбуждения (на отдельную обмотку возбудителя, на основную обмотку, на шунтовой реостат) условия устойчивости АРВ могут быть различными.

Рассмотрим условия устойчивости регулирования напряжения только при включении выхода регулятора на основную обмотку возбудителя (см. рис. 65, а).

Регулирование возбуждения при холостом ходе генератора сводится к регулированию напряжения на выводах статора. Элементная схема САР возбуждения при холостом ходе генератора изображена на рис. 118. Регулятор напряжения АРВ представлен одним эквивалентным элементом, реагирующим только на отклонение регулируемой величины. Составим уравнения отдельных звеньев системы АРВ для малых отклонений регулируемой величины в случае применения электромагнитного регулятора возбуждения.

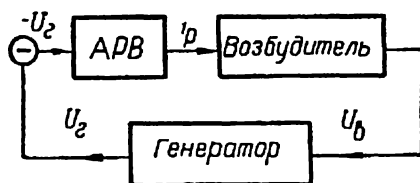


Рис. 118. Элементная схема САР возбуждения при холостом ходе генератора.

Электромагнитный регулятор возбуждения состоит из нескольких элементов, но в отношении динамических свойств его можно представить одним апериодическим звеном. Такое представление достаточно близко к действительности в случае применения таких регуляторов, как электромагнитный корректор напряжения и регулятор с управляемым фазовым компаундированием при холостом ходе генератора, когда отсутствует регулирующее воздействие по току статора.

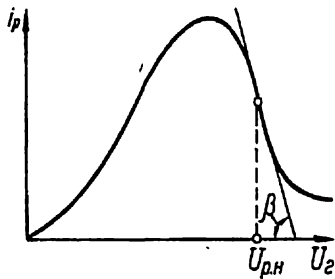


Рис. 119. Характеристика регулятора напряжения.

Таким образом, регулятор возбуждения можно описать уравнением в операторной форме

$$(T_{p.н} p + 1) \Delta i_p = -\gamma_{p.н} \Delta U_G, \quad (3,40)$$

где $T_{p.н}$ — постоянная времени регулятора возбуждения, определяемая в основном постоянной времени магнитного усилителя корректора; ΔU_G , Δi_p — отклонения напряжения генератора и выходного тока регулятора от значений в избранном равновесном режиме.

В качестве равновесного режима принимаем такой режим системы АРВ, при котором напряжение холостого хода генератора равно номинальному значению $U_{г.н.}$

Коэффициент усиления регулятора $\gamma_{p.н.}$, имеющий размерность проводимости, определяется по характеристике регулятора (рис. 119):

$$\gamma_{p.н.} = - \left| \frac{di_p}{dU_G} \right|_{U_{г.н.}} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{tg} \beta_p,$$

где m_U и m_I — масштабы напряжения и тока.

Таким образом, коэффициент усиления регулятора возбуждения пропорционален тангенсу угла наклона касательной к характеристике корректора в точке равновесного режима.

Возбудитель при постоянной скорости вращения якоря также представляется апериодическим звеном, у которого входной величиной является ток регулятора, а выходной — напряжение на щетках возбудителя.

Для составления уравнения возбудителя рассмотрим его принципиальную схему с учетом того, что выход регулятора возбуждения включен на основную обмотку возбудителя (рис. 65, а). Из этой схемы видно, что

$$U_{в.в.} + r_{п.в.} i_{п.в.} = U_B; \quad (3,41)$$

$$i_{ш} = i_{в} - i_{р}; \quad (3,42)$$

$$U_{в. в} = \frac{d\psi_{в}}{dt} + r_{в}i_{в}, \quad (3,43)$$

где $U_{в. в}$ — напряжение на основной обмотке возбуждения возбудителя;

$r_{р. в}, i_{р. в}$ — сопротивление и ток цепи самовозбуждения;

$r_{в}$ — активное сопротивление основной обмотки возбуждения возбудителя;

$\psi_{в}$ — потокосцепление обмотки возбуждения, равное потокосцеплению якоря возбудителя.

Из уравнений (3,41)—(3,43) легко определить зависимость между выходным током регулятора и величинами, характеризующими режим работы возбудителя

$$\frac{d\psi_{в}}{dt} + (r_{в} + r_{р. в}) i_{в} - U_{в} = i_{р. в} i_{р}. \quad (3,44)$$

Если пренебречь активным сопротивлением якоря возбудителя, то при постоянной скорости его вращения можно считать, что напряжение на щетках возбудителя $U_{в}$ прямо пропорционально потокосцеплению $\psi_{в}$:

$$U_{в} = k_{в}\psi_{в}.$$

В этом случае уравнение (3,44) можно записать так:

$$\frac{1}{k_{в}} \frac{dU_{в}}{dt} + (r_{в} + r_{р. в}) i_{в} - U_{в} = r_{р. в} i_{в}, \quad (3,45)$$

где $k_{в}$ — коэффициент пропорциональности.

Зависимость между напряжением $U_{в}$ и током $i_{в}$ определяется нагрузочной характеристикой $U_{в} = f(i_{в})$ при $R_{р} = \text{const}$ (рис. 120) и, следовательно, дифференциальное уравнение возбудителя (3,45) является нелинейным. Для линеаризации этого уравнения преобразуем его и введем малые отклонения соответствующих величин от значений в избранном равновесном режиме. В этом случае имеем

$$\left. \begin{aligned} U_{в} &= U_{в0} + \Delta U_{в}; \\ i_{р} &= i_{р0} + \Delta i_{р}; \\ i_{в} &= i_{в0} + \Delta i_{в}, \end{aligned} \right\} \quad (3,46)$$

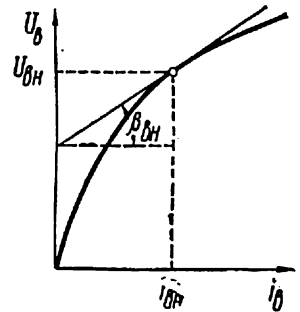


Рис. 120. Нагрузочная характеристика возбудителя.

причем

$$(r_{\text{в}} + r_{\text{р. в}}) i_{\text{в0}} - U_{\text{в0}} = r_{\text{р. в}} i_{\text{р0}}. \quad (3,47)$$

Подставив выражения (3,46) в (3,45) с учетом формулы (3,47), получим уравнение возбудителя для малых отклонений

$$\frac{1}{k_{\text{в}}} \cdot \frac{d(\Delta U_{\text{в}})}{dt} + (r_{\text{в}} + r_{\text{р. в}}) \Delta i_{\text{в}} - \Delta U_{\text{в}} = r_{\text{р. в}} \Delta i_{\text{р}}. \quad (3,48)$$

По нагрузочной характеристике возбудителя $U_{\text{в}} = F_{\text{в}}(i_{\text{в}})$ определяем

$$\Delta i_{\text{в}} = \frac{\Delta U_{\text{в}}}{\left| \frac{dU_{\text{в}}}{di_{\text{в}}} \right|_{\text{н}}} = \frac{\Delta U_{\text{в}}}{\alpha_{\text{в}}}, \quad (3,49)$$

где

$$\alpha_{\text{в}} = \left| \frac{dU_{\text{в}}}{di_{\text{в}}} \right|_{\text{н}} = \frac{m'_{\text{U}}}{m'_{\text{I}}} \operatorname{tg} \beta_{\text{в. н}}, \quad (3,50)$$

m'_{U} и m'_{I} — масштабы напряжений и тока.

Из уравнения (3,50) видно, что величина $\alpha_{\text{в}}$, имеющая размерность сопротивления, пропорциональна тангенсу угла наклона касательной к нагрузочной характеристике возбудителя в точке, характеризующей избранный равновесный режим (рис. 120). Напряжение $U_{\text{в}}$ возбудителя при холостом ходе генератора меньше, чем при работе его на нагрузку, поэтому величина $\alpha_{\text{в}}$ для генератора, работающего без нагрузки, больше, чем для нагруженного генератора.

Подставив выражение (3,49) в (3,48), после некоторых преобразований получим линеаризованное дифференциальное уравнение возбудителя в операторной форме

$$(T_{\text{в}} p + 1) \Delta U_{\text{в}} = \gamma_{\text{в}} \Delta i_{\text{р}}, \quad (3,51)$$

где

$$T_{\text{в}} = \frac{1}{k_{\text{в}}} \cdot \frac{\alpha_{\text{в}}}{r_{\text{в}} + r_{\text{р. в}} - \alpha_{\text{в}}}; \quad (3,52)$$

$$\gamma_{\text{в}} = \frac{r_{\text{р. в}} \alpha_{\text{в}}}{r_{\text{в}} + r_{\text{р. в}} - \alpha_{\text{в}}}. \quad (3,53)$$

Величина $T_{\text{в}}$, имеющая размерность времени, является постоянной времени возбудителя. Величина $\gamma_{\text{в}}$ имеет размерность сопротивления и представляет собой коэффициент усиления возбудителя в САР напряжения.

Генератор в системе регулирования возбуждения при постоянной скорости вращения ротора описывается дифференциальным уравнением первого порядка

$$\frac{d\psi_r}{dt} + R_r i_r = U_b, \quad (3,54)$$

где ψ_r — потокосцепление ротора генератора;
 i_r , R_r — ток и сопротивление обмотки ротора.

Так как напряжение холостого хода генератора пропорционально потокосцеплению ψ_r

$$U_r = k_r \psi_r,$$

то уравнение (3,54) можно записать в виде

$$\frac{1}{R_r} \cdot \frac{dU_r}{dt} + R_r i_r = U_b, \quad (3,55)$$

где k_r — коэффициент пропорциональности.

Зависимость между напряжением U_r и током I_r определяется характеристикой холостого хода генератора (рис. 121) и, следовательно, уравнение (3,55) является нелинейным.

Переходя к малым отклонениям соответствующих величин от значений в избранном равновесном режиме, как и для возбудителя, получим линеаризованное уравнение генератора в операторной форме

$$(T_r p + 1) \Delta U_r = \gamma_r \Delta U_b, \quad (3,56)$$

где

$$T_r = \frac{\alpha_r}{k_r R_r}; \quad (3,57)$$

$$\gamma_r = \frac{\alpha_r}{R_r}; \quad (3,58)$$

$$\alpha_r = \left[\frac{dE_r}{dI_r} \right]_H = \frac{m_U''}{m_I''} \operatorname{tg} \beta_{r.H}; \quad (3,59)$$

m_U'' и m_I'' — масштабы напряжения и тока.

Величина α_r пропорциональна тангенсу угла наклона касательной к характеристике холостого хода генератора в точке избран-

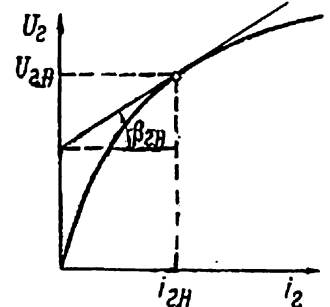


Рис. 121. Характеристика холостого хода генератора.

ного равновесного режима. Величины T_r и γ_r представляют собой постоянную времени и коэффициент усиления генератора.

Условия устойчивости. Рассматриваемая САР возбуждения представляет собой одноконтурную систему автоматического регулирования, состоящую из апериодических звеньев первого порядка. Об условиях устойчивой работы таких систем можно высказать одно общее положение, вытекающее из качественного рассмотрения процесса регулирования. Условия устойчивости определяются характером переходных процессов в отдельных звеньях и в системе автоматического регулирования в целом.

Переходный процесс в апериодическом звене имеет апериодический характер и его длительность определяется постоянной времени звена. Если постоянные времени отдельных звеньев близки по величине, то переходные процессы в них протекают одновременно, влияя один на другой. При этом переходный процесс во всей системе автоматического регулирования может иметь сложный характер, и вероятность неустойчивой работы замкнутой САР довольно велика.

Если постоянные времени звеньев одноконтурной САР значительно отличаются между собой по величине, то запас устойчивости такой системы оказывается намного больше, чем в предыдущем случае. Для уяснения этого предположим, что звенья САР расположены в порядке возрастания их постоянных времени. При таком предположении погрешность в исследование условий устойчивости не вносится, так как характер переходного процесса в САР не зависит от порядка расположения отдельных звеньев.

Если возникает возмущение, переходный процесс в предыдущем звене будет протекать значительно быстрее, чем в последующем. В этом случае каждое предыдущее звено по отношению к своему последующему можно рассматривать как пропорциональное, так как переходный процесс в нем практически заканчивается тогда, когда в последующем звене он только начинается. Поэтому такую САР можно приближенно рассматривать как замкнутую САР, содержащую, кроме пропорциональных звеньев, только одно апериодическое звено, которое имеет наибольшую постоянную времени. Такие САР всегда устойчивы.

Таким образом, одноконтурная система автоматического регулирования, состоящая из апериодических звеньев, имеет тем больший запас устойчивости, чем больше отличаются между собой постоянные времени отдельных звеньев. Это положение подтверждается на примере исследования устойчивости САР напряжения.

Характеристическое уравнение рассматриваемой замкнутой САР возбуждения можно легко получить, перемножив уравнения (3,40), (3,51) и (3,56), т. е.

$$(T_p p + 1)(T_v p + 1)(T_r p + 1) + k_b = 0, \quad (3,60)$$

где $k_b = \gamma_p \gamma_v \gamma_r$ — коэффициент усиления разомкнутой САР возбуждения.

Характеристическое уравнение (3,60) после соответствующих преобразований приводится к виду

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0, \quad (3,61)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= T_p T_v T_r; \\ a_1 &= T_p T_v + T_v T_r + T_p T_r; \\ a_2 &= T_p + T_v + T_r; \\ a_3 &= 1 + k_b. \end{aligned}$$

Таким образом, система автоматического регулирования возбуждения описывается уравнением третьего порядка и ее устойчивость целесообразно исследовать с помощью алгебраического критерия Рауса—Гурвица. Согласно этому критерию необходимые и достаточные условия при всех положительных коэффициентах уравнения (3,61) определяются неравенством

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0.$$

При $\Delta_2 = 0$ коэффициент усиления разомкнутой системы k_b равен критическому значению $k_{b, \text{кр}}$.

Подставив в это неравенство значения соответствующих коэффициентов и решив его относительно коэффициента усиления k_b , получим необходимое и достаточное условие устойчивости САР возбуждения при холостом ходе изолированно работающего генератора

$$k_b < \left(\frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_v} + \frac{1}{T_r} \right) (T_p + T_v + T_r) - 1 = k_{b, \text{кр}}. \quad (3,62)$$

Из выражения (3,62) легко убедиться в справедливости рассмотренного положения об увеличении запаса устойчивости одноконтурной САР с увеличением различия постоянных времени отдельных звеньев. Действительно, при равенстве постоянных времени $T_p = T_v = T_r$ САР возбуждения будет устойчивой, если

$$k_b < 8.$$

В этом случае коэффициент статизма системы регулирования согласно выражению (2,17)

$$k_c = \frac{k_0}{1 + k_B} > 0,11k_0.$$

Если

$$T_p = 0,1T_B = 0,01T_r,$$

то

$$k_B < 123$$

и коэффициент статизма, при котором регулирование возбуждения будет устойчивым,

$$k_c > 0,008k_0.$$

Таким образом, если постоянные времени звеньев значительно отличаются между собой, для устойчивости САР возбуждения на холостом ходу достаточно иметь малый статизм системы регулирования, при этом напряжение будет поддерживаться почти неизменным.

Контрольные вопросы и упражнения

1. Объясните смысл понятий *автоматическое регулирование возбуждения* и *автоматическое регулирование напряжения*.
2. Как влияет АРВ на устойчивость электрических систем?
3. Что такое сильное регулирование возбуждения и какой эффект оно создает?
4. Какие функции выполняет АРВ в электрических системах?
5. Каким требованиям должна удовлетворять система возбуждения синхронного генератора, чтобы действие устройства АРВ было достаточно эффективным?
6. Объясните принцип действия устройств релейной форсировки возбуждения и быстродействующего развозбуждения. Почему нецелесообразно применять в этих устройствах реле напряжения с коэффициентом возврата, значительно отличающимся от единицы?
7. Почему магнитопровод магнитного усилителя выполняется из двух сердечников?
8. Объясните назначение и действие внешней и внутренней обратных связей в магнитном усилителе.
9. Как будет работать магнитный усилитель при очень большом значении коэффициента обратной связи?
10. При отсутствии управляющего сигнала выходной ток дифференциального магнитного усилителя оказался отличным от нуля. Какими способами можно устранить этот ток?
11. Объясните принцип действия и сопоставьте свойства компаундирования по току и фазового компаундирования.
12. Объясните принцип действия измерительного и исполнительного элементов корректора напряжения (см. рис. 82).

13. Объясните вид характеристики корректора, изображенной на рис. 83.
14. Исходя из характеристик, изображенных на рис. 83, объясните действие электромагнитного корректора при изменении тока нагрузки генератора.
15. Какое влияние на характеристику регулирования напряжения в САР, схема которой приведена на рис. 82, окажет перемещение вверх: движков установочного автотрансформатора корректора; дополнительных движков установочного реостата компаундирования?
16. Составьте элементную схему системы регулирования напряжения, изображенной на рис. 82.
17. Чем отличается усовершенствованный электромагнитный корректор завода «Электросила» (рис. 87) от корректора ЭМК (рис. 82)?
18. К каким фазам должен быть подключен автотрансформатор АТ регулятора с управляемым фазовым компаундированием (рис. 93), если трансформатор напряжения ТН будет соединен по схеме $\Delta/\lambda - 1$?
19. Объясните назначение балластного сопротивления z_6 в принципиальной схеме фазового компаундирования (см. рис. 90).
20. Объясните принцип действия измерительного элемента корректора регулятора с управляемым фазовым компаундированием.
21. Как влияют на характеристику регулятора с управляемым фазовым компаундированием при холостом ходе генератора связи по току нагрузки генератора и по току выхода регулятора?
22. Для чего осуществляется независимость поддерживаемого регулятором возбуждения генератора от активной составляющей тока нагрузки?
23. Как распределяются реактивные составляющие токов между генераторами, работающими на общие шины, при условии, что все АРВ имеют статическую настройку, а один регулятор возбуждения — астатическую?
24. Как необходимо включить обмотки трансформатора PT_2 (рис. 82), чтобы отстроить напряжение электромагнитного корректора от изменений активной нагрузки генератора?
25. Объясните принцип действия отдельных элементов регулятора возбуждения сильного действия, а также регулятора в целом.
26. Почему условия устойчивости регулирования возбуждения при холостом ходе генератора тяжелее, чем при работе его на нагрузку?
27. Как влияет величина сопротивления $r_{р.в}$ в цепи самовозбуждения возбудителя на устойчивость рассмотренной САР возбуждения?
-

ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Частота является одним из основных критериев качества электрической энергии. При равенстве генерируемых и потребляемых мощностей в системе ее частота не изменяется. Если это равенство нарушается, то изменяется частота. Частота генерируемого напряжения регулируется изменением впуска энергоносителя (пара, воды) в первичный двигатель генератора, т. е. воздействием на режим турбины. Изменением впуска энергоносителя в первичный двигатель генератора регулируется также активная мощность, вырабатываемая генератором. Таким образом, регулирование частоты в энергосистемах неразрывно связано с регулированием мощности и распределением активных нагрузок между отдельными агрегатами и электростанциями.

Отклонение частоты в системе от заданного значения чаще всего вызывается нерегулярными колебаниями нагрузки, не предусмотренными диспетчерским графиком. Отклонения частоты, связанные с аварийными отключениями отдельных агрегатов или станций, происходят в системах значительно реже. В системах сравнительно небольшой мощности колебания нагрузки могут быть скомпенсированы одной станцией. Поэтому еще относительно недавно в энергосистемах Советского Союза частота регулировалась одной станцией, которая воспринимала нерегулярные колебания нагрузки системы и тем самым поддерживала частоту на заданном уровне.

В настоящее время энергосистемы Советского Союза бурно развиваются, невиданными темпами наращиваются их мощности, укрупняются и объединяются отдельные энергосистемы. С ростом энергосистем увеличивается количество потребителей, вследствие чего колебания их нагрузки усредняются по системе и от-

носительная величина нерегулярных колебаний нагрузки уменьшается. Уменьшению относительной величины нерегулярных колебаний в значительной мере способствует и то, что с ростом энергосистем значительно улучшается прогнозирование суточных графиков нагрузки. Поэтому облегчается задача поддержания частоты на заданном уровне.

Однако с ростом энергосистем значительно увеличиваются абсолютные значения нерегулярных колебаний нагрузки на станции, регулирующей частоту. Вследствие этого регулировочный диапазон одной станции становится недостаточным для компенсации возможных колебаний нагрузки в системе и в крупных энергосистемах. Поэтому частоту регулируют несколько станций одновременно. При этом усложняется задача экономического распределения нагрузки между станциями, регулируемыми частоту. Таким образом, вследствие роста энергосистем облегчается задача поддержания частоты на заданном уровне, но значительно усложняется экономическое распределение нагрузки между отдельными станциями.

За рубежом широко применяются методы регулирования частоты несколькими станциями, основанные на поддержании заданных перетоков мощности между отдельными частями энергосистемы или отдельными энергообъединениями. Этот метод в последнее время применяется и в энергосистемах Советского Союза.

Таким образом, в укрупненных и объединенных энергосистемах регулирование частоты по существу сводится к управлению режимом энергосистемы, при котором непрерывно поддерживаются баланс генерируемых и потребляемых мощностей (постоянство частоты) и оптимальное распределение нагрузок между агрегатами. Эту задачу можно решить только применением автоматических устройств. Эти автоматические устройства образуют систему автоматического управления режимом энергосистемы по частоте и активной мощности. Такие системы автоматического управления разрабатываются в Советском Союзе Государственным трестом по организации и рационализации районных электрических станций и сетей (ОРГРЭС), Всесоюзным научно-исследовательским институтом электроэнергетики (ВНИИЭ), Институтом электрических управляющих машин АН СССР (ИЭУМ) и др.

Регулирование частоты и активной мощности первичными регуляторами турбин. Все первичные двигатели турбин энергосистем снабжены регуляторами скорости. В современных энергетических системах применяются регуляторы скорости вращения турбин двух видов: центробежные и гидродинамические. Эти

регуляторы отличаются, в основном, принципом действия измерительных элементов. В центробежных регуляторах измерительным элементом является центробежный маятник (гл. 1). Измерительный элемент гидродинамического регулятора выполнен в виде центробежного насоса, создающего давление масла, которое зависит от скорости вращения турбины.

В настоящее время на некоторых гидростанциях применяются электрогидравлические регуляторы скорости, сочетающие электрические измерительные элементы и гидравлические усилители.

В случае одиночно работающего агрегата, активная нагрузка которого определяется мощностью потребителя, регулятор скорости поддерживает в заданных пределах скорость турбин и, следовательно, автоматически регулирует частоту. В крупных энергосистемах регуляторы скорости отдельных турбин не регулируют скорость вращения турбины, так как ее угловая скорость определяется частотой системы. Поэтому регуляторы скорости агрегатов, объединенных в систему, правильнее называть первичными регуляторами турбины, с помощью которых изменяется выпуск энергоносителя в турбину.

Частота генерируемого напряжения изолированно работающего агрегата, снабженного статическими первичными регуляторами, при изменениях нагрузки изменяется по статической характеристике регулирования. С изменением нагрузки агрегата частота его не остается постоянной и ее отклонение от некоторого заданного значения (например, f_1) определяется коэффициентом статизма и зоной нечувствительности регулятора.

Предположим, что регулятор не имеет зоны нечувствительности, и характеристика регулирования линейна. В этом случае при изменении нагрузки от некоторого значения P_1 , для которого частота равнялась f_1 , до значения P_2 частота изменится до величины f_2 , причем изменение частоты (прямая $1\ 1$ на рис. 122)

$$\Delta f = f_2 - f_1 = -k_c (P_2 - P_1) = -k_c \Delta P. \quad (4,1)$$

Чтобы восстановить прежнее значение частоты f_1 , при нагрузке генератора P_2 необходимо изменить настройку регулятора. Настройка регулятора изменяется воздействием на механизм изменения скорости вращения (МИС), который соответственно смещает параллельно характеристику регулирования (прямую $1' 1'$). Это воздействие может быть произведено вручную или автоматически регулятором, имеющим астатическую настройку по частоте, т. е. осуществляющего регулирование по закону

$$\Delta f = 0.$$

Такие автоматические устройства, воздействующие на первичные регуляторы турбин с целью регулирования частоты или нагрузки, называются вторичными регуляторами. Если генератор работает параллельно с системой очень большой мощности по сравнению с его мощностью, то частота для любых его нагрузок практически не изменяется и при воздействии на МЭС (рис. 122) изменяется нагрузка генератора.

Если генераторы, имеющие первичные регуляторы со статическими характеристиками, работают параллельно в энергосистеме конечной мощности, то при изменении нагрузки системы на величину ΔP_c в пределах ее установленной мощности изменяется частота на величину Δf , определяемую коэффициентом статизма системы $k_{c.с.}$. В этом случае изменение нагрузки системы, вызвавшее отклонение частоты, распределится между генераторами системы обратно пропорционально коэффициентам статизма их характеристик регулирования. В этом легко убедиться, если так же, как и при рассмотрении регулирования реактивной мощности (§ 8 гл. 3), записать уравнения характеристик статических первичных регуляторов (4,1) для n агрегатов и совместно их решить.

После решения этих уравнений определяются:

$$\Delta f = -\Delta P_c k_{c.с.}; \quad (4,2)$$

$$\Delta P_l = \Delta P_c \frac{k_{o.l}}{k_{cl}}, \quad (4,3)$$

$$k_{c.с.} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_{ci}}}; \quad (4,4)$$

$$\Delta P_c = \sum_{i=1}^n \Delta P_i,$$

где ΔP_l и ΔP_i — изменения нагрузки l -го и i -го агрегатов;

$k_{o.l}$ и k_{ci} — коэффициенты статизма характеристик регулирования l -го и i -го агрегатов.

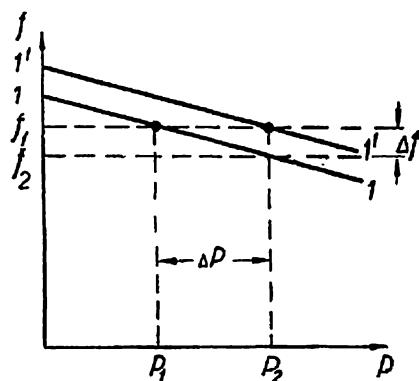


Рис. 122. Характеристики регулирования частоты и мощности изолированно работающего агрегата первичным регулятором со статической настройкой.

Для поддержания постоянного значения частоты необходимо автоматически или вручную, воздействуя на МИС, изменить настройку одного или нескольких первичных регуляторов отдельных агрегатов. В этом случае характеристика регулирования этого агрегата (нескольких агрегатов) сместится параллельно самой себе аналогично смещению характеристики регулирования напряжения (см. рис. 113), и частота восстановится до прежнего значения. Очевидно, что при восстановлении прежнего значения частоты нагрузки тех агрегатов, настройка регуляторов которых осталась неизменной, восстановятся до первоначального значения, а изменение всей нагрузки системы будет скомпенсировано агрегатом, настройка регулятора которого была изменена. Такой же эффект можно получить, если данный агрегат будет снабжен регулятором с астатической характеристикой регулирования.

Таким образом, постоянное значение частоты в системе принципиально можно поддерживать первичными регуляторами без дополнительных устройств, если один из регуляторов будет астатическим, а все остальные регуляторы — статическими. В этом случае все изменения нагрузки системы компенсируются одним агрегатом, снабженным регулятором с астатической характеристикой, а нагрузки всех остальных агрегатов неизменны. Астатическую характеристику регулирования агрегата можно получить, применяя первичный регулятор с астатической характеристикой (изодромная обратная связь) или дополнительное устройство, воздействующее на МИС первичного регулятора агрегата. Такое регулирование частоты возможно в энергетических системах малой мощности, где возможные изменения нагрузки могут быть скомпенсированы одним агрегатом.

В современных энергосистемах, объединяющих большое количество станций и питающих крупные промышленные районы с энергоемкими потребителями, возможные изменения нагрузки такие, что для их компенсации недостаточна мощность одного даже самого крупного агрегата. В этом случае для компенсации изменений нагрузки системы и, следовательно, регулирования частоты необходимо несколько агрегатов, а часто и несколько станций.

Для поддержания неизменного значения частоты несколькими агрегатами с помощью обычных первичных регуляторов без дополнительных автоматических устройств характеристики регулирования регуляторов должны быть астатическими. В § 8 гл. 3 было показано, что при астатической настройке нескольких регуляторов параллельно работающих генераторов распределение

реактивных нагрузок между генераторами будет неопределенным. Поэтому, если частота регулируется несколькими параллельно работающими агрегатами с астатическими характеристиками регулирования, распределение активных нагрузок между агрегатами также будет неопределенным.

В крупных энергосистемах частота регулируется большим количеством мощных агрегатов, поэтому при произвольном распределении нагрузок между ними резко ухудшается экономичность работы системы, а иногда отдельные агрегаты работают в недопустимых режимах (одни агрегаты перегружены, а другие — недогружены). Таким образом, регулирование частоты в крупных энергосистемах обычными первичными регуляторами без дополнительных автоматических устройств затруднительно. Для уяснения методов регулирования частоты и принципов построения систем автоматического регулирования, которые поддерживают неизменными частоту и распределение нагрузок между агрегатами, соответствующие наиболее экономичному режиму работы системы в целом, рассмотрим предварительно, чем обуславливается необходимая точность регулирования частоты.

Необходимая точность регулирования частоты в энергосистемах определяется влиянием отклонения частоты от номинального значения на работу энергосистемы в целом. Отклонение частоты генерируемого напряжения от номинального значения влияет на работу различных агрегатов, приборов и аппаратов, от которых зависит экономичность работы энергосистемы. Паровые турбины конструируются так, что они наиболее экономично работают при номинальной скорости вращения, т. е. при номинальной частоте в энергосистеме. Если частота отклоняется от номинального значения, экономичность работы паровых турбин ухудшается.

Экономичность и бесперебойная работа энергосистемы в значительной степени зависят от надежности работы механизмов собственного расхода электростанций. Приводом ответственных механизмов собственного расхода таких, как питательные насосы, циркуляционные насосы, дымососы, вентиляторы, являются асинхронные двигатели переменного тока, поэтому работа этих механизмов зависит от частоты. При понижении частоты даже на незначительную величину относительно номинального значения резко снижается производительность питательных насосов на электростанции, приводимых во вращение электродвигателями, вследствие чего нарушается нормальная работа электростанции.

Если частота понижается по сравнению с номинальным значением, уменьшается производительность циркуляционных насосов, в результате чего снижается к. п. д. паровой турбины. При увеличении частоты по сравнению с номинальной увеличивается расход электроэнергии на работу этих насосов. Вследствие отклонений частоты от номинального значения изменяется производительность вентиляторов и дымососов, что нарушает режим работы котла.

Мощность значительной части потребителей энергосистемы зависит от частоты питающего напряжения. Эти потребители работают в оптимальных режимах при номинальной частоте и, если частота изменяется, то нарушаются эти оптимальные режимы.

Таким образом, для надежной и экономичной работы электростанций, определяемой режимом работы их оборудования, в системе недопустимы значительные отклонения частоты от номинального значения.

В этом отношении постоянное значение частоты в энергосистеме достаточно было бы поддерживать с точностью 1—2% по отношению к ее номинальному значению. Однако при такой точности регулирования частоты в системе будут значительные отклонения от заданных значений нагрузок отдельных агрегатов и станций, не принимающих участия в регулировании частоты (базовые агрегаты и станции) и предназначенных для несения нагрузки по наиболее экономичному графику. Кроме того, распределение нагрузки между агрегатами (станциями), регулирующими частоту, в этом случае также не будет соответствовать экономичному режиму их работы.

Такое изменение и перераспределение нагрузок между агрегатами объясняется наличием у них первичных регуляторов со статическими характеристиками.

Для оценки средней величины отклонений нагрузки агрегата от номинального значения при номинальной частоте воспользуемся уравнением статической характеристики регулирования первичного регулятора агрегата в относительных единицах (4,1)

$$\Delta f_* + k_{c_*} \Delta P_* = 0,$$

откуда

$$\Delta P_* = \frac{\Delta P}{P_H} = \frac{\Delta f_*}{k_{c_*}} = - \frac{\Delta f}{f_H} \frac{1}{k_{c_*}}. \quad (4,5)$$

Относительный статизм первичных регуляторов турбин

$$k_{c_*} = 0,02 \div 0,06.$$

Принимая среднее значение коэффициента статизма $k_{с, ср.} = 0,04$, определяем изменение нагрузки агрегата при уменьшении частоты системы на 1% ($\Delta f_* = 0,01$), отнесенное к его номинальной нагрузке

$$\Delta P_* = -(-0,01) \frac{1}{0,04} = 0,25.$$

Таким образом, если частота системы отклоняется на 1%, то нагрузка агрегата в среднем отклоняется от заданного значения на 25%. Такое большое отклонение нагрузки от заданного, наиболее экономичного, значения в нормальных эксплуатационных условиях недопустимо.

Поэтому согласно правилам устройства электроустановок и правилам технической эксплуатации [45, 46] в современных энергосистемах допускаются значительно меньшие отклонения частоты от номинального значения: $\Delta f\% = (0,2 \div 0,4)\%$ (большее значение — для энергосистем небольшой мощности). При таком отклонении частоты изменение нагрузки агрегата для $k_{с.} = 0,04$ составляет только 5—10% от его номинальной нагрузки.

Таким образом, частота в энергосистемах при нормальных эксплуатационных условиях должна регулироваться с очень высокой точностью.

Выявление отклонения частоты от номинального значения. Так как частота в энергосистемах должна поддерживаться постоянной с очень высокой точностью, ее необходимо регулировать автоматически. При автоматическом регулировании частоты необходимы устройства, выявляющие ее отклонение от заданного значения и формирующие такие регулирующие воздействия на агрегаты системы, которые устраняют эти отклонения. Устройства, выявляющие отклонение частоты от заданного значения, можно построить по принципам выявления:

- 1) мгновенного отклонения частоты;
- 2) интегрального отклонения частоты.

Принцип выявления отклонения частоты по мгновенному значению заключается в том, что при отклонении частоты f системы от заданного значения f_0 на величину

$$\Delta f = f - f_0,$$

превышающую зону нечувствительности системы автоматического регулирования частоты, система регулирования приходит в действие и устраняет это отклонение Δf .

Принцип выявления отклонения частоты по интегральному значению заключается в том, что система автоматического регу-

лирования частоты приходит в действие после того, как значение интегрального отклонения частоты

$$\delta f = \int_{t_1}^{t_2} \Delta f dt$$

за некоторый промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ превысит ее зону нечувствительности.

Интегральным отклонением частоты однозначно определяется разность показаний двух электрических часов за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$, приводимых во вращение синхронными двигателями, которые питаются от двух источников напряжения различных частот f и f_0 . Изменение положения стрелки электрических часов, питающихся от источника заданной частоты f_0 , за время $t_2 - t_1$

$$\Delta t_0 = k \int_{t_1}^{t_2} \omega_0 dt = 2\pi k \int_{t_1}^{t_2} f_0 dt,$$

где k — масштабный коэффициент, сек;

$$\omega_0 = 2\pi f_0.$$

Изменение положения стрелки часов, питающихся от источника фактической частоты f ,

$$\Delta t_\phi = 2\pi k \int_{t_1}^{t_2} f dt.$$

Разность показаний электрических часов

$$\Delta t_c = \Delta t_\phi - \Delta t_0 = 2\pi k \int_{t_1}^{t_2} (f - f_0) dt = 2\pi k \int_{t_1}^{t_2} \Delta f dt.$$

Таким образом, разность времени, отсчитанного по электрическим часам, которые питаются от двух источников различных частот, за время $t_2 - t_1$ пропорциональна интегральному отклонению частоты за этот промежуток времени. Поэтому интегральное отклонение частоты часто называют изменением синхронного времени. При расхождении стрелок часов на некоторый угол, превышающий зону нечувствительности системы автоматического регулирования частоты, эта система периодически подает регулирующие импульсы, изменяя впуск энергоносителя в турбину и выправляя тем самым частоту.

При любом, сколь угодно малом, отклонении мгновенного значения частоты от номинального значения ее интегральное отклонение со временем будет накапливаться и превысит зону нечувствительности регулятора. Таким образом, в смысле регулирования частоты регуляторы, основанные на принципе выявления интегрального отклонения, не имеют зоны нечувствительности и поэтому могут более точно поддерживать среднее значение частоты на заданном уровне, чем регуляторы, реагирующие на мгновенное отклонение частоты. Однако для накопления определенного значения интегрального отклонения частоты (угла расхождения стрелок электрических часов), при котором регулятор приходит в действие, всегда требуется некоторое время, вследствие чего регулирование частоты по методу синхронного времени происходит более медленно, чем регулирование по отклонению мгновенного значения частоты. Кроме того, конструктивное выполнение измерительных органов регуляторов, выявляющих интегральное отклонение частоты, более сложно, чем измерительных органов отклонения мгновенного значения частоты.

Поэтому для поддержания заданного значения частоты в энергосистемах Советского Союза применяются автоматические регуляторы, основанные на принципе выявления отклонения частоты по мгновенному значению, а по интегральному отклонению частоты современные системы автоматического регулирования частоты и активной мощности экономично распределяют нагрузки между станциями и агрегатами.

Прежде чем рассматривать методы и устройства регулирования частоты и активной мощности, необходимо получить представление о принципах экономически наиболее выгодного распределения активной нагрузки между параллельно работающими агрегатами и электрическими станциями. При экономическом распределении нагрузки необходимо, чтобы стоимость электроэнергии в энергосистеме (энергообъединении) была минимальной.

Из всех расходов, связанных с эксплуатацией энергосистемы, от распределения нагрузки практически зависят только затраты на топливо. Поэтому экономически наиболее выгодный режим работы энергосистемы и отдельных электростанций должен обеспечить минимум денежных затрат на расходуемое топливо, а в случае одинаковой стоимости одной тонны условного топлива для всех электрических станций — минимум расхода условного топлива.

Экономически целесообразно распределять активную нагрузку по методу относительных приростов, подробно освещенному

в работах [14, 33]. Рассмотрим условия, в соответствии с которыми нагрузка распределяется экономически наиболее выгодным образом.

Экономическое распределение нагрузки между агрегатами электрической станции. Рассмотрим распределение общей нагрузки между параллельно работающими агрегатами с соблюдением требования наименьшего расхода энергоносителя, например распределение:

электрической мощности между блоками электростанций при минимальном расходе топлива;

электрической мощности между турбоагрегатами, питающимися от общего паропровода при минимальном расходе пара;

выработки пара между котлами при наименьшем расходе топлива;

электрической мощности между гидроагрегатами ГЭС при минимальном расходе воды.

Зависимость $G_a = F(P_a)$ расхода энергоносителя за единицу времени (часового расхода) G_a от нагрузки P_a агрегата называется расходной характеристикой агрегата. Производная

$$g_a = \frac{dG_a}{dP_a}, \quad (4,6)$$

выражающая изменение часового расхода энергоносителя при возрастании нагрузки на одну единицу, называется относительным приростом расхода энергоносителя (кратко — относительным приростом). Зависимость $g_a = f(P_a)$ относительного прироста от нагрузки называется характеристикой относительного прироста. Используемые на практике идеализированные характеристики относительных приростов различных агрегатов имеют вид восходящих кривых (рис. 123, а), которые могут иметь некоторое количество разрывов непрерывности (рис. 123, б) горизонтальной прямой (рис. 123, в) или ступеней (рис. 123, г).

При распределении нагрузки между n агрегатами, относительные приросты которых обозначим через $g_{a1}, g_{a2}, \dots, g_{an}$, условие минимума расхода энергоносителя записывается в виде

$$g_{a1} = g_{a2} = \dots = g_{an}. \quad (4,7)$$

Это означает, что в экономически наиболее выгодном режиме агрегаты должны работать с такими нагрузками, которым соответствуют одинаковые значения относительных приростов.

Если характеристики относительных приростов имеют разрывы непрерывности (рис. 123, д), то такой критерий экономического распределения следует применять, полагая, что мощности агрегата, при которой происходит скачок относительного прироста от вели-

чины g_a до величины g_b , соответствуют все значения относительного прироста в интервале от g_a до g_b [33].

Чтобы при распределении нагрузки по правилу равенства относительных приростов нагрузка агрегата не превышала максимально допустимую для агрегата величину P_{\max} , необходимо условно считать, что в точке $P = P_{\max}$ характеристика относительного прироста агрегата поднимается вверх параллельно оси ординат (рис. 123, e).

Зная характеристики относительных приростов для отдельных агрегатов и пользуясь правилом равенства относительных приростов, легко построить графики, выражающие зависимости экономически целесообразных нагрузок агрегатов в функции распределяемой между ними суммарной нагрузки. С этой целью для ряда значений относительного прироста, одинакового для всех агрегатов, определяется сумма нагрузок агрегатов, после чего по полученным значениям суммы нагрузок и соответствующим нагрузкам агрегатов строятся кривые экономической загрузки агрегатов (рис. 124).

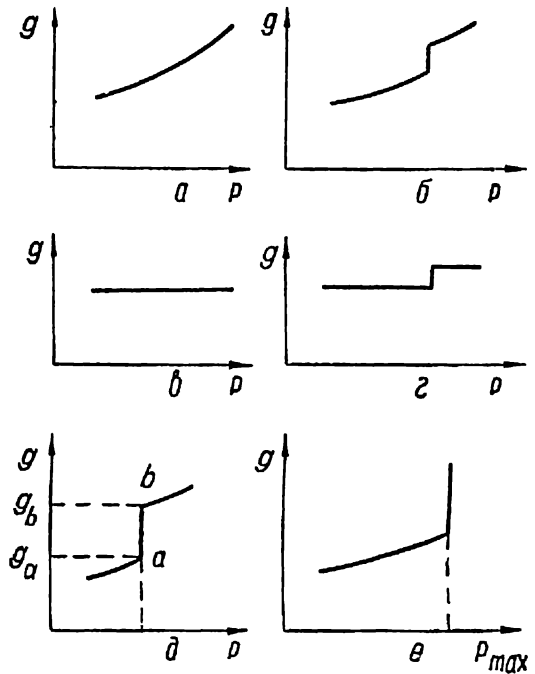


Рис. 123. Характеристики относительных приростов агрегатов.

Экономическое распределение нагрузки между тепловыми электростанциями. В этом случае необходимо обеспечить минимальную стоимость топлива, расходуемого за единицу времени всеми станциями энергосистемы, так как стоимость одной тонны условного топлива на различных станциях может быть неодинаковой.

Будем полагать, что на каждой электростанции энергосистемы всегда выдерживаются экономически целесообразный состав работающего оборудования и экономически наиболее выгодное распределение нагрузки между агрегатами. Введем понятие относительного прироста g стоимости условного топлива, определяя его уравнением, аналогичным уравнению (4,6)

$$g = \frac{dG}{dP}, \quad (4,8)$$

где G — стоимость топлива, расходуемого на электростанции в течение единицы времени;

P — мощность, отпускаемая с шин электростанции.

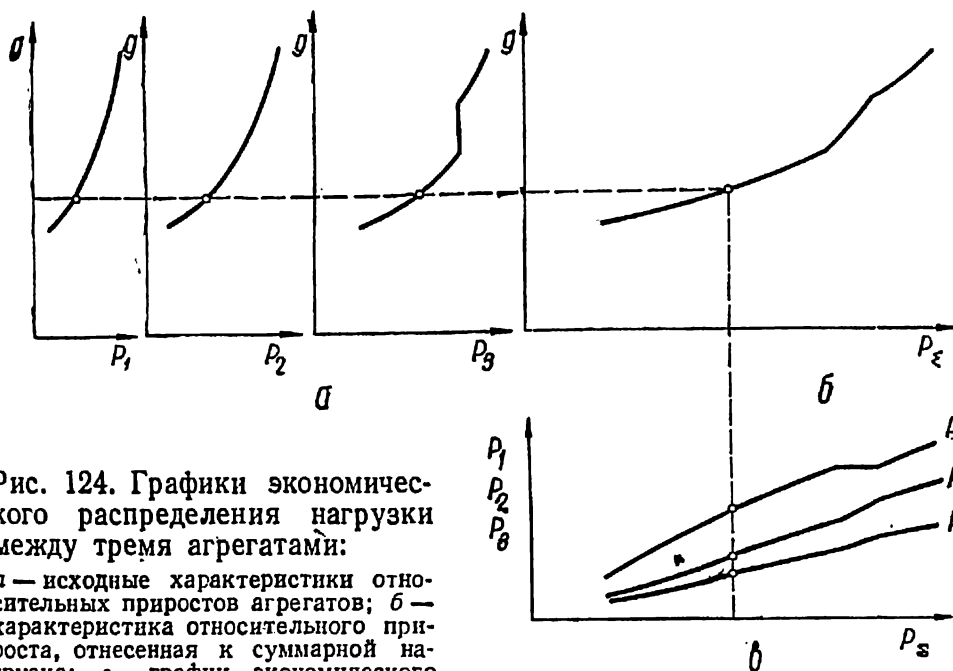


Рис. 124. Графики экономического распределения нагрузки между тремя агрегатами:

a — исходные характеристики относительных приростов агрегатов; b — характеристика относительного прироста, отнесенная к суммарной нагрузке; $в$ — график экономического распределения общей нагрузки.

Характеристики относительных приростов электростанций, выражающие зависимость относительных приростов g от мощности P (рис. 125), можно получить из характеристик относительных приростов агрегатов станции с учетом включений и отключений отдельных агрегатов при изменениях нагрузки электростанции и расхода электроэнергии на собственные нужды.

В концентрированных энергосистемах, в которых электрические станции связаны короткими линиями, потерями мощности в сетях можно пренебречь. В этом случае для n тепловых электростанций условие наивыгоднейшего распределения нагрузки записывается подобно условию для распределения нагрузки между агрегатами в виде

$$g_1 = g_2 = \dots = g_n, \quad (4,9)$$

где g_1, g_2, \dots, g_n — относительные приросты стоимости топлива на станциях.

В большинстве энергосистем в линиях, через которые осуществляется связь между электростанциями, имеются значительные потери мощности, зависящие от распределения нагрузки между станциями. В таких системах нагрузка должна распределяться из условия минимума часовой стоимости расходуемого топлива с учетом потерь в сетях. Если пренебречь влиянием распределения активной нагрузки на реактивные мощности линий электропередачи, то это условие можно записать в виде

$$\frac{g_1}{1 - \sigma_1} = \frac{g_2}{1 - \sigma_2} = \dots = \frac{g_n}{1 - \sigma_n} = g_c, \quad (4,10)$$

где g_c — относительный прирост энергосистемы (энергообъединения).

В уравнении (4,10) величины $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$, называемые относительными приростами потерь в сети, представляют собой частные производные суммарных потерь π активной мощности в сети по мощности соответствующей электростанции:

$$\sigma_i = \frac{\partial \pi}{\partial P_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4,11)$$

и выражают изменение потерь при увеличении мощности станции на одну единицу. Для заданных электрических нагрузок в различных пунктах энергетической системы потери π в сети зависят от мощностей P_1, P_2, \dots, P_n . Частной производной $\frac{\partial \pi}{\partial P_i}$ характеризуется изменение потерь при изменении мощности i -й станции и постоянстве мощностей остальных станций. Так как при неизменной мощности всех потребителей это выполнить невозможно, то предполагается, что изменение мощности сопровождается соответствующим изменением нагрузки в определенной точке энергосистемы, называемой балансирующей точкой. В результате этого в случае изменения мощности P_i баланс активных мощностей не нарушается. Балансирующая точка выбирается произвольно, но остается одинаковой при вычислении относительных приростов потерь для всех электростанций.

Экономическое распределение нагрузки энергосистемы при наличии тепловых электростанций с заданным расходом топлива и гидроэлектростанций. Для некоторых тепловых электростанций количество топлива, которое может быть фактически израсходовано за определенный период времени, ограничивается возможностями транспорта, производительностью шахт или другими условиями. Может оказаться, что при распределении нагрузок в соответствии с уравнением (4,9) или (4,10) на станции не будет хватать топлива.

Возможны и такие случаи, когда требуется, чтобы станция в течение некоторого периода израсходовала больше топлива, чем по условию наименьшей стоимости топлива. В таких случаях нагрузку между тепловыми электростанциями в каждый момент времени необходимо распределять так, чтобы в течение определенного периода некоторые станции израсходовали заданное им количество топлива, и в этих условиях стоимость топлива, израсходованного за этот период во всей системе, была минимальной. Если часть электростанций (от h -й до n -й) из общего числа n работает с заданными расходами топлива, то условие экономического распределения нагрузки записывается в виде

$$\frac{g_1}{1-\sigma_1} = \dots = \frac{g_g}{1-\sigma_g} = \frac{\alpha_h g_h}{1-\sigma_h} = \dots = \frac{\alpha_n g_n}{1-\sigma_n}. \quad (4,12)$$

Коэффициенты $\alpha_h, \dots, \alpha_n$ определяются предварительно так, чтобы при работе энергосистемы с запланированными графиками потребления электроэнергии обеспечить заданные расходы топлива за определенный период.

Для гидростанций расход воды через турбины на некоторый расчетный период определяется по прогнозу притока воды, планируемому расходу воды для судоходства, водоснабжения, орошения и т. д. Нагрузку в энергосистеме с тепловыми и гидравлическими электростанциями необходимо распределять так, чтобы за расчетный период при заданном потреблении воды турбинами гидростанций стоимость топлива, израсходованного тепловыми станциями, была минимальной. Если в энергосистеме имеются тепловые электростанции, работающие без заданного расхода топлива (от 1-й до g -й), тепловые станции с заданным расходом топлива (от h -й до k -й) и гидростанции, работающие с заданным расходом воды (от l -й до n -й), то для экономического распределения нагрузки между электрическими станциями в каждый момент времени необходимо соблюдать условие

$$\begin{aligned} \frac{g_1}{1-\sigma_1} &= \dots = \frac{g_g}{1-\sigma_g} = \frac{\alpha_h g_h}{1-\sigma_h} = \dots = \frac{\alpha_k g_k}{1-\sigma_k} = \\ &= \frac{\lambda_l g_l}{1-\sigma_l} = \dots = \frac{\lambda_n g_n}{1-\sigma_n} = g_c, \end{aligned} \quad (4,13)$$

причем

$$g_m = \frac{dQ_m}{dP_m}, \quad (4,14)$$

где Q_m — часовой расход воды на m -й гидростанции;
 g_m — относительный прирост m -й гидростанции.

Коэффициенты α и λ предварительно рассчитываются, исходя из предполагаемых графиков нагрузки так, чтобы расходы топлива на тепловых станциях, где они заданы, и расходы воды на гидростанциях за расчетный период имели заданное значение. Эти коэффициенты можно корректировать до окончания расчетного периода.

Чтобы определить коэффициенты α и λ для расчетного периода и относительные приросты потерь σ для каждого режима работы энергосистемы, а также оперативное экономически наиболее выгодное распределение нагрузки между электростанциями, необходимо провести большую вычислительную работу. Поэтому такие расчеты обычно выполняются с помощью вычислительных машин.

§ 2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ОДНОЙ СТАНЦИЕЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ

Пропорциональное распределение нагрузки. При регулировании частоты одной станцией система автоматического регулирования должна быть построена так, чтобы эта станция воспринимала все нерегулярные колебания нагрузки системы и отклонения фактической нагрузки от заранее заданного графика, поддерживая непрерывно баланс генерируемых и потребляемых мощностей и тем самым поддерживая частоту в системе на заданном уровне. Нагрузка между агрегатами, регулирующими частоту, должна при этом распределяться вполне определенным образом. В простейшем случае система автоматического регулирования может быть построена так, что для неизменного значения частоты будет пропорционально распределять нагрузку между агрегатами, регулирующими частоту. При такой системе регулирования нагрузка каждого агрегата в любом установившемся режиме составляет определенную, заранее заданную часть суммарной нагрузки всех агрегатов, регулирующих частоту.

Упрощенная блок-схема системы автоматического регулирования частоты, пропорционально распределяющей нагрузку между агрегатами, изображена на рис. 126. Измерительный элемент частоты Δf (общестанционный или индивидуальный для каждого агрегата) создает регулирующее воздействие на входе индивидуальных исполнительных блоков $ИБ_1$, $ИБ_2$ каждого агрегата, которые изменяют впуск энергоносителя в турбину.

Кроме того, на входе исполнительных блоков создаются регулирующие воздействия от агрегатных измерительных элементов

мощности $ИМ_1$, $ИМ_2$ и устройства, измеряющего суммарную нагрузку агрегатов. Это устройство, называемое устройством распределения активных нагрузок (УРАН), создает регулирующее воздействие, пропорциональное суммарной нагрузке $\alpha \sum_1^n P_i$ агрегатов, регулирующих частоту.

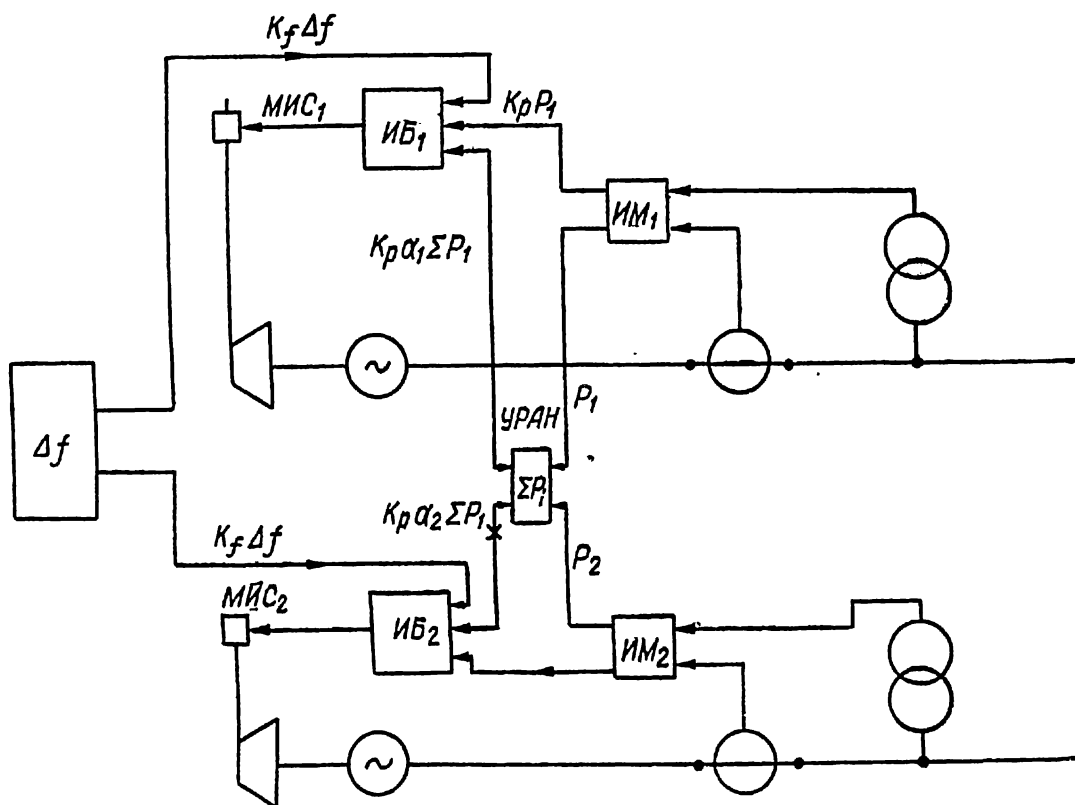


Рис 126. Блок-схема системы АРЧМ с пропорциональным распределением нагрузки.

Таким образом, на вход исполнительного блока l -го агрегата подаются три регулирующие воздействия, которые соответственно пропорциональны:

отклонению частоты системы от заданного значения

$$x_1 = k_f \Delta f; \quad (4,15)$$

фактической нагрузке данного l -го агрегата

$$x_2 = k_{p_l} P_i; \quad (4,16)$$

некоторой заранее заданной части суммарной нагрузки $\sum P_i$ агрегатов станций, регулирующих частоту в системе,

$$x_3 = k_{pl} \alpha_l \sum_1^n P_i, \quad (4,17)$$

где k_f, k_{pl} — коэффициенты пропорциональности;
 Δf — отклонение частоты системы от заданного значения;
 α_l — коэффициент, определяющий заданную долю суммарной нагрузки агрегатов, которую должен воспринять l -й агрегат (коэффициент долевого участия данного агрегата).

При $n > 1$ $\alpha_l < 1$, причем если нагрузки измеряются с абсолютной точностью,

$$\sum_1^n \alpha_i = 1. \quad (4,18)$$

Воздействия x_2 и x_3 от измерительного элемента мощности и УРАНа соответственно на входе исполнительного блока направлены противоположно одно другому.

Рассматриваемая система регулирования l -го агрегата находится в состоянии покоя, если алгебраическая сумма регулирующих воздействий на входе соответствующего исполнительного блока равна нулю, т. е.

$$x_1 + x_2 - x_3 = 0$$

или с учетом выражений (4,15) — (4,17) при

$$\Delta f + s_l (P_l - \alpha_l \sum_1^n P_i) = 0, \quad (4,19)$$

где

$$\frac{k_{pl}}{k_f} = s_l. \quad (4,20)$$

Уравнение (4,19) представляет собой уравнение характеристики регулирования системы автоматического регулирования частоты и активной мощности (АРЧМ), изображенной на рис. 126. Если режим работы агрегата такой, что уравнение (4,19) не выполняется, т. е.

$$\Delta f + s_l (P_l - \alpha_l \sum_1^n P_i) < 0,$$

или

$$\Delta f + s_l (P_l - \alpha_l \sum_1^n P_i) > 0$$

и в системе регулирования отсутствует зона нечувствительности, то исполнительный блок воздействует на первичный регулятор и изменяет выпуск энергоносителя в турбину до тех пор, пока режим работы агрегата не установится согласно уравнению (4,19). Сравнив уравнение (4,19) с уравнением характеристики регулирования первичного регулятора турбины (4,11), который регулирует частоту со статизмом по нагрузке агрегата, легко убедиться в том, что система регулирования (рис. 126) регулирует частоту со статизмом по отклонению фактической нагрузки агрегата от заданной части суммарной нагрузки n агрегатов, регулирующих частоту.

Покажем, что системы регулирования, основанные на таком принципе, поддерживают постоянное значение частоты и пропорционально распределяют нагрузки между агрегатами.

Запишем уравнения характеристик регулирования для всех n агрегатов с учетом того, что отклонение частоты одинаково для всех агрегатов:

$$\left. \begin{aligned} \Delta f + s_1 (P_1 - \alpha_1 \sum_1^n P_i) &= 0; \\ \Delta f + s_2 (P_2 - \alpha_2 \sum_1^n P_i) &= 0; \\ \Delta f + s_l (P_l - \alpha_l \sum_1^n P_i) &= 0; \\ \Delta f + s_n (P_n - \alpha_n \sum_1^n P_i) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4,21)$$

Разделив каждое из уравнений (4,21) на соответствующий коэффициент s_l и просуммировав их, получим равенство

$$\Delta f \sum_1^n \frac{1}{s_l} + \left(1 - \sum_1^n \alpha_i\right) \sum_1^n P_i = 0. \quad (4,22)$$

Подставив выражение (4,18) в (4,22) при условии

$$\frac{1}{s_l} \neq 0,$$

получим

$$\Delta f = 0. \quad (4,23)$$

Подставив выражение (4,23) во все уравнения (4,21), найдем для любого агрегата равенство

$$P_l = \alpha_l \sum_1^n P_i. \quad (4,24)$$

Из уравнений (4,23) и (4,24) видно, что после окончания процесса регулирования частота в энергосистеме останется неизменной, а суммарная нагрузка агрегатов, регулирующих частоту, распределится между ними в заданном соотношении. Описанный принцип регулирования частоты называется методом мнимого статизма.

Регуляторы каждого агрегата регулируют частоту со статизмом по отклонению его фактической нагрузки от заданной части суммарной нагрузки агрегатов, регулирующих частоту. При этом вследствие совместного действия всех регуляторов частота в энергосистеме остается неизменной, т. е. регулирование частоты оказывается астатическим.

Процесс регулирования в этом случае протекает следующим образом. При нарушении баланса генерируемых и потребляемых мощностей в энергосистеме, вследствие чего частота отклоняется от заданного значения, все регуляторы приходят в действие и изменяют нагрузки агрегатов так, чтобы ликвидировать этот небаланс и восстановить частоту до прежнего значения. Если после восстановления номинального значения частоты нагрузка одного из агрегатов окажется больше заданной части суммарной нагрузки, то нагрузка другого агрегата (или нескольких других агрегатов) обязательно будет меньше соответствующей части суммарной нагрузки. Регуляторы этих агрегатов создадут регулирующие воздействия противоположных направлений: воздействие регулятора первого агрегата будет уменьшать его нагрузку, а воздействие регулятора второго агрегата — наоборот. В результате этого нагрузка перераспределится между агрегатами и, когда нагрузки агрегатов станут равными заданным частям суммарной нагрузки, регулирующие воздействия исчезнут, и система регулирования частоты придет в состояние покоя.

При регулировании частоты по мнимостатическим характеристикам нагрузки между агрегатами распределяются пропорционально. Такой режим в большинстве случаев не является наилучшим с экономической точки зрения, так как характеристики

относительных приростов отдельных агрегатов не подобны одна другой.

Если на станции установлены однотипные агрегаты с одинаковыми характеристиками относительных приростов, при регулировании по мнимостатическим характеристикам получается экономически наиболее выгодное распределение нагрузок. На станциях с однотипными агрегатами, имеющими возрастающие характеристики относительных приростов, необходимо равномерно распределять нагрузки между агрегатами, т. е. система регулирования должна быть настроена так, чтобы

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_l = \dots = \alpha_n = \frac{1}{n}.$$

При такой настройке системы регулирования частоты и активной мощности нагрузки агрегатов в установившемся режиме согласно выражению (4,24) будут одинаковыми и равными среднему значению нагрузки агрегата:

$$P_1 = P_2 = \dots = P_l = \dots = P_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i.$$

Чаще всего нагрузку целесообразно распределять равномерно на гидростанциях, где устанавливаются однотипные агрегаты. При таком распределении нагрузки система регулирования может быть построена так, что она будет равномерно распределять нагрузку (выравнивать) без общестанционного устройства — УРАНа.

Равномерное распределение нагрузки. Нагрузку между агрегатами при астатическом регулировании частоты можно выравнивать, соединяя измерительные элементы мощности (или трансформаторы тока) в схемы:

- многолучевой звезды;
- многоугольника.

Упрощенная блок-схема системы регулирования частоты с выравниванием нагрузок агрегатов по схеме многолучевой звезды изображена на рис. 127, а. На этой схеме цепи питания (входа) измерительных элементов частоты и активной мощности не показаны. Параметры всех измерительных элементов мощности и исполнительных блоков должны быть одинаковыми. Выходной величиной измерительного элемента мощности является напряжение постоянного тока, пропорциональное активной нагрузке генератора и, следовательно, регулирующее воздействие от этих элементов на входе исполнительных блоков осуществляется электрическим

током. Это регулирующее воздействие (ток) можно определить из схемы замещения цепей измерительных элементов мощности и исполнительных блоков (рис. 127, б), на которой измерительные элементы мощности представлены источниками постоянного напряжения U_i с внутренним сопротивлением r , а входная цепь

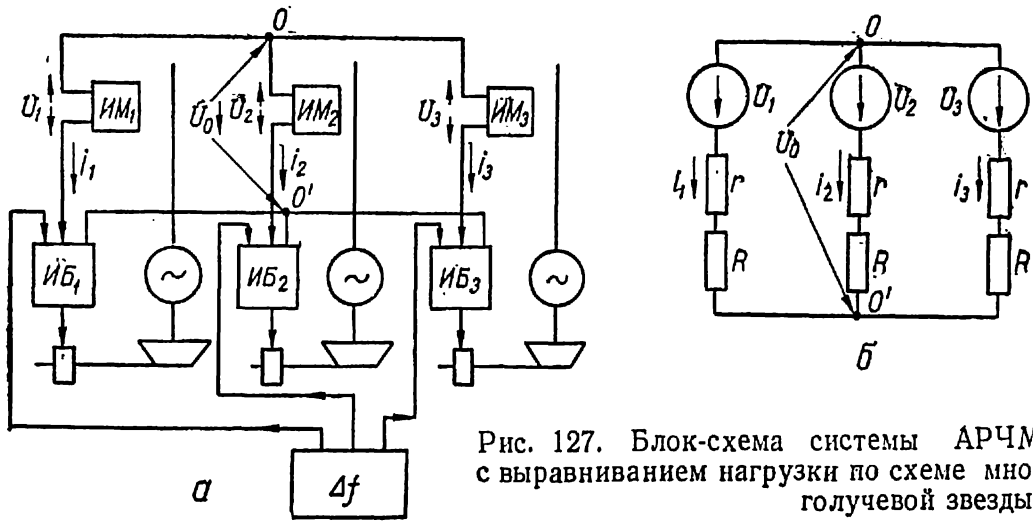


Рис. 127. Блок-схема системы АРЧМ с выравниванием нагрузки по схеме многолучевой звезды.

исполнительного блока — активным сопротивлением R . Очевидно, что

$$U_i = \gamma P_i, \quad (4,25)$$

где γ — коэффициент пропорциональности,
Ток в любой ветви схемы

$$i_l = \frac{U_l - U_0}{r + R}, \quad (4,26)$$

где U_0 — напряжение между узлами O и O' .
Согласно первому закону Кирхгофа

$$\sum_{i=1}^n i_i = 0. \quad (4,27)$$

Из уравнений (4,25) — (4,27) легко определить

$$U_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i$$

и регулирующее воздействие

$$x_2 = i_l = \frac{1}{r+R} \left(U_l - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \right) = k_p \left(P_l - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \right) \quad (4,28)$$

где

$$k_p = \frac{\gamma}{r+R}.$$

Уравнение характеристики регулирования системы в этом случае примет вид

$$x_1 + x_2 = k_f \Delta f + k_p \left(P_l - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \right) = 0$$

или

$$\Delta f + s \left(P_l - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \right) = 0,$$

т. е. система АРЧМ, построенная по принципу многолучевой звезды, поддерживает постоянное значение частоты и выравнивает нагрузку между агрегатами.

Упрощенная блок-схема системы АРЧМ, выравнивающая нагрузку по схеме многоугольника, приведена на рис. 128, а. Ток, создающий воздействие на входе исполнительного блока, определяется из схемы замещения (рис. 128, б), где измерительный элемент мощности представлен эквивалентным источником постоянного тока I_i с внутренней проводимостью g , а входная цепь исполнительного блока — активной проводимостью G , причем

$$I_i = \beta P_i,$$

где β — коэффициент пропорциональности.

Так как ток в любой проводимости G , т. е. на входе исполнительного блока (рис. 128, б)

$$i_l = (I_l - I) \frac{G}{G+g} \quad (4,29)$$

и согласно второму закону Кирхгофа

$$\frac{1}{G} \sum_{i=1}^n i_i = 0, \quad (4,30)$$

то после решения уравнений (4,29) и (4,30) получим

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad (4,31)$$

$$i_l = x_2 = \frac{G}{G+g} \left(I_l - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \right) = k_p \left(P_l - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \right), \quad (4,32)$$

где

$$k_p = \frac{\beta G}{G+g}.$$

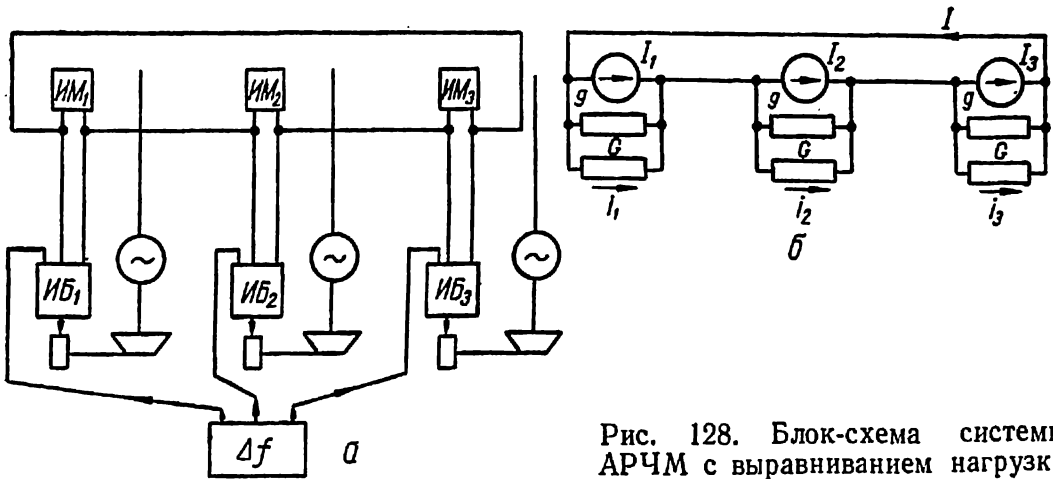


Рис. 128. Блок-схема системы АРЧМ с выравниванием нагрузки по схеме многоугольника.

Таким образом, система АРЧМ, выполненная по принципу многоугольника, как и система с многолучевой звездой, поддерживает постоянное значение частоты и выравнивает нагрузки агрегатов.

В схемах выравнивания нагрузки вместо измерительных элементов мощности можно включить трансформаторы тока генераторов. Трансформаторы тока чаще используются в схемах многоугольника. При включении трансформаторов тока в схему многолучевой звезды вторичная обмотка каждого трансформатора шунтируется активным сопротивлением, так как в этой схеме измерительный элемент должен работать в качестве эквивалентного источника напряжения.

Схема выравнивания с трансформаторами тока дополняется фазочувствительными устройствами (по числу агрегатов), входные цепи которых включаются по схеме звезды или многоугольника, а выходные токи их, пропорциональные активным составляющим

их входных токов относительно напряжений генераторов, создают регулирующее воздействие на входе исполнительных блоков. В этом случае выравниваются активные составляющие тока и схема выравнивает нагрузки агрегатов только в том случае, если напряжения генераторов равны по величине и совпадают по фазе.

Выравнивать можно не только электрические нагрузки генераторов, но и положения направляющих аппаратов или других управляющих органов. В этом случае в схемы многолучевой звезды или многоугольника включаются датчики открытия направляющих аппаратов, выходное напряжение или ток которых определяет их положение. Этот метод применяется на гидростанциях. На тепловых станциях он не применяется.

Распределение электрической нагрузки при этом менее точное, поскольку отсутствует точная однозначная и одинаковая для разных агрегатов зависимость между положениями управляющих органов и электрической нагрузкой, но динамика процесса выравнивания нагрузки, а следовательно, динамика работы всей системы регулирования частоты, может значительно улучшаться, особенно для гидроагрегатов. Это объясняется тем, что вследствие инерции массы воды изменение нагрузки агрегата запаздывает относительно изменения открытия направляющего аппарата и, следовательно, в процессе выравнивания по нагрузке могут наблюдаться значительные перерегулирования.

§ 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ПО ИНТЕГРАЛЬНОМУ ОТКЛОНЕНИЮ ЧАСТОТЫ

Параметры задания нагрузки. В процессе регулирования частоты нагрузка между агрегатами распределяется путем сравнения их фактических нагрузок с некоторым заданием, которое автоматически изменяется с изменением режима работы станции или системы.

При регулировании по мнимостатическим характеристикам (пропорциональное распределение нагрузки) таким заданием является определенная доля суммарной нагрузки группы агрегатов (станций), регулирующих частоту. Общим параметром задания для всех агрегатов в этом случае является суммарная нагрузка. Суммарная нагрузка в значительной степени изменяется в начале регулирования, вследствие чего частота отклоняется от заданного значения, а в процессе регулирования полная нагрузка изменяется только частично. Поэтому при таком параметре задания конструктивно сложно автоматически изменять соотношение нагрузок агре-

гатов в процессе регулирования по принципу относительных приростов, обеспечивающих экономическую работу станции или системы.

Чтобы в процессе регулирования можно было автоматически изменять соотношение нагрузок между агрегатами, целесообразно выбрать такой общий параметр задания, который изменяется монотонно в течение всего времени регулирования. Принципиально общим параметром задания может быть любая физическая величина, характеризующая режим работы станции или системы, являющаяся одинаковой для всех агрегатов (станций) и при отклонении частоты от заданного значения качественно изменяющаяся так же, как и суммарная нагрузка агрегатов (станций). Этот параметр должен изменяться до тех пор, пока не устранится отклонение частоты от заданного значения, так как в противном случае в системе регулирования никогда не будет установившегося режима.

В 1951 г. во ВНИИЭ и в 1952 г. в ОРГРЭС предложили в качестве такого общего параметра задания использовать интегральное отклонение частоты, отсчитываемое с некоторого момента времени t_0 , когда частота f равна номинальному значению f_n

$$\delta_{\int} f = - \int_{t_0}^t \Delta f dt.$$

Возможность использования величины $\delta_{\int} f$ в качестве общего параметра задания вытекает из одинакового характера изменения этой функции и суммарной нагрузки всех агрегатов в процессе регулирования частоты. Действительно, с понижением частоты в системе, обусловленным увеличением суммарной нагрузки или превышением потребляемой мощности относительно генерируемой (отключение агрегата), возрастают нагрузка регулирующих агрегатов и интегральное отклонение частоты. При повышении частоты уменьшается величина $\delta_{\int} f$, т. е. изменения величин $\sum_{i=1}^n P_i$ и $\delta_{\int} f$ качественно совпадают. Если частота принимает номинальное значение, $\Delta f = 0$ и интегральное отклонение $\delta_{\int} f$ не изменяется.

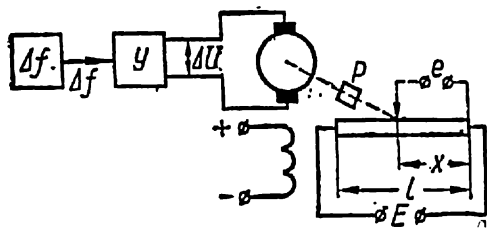
В случае регулирования частоты одной станцией общим параметром задания может являться не точное значение интегрального отклонения частоты, а интегральное значение от некоторой функции мгновенного отклонения частоты $F(\Delta f)$, одинаковой для всех агрегатов.

Эта функция должна иметь следующие свойства: с увеличением абсолютного значения Δf абсолютное значение ее должно возрастать, и при изменении знака отклонения частоты должен изменяться знак функции. Если $\Delta f = 0$, эта функция также должна равняться нулю.

Способы получения интегральной функции отклонения частоты
Интегральную функцию

$$\delta_2 f = - \int_{t_0}^t F(\Delta f) dt,$$

имеющую необходимые свойства общего параметра задания, можно получить в виде напряжения, снимаемого с потенциометра, движок которого перемещается двигателем постоянного тока или двухфазным асинхронным двигателем, управляемым напряжением, величина и знак которого зависят от мгновенного отклонения частоты (рис. 129).



Выходное напряжение ΔU двухтактного усилителя $У$ является функцией мгновенного отклонения частоты Δf , имеющей необходимые описанные свойства, т. е.

$$\Delta U = - F_1(\Delta f).$$

Рис. 129. Принципиальная схема датчика интегральной функции отклонения частоты.

Угловая скорость ω_d двигателя является монотонной нечетной функцией приложенного напряжения и, следовательно, отклонения частоты Δf :

$$\omega_d = F_2(\Delta U) = F_2[-F_1(\Delta f)] = -F_3(\Delta f).$$

Если при $t = t_0$ движок потенциометра находится в крайнем положении, величина перемещения движка потенциометра x пропорциональна интегралу по времени от угловой скорости двигателя:

$$x = k \int_{t_0}^t \omega_d dt = -k \int_{t_0}^t F_3(\Delta f) dt,$$

где k — коэффициент, зависящий от передаточного числа редуктора P .
Напряжение, снимаемое с потенциометра,

$$|e| = \frac{E}{l} x = \frac{-kE}{l} \int_{t_0}^t F_3(\Delta f) dt = - \int_{t_0}^t F(\Delta f) dt, \quad (4,33)$$

где

$$F(\Delta f) = \frac{kE}{l} F_3(\Delta f).$$

Следовательно, напряжение e является интегральной функцией отклонения частоты. Если усилитель линейный и скорость двигателя строго пропорциональна приложенному напряжению, то

$$\Delta U = -k_1 \Delta f;$$

$$\omega_d = k_2 \Delta U = -k_1 k_2 \Delta f = -k_3 \Delta f$$

и напряжение

$$|e| = \frac{-kk_3 E}{l} \int_{t_0}^t \Delta f dt,$$

т. е. напряжение e пропорционально интегральному отклонению частоты $\delta_1 f$. Если вместо линейного потенциометра применить нелинейный (фигурный), то снимаемое с него напряжение определится некоторой функцией перемещения движка x , т. е.

$$|e| = \varphi(x) = \varphi \left[- \int_{t_0}^t F(\Delta f) dt \right] \quad (4,34)$$

или при линейном усилителе

$$|e| = \varphi \left[- \int_{t_0}^t \Delta f dt \right]. \quad (4,35)$$

Вместо потенциометров можно применить другие функциональные преобразователи.

Блок-схема АРЧМ, распределяющая нагрузку по интегральному отклонению. Упрощенная блок-схема системы АРЧМ, распределяющая нагрузку между агрегатами одной станции по интегральному отклонению частоты, изображена на рис. 130. На вход исполнительного блока каждого агрегата подаются воздействия от: измерительного элемента частоты (это воздействие одинаково для всех блоков)

$$x_1 = k_f \Delta f;$$

измерительных элементов мощности каждого агрегата

$$x_2 = k_p P_i;$$

устройства, формирующего воздействие, которое зависит от интегральной функции отклонения частоты,

$$x_3 = -\varphi_i(\delta_2 f) = -\varphi_i \left[- \int_{t_0}^t F(\Delta f) dt \right].$$

Эти устройства (по количеству агрегатов) можно выполнить в виде нелинейных (линейных) потенциометров или других функциональных преобразователей; они условно изображены на схеме

фигурными клиньями (Π_1, Π_2, Π_3), причем на вход этих устройств подается интегральная функция отклонения частоты $\delta_2 f$, одинаковая для всех агрегатов.

Практически одинаковую интегральную функцию на вход этих устройств можно подать при помощи общего привода ко всем

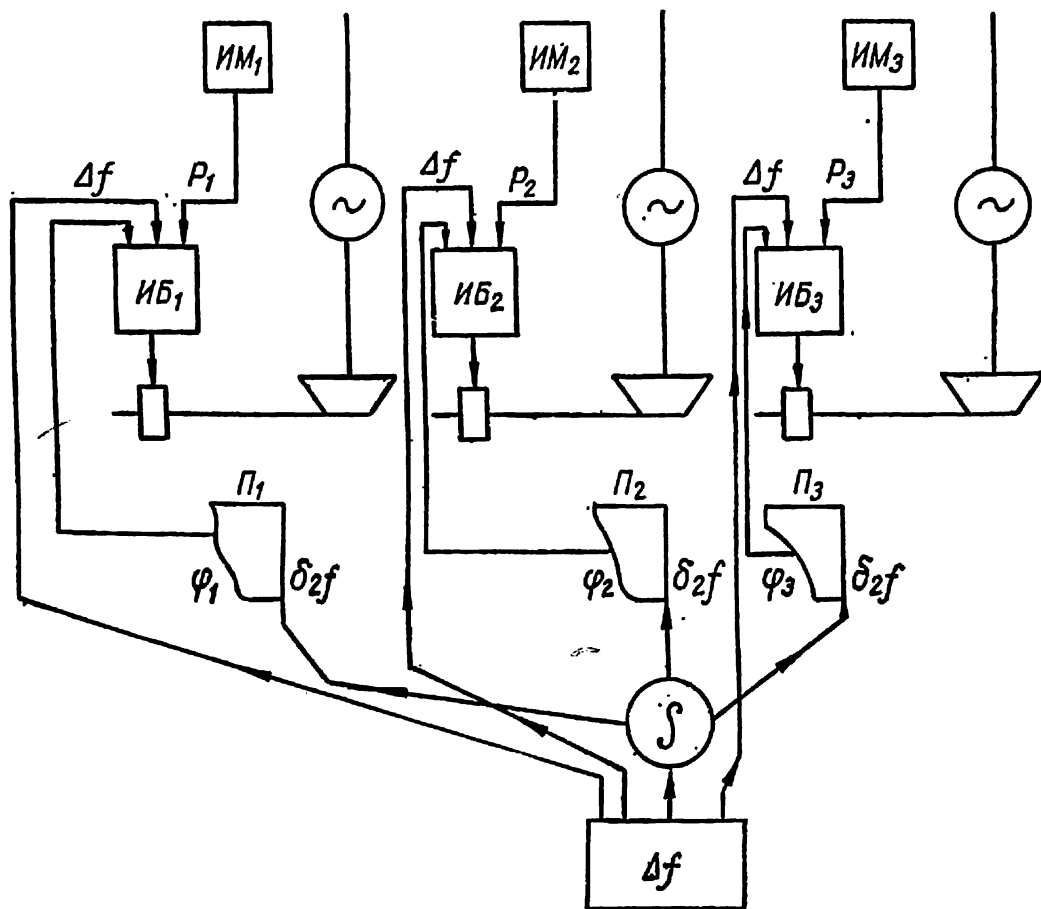


Рис. 130. Блок-схема системы АРЧМ, распределяющая нагрузку между агрегатами одной станции по интегральному отклонению частоты.

движкам потенциометров от одного двигателя, управляемого по схеме, показанной на рис. 130. Это устройство является датчиком интегральной функции отклонения частоты. Датчик интегрального отклонения частоты совместно с функциональными преобразователями представляет собой УРАН. Уравнение характеристики регулирования в этом случае для l -го агрегата имеет вид

$$x_1 + x_2 + x_3 = k_f \Delta f + k_p P_l - \varphi_l \left[- \int_{t_0}^t F(\Delta f) dt \right] = 0$$

или

$$\Delta f + s_l \left\{ P_l - \frac{1}{k_p} \varphi_l \left[- \int_{t_0}^t F(\Delta f) dt \right] \right\} = 0, \quad (4,36)$$

где

$$s_l = \frac{k_p}{k_f}.$$

Из уравнения (4,36) видно, что система АРЧМ (рис. 130) осуществляет астатическое регулирование частоты и определенное распределение нагрузки между агрегатами. При нарушении баланса генерируемых и потребляемых мощностей в системе появляется отклонение частоты от номинального значения ($\Delta f \neq 0$), функция φ_l изменяется, равенство (4,36) нарушается (т. е. нарушается баланс воздействий на входе силового блока любого l -го агрегата) и система регулирования приходит в действие, изменяя нагрузку агрегата так, чтобы устранить отклонение частоты.

При восстановлении частоты до номинального значения ($\Delta f = 0$) в некоторый момент времени t_1 интегральная функция отклонения частоты перестанет изменяться, и согласно уравнению (4,36) нагрузка агрегата будет определяться значением функции φ_l в момент t_1 :

$$P_{l(t=t_1)} = \frac{1}{k_p} \varphi_l \left[- \int_{t_0}^{t_1} F(\Delta f) dt \right]. \quad (4,37)$$

Влияние воздействия по мгновенному отклонению частоты. Принципиально система АРЧМ, распределяющая нагрузку по интегральному отклонению частоты, может обеспечить астатическое регулирование частоты и экономический режим работы станции без введения воздействия по мгновенному отклонению частоты Δf . В этом случае уравнение характеристики регулирования принимает вид

$$P_l - \frac{1}{k_p} \varphi_l \left[- \int_{t_0}^t F(\Delta f) dt \right] = 0.$$

После отклонения частоты от номинального значения начнет изменяться функция φ_l и, следовательно, система регулирования будет изменять нагрузку агрегата согласно равенству (4,37). Изменение функции φ_l , а следовательно, и процесс регулирования

прекратится в момент времени t_1 , когда $\Delta f = 0$, т. е. регулирование частоты оказывается астатическим.

Однако из-за отсутствия воздействия по мгновенному отклонению частоты значительно ухудшается качество регулирования. Действительно, интегральная функция отклонения частоты изменится через некоторое время после отклонения частоты и, следовательно, регулирование при отсутствии воздействия по мгновенному отклонению частоты будет происходить с запаздыванием, вследствие чего ухудшится условие устойчивости. Более того, в первое время после появления отклонения частоты система регулирования препятствует восстановлению частоты. Это объясняется тем, что после появления Δf , пока функция φ_l еще не успела измениться, задание нагрузки агрегата остается неизменным, и система регулирования действует так, чтобы не допустить изменения его нагрузки.

Только после того, когда изменение величины φ_l превысит зону нечувствительности регулятора, система регулирования начнет действовать в сторону необходимого изменения нагрузки. Таким образом, для необходимого качества регулирования в современных системах АРЧМ обязательно вводится воздействие по мгновенному отклонению частоты.

Экономическое распределение нагрузки. Функцию φ для любого агрегата принципиально можно выбрать произвольной. Однако после окончания процесса регулирования (когда $\Delta f = 0$ в момент времени t_1) величина интегральной функции установится такой, что суммарное значение функции φ для всех n агрегатов согласно выражению (4,37) будет пропорциональным их суммарной нагрузке, обеспечивающей баланс генерируемых и потребляемых мощностей в системе, т. е.

$$\frac{1}{k_p} \sum_{l=1}^n \varphi_l = \sum_{l=1}^n P_l. \quad (4,38)$$

Интегральная функция отклонения частоты $\delta_2 f$ в процессе регулирования качественно изменяется так же, как и суммарная нагрузка агрегатов $\sum_{l=1}^n P_l$, регулирующих частоту. Так как суммарная нагрузка станции изменяется так же, как и относительный прирост станции, который при экономическом распределении нагрузки одинаковый для всех агрегатов, то интегральная функция отклонения частоты, также одинаковая для всех агрегатов, в неко-

тором масштабе может определять относительный прирост станции g :

$$\left| \int_{t_0}^{t_1} F(\Delta f) dt \right| = m_g (g - g_0),$$

где g_0 — значение относительного прироста станции при $t = t_0$;

m_g — масштабный коэффициент.

Датчик интегральной функции отклонения частоты может выполнять функции датчика относительного прироста и, следовательно, аргументом функции φ_l , определяющей нагрузку l -го агрегата, может быть принят относительный прирост нагрузки станции g . Если на станции установлены блоки котел — турбина — генератор, то для экономического распределения нагрузок между агрегатами функция φ_l должна быть такой, как на рис. 124, а. Если котлы станции имеют общий паропровод, то нагрузки по относительным приростам необходимо распределять отдельно между котлами и между генераторами. Таким образом, системы АРЧМ, распределяющие нагрузку между агрегатами по интегральному отклонению частоты, обеспечивают экономический режим работы станции и, следовательно, удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к таким системам.

Регулирование нагрузки станции по заданному графику. Станции, не регулирующие частоту при нормальных эксплуатационных режимах, должны изменять свою нагрузку по заранее заданному графику, построенному с учетом потребностей системы и экономической работы данной станции. Нагрузку станции по заданному графику целесообразно регулировать автоматически. В этом случае система автоматического регулирования строится так, что суммарная нагрузка станции устанавливается согласно заданному графику, а распределение нагрузок между агрегатами экономически наиболее выгодное. Эта система регулирования не должна реагировать на отклонения частоты, если эти отклонения не превышают значений, которые могут быть скомпенсированы станциями, регулирующими частоту.

Если в энергосистеме возникает большое изменение нагрузки, вследствие чего частота значительно отклоняется от номинального значения, и это отклонение частоты нельзя скомпенсировать станциями, регулирующими частоту, то автоматический регулятор нагрузки должен воздействовать на агрегаты так, чтобы нагрузка изменялась в сторону, необходимую для восстановления частоты в системе. В этом случае нагрузка станции не будет соответствовать ее заданному значению. Зависимость нагрузки станции от

частоты системы должна быть такой, как это показано на рис. 131. Таким образом, при больших отклонениях частоты ($|\Delta f| > |\Delta f_{\max}|$) станция, регулирующая нагрузку по заданному графику, включается в процесс регулирования частоты и помогает ее восстановлению до номинального значения.

Блок-схема системы регулирования нагрузки станции по заданному графику с коррекцией по отклонению частоты изображена на рис. 132.

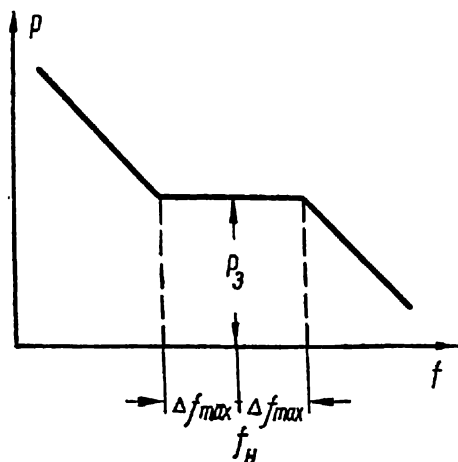


Рис. 131. График зависимости нагрузки станции от частоты при регулировании нагрузки по заданному графику.

Частотный корректор ЧК искусственно создает зону нечувствительности системы регулирования по частоте, равную $\pm \Delta f_{\max}$, вследствие чего при $|\Delta f| < |\Delta f_{\max}|$ воздействие по отклонению частоты отсутствует. В этом случае регулирующее воздействие создается разностью ΔP фактической суммарной нагрузки станции ΣP_i и заданного ее значения P_3 :

$$\Delta P = \Sigma P_i - P_3. \quad (4,39)$$

Заданное значение нагрузки станции обрабатывается устройством задания графика нагрузки (УЗГН), а фактическая нагрузка станции замеряется суммированием выходных

величин измерительных элементов мощности каждого агрегата.

Общим параметром задания нагрузки каждого агрегата при $|\Delta f| < |\Delta f_{\max}|$ является интегральная функция отклонения нагрузки станции от заданного значения

$$\delta_2 P = - \int_{t_0}^t F(\Delta P) dt.$$

Возможность использования величин $\delta_2 P$ в качестве общего параметра задания следует из того, что закон изменения интегральной функции отклонения нагрузки имеет такой же характер, как закон изменения суммарной нагрузки станции. Таким образом, величиной $\delta_2 P$ в некотором масштабе определяется суммарная нагрузка станции, и функциональные преобразователи φ строятся так, что при передвижении воспроизводят график экономической нагрузки агрегата в функции суммарной нагрузки станции. Из схемы, приведенной на рис. 132, видно, что при $|\Delta f| < |\Delta f_{\max}|$

уравнение характеристики регулирования системы регулирования l -го агрегата принимает вид

$$\Delta P + k_c [P_l - \varphi_l(\delta_2 P)] = 0. \quad (4,40)$$

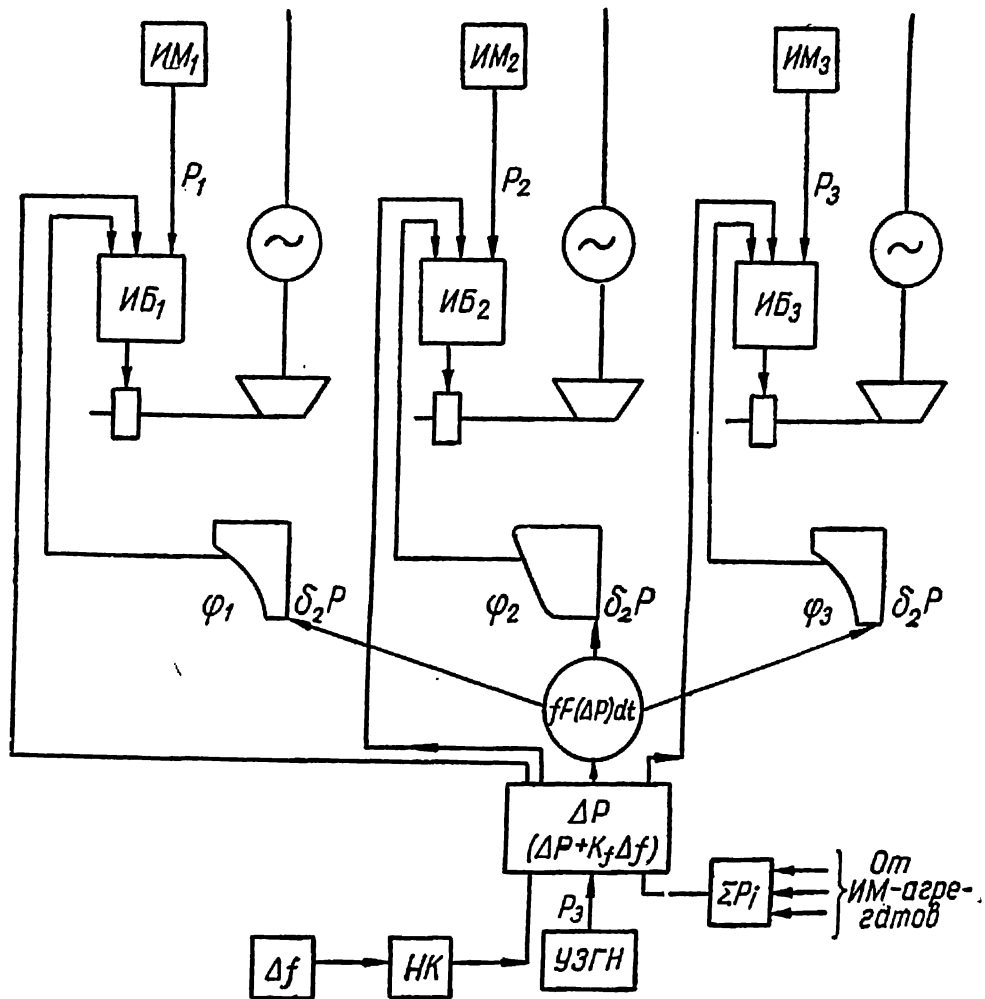


Рис. 132. Блок-схема системы автоматического регулирования нагрузки станции по заданному графику с коррекцией по частоте.

Так как изменение $\delta_2 P$ прекратится только при $\Delta P = 0$, то процесс регулирования закончится, если

$$P_l = \varphi_l(\delta_2 P); \quad (4,41)$$

$$\Sigma P_i = P_3. \quad (4,42)$$

Таким образом, система регулирования поддерживает заданное значение нагрузки станции и экономично распределяет ее между отдельными агрегатами.

При $|\Delta f| > |\Delta f_{\max}|$ регулирующее воздействие создается отклонением нагрузки от заданного значения и отклонением частоты. Если $\Delta f = f - f_n < -\Delta f_{\max}$, воздействие на вход исполнительного блока равно

$$\Delta P + k_f (\Delta f + \Delta f_{\max}),$$

если $\Delta f = f - f_n > +\Delta f_{\max}$, то

$$\Delta P + k_f (\Delta f - \Delta f_{\max}).$$

При таких воздействиях нагрузка станции будет изменяться так, чтобы в системе восстановилось прежнее значение частоты согласно рис. 131.

§ 4. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АРЧМ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ НЕСКОЛЬКИМИ СТАНЦИЯМИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В основу построения системы АРЧМ при регулировании частоты несколькими станциями могут быть положены те же принципы, что и при регулировании частоты одной станцией. В этом случае каждую станцию необходимо рассматривать как один эквивалентный агрегат. Однако простейшие принципы распределения нагрузки (пропорциональное распределение, выравнивание) между агрегатами не всегда обеспечивают экономический режим работы при регулировании частоты одной станцией и тем более — в случае регулирования частоты несколькими станциями.

Для осуществления таких принципов регулирования необходимо значительное количество электрических связей между элементами отдельных агрегатов. Например, при регулировании по мнимостатическим характеристикам требуются двухсторонние связи между УРАНОм и узлами регулятора каждого агрегата, в случае выравнивания нагрузок — связи между измерительными элементами мощности и силовыми блоками, которые при регулировании несколькими станциями должны осуществляться средствами телемеханики. Поэтому, если частота регулируется несколькими станциями, пропорциональное распределение нагрузок между ними или выравнивание не применяются.

Большинство современных систем АРЧМ для крупных энергосистем, где частота регулируется несколькими станциями, экономично распределяют нагрузку между станциями и агрегатами по интегральному отклонению частоты. При таком регулировании особенно сказываются преимущества интегрального отклонения

частоты в качестве общего параметра задания. Это объясняется не только тем, что в этом случае принципиально просто экономично распределить нагрузку между станциями и агрегатами, но и тем, что этот параметр легко можно получить в любой точке системы, так как изменение частоты при нормальных эксплуатационных режимах во всей системе одинаково. Если изменение частоты во всей системе одинаково, можно значительно сократить количество телемеханических связей между отдельными узлами АРЧМ, расположенных на различных станциях, а в некоторых случаях — полностью их исключить.

В настоящее время в Советском Союзе разработаны две системы АРЧМ для крупных энергосистем, экономично распределяющие нагрузку по интегральному отклонению частоты: система ОРГРЭС и система ВНИИЭ.

Система автоматического регулирования, разработанная в ОРГРЭС. Упрощенная блок-схема системы АРЧМ приведена на рис. 133 [53]. На центральном диспетчерском пункте системы ЦДП или в другой точке системы устанавливается центральный датчик относительного прироста ЦДОП, состоящий из измерительного элемента частоты Δf , усилителя (на схеме не показанного) и интегрирующего устройства (двигателя). Интегрирующее устройство формирует на выходе воздействие, пропорциональное

интегральной функции отклонения частоты $\int_{t_0}^t F(\Delta f) dt$, которым в некотором масштабе определяется изменение относительного прироста системы $g - g_0$.

При экономичном распределении нагрузки между станциями их относительные приросты должны быть одинаковыми. Поэтому система регулирования построена так, что ЦДОП одновременно воздействует на функциональные преобразователи I, II станций, определяющие нагрузку станции в зависимости от величины относительного прироста:

$$P_I = \varphi_1(g); \quad P_{II} = \varphi_2(g).$$

Это устройство в целом называется диспетчерским автоматическим распределителем активных нагрузок (АРАН-Д).

Функциональные преобразователи с ЦДП через каналы связи K передают задание экономической станционной нагрузки на соответствующие исполнительные блоки ИБ_I и ИБ_{II} внутростанционных распределителей (АРАН-С). Распределители АРАН-С представляют собой систему функциональных преобразователей (I_1, I_2

и т. д.), воспроизводящих требуемую зависимость нагрузки агрегатов от общего параметра задания (общестанционная нагрузка или относительный прирост):

$$P_{I_1} = \psi_1(P_I); P_{I_2} = \psi_2(P_I) \text{ и т. д.}$$

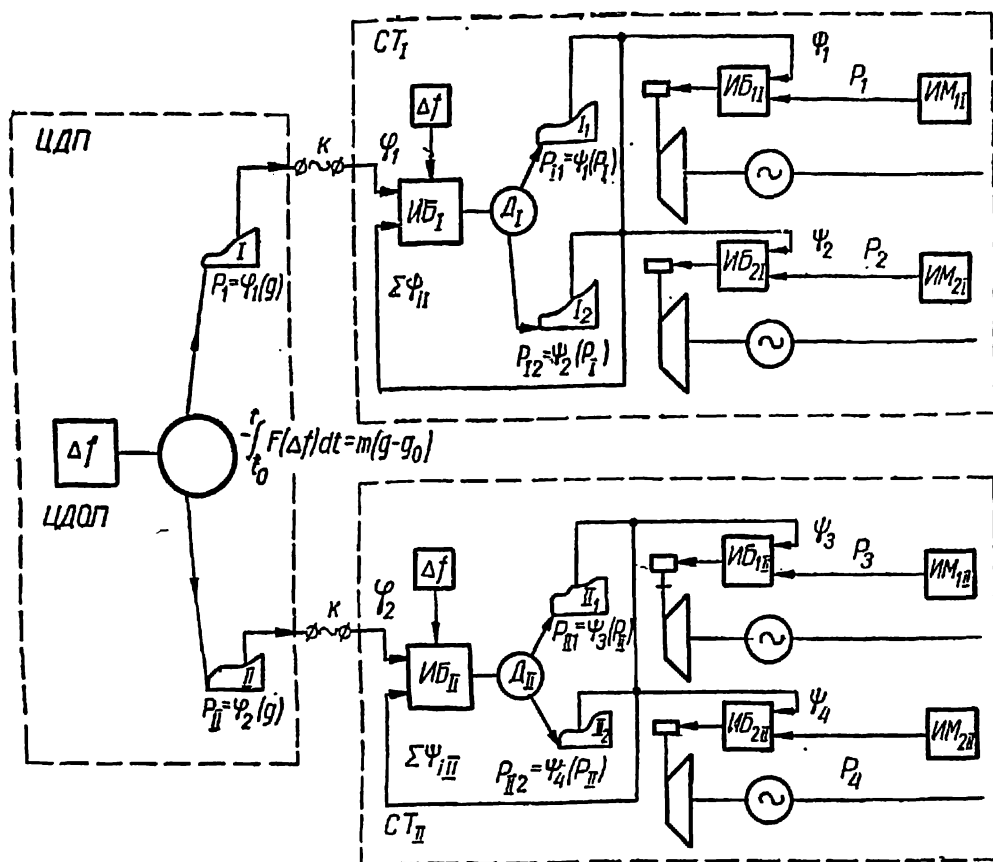


Рис. 133. Упрощенная блок-схема системы АРЧМ, разработанной в ОРГРЭС.

На вход исполнительного блока АРАН-С, помимо воздействия от функциональных преобразователей ЦДОП, подаются воздействия, пропорциональные мгновенному отклонению частоты Δf и суммарной заданной нагрузке станции $\sum_1^n \psi_{II}$. Последнее воздействие противоположно воздействию от ЦДОП.

Исполнительный двигатель (D_I или D_{II}) внутростанционного распределителя находится в состоянии покоя в случае равенства нулю алгебраической суммы воздействий на входе исполнительного

блока, т. е. уравнение характеристики регулирования для l -й станции имеет вид

$$k_f \Delta f + k_p \left(\sum_1^n \psi_i - \varphi_l \right) = 0,$$

или

$$\Delta f + k_c \left(\sum_1^n \psi_i - \varphi_l \right) = 0, \quad (4,43)$$

где

$$k_c = \frac{k_p}{k_f}.$$

При отклонении частоты от номинального значения приходят в действие ЦДОП и станционные распределители нагрузки. ЦДОП изменяет величину относительного прироста системы и, следовательно, посредством функциональных преобразователей ЦДП изменяет задание нагрузки станции, причем это задание изменяется до тех пор, пока не устранится отклонение частоты ($\Delta f = 0$).

Когда частота в системе восстановится, двигатели внутростанционных распределителей нагрузки еще могут продолжать вращаться, изменяя настройку функциональных преобразователей станции до тех пор, пока согласно выражению (4,43) не установится равенство между заданием от ЦДОП и фактическим суммарным заданием нагрузки данной станции

$$\sum_1^n \psi_{il} = \varphi_l. \quad (4,44)$$

Таким образом, суммарное задание нагрузки станции, устанавливаемое ЦДОП, соответствует экономически наиболее выгодной величине нагрузки.

На вход исполнительного блока внутростанционного распределителя принципиально можно не вводить воздействие по мгновенному отклонению частоты Δf , так как изменение задания φ_l в любом случае прекращается при $\Delta f = 0$ и равенство (4,44) в установившемся режиме обязательно выполняется. Однако качество регулирования при этом значительно ухудшается.

Уравнение характеристики регулирования регулятора нагрузки l -го агрегата имеет вид

$$\Psi_l - P_l = 0, \quad (4,45)$$

т. е. агрегаты загружаются так, что обеспечивается экономичный режим работы станции.

Воздействие по мгновенному отклонению частоты можно подавать не на вход станционного распределителя, а на вход исполнительного блока регулятора каждого агрегата.

Система АРЧМ, содержащая межстанционный распределитель нагрузки, который установлен на ЦДП, позволяет диспетчеру контролировать задаваемые станциям нагрузки и, если необходимо, изменять их, воздействуя на установочные элементы. Однако надежность действия этой системы зависит от надежности телемеханических каналов связи, которая не всегда достаточна. Кроме того, эта система АРЧМ не обеспечивает экономически наиболее выгодное распределение нагрузки между станциями при разделении энергосистемы на несинхронно работающие части (за исключением одной ее части, связанной с ЦДП). Если изменяется состав включенных на станции агрегатов, необходимо на ЦДП менять зависимости нагрузки станции от относительного прироста системы.

Система автоматического регулирования, разработанная во ВНИИЭ. Отличительной особенностью этой системы АРЧМ является то, что электростанции получают задания не в виде мощности, а в виде относительного прироста [39]. Мощности, которые должны развивать электростанции, определяются децентрализованно на каждой станции. Эта система называется децентрализованной системой автоматического управления режимом по частоте и активной мощности (ДЕСАУР ЧМ).

ВНИИЭ разработал два варианта ДЕСАУР ЧМ. В первом варианте ДЕСАУР ЧМ ВНИИЭ на ЦДП или в другой точке системы устанавливается центральный датчик относительного прироста. Устройства, определяющие требуемую экономическую нагрузку станции (станционные функциональные преобразователи), устанавливаются непосредственно на станции. Так как относительный прирост нагрузки системы должен быть одинаковым для всех станций, то его значение, полученное на ЦДП, можно передать по одному телеканалу для группы станций. В системе АРЧМ ОРГРЭС каждая станция связана телеканалом со своим функциональным преобразователем, установленным на диспетчерском пункте. Принцип построения системы АРЧМ, предложенный во ВНИИЭ, позволяет, в некоторых случаях, сократить до минимума необходимое количество телеканалов.

Упрощенная блок-схема первого варианта системы ДЕСАУР ЧМ, разработанной во ВНИИЭ, изображена на рис. 134.

Центральный датчик относительного прироста через телеканалы K передает на исполнительные блоки $ИБ_1$ и $ИБ_{II}$ станционных

распределителей нагрузки величину, одинаковую для всех станций и пропорциональную относительному приросту нагрузки системы.

Одновременно на входы исполнительных блоков подаются воздействия, пропорциональные мгновенному отклонению частоты

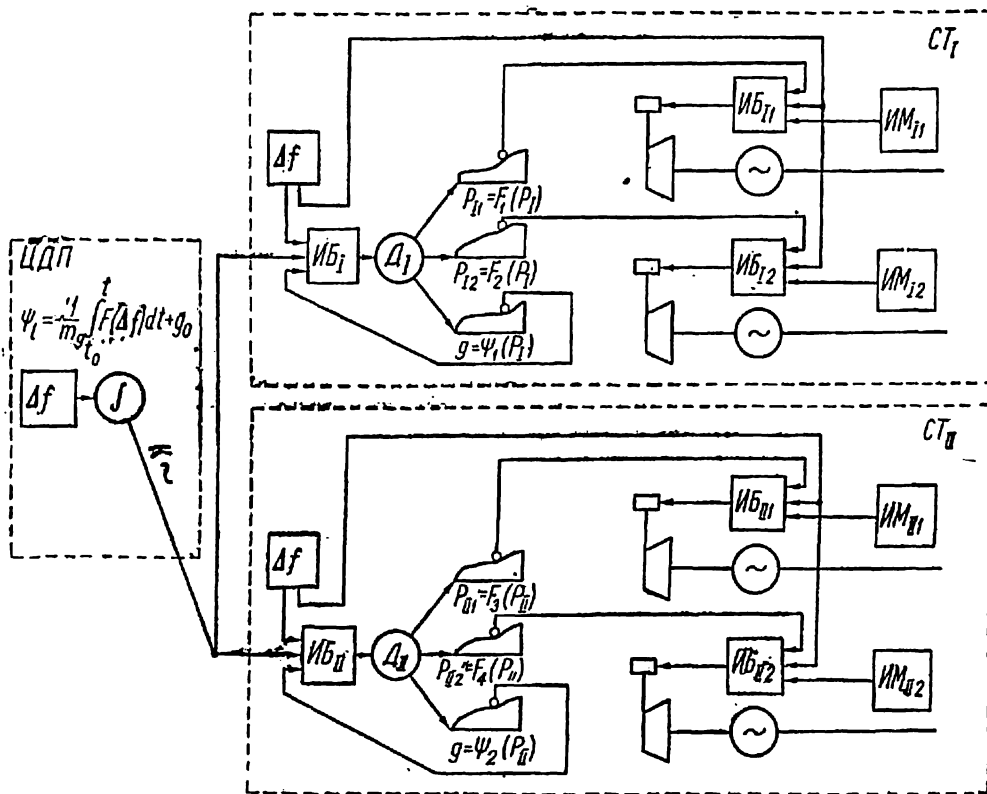


Рис. 134. Упрощенная блок-схема первого варианта системы ДЕКАУР ЧМ, разработанной во ВНИИЭ.

и относительного прироста станции, причем воздействие по относительному приросту станции противоположно воздействию от центрального датчика относительного прироста. Величина относительного прироста станции обрабатывается специальным функциональным преобразователем в зависимости от суммарной нагрузки станции.

Величина, пропорциональная требуемой суммарной нагрузке станции и подаваемая на вход станционных функциональных преобразователей, определяется суммарным углом поворота якоря двигателя станционного распределителя D_I или D_{II} . Возможность использования суммарного угла поворота якоря двигателя в качестве величины, определяющей суммарную нагрузку станции,

вытекает из качественного совпадения характеров изменения этих величин. Действительно, с ростом нагрузки системы увеличивается интегральная функция отклонения частоты. Следовательно, баланс регулирующих воздействий на входе исполнительных блоков станционных распределителей нарушается, и якорь двигателя вращается в определенную сторону до тех пор, пока частота не восстановится и не компенсируется изменение нагрузки станции.

Таким образом, с ростом нагрузки системы (станции) увеличивается и угол поворота якоря двигателя станционного распределителя.

Уравнение характеристики регулирования станционного распределителя l -й станции имеет вид

$$\Delta f + s_g (\Psi_l - g) = 0, \quad (4,46)$$

где Ψ_l — интегральная функция отклонения частоты, определяющая относительный прирост системы;

g — относительный прирост станции;

s_g — коэффициент статизма.

В установившемся режиме отклонение частоты $\Delta f = 0$ величина относительного прироста нагрузки системы имеет определенное значение (интегральная функция отклонения частоты не изменяется) и согласно выражению (4,46) $\Psi_l = g$, т. е. относительные приросты станций равны между собой и равны относительному приросту системы.

Из выражения (4,46) видно, что система ДЕСАУР ЧМ обеспечивает равенство относительных приростов станций и экономично распределяет нагрузки между ними.

Уравнение характеристики регулирования агрегата имеет вид

$$\Delta f + s_p (P_l - F_l) = 0,$$

где F_l — функция относительного прироста, определяющая экономичную нагрузку агрегата;

P_l — фактическая нагрузка агрегата;

s_p — коэффициент статизма.

Таким образом, агрегаты загружаются так, что обеспечивается экономический режим работы станции.

С помощью второго варианта ДЕСАУР ЧМ можно регулировать частоту и экономично распределять нагрузку между станциями без телеканалов. В этом случае датчики относительных приростов устанавливаются на каждой станции, т. е. относитель-

ный прирост нагрузки системы определяется децентрализованно. Относительные приросты, определенные на различных станциях, должны быть одинаковыми.

Поэтому при децентрализованном определении относительного прироста системы его нельзя определить по интегральной функции

отклонения частоты $\int_{t_0}^t F(\Delta f) dt$, так как практически невозможно

выполнить одинаковыми функции F на всех станциях. В этом случае относительный прирост необходимо определить по точному значению интегрального отклонения

частоты $\int_{t_0}^t \Delta f dt$, которое одинаково для всей системы.

Для определения интегрального отклонения частоты (относительного прироста нагрузки системы) на каждой станции устанавливается источник эталонного значения частоты $f_{\text{эт}}$, которая сравнивается с фактической частотой системы.

Интегральное отклонение частоты

$$|\delta_1 f| = \left| \int_{t_0}^t (f - f_{\text{эт}}) dt \right| = \left| \int_{t_0}^t \Delta f dt \right|.$$

Практически величину $\delta_1 f$ можно получить с помощью дифференциального сельсина (или синхроскопа), если обмотку статора питать от сети, а обмотку ротора — от источника эталонного значения частоты (рис. 135).

Скорость вращения ротора в этом случае пропорциональна разности частот напряжений, питающих его статор и ротор, и, следовательно, угол поворота ротора α пропорционален величине $\delta_1 f$

$$\alpha = \gamma \left| \int_{t_0}^t (f_{\text{ст}} - f_{\text{рот}}) dt \right| = \gamma \left| \int_{t_0}^t (f - f_{\text{эт}}) dt \right| = \gamma |\delta_1 f| = m_1 g,$$

где $f_{\text{ст}}$ и $f_{\text{рот}}$ — частоты напряжений статора и ротора;

γ , m_1 — коэффициенты пропорциональности.

Величина напряжения e , снимаемого с потенциометра и определяемая углом α , пропорциональна величине относительного при-

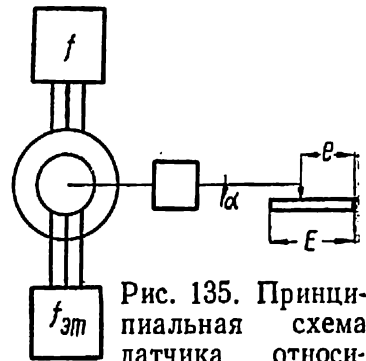


Рис. 135. Принципиальная схема датчика относительного прироста.

роста g . Это устройство представляет собой датчик относительного прироста. Вторым вариантом ДЕСАУР ЧМ отличается от первого варианта наличием таких индивидуальных датчиков относительного прироста и отсутствием центрального датчика относительного прироста.

Децентрализованные системы АРЧМ, разработанные во ВНИИЭ, имеют следующие преимущества: незначительное количество телеканалов и возможность работы системы регулирования при разделении энергосистемы на несинхронно работающие части (особенно во втором варианте). Однако эти системы имеют тот недостаток, что задание нагрузки станции определяется на самой станции, и диспетчер не имеет возможности вносить необходимые коррективы в распределение нагрузок между регулирующими станциями.

В настоящее время в Советском Союзе ведутся работы по усовершенствованию систем автоматического регулирования режимов энергосистем по частоте и активной мощности.

В системах АРЧМ, разработанных в США (по-видимому, несколько позже, чем в СССР) регулирование осуществляется по критерию

$$R = \Delta P_{\text{обм}} + K\Delta f,$$

где $\Delta P_{\text{обм}}$ — изменение обменной мощности между частями энергосистемы.

Общим параметром задания является интегральная функция $\int_{t_0}^t R dt$. В системе Минеаполис — Хоннейуэл [52, 53] предусматривается центральный стационарный распределитель, подобный распределителю системы ОРГРЭС. Нагрузка распределяется не по электрической нагрузке генераторов, а по положению МИС. При этом ухудшается точность распределения, но улучшается динамика регулирования.

В системе регулирования Дженерал Электрик на центральном диспетчерском пункте устанавливается только датчик общего пара-

метра задания $R + \int_{t_0}^t R dt$, подобный датчику системы ВНИИЭ, а функциональные преобразователи стационарных нагрузок, определяемых по относительному приросту, устанавливаются на станциях. Нагрузки распределяются по положению кулачкового вала регулирующих клапанов турбины.

§ 5. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ В СЕТИ

Полуавтоматическое распределение активной нагрузки с учетом потерь в сети. Рассмотренные системы АРЧМ, разработанные в ОРГРЭС и ВНИИЭ, можно применять в энергосистемах, охватывающих относительно небольшую территорию и у которых потери в основной сети столь невелики, что их можно не учитывать при распределении активной нагрузки. В крупной энергосистеме с развитой основной сетью, в объединенной энергосистеме (энергообъединении) и тем более в единой энергосистеме страны необходимо учитывать экономичность производства электроэнергии на станциях и ее транспортировки по линиям электропередачи.

Для оперативного распределения нагрузки между электростанциями с учетом потерь в сети необходимо вычислить текущие значения относительных приростов потерь $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ для каждой из n электростанций и использовать эти величины в соответствии с уравнением (4,13). В результате этого усложняется полная автоматизация распределения нагрузки. В настоящее время в некоторых энергосистемах и энергообъединениях применяется полуавтоматическая система распределения нагрузки, при которой автоматизируется только вычислительная работа по определению экономически целесообразных величин мощности или относительных приростов электростанций для текущих режимов работы. На диспетчерском пункте устанавливается вычислительная машина, являющаяся «советчиком» диспетчера [35]. Информация о режиме работы энергосистемы и о состоянии ее оборудования вводится в вычислительную машину персоналом диспетчерской службы или автоматически через телеканалы.

На некоторых станциях энергосистемы регулируется частота (вручную или автоматически). Остальные станции работают по диспетчерскому суточному графику нагрузки. Суточные графики нагрузки электростанций предварительно составляются диспетчерской службой энергосистемы на основании предполагаемых графиков нагрузок энергосистемы и предполагаемого состава ее оборудования.

Время от времени на вычислительной машине выполняются расчеты экономически целесообразного распределения текущей нагрузки энергосистемы. Результаты выполненных расчетов сопоставляются с фактическим распределением активной нагрузки. Если относительные приросты нагрузок некоторых станций

отличаются от экономически наивыгоднейших, то диспетчер дает указание о соответствующих изменениях нагрузки этих станций.

Внедрение полуавтоматической системы облегчается тем, что для выполнения расчетов экономического распределения нагрузки в энергосистемах и объединениях изготавливаются специализированные вычислительные машины, а также разработаны методы использования универсальных цифровых вычислительных машин [3, 49, 50, 57].

Автоматическое регулирование частоты и экономическое распределение активной нагрузки с учетом потерь в сети (АРЧЭРАНУП) имеет значительные преимущества перед ручным или полуавтоматическим распределением активной нагрузки, но только в том случае, если оно обеспечивает более точное приближение режима работы энергосистемы к экономически наивыгоднейшему [13].

В Советском Союзе системы АРЧЭРАНУП разработаны в Энергетическом институте АН СССР (ЭНИИ АН СССР) [39], Ленинградском политехническом институте им. Калинина (ЛПИ) [56, 57], ВНИИЭ [39], Институте автоматики (г. Киев) [59], лаборатории автоматики Карельского филиала АН СССР [16]. Значительное внимание уделяется автоматическому распределению нагрузки с учетом потерь в сети за рубежом. В энергосистеме «Коммонуэлс Эдисон» (США) в 1960 г. установлена система АРЧЭРАНУП, выполненная с применением вычислительных устройств непрерывного действия. Она распределяет нагрузку между 37 агрегатами десяти электростанций энергосистемы [23]. Другая система, выполненная с применением вычислительных устройств непрерывного действия и цифровой вычислительной машины, установлена в США в энергосистеме «Филадельфия Электрик», где она распределяет нагрузку между 34 агрегатами девяти станций [63].

Для достижения наибольшего технико-экономического эффекта обычно стремятся к тому, чтобы система АРЧЭРАНУП распределяла нагрузку между всеми электростанциями энергосистемы (станции, не охваченные системой АРЧЭРАНУП, работают по диспетчерскому суточному графику с неавтоматической корректировкой нагрузки при отклонениях относительного прироста станции от экономически наивыгоднейшего).

В энергосистемах устройства АРЧЭРАНУП распределяют нагрузку между электростанциями или агрегатами. В энергообъединениях эти устройства также могут непосредственно распределять нагрузку между станциями или агрегатами. Но устройствами АРЧЭРАНУП можно распределять нагрузку энергообъединения между входящими в его состав энергосистемами, а внутри каждой энергосистемы — другими автоматическими устройствами. В Единой энергетической системе СССР возможно многоступенчатое распределение нагрузки со ступенями: единая энергосистема — энергообъединение — энергосистема — электростанция — агрегат.

Дальнейшие пояснения для определенности будут относиться к распределению нагрузки энергосистемы между электростанциями.

В системах АРЧЭРАНУП обрабатывается общая для всех электростанций величина g_c относительного прироста системы. В соответствии с уравнениями* (4, 10) относительные приросты отдельных электростанций

$$g_i = (1 - \sigma_i) g_c \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4,47)$$

вычисляются умножением относительного прироста системы g_c на поправочный коэффициент $1 - \sigma_i$, а мощность P каждой станции (агрегата) — с помощью функционального преобразования

$$P = \varphi(g_i), \quad (4,48)$$

заданного характеристикой относительного прироста станции (агрегата). Все вычисления выполняются автоматически вычислительными устройствами или вычислительной машиной.

В некоторых системах АРЧЭРАНУП определение величин $1 - \sigma_i$ и выполнение преобразований (4,48) осуществляются вычислительной машиной или вычислительными устройствами, располагаемыми на диспетчерском пункте энергосистемы. К таким (централизованным) системам АРЧЭРАНУП относятся системы ЭНИН АН СССР, ЛПИ и система, примененная в энергосистеме «Филадельфия Электрик».

Системы АРЧЭРАНУП, предложенные ВНИИЭ, являются децентрализованными, так как в них обе операции производятся на электростанциях.

В системе АРЧЭРАНУП, установленной в энергосистеме «Коммонуэлс Эдисон», на диспетчерском пункте вычисляются величины $1 - \sigma_i$ и определяются относительные приросты электростанций. Экономически целесообразные нагрузки электростанций (точнее, нагрузки отдельных агрегатов) определяются с помощью функциональных преобразователей на месте по величине относительного прироста, переданной с диспетчерского пункта. Поэтому такая система является централизованной системой АРЧЭРАНУП с децентрализованной обработкой заданной мощности.

Свойства централизованных и децентрализованных систем АРЧЭРАНУП. С помощью централизованных систем диспетчер может легко контролировать распределение нагрузки в энергосистеме и быстро корректировать его. При использовании централизованной системы АРЧЭРАНУП легче перейти в дальнейшем

* Рассматривается простейший случай энергосистемы без гидростанций и тепловых станций, работающих с заданным расходом топлива.

к более полной автоматизации оперативного управления энергосистемой при помощи управляющей машины.

К преимуществам централизованной системы относится также принципиальная возможность точного учета потерь в сети при любой ее конфигурации. Следует, однако, учитывать, что для реализации этой возможности необходимо на диспетчерский пункт средствами телемеханики передавать сведения о нагрузках всех линий электропередачи (всех подстанций) основной сети энергосистемы (помимо передачи на диспетчерский пункт информации о мощностях электростанций и с диспетчерского пункта командных сигналов на электростанции). Кроме того, для точного определения поправочных коэффициентов $1-\sigma_i$ требуется относительно сложное вычислительное устройство (вычислительная машина). Необходимый объем поступающей на диспетчерский пункт информации без существенного снижения точности определения экономически целесообразных нагрузок электростанций удастся значительно уменьшить, не учитывая потери в коротких малонагруженных линиях и применяя приближенные методы определения относительных приростов потерь. Но и в этом случае при централизованном распределении нагрузки необходимо значительное количество телемеханических каналов и аппаратуры.

В находящееся на диспетчерском пункте центральное устройство АРЧЭРАНУП должны вводиться характеристики относительных приростов электростанций. Но эти характеристики зависят от состава и состояния включенного в работу оборудования. Характеристики относительного прироста гидростанций зависят от напора воды, который может изменяться. Чтобы правильно распределять нагрузку, дежурный персонал диспетчерского пункта должен всегда иметь данные о фактических характеристиках относительного прироста электростанций и вовремя корректировать закладываемую в устройство АРЧЭРАНУП информацию. Если дежурный персонал не успевает управляться с этой работой, экономически целесообразное распределение нагрузки нарушается. Можно осуществить автоматический ввод характеристик относительного прироста электростанций, передаваемых на диспетчерский пункт по телеканалам, но это значительно усложняет систему АРЧЭРАНУП. Трудности, связанные с учетом изменений характеристик относительного прироста электростанций, являются недостатком централизованной системы.

Децентрализованные системы АРЧЭРАНУП, разработанные в Советском Союзе, представляют собой развитие децентрализованных систем ВНИИЭ, описанных в предыдущем параграфе.

На каждой из электростанций, между которыми распределяется нагрузка, для вычисления величины $I - \sigma_i$ используется информация о режимах работы ряда линий электропередачи. Иногда эту информацию можно получить непосредственно на электростанции, в остальных случаях она передается на станцию по телеканалам. Используя приближенные методы определения относительного прироста потерь, можно обойтись небольшим количеством телеканалов. Применяя датчики относительного прироста, можно получить значение относительного прироста энергосистемы непосредственно на электростанции, т. е. без использования средств телемеханики. Следует также учесть, что при децентрализованной системе на диспетчерский пункт не надо передавать значения нагрузок электрических станций. По-видимому, для децентрализованных систем АРЧЭРАНУП потребуется меньшее количество телеканалов, чем для централизованных, что является их преимуществом.

Не менее важное преимущество децентрализованной системы АРЧЭРАНУП заключается в том, что характеристики относительных приростов электростанций или агрегатов вводятся в устройства, находящиеся на самих электростанциях. При этом значительно облегчается работа диспетчера.

Децентрализованные системы АРЧЭРАНУП для крупных энергообъединений предполагается осуществлять с установкой на электростанциях датчиков интегрального отклонения частоты (датчиков относительного прироста). Применение сложных и дорогостоящих датчиков является недостатком этой системы. Отметим еще один недостаток децентрализованной системы АРЧЭРАНУП: при децентрализации распределения нагрузки диспетчер не может непосредственно корректировать автоматическое распределение активной нагрузки.

Централизованные системы АРЧЭРАНУП с децентрализованной отработкой заданной мощности имеют все преимущества централизованных систем. В то же время им свойственно существенное преимущество децентрализованных систем: характеристики относительных приростов электростанций или агрегатов вводятся в систему непосредственно на электростанциях.

Система АРЧЭРАНУП, разработанная во ВНИИЭ. Рассматриваемая система АРЧЭРАНУП, выполненная на базе второго варианта децентрализованной системы АРЧМ (§ 4, гл. 4), отличается следующими особенностями, связанными с учетом потерь в сети при распределении активной нагрузки:

- 1) интегральное отклонение частоты используется для передачи

на электрические станции относительного прироста системы g_c , так как относительные приросты электростанций неодинаковы;

2) на электрических станциях устанавливаются устройства (измерители относительного прироста сети) для вычисления величины $\frac{1}{1-\sigma_i}$, называемой относительным приростом сети, или логарифма этой величины. В эти устройства поступает информация о режимах работы линий электропередачи, связывающих станцию с балансирующей точкой энергосистемы;

3) величина g_i относительного прироста i -й электростанции обрабатывается на электростанции в соответствии со значениями интегрального отклонения частоты и относительного прироста сети.

Для регулирования частоты и распределения нагрузки энергосистемы (энергообъединения) согласно уравнениям (4, 10) принципиально можно использовать вариант схемы станционных устройств АРЧЭРАНУП, представленной на рис. 136, а. Станционное устройство этой системы регулирования отличается от устройств, разработанных для второй децентрализованной системы АРЧМ (см. § 4, гл. 4), наличием измерителя относительного прироста ИОПС и делительного устройства ДУ.

В функциональные преобразователи $\Phi\Pi_1$ и $\Phi\Pi_2$ введены характеристики относительных приростов соответствующих блоков электростанции. При подаче величины cg_i , пропорциональной относительному приросту электростанции g_i , на входы функциональных преобразователей последние обрабатывают выходные величины $k_p P_{i1}$ и $k_p P_{i2}$, пропорциональные заданным мощностям агрегатов P_{i1} и P_{i2} в соответствии с их характеристиками относительных приростов. В установившемся режиме системы АРЧЭРАНУП мощности агрегатов равны заданным величинам, и, следовательно, входная величина функциональных преобразователей равна cg_i .

Точно так, как и в рассмотренных децентрализованных системах ВНИИЭ, функциональные преобразователи $\Phi\Pi_1$ и $\Phi\Pi_2$ воздействуют на соответствующие исполнительные блоки, управляющие электродвигателями МИС. Исполнительные блоки, а также измерители мощности и блок измерения частоты на рис. 136 не показаны.

Датчики интегрального отклонения частоты ДИОЧ, называемые также датчиками относительного прироста (см. § 3, гл. 4), каждого из станционных устройств АРЧЭРАНУП обрабатывают

одинаковую величину (напряжение) — $a \int_{t_0}^t \Delta f dt + A$, линейно зави-

сящую от интегрального отклонения частоты (a и A — постоянные величины). Измеритель относительного прироста сети ИОПС на i -й электростанции создает выходную величину $\frac{1}{1 - \sigma_i}$.

Частное $(1 - \sigma_i) \left(-a \int_{t_0}^t \Delta f dt + A \right)$ от деления первой величины на вторую обрабатывается делительным устройством ДУ и пода-

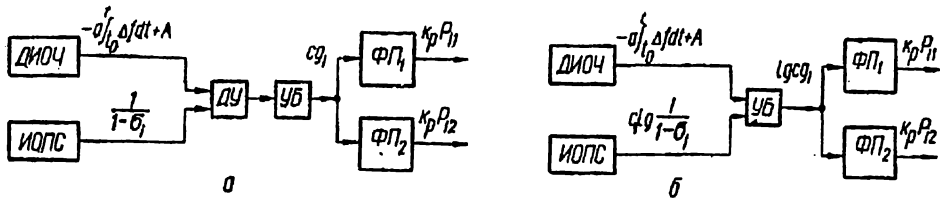


Рис. 136. Упрощенные блок-схемы станционных устройств АРЧЭРАНУП для блочной тепловой электростанции.

ется на вход усилительного блока УБ, выходная величина которого $k(1 - \sigma_i) \left(-a \int_{t_0}^t \Delta f dt + A \right)$ пропорциональна входной (k — коэффициент пропорциональности). Приравнивая выходную величину усилительного блока входной величине gc_i функциональных преобразователей, получаем

$$\frac{gc_i}{1 - \sigma_i} = -\frac{ak}{c} \int_{t_0}^t \Delta f dt + \frac{Ak}{c}.$$

Постоянные величины $\frac{ak}{c}$ и $\frac{Ak}{c}$ выбираются одинаковыми для всех станций, между которыми автоматически распределяется нагрузка. Из последнего равенства видно, что рассматриваемая система АРЧЭРАНУП распределяет нагрузку согласно уравнению (4,10), причем между относительным приростом энергосистемы и интегральным отклонением частоты существует линейное соотношение

$$g_c = -m \int_{t_0}^t \Delta f dt + g_{c0}, \quad (4,49)$$

где $g_{c0} = \frac{Ak}{c}$ — относительный прирост энергосистемы при $t = t_0$;

$m = \frac{ak}{c}$ — постоянный коэффициент.

Схема стационарного устройства АРЧЭРАНУП, разработанного во ВНИИЭ (рис. 136, б), не содержит делительного устройства. Операция деления заменена в этой схеме операцией вычитания, для которой не нужна специальная аппаратура, так как выполняется непосредственно в усилительном блоке УБ.

Измерители относительного прироста сети ИОПС выполняются так, что их выходные величины пропорциональны логарифму относительного прироста сети, а функциональные преобразователи $\Phi\Pi_1$, $\Phi\Pi_2$ и другие — так, что их входные величины пропорциональны логарифму относительного прироста электростанции. Нетрудно показать, что при таком исполнении стационарных устройств АРЧЭРАНУП обеспечивается экономически наивыгоднейшее распределение нагрузок, причем интегральное отклонение частоты является мерой не относительного прироста системы, а его логарифма. Действительно,

$$k \left(-a \int_{t_0}^t \Delta f dt + A - c_1 \lg \frac{1}{1-\sigma_i} \right) = c \lg g_i,$$

откуда при соблюдении условия

$$kc_1 = 0$$

с учетом выражения (4,10) получаем

$$\lg g_c = -m \int_{t_0}^t \Delta f dt + \lg g_{c0}. \quad (4,50)$$

При наличии в энергосистеме тепловых электростанций, работающих с заданным расходом топлива, и гидроэлектростанций, работающих с заданным расходом воды, рассматриваемая децентрализованная система АРЧЭРАНУП может распределять нагрузку в соответствии с уравнением (4,13). Нетрудно убедиться, что для этого в усилительном блоке из величины $-\int_{t_0}^t \Delta f dt + A$ должны вычитаться две величины: $c_1 \lg \frac{1}{1-\sigma_i}$ и $c_1 \lg \alpha_i$ (для тепловой электростанции) или $c_1 \lg \frac{1}{1-\sigma_i}$ и $c_1 \lg \lambda_i$ (для гидроэлектростанции).

Автоматизация экономического распределения нагрузки с использованием принципа деления нагрузки на плановую и внеплановую. Нагрузки электростанций в каждый момент времени можно

рассматривать как сумму двух составляющих: плановой (соответствующей заранее разработанному диспетчерскому суточному графику) и внеплановой (представляющей собой отклонение действительной нагрузки от запланированной). Графики нагрузки электростанций планируются диспетчерскими службами энергосистем (энергообъединений), исходя из предполагаемых графиков потребления электроэнергии в узловых точках основной сети, составляемых с довольно высокой точностью на основании накопленного опыта. На основании изучения графиков суммарной нагрузки некоторых энергосистем установлено, что отклонения фактических нагрузок от запланированных не превышают $\pm (5 \div 6)\%$ от номинальной мощности энергосистемы, причем в течение (65—75)% годового времени отклонения не превышают $\pm (1 \div 2)\%$ [59]. Поэтому внеплановые нагрузки составляют небольшую часть фактических нагрузок электростанций.

При делении нагрузки на плановую и внеплановую легче автоматизировать экономическое распределение нагрузки с учетом потерь в сети [16, 29, 48, 59]. Рассматриваемый принцип заключается в следующем.

Осуществляя при помощи вычислительных устройств (машин) экономически целесообразное распределение предполагаемой нагрузки с достаточно точным учетом потерь в сети, диспетчерская служба энергосистемы составляет и заранее передает всем электростанциям суточные графики их плановых нагрузок или плановых значений их относительных приростов. Графики плановых величин воспроизводятся на станциях устройствами задания графиков нагрузки или графиков относительных приростов, создающими в каждый момент времени выходную величину (например, напряжение, ток), которая пропорциональна планируемой величине. Запланированные нагрузки или относительные приросты электростанций автоматически корректируются в соответствии с фактической нагрузкой энергосистемы. Корректировка осуществляется упрощенным методом: без учета потерь в сети или с приближенным их учетом. Однако при этом топливо почти не перерасходуется, так как внеплановые нагрузки очень малы.

Системы АРЧЭРАНУП с делением нагрузки на плановую и внеплановую называются комбинированными. Распределение плановой нагрузки в комбинированных системах является централизованным.

Поправки к плановым нагрузкам или плановым относительным приростам электростанций могут обрабатываться на диспетчерском пункте и передаваться на электростанции по каналам связи.

Не меньшие перспективы имеют системы с корректировкой относительных приростов непосредственно на электростанциях. В этом случае мерой отклонения относительного прироста энергосистемы от запланированного может служить интегральное отклонение частоты, для измерения которого на электростанциях устанавливаются датчики интегрального отклонения частоты. В комбинированных системах требования к точности работы этих датчиков могут быть значительно понижены, так как погрешность датчика отражается не на полной величине относительного прироста электростанции, а только на поправке к ней.

Комбинированные системы АРЧЭРАНУП. Блок-схема стационарного устройства АРЧЭРАНУП для блочной тепловой электрической станции с двумя агрегатами изображена на рис. 137, а. Станционное устройство состоит из устройства задания графика относительного прироста УЗГП, датчика интегрального отклонения частоты ДИОЧ, суммирующего устройства Σ и двух функциональных преобразователей $\Phi\Pi_1$ и $\Phi\Pi_2$. Входная величина cg_i функциональных преобразователей $\Phi\Pi_1$ и $\Phi\Pi_2$ пропорциональна относительному приросту электростанции, выходные величины $k_p P_{i1}$ и $k_p P_{i2}$ пропорциональны заданным мощностям агрегатов.

На вход суммирующего устройства поступают выходная величина устройства задания графика относительного прироста cg_{in} , пропорциональная запланированному относительному приросту станции g_{in} , и отработанная датчиком интегрального отклонения

частоты величина $-a \int_{t_0}^t \Delta f dt + A$. Выходная величина суммирующего устройства в установившемся режиме равна cg_i . В то же время

$$cg_i = cg_{in} - a \int_{t_0}^t \Delta f dt + A,$$

откуда получаем уравнение устройства АРЧЭРАНУП для установившегося режима системы

$$g_i = g_{in} - k \int_{t_0}^t \Delta f dt + \Delta_0 g, \quad (4,51)$$

где $\Delta_0 g = \frac{A}{c} = (g_i - g_{in})_{t=t_0}$ и $k = \frac{a}{c}$ — постоянные величины, которые выбираются для всех электростанций одинаковыми.

Следовательно, поправки к плановому относительному приросту

$$\Delta g = g_i - g_{\text{пл}} = -k \int_{t_0}^t \Delta f dt + \Delta_{0g} \quad (4,52)$$

также оказываются для всех станций одинаковыми. Таким образом, внеплановая нагрузка в рассматриваемой системе АРЧЭРАНУП распределяется без учета потерь в сети по равенству отклонений относительных приростов от плановых величин. Из расчетов, выполненных в Институте автоматики (г. Киев) следует, что при таком способе распределения внеплановой нагрузки энергосистемы перерасход топлива мал по сравнению с его расходом в оптимальном режиме энергосистемы [59].

При отклонениях частоты от заданной величины система действует следующим образом. Допустим, например, что частота в энергосистеме повысилась, в то время как плановые относительные приросты $g_{\text{пл}}$ электростанций на протяжении некоторого отрезка времени остаются неизменными. Интегральное отклонение

частоты $\int_{t_0}^t \Delta f dt$ начинает увеличиваться, а величина Δg в соответ-

ствии с выражением (4,52) — уменьшаться, вследствие чего снижаются заданные значения относительных приростов электростанций и мощностей агрегатов. Впуск энергоносителя в турбины уменьшается, частота снижается, и после окончания переходного процесса наступает новое состояние равновесия* с заданным значением частоты и несколько сниженными величинами относительных приростов электростанций и мощностей агрегатов. Легко видеть, что снижение частоты в энергосистеме также устраняется рассматриваемыми станционными устройствами.

В другом варианте комбинированной системы АРЧЭРАНУП применяются станционные устройства, выполненные по схеме на рис. 137, б. В этом устройстве для относительных приростов электростанций используется логарифмический масштаб: входная величина функциональных преобразователей $\Phi П_1$ и $\Phi П_2$ пропорциональна логарифму относительного прироста $\lg g_i$, а выходная величина устройства задания графика относительного прироста — логарифму запланированного относительного прироста $\lg g_{\text{пл}}$.

Действие устройства АРЧЭРАНУП в установившемся режиме системы характеризуется следующим уравнением, которое можно

* Предполагается, что система АРЧЭРАНУП устойчива.

получить, приравняв выходную величину суммирующего устройства сумме входных величин,

$$\lg g_i = \lg g_{\text{пл}} - k \int_{t_0}^t f dt + \Delta_0 \lg g, \quad (4,53)$$

где $\Delta_0 \lg g = \frac{A}{c} = (\lg g_i - \lg g_{\text{пл}})_{t=t_0}$ и $k = \frac{a}{c}$ — постоянные величины.

Величина

$$\Delta \lg g = \lg g_i - \lg g_{\text{пл}} = -k \int_{t_0}^t \Delta f dt + \Delta_0 \lg g \quad (4,54)$$

является одинаковой для всех охватываемых системой электрических станций поправкой к запланированному значению логарифма относительного прироста станции. Следовательно, и в этом случае внеплановая нагрузка распределяется без учета потерь в сети.

Из выражения (4,54) следует, что

$$\Delta \lg g = \lg(1 + \beta), \quad (4,55)$$

где β — относительное отклонение относительного прироста электростанции от плановой величины,

$$\beta = \frac{g_i - g_{\text{пл}}}{g_{\text{пл}}} = \frac{\Delta g}{g_{\text{пл}}}. \quad (4,56)$$

Учитывая, что $\beta \ll 1$, с помощью приближенного равенства

$$\lg(1 + \beta) \approx \beta \lg e$$

получаем

$$\Delta \lg g \approx \beta \lg e, \quad (4,57)$$

т. е. поправка $\Delta \lg g$, обрабатываемая датчиком интегрального отклонения частоты, пропорциональна относительному отклонению от запланированной величины относительного прироста электрической станции.

При несоответствии фактического режима энергосистемы запланированному внеплановые нагрузки в схеме на рис. 137, а определяются одинаковой для всех станций величиной Δg , а в схеме на рис. 137, б — одинаковой величиной $\lg(1 + \beta)$ и, следовательно, величиной β . Но величины Δg и β связаны соотношением (4,56). Если учесть, что плановые относительные приросты различных электростанций близки по величине, то из выражения (4,56) можно видеть, что при одинаковых значениях

величин Δg величины β для всех электростанций почти одинаковые. Аналогично при одинаковых значениях β почти одинаковы для всех станций величины Δg . Так как величинами Δg или β определяются только поправки к плановым относительным приростам электростанций, то оба варианта рассматриваемых устройств обеспечивают почти одинаковое распределение нагрузки и по расходу топлива в энергосистеме практически равноценны.

Для повышения устойчивости и качества регулирования частоты в рассматриваемые устройства можно ввести блоки измерения частоты ИЧ, как это показано штрихом на рис. 137, а и б.

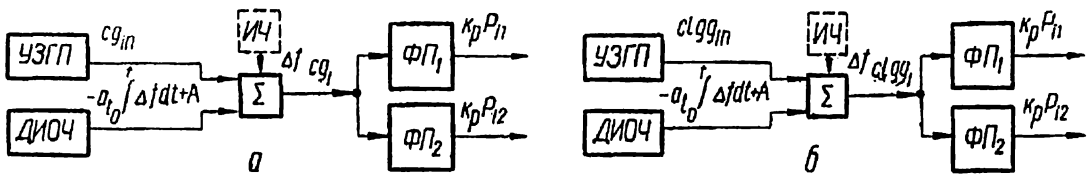


Рис. 137. Упрощенные блок-схемы станционных устройств АРЧЭРАНУП с использованием принципа деления нагрузки на плановую и внеплановую.

Оба рассмотренных варианта систем АРЧЭРАНУП с делением нагрузки на плановую можно применить на практике. Первый вариант (рис. 137, а) положен в основу системы, разработанной Институтом автоматики (г. Киев) [56], второй (рис. 137, б) — принят лабораторией автоматики Карельского филиала АН СССР [16]. Заметим, что при использовании для относительных приростов логарифмического масштаба облегчается корректировка характеристик относительного прироста агрегатов в случае изменения их состояния или условий работы, упрощается выполнение устройств АРЧЭРАНУП для электростанций, работающих с заданным расходом топлива или воды, а также можно грубо учитывать потери в сети при распределении внеплановой нагрузки.

Автоматическое регулирование частоты и экономическое распределение активной нагрузки в крупных энергообъединениях отличается следующими существенными особенностями.

1. Экономическое распределение нагрузки усложняется в связи с наличием в крупном энергообъединении большого количества электростанций. При этом нужно учитывать, что характеристики относительных приростов электростанций зависят от состава, состояния и условий работы оборудования; коэффициенты α и λ электрических станций с регламентированным расходом энергоресурсов также изменяются.

2. Электропередачи, связывающие между собой энергосистемы или их отдельные районы, во многих случаях являются слабыми связями, т. е. имеют небольшую пропускную способность по сравнению с мощностями соединяемых ими частей энергообъединения. Предельно допустимая мощность слабой связи определяется условиями устойчивости. Распределение нагрузки должно обеспечить наименьшую стоимость электроэнергии, вырабатываемой в энергообъединении, но с соблюдением условия ограничения потоков мощности в слабых связях заданными предельными величинами*.

3. Крупные энергообъединения охватывают большие территории и имеют слабые связи, потери мощности в которых могут быть велики, поэтому намного увеличивается значение учета потерь в сети при распределении нагрузки. Изменение потребления электрической мощности в части энергообъединения в основном должно покрываться более близкими электростанциями.

Для крупных энергообъединений и ЕЭС могут быть использованы комбинированные системы АРЧЭРАНУП с делением нагрузки на плановую и внеплановую. На этом принципе основана система АРЧЭРАНУП института Энергосетьпроект [29]. Система Энергосетьпроект предусматривает распределение внеплановой нагрузки по интегральному отклонению частоты между выделенными для этой цели электростанциями энергообъединения, на которые также возлагается задача регулирования потоков мощности в слабых связях (остальные электростанции работают по запланированному графику изменения относительного прироста или мощности). Это дает возможность использовать для распределения активной нагрузки небольшое количество каналов связи и датчиков интегрального отклонения частоты. Распределение нагрузки в энергообъединении приближается к экономически наиболее выгоднейшему, так как плановые нагрузки определяются с точным учетом потерь в сетях. Экономичность распределения нагрузки в энергообъединении будет повышаться по мере привлечения к регулированию частоты большего количества электростанций.

Управляющие машины для оперативного управления энергосистемами. В дальнейшем будет решена задача создания управляющих машин для полной автоматизации оперативного управления энергосистемой. Такая машина вместе с комплексом автоматических устройств должна выполнять большинство функций дис-

* При внезапных аварийных нарушениях режима линий электропередачи перегрузки, угрожающие нарушением устойчивости, должны устраняться специальной противоаварийной автоматикой.

петчера энергосистемы и ряд новых функций управления энергосистемой в нормальных и аварийных режимах. Экономически наиболее выгодное распределение активной и реактивной нагрузок управляющая машина будет производить с высокой точностью.

Все этапы перехода к полной автоматизации управления режимом энергосистемы должны быть оправданы технико-экономическим анализом, учитывающим экономическую целесообразность, эксплуатационную надежность и техническую подготовленность [39].

§ 6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЧАСТОТЫ

Измерительные элементы частоты систем АРЧМ предназначены для выявления отклонения частоты от заданного значения и создания соответствующего регулирующего воздействия, необходимого для устранения этого отклонения.

В процессе регулирования частота системы изменяется незначительно. Поэтому достаточно, чтобы необходимая зависимость между выходной величиной измерительного элемента и отклонением частоты выдерживалась в относительно узких пределах (несколько процентов) ее изменения. Измерительные элементы автоматических регуляторов частоты строятся так, что при заданном (номинальном) значении частоты их выходная величина (напряжение, ток, разность напряжений или токов) равна нулю. Если частота отклоняется от заданного значения, на выходе измерительного элемента появляется воздействие соответствующих величины и знака. Так как в энергосистемах частота регулируется с очень высокой точностью и общий параметр задания нагрузки может формироваться по интегральной функции отклонения частоты, то измерительные элементы систем АРЧМ должны работать без зоны нечувствительности и их стабильность должна быть очень высокой.

При отклонении частоты на 0,05—0,1% от номинального значения на выходе измерительного элемента должно появиться воздействие, достаточное для приведения в действие всей системы автоматического регулирования частоты и активной мощности.

Качество процесса регулирования и условия устойчивости улучшаются с уменьшением количества звеньев системы регулирования. Количество звеньев (усилительных элементов) тем меньше, чем больше выходная мощность отдельных элементов системы. В этом отношении измерительные элементы системы АРЧМ строятся так, что при одной и той же потребляемой мощности и отклонении частоты Δf их выходная величина максимальная.

В настоящее время имеется много различных конструкций измерительных элементов частоты, но все их можно разделить на две принципиально различные конструкции:

1) электрические (параметрические) измерительные элементы частоты;

2) электромеханические измерительные элементы частоты.

Электрические измерительные элементы частоты представляют собой активно-индуктивные, активно-емкостные или индуктивно-емкостные цепи, токи в которых и их фазы относительно приложен-

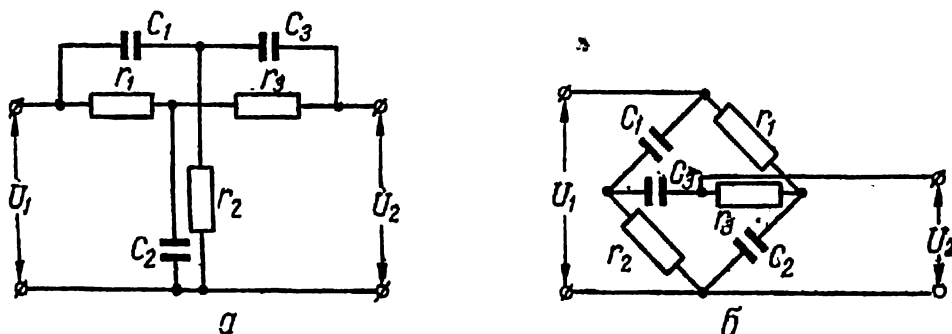


Рис. 138. Принципиальная схема измерительного элемента частоты системы АРЧМ ОРГРЭС.

ного напряжения изменяются с изменением частоты. Принцип действия электромеханических измерительных элементов основан на том, что механические упругие системы (камертон, струна) изменяют фазу своих колебаний относительно фазы возбуждающей силы в зависимости от частоты этой силы.

Рассмотрим принцип действия и схемы измерительных элементов систем АРЧМ, разработанных и применяемых в СССР.

Измерительный элемент частоты системы АРЧМ, разработанной в ОРГРЭС. В системе АРЧМ, разработанной ОРГРЭС [21], применяется электрический измерительный элемент частоты, представляющий собой двойную активно-емкостную Т-образную схему, или двойной Т-образный фильтр. Принципиальная схема двойного Т-образного фильтра изображена на рис. 138, а и в более развернутом виде — на рис. 138, б.

Параметры схемы можно подобрать так, что при номинальной частоте питающего напряжения U_1 выходное напряжение измерительного элемента U_2 равно нулю. При отклонении частоты от номинального значения на выходе двойного Т-образного фильтра появляется напряжение определенной величины и фазы, причем

с изменением знака отклонения частоты фаза выходного напряжения меняется на противоположную.

Таким образом, двойной Т-образный фильтр при соответствующем подборе его параметров может создать воздействие на входе АРЧМ определенной величины и знака, необходимое для устранения отклонения частоты.

На рис. 139 показаны зависимости относительно значения напряжения на выходе $\frac{U_2}{U_1}$ (амплитудная характеристика) и угла

сдвига фаз α между напряжениями на выходе U_2 и на входе U_1 (фазовая характеристика) в функции относительно значения частоты $\frac{f}{f_H}$ для измерительного элемента системы АРЧМ ОРГРЭС. Из приведенных характеристик видно, что в небольшом диапазоне отклонения частоты от номинального значения (примерно 10%) измерительный элемент имеет примерно линейную характеристику $\frac{U_2}{U_1} = F\left(\frac{f}{f_H}\right)$.

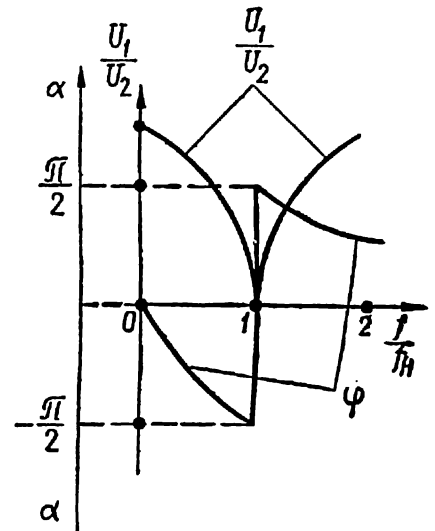


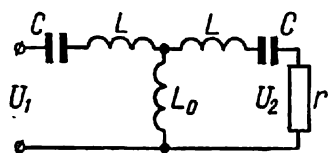
Рис. 139. Характеристики двойного Т-образного фильтра.

В некоторых случаях необходимо получить линейную зависимость выходной величины измерительного элемента от частоты в широком диапазоне ее изменения. Соответствующей настройкой двойного Т-образного фильтра можно получить такую зависимость. Двойной Т-образный фильтр можно настроить так, что при некоторой заданной частоте f_3 напряжение на его выходе U_2 будет отлично от нуля, но совпадать по фазе с входным напряжением U_1 . Такая настройка фильтра называется ненулевой.

В измерительном элементе с ненулевой настройкой выходной величиной является составляющая выходного напряжения U_2 , сдвинутая по фазе относительно напряжения U_1 на угол $\frac{\pi}{2}$. Таким образом, если $f = f_3$, выходная величина измерительного элемента с ненулевой настройкой равна нулю. При отклонении частоты от заданного значения напряжение U_2 изменяется по величине и по фазе относительно напряжения U_1 , причем составляющая напряжения U_2 , сдвинутая по фазе относительно напряжения U_1 на

угол $\frac{\pi}{2}$ (выходная величина измерительного элемента), в этом случае примерно пропорциональна отклонению частоты $\Delta f = f - f_0$ от заданного значения в широких пределах изменения частоты.

Применяя высокостабильные конденсаторы и сопротивления, можно выполнить измерительный элемент частоты по схеме двойного Т-образного фильтра с высокостабильными характеристиками. Двойной Т-образный фильтр имеет малую постоянную времени.



а

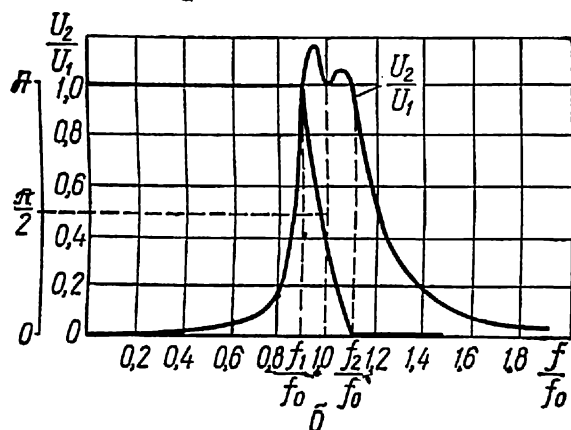


Рис. 140. Схема и характеристики частотного полосового фильтра.

рехполюсник, имеющий следующие свойства [41].

Если частота входного напряжения равна некоторой величине f_0 , то при определенном подборе параметров фильтра, включенного на активное сопротивление r , равное его повторному сопротивлению, которое рассчитано для данной f_0 , то угол сдвига фаз между входным и выходным напряжением фильтра U_1 и U_2 равен $\frac{\pi}{2}$. При этом величина выходного напряжения U_2 равняется входному напряжению U_1 . В некотором диапазоне изменения частоты от f_1 до f_2 при условии

$$f_1 < f_0 < f_2$$

величина выходного напряжения фильтра U_2 изменяется незначительно и остается примерно равной величине U_1 , но угол сдвига

Измерительный элемент частоты, разработанный ВНИИЭ. Во ВНИИЭ в 1947 г. разработан измерительный элемент частоты с частотным полосовым фильтром [39]. Имеется много различных схем частотных полосовых фильтров. Схема частотного Т-образного полосового фильтра, примененного в измерительном элементе частоты ВНИИЭ, изображена на рис. 140, а.

Полосовой частотный фильтр представляет собой симметричный реактивный четы-

фаз α между входным и выходным напряжениями при этом изменится от π до 0.

Диапазон частот от f_1 до f_2 называется зоной прозрачности фильтра. При частотах $f < f_1$ и $f > f_2$ выходное напряжение фильтра U_2 резко уменьшается. Примерные амплитудная и фазовая характеристики Т-образного частотного полосового фильтра в функции относительно значения частоты $\frac{f}{f_0}$ изображены на рис. 140, б.

Принцип действия измерительного элемента частоты, разработанного ВНИИЭ, основан на описанных свойствах полосового фильтра. Принципиальная схема измерительного элемента частоты системы ВНИИЭ изображена на рис. 141 [39]. Выходное напряжение $U_{2\phi}$ частотного полосового фильтра ЧПФ подводится к диагонали ab моста, собранного из двух одинаковых полуобмоток ac и ad питающего трансформатора Tr и двух выпрямителей B_1 и B_2 , собранных по двухполупериодной схеме. Такая схема называется фазочувствительной, так как с изменением угла сдвига фаз между напряжением U_1 и напряжением $U_{2\phi}$ диагонали ab изменяется разность выходных выпрямленных токов I_1 и I_2 .

Воздействие измерительного элемента (рис. 141) на последующие элементы системы АРЧМ создается разностью выпрямленных токов $\Delta I = I_1 - I_2$.

На частотный полосовой фильтр от обмотки ω_2 питающего трансформатора Tr поступает напряжение $U_{1\phi}$, совпадающее по фазе с напряжением U_1 . Следовательно, угол сдвига фаз между выходным $U_{2\phi}$ и входным $U_{1\phi}$ напряжениями фильтра равен углу сдвига фаз между напряжениями $U_{2\phi}$ и U_1 . Напряжения на выпрямителях на основании второго закона Кирхгофа

$$\dot{U}_{B_1} = \dot{U}_1 + \dot{U}_{2\phi}; \quad (4,58)$$

$$\dot{U}_{B_2} = \dot{U}_1 - \dot{U}_{2\phi}. \quad (4,59)$$

Если параметры частотного полосового фильтра подобрать так, что частота f_0 будет равной номинальному значению частоты f_n ,

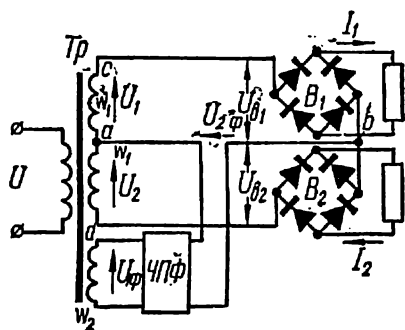


Рис. 141. Принципиальная схема измерительного элемента частоты, разработанного во ВНИИЭ.

то согласно рис. 140, б при частоте питающего напряжения

$$f = f_0 = f_n$$

угол сдвига фаз α между напряжениями $U_{2\phi}$ и U_1 равен $\frac{\pi}{2}$.

Из векторной диаграммы (рис. 142, а) напряжений измерительного элемента частоты, построенной по уравнениям (4,58) и (4,59), видно, что в этом случае величины напряжений U_{B_1} и U_{B_2} равны между собой и при равных сопротивлениях нагрузки выпрямителей z равны между собой выпрямленные токи I_1 и I_2 .

Таким образом, если $f = f_n$, регулирующее воздействие измерительного элемента

$$\Delta I = I_1 - I_2 = 0.$$

При частоте питающего напряжения

$$f_2 > f > f_n$$

согласно рис. 140, б

$$\alpha < \frac{\pi}{2}$$

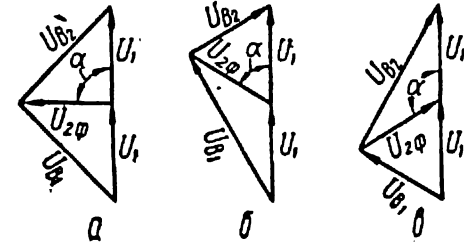


Рис. 142. Векторные диаграммы напряжений измерительного элемента частоты ВНИИЭ:
а — $f = f_n$; б — $f > f_n$; в — $f < f_n$.

и векторная диаграмма напряжений в этом случае изображена на рис. 142, б (величина напряжения $U_{2\phi}$ в зоне прозрачности фильтра принимается неизменной). Из рис. 142, б видно, что, если частота питающего напряжения превышает номинальное значение, $U_{B_1} > U_{B_2}$ и на выходе измерительного элемента создается воздействие определенной величины и знака

$$\Delta I = I_1 - I_2 > 0.$$

Если частота питающего напряжения

$$f_1 < f < f_n,$$

то

$$\alpha > \frac{\pi}{2}$$

и согласно рис. 142, в $U_{B_1} < U_{B_2}$. В этом случае знак регулирующего воздействия на выходе измерительного элемента изменяется на обратный:

$$\Delta I = I_1 - I_2 < 0.$$

Чувствительность измерительного элемента определяется величиной разности токов ΔI при некотором отклонении частоты Δf

от номинального значения. Чем больше величины напряжений на выпрямителях, тем выше чувствительность элемента. Однако напряжение, подводимое к выпрямителям, не должно превышать некоторой допустимой величины, определяемой прочностью выпрямителей. Можно доказать, что при заданной величине напряжения на выпрямителях чувствительность измерительного элемента максимальная, если

$$U_1 = U_{2\phi}.$$

Так как с уменьшением зоны прозрачности фильтра возрастает крутизна его частотной фазовой характеристики (рис. 140, б), то чувствительность измерительного элемента ВНИИЭ тем больше, чем меньше зона прозрачности. Величина зоны прозрачности фильтра определяется заданной зоной регулирования частоты и принимается в системе АРЧМ ВНИИЭ $\pm 3\%$ относительно f_n . Измерительный элемент, разработанный ВНИИЭ, имеет высокую чувствительность и малую постоянную времени (примерно 0,01 сек) [39].

К недостаткам рассматриваемого измерительного элемента частоты относится его нестабильность, вызываемая нестабильностью индуктивностей, которые выполняются на ферромагнитных сердечниках с воздушными зазорами.

Измерительный элемент частоты, разработанный ЭНИН АН СССР. Принципиальная схема измерительного элемента частоты, разработанного ЭНИН АН СССР в 1948 г., изображена на рис. 143 [4]. Действие такого измерительного элемента основано на свойстве камертона изменять фазу своих колебаний в зависимости от частоты возмущающей силы.

На ножках камертона K (рис. 143) укреплены постоянные магниты M_1 и M_2 , против которых установлены неподвижные электромагниты $ЭМ_1$ и $ЭМ_2$, собранные на трехстержневых сердечниках. На средних стержнях этих электромагнитов расположены обмотки O_1 и O_2 . Обмотка O_1 питается напряжением контролируемой частоты, а обмотка O_2 через усилитель $У$ включена в средний провод фазочувствительной схемы, состоящей из двух обмоток

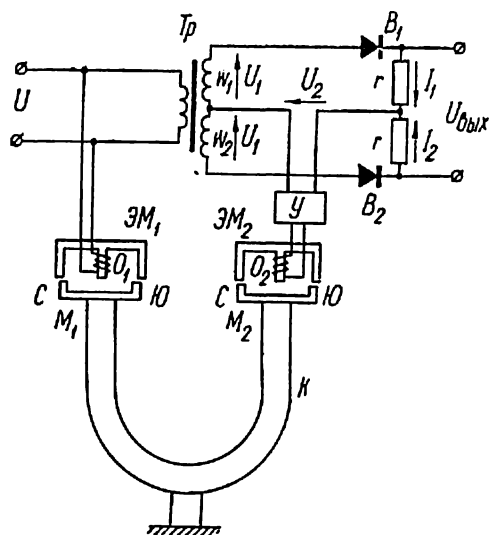


Рис. 143. Принципиальная схема измерительного элемента частоты системы ЭНИН АН СССР.

питающего трансформатора Tp , двух выпрямителей B_1 и B_2 и двух равных сопротивлений r .

В среднем стержне электромагнита $\mathcal{E}M_1$ под действием питающего напряжения U возникает переменный магнитный поток, замыкающийся через полюса постоянного магнита M_1 и крайние стержни сердечника $\mathcal{E}M_1$. В один из полупериодов изменения переменной составляющей потока магнитная индукция в зазоре одного из полюсов (например, C) увеличивается, а в другом зазоре — уменьшается. В следующий полупериод индукция увеличивается в зазоре другого полюса (т. е. $Ю$). Вследствие поочередного изменения величины магнитной индукции в зазорах на ножку камертона будет воздействовать периодически изменяющаяся сила, частота которой равна частоте питающего напряжения или контролируемой частоте.

Так как возмущающая сила определяется переменной составляющей магнитного потока, то фаза силы, действующей на ножку камертона, совпадает с фазой переменной составляющей магнитного потока. Если активное сопротивление обмотки электромагнита $\mathcal{E}M_1$ очень мало по сравнению с его индуктивным сопротивлением, то переменная составляющая магнитного потока отстает по фазе от питающего напряжения примерно на $\frac{\pi}{2}$ и, следовательно, сдвиг между возмущающей силой и питающим напряжением также составляет $\frac{\pi}{2}$.

Под действием возмущающей силы ножки камертона начнут колебаться, и магнитный поток в среднем стержне электромагнита $\mathcal{E}M_2$ будет изменяться по периодическому закону с частотой и фазой колебаний камертона. Под действием периодически изменяющегося в среднем стержне потока в потоке O_2 индуцируется э. д. с., пропорциональная скорости изменения магнитного потока и, следовательно, скорости движения ножек камертона. Таким образом, фаза индуцируемой в обмотке O_2 э. д. с. совпадает с фазой скорости движения ножек камертона, а величина этой э. д. с. пропорциональна частоте и амплитуде переменной составляющей потока, т. е. амплитуде колебаний камертона. Из теоретической механики известно, что если частота возмущающей силы равна частоте собственных колебаний камертона

$$f = f_{с. к.},$$

то фазы возмущающей силы и скорости движения ножек совпадают. Так как возмущающая сила в этом случае отстает по фазе

от питающего напряжения на угол $\frac{\pi}{2}$, то скорость, а следовательно, и э. д. с., индуцируемая в обмотке O_2 , отстает по фазе от напряжения U на угол $\frac{\pi}{2}$.

Таким образом, если частота собственных колебаний камертона равна номинальному значению частоты f_n , то при $f = f_n = f_{с.к}$ напряжение в среднем проводе фазочувствительной схемы, равное усиленной э. д. с. обмотки O_2 , сдвинуто относительно напряжения U на $\frac{\pi}{2}$ и среднее значение выходного напряжения (регулирующее воздействие) согласно рис. 142

$$U_{\text{вых}} = r(I_1 - I_2) = 0.$$

Если частота возмущающей силы меньше частоты собственных колебаний камертона

$$f < f_n = f_{с.к},$$

то скорость движения ножек опережает по фазе возмущающую силу и, следовательно, угол сдвига фаз между питающим напряжением и э. д. с. обмотки O_2 меньше $\frac{\pi}{2}$ (рис. 142, б). В этом случае $I_1 > I_2$ и на выходе измерительного элемента появляется регулирующее воздействие

$$U_{\text{вых}} = r(I_1 - I_2) > 0.$$

При частоте возмущающей силы

$$f > f_n = f_{с.к}$$

скорость движения ножек камертона отстает по фазе от возмущающей силы, и угол сдвига фаз между напряжением U и э. д. с. обмотки ω_2 больше 90° и, следовательно, знак регулирующего воздействия изменяется на обратный:

$$U_{\text{вых}} = r(I_1 - I_2) < 0.$$

На рис. 144 изображены частотные амплитудная (кривая 1) и фазовая (кривая 2) характеристики камертона, причем в качестве фазовой характеристики приведена кривая зависимости абсолютного значения угла сдвига фаз φ_2 между питающим напряжением U и скоростью движения ножек камертона. Из рис. 144 видно, что при отклонении частоты от номинального значения ($f_n = f_{с.к}$) амплитуда колебаний ножек камертона резко уменьшается и, сле-

довательно, резко уменьшаются э. д. с. обмотки O_2 и выходное напряжение измерительного элемента. В обычных камертонах полоса высоких амплитуд составляет доли процента от частоты собственных колебаний и, следовательно, зона регулирования в таких измерительных элементах может оказаться недостаточной.

Для расширения зоны регулирования применяют камертон со специальным воздушным демпфером. Так как э. д. с. обмотки O_2 незначительна, для получения необходимой чувствительности измерительного элемента применен усилитель $У$. Камертонный измерительный элемент имеет очень высокую стабильность и малую постоянную времени.

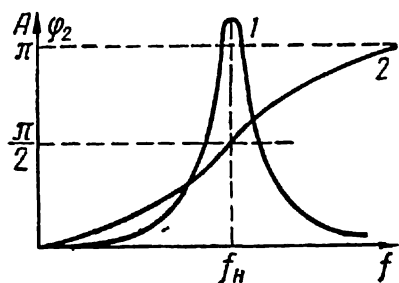


Рис. 144. Частотные амплитудная и фазовая характеристики камертона.

Нестабильность частоты собственных колебаний камертона, обусловленная изменением температуры окружающей среды, устраняется, если изготовить камертон из специальных сплавов или поместить его в термостат.

Конструкция и схема измерительного элемента частоты системы ЭНИИН АН СССР сложнее конструкции рассмотренных ранее измерительных элементов.

§ 7. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МОЩНОСТИ

Измерительные элементы мощности в системах АРЧМ предназначены для выявления отклонения фактической мощности генератора (станции) от заданного значения и создания регулирующего воздействия, устраняющего это отклонение.

Если частота в процессе регулирования изменяется незначительно, то нагрузка агрегата при регулировании и распределении ее между агрегатами изменяется значительно, и, следовательно, в широких пределах изменяется (вручную или автоматически) задание нагрузки. Поэтому измерительные элементы мощности должны быть сконструированы так, чтобы между их выходной величиной (напряжением, током) и измеряемой нагрузкой в широких пределах выдерживалась линейная зависимость.

Согласно правилам устройств электроустановок [46] при автоматическом регулировании погрешность поддержания нагрузки на заданном уровне не должна превышать $\pm 2\%$. Учитывая возможную погрешность измерительных трансформаторов, погрешность сравнения фактической и заданной величины нагрузки, погреш-

ность измерительного элемента мощности в системе АРЧМ должна быть меньше чем $\pm 2\%$.

Для устойчивой работы и малого количества усилительных звеньев системы автоматического регулирования частоты и активной мощности измерительные элементы мощности должны иметь малую постоянную времени и достаточную выходную мощность.

В некоторых случаях, когда генераторы работают на общие шины или напряжение шин станции практически остается неиз-

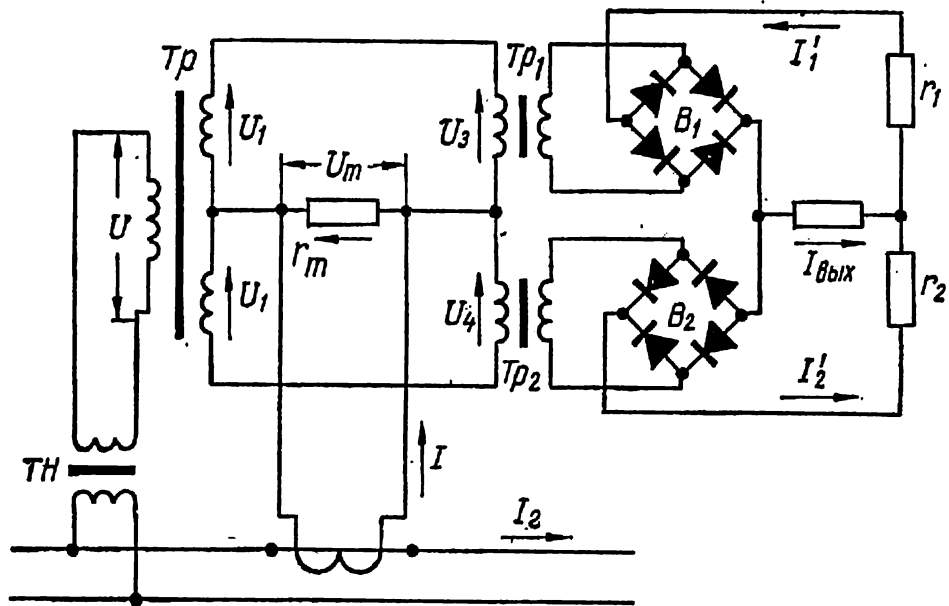


Рис. 145. Схема измерительного элемента активного тока.

менным, вместо измерительных элементов мощности для целей распределения (в первом случае) и регулирования нагрузки (во втором случае) можно применять измерительные элементы активного тока.

Измерительный элемент активного тока. Схема измерительного элемента активного тока приведена на рис. 145. Измерительный элемент активного тока представляет собой фазочувствительное устройство, питающееся от трансформатора напряжения генератора. В средний провод фазочувствительного устройства подводится напряжение, пропорциональное току генератора (от трансформатора тока). Промежуточные трансформаторы Tr_1 и Tr_2 электрически разделяют цепи переменного тока выпрямителей. Векторная диаграмма напряжений измерительного элемента тока аналогична векторной диаграмме измерительного элемента частоты (рис. 142)

и показана на рис. 146, причем угол φ равен углу сдвига фаз между напряжением и током нагрузки. Выходной ток $I_{\text{вых}}$ измерительного элемента активного тока согласно закону Кирхгофа равен разности выпрямленных токов I'_1 и I'_2 выпрямителей B_1 и B_2

$$I_{\text{вых}} = I'_1 - I'_2, \quad (4,60)$$

которые пропорциональны напряжениям на выпрямителях

$$\left. \begin{aligned} I'_1 &= k_1 U_3; \\ I'_2 &= k_1 U_4; \end{aligned} \right\} \quad (4,61)$$

Из векторной диаграммы (рис. 146) видно, что

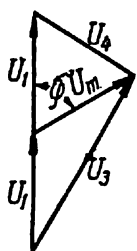


Рис. 146. Векторная диаграмма напряжений измерительного элемента активного тока.

$$\begin{aligned} U_3 &= \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \varphi} = \\ &= U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 + 2\frac{U_2}{U_1} \cos \varphi}; \end{aligned} \quad (4,62)$$

$$\begin{aligned} U_4 &= \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \varphi} = \\ &= U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 - 2\frac{U_2}{U_1} \cos \varphi}. \end{aligned} \quad (4,63)$$

Если принять, что

$$\frac{U_2}{U_1} \ll 1,$$

то, разлагая в ряд выражения (4,62) и (4,63) по величине

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \pm 2\frac{U_2}{U_1} \cos \varphi$$

и ограничиваясь двумя первыми членами разложения, получим

$$U_3 \approx U_1 \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{U_2^2}{U_1^2} + \frac{U_2}{U_1} \cos \varphi \right); \quad (4,64)$$

$$U_4 \approx U_1 \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{U_2^2}{U_1^2} - \frac{U_2}{U_1} \cos \varphi \right). \quad (4,65)$$

Так как

$$U_2 = r_{\tau} \frac{I_2}{N_i},$$

Dp_1 и Dp_2 , выполненных на ферромагнитных сердечниках. Промежуточные трансформаторы работают в режиме трансформаторов тока. Реактивные катушки с ферромагнитным сердечником имеют нелинейную вольт-амперную характеристику, зависящую от свойств ферромагнитного материала (кривой намагничивания) и параметров сердечника и обмотки. Вольт-амперная характеристика цепи, состоящей из последовательно включенных реактивной катушки

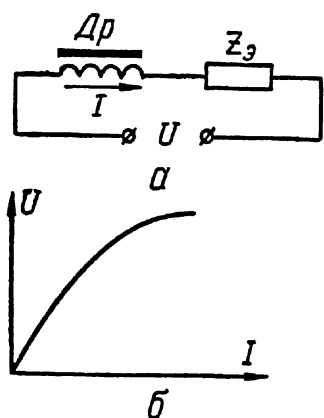


Рис. 148. Схема замещения нелинейного дросселя и промежуточного трансформатора и ее эквивалентная вольт-амперная характеристика при переменном напряжении.

(Dp_1 или Dp_2) и эквивалентного сопротивления со стороны первичной обмотки промежуточного трансформатора тока (Tr_1 или Tr_2) с учетом его нагрузки z_3 (рис. 148, а), для эффективных значений напряжения и тока изображается кривой, показанной на рис. 148, б. Параметры реактивной катушки, сердечника, промежуточного трансформатора тока и его эквивалентной нагрузки рассчитываются так, что в определенных пределах изменения напряжения U_3 (или U_4) вольт-амперная характеристика рассматриваемой цепи с достаточной точностью приближается к квадратичной зависимости

$$I_1 = I_0 + aU_3^2 \quad (4,67)$$

или

$$I_2 = I_0 + aU_4^2, \quad (4,68)$$

где I_0 и a — постоянные величины.

Векторная диаграмма напряжений электромагнитного элемента мощности ничем не отличается от векторной диаграммы измерительного элемента активного тока и, следовательно, напряжения U_3 и U_4 определяются выражениями (4,62) и (4,63).

Выпрямленные токи I'_1 и I'_2 пропорциональны первичным токам I_1 и I_2 промежуточных трансформаторов, поэтому с учетом выражений (4,67) и (4,68) получим

$$I_{\text{вых}} = I'_1 - I'_2 = k_1(I_1 - I_2) = k_1 a (U_3^2 - U_4^2). \quad (4,69)$$

Подставляя в выражение (4,69) значения напряжений из выражений (4,62) и (4,63) и учитывая, что

$$U_T = \frac{r_T I_T}{N_i}; \quad (4,70)$$

$$U_1 = \frac{U_T}{N_u N_T}, \quad (4,71)$$

определяем выходной ток измерительного элемента активной мощности

$$I_{\text{вых}} = \frac{4k_1 a r_T}{N_u N_i N_T} U_{\Gamma} I_{\Gamma} \cos \varphi = kP, \quad (4,72)$$

где U_{Γ} — напряжение цепи, где изменяется нагрузка;
 N_u и N_T — коэффициенты трансформации трансформатора напряжения нагрузки и промежуточного трансформатора Tr ;
 P — измеряемая активная мощность;

$$k = \frac{4k_1 a r_T}{N_u N_i N_T}.$$

Таким образом, применяя нелинейные сопротивления ($D\rho_1$ и $D\rho_2$) с квадратичными вольт-амперными характеристиками, можно получить на выходе измерительного элемента выпрямленный ток, среднее значение которого пропорционально измеряемой активной мощности нагрузки.

Измерительный элемент активной мощности на полупроводниковых диодах. Переменный ток преобразуется в постоянный ток (напряжение), как это следует из рассмотрения электромагнитного измерительного элемента, при помощи нелинейных сопротивлений, имеющих квадратичную вольт-амперную характеристику. Нелинейную вольт-амперную характеристику, в том числе и квадратичную, с достаточной степенью точности можно представить ломаной кривой, состоящей из отрезков прямых (рис. 149). При такой аппроксимации нелинейную вольт-амперную характеристику $I = f(U)$ можно рассматривать как сумму линейных характеристик вида

$$i_k = m_k (U - e_k) \quad (4,73)$$

Для

$$i_k \geq 0,$$

т. е.

$$I = \sum_1^n m_k (U - e_k),$$

где n — количество участков ломаной кривой, аппроксимирующей вольт-амперную характеристику.

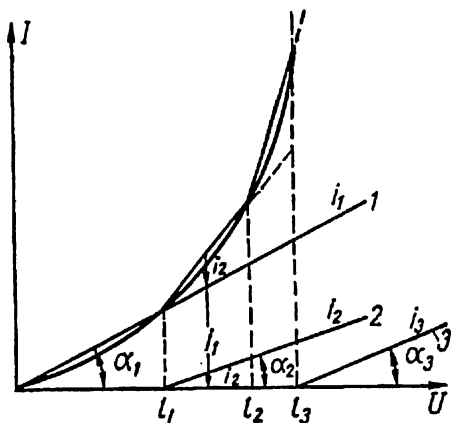
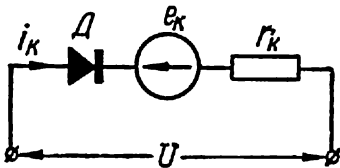


Рис. 149. Аппроксимация нелинейной вольт-амперной характеристики ломаной линией.

Линейные характеристики (4,73) показаны на рис. 149 прямыми 1—3, причем

$$\operatorname{tg} \alpha_k = m_k.$$

Вольт-амперные характеристики (4,73) имеют цепи, состоящие из последовательно включенных диода D , линейного активного сопротивления r_k и постоянной э. д. с. e_k , действующей в направлении, противоположном проводящему направлению диода (рис. 150). Ток такой цепи



$$i_k = \frac{1}{r_k} (U - e_k) = m_k (U - e_k);$$

где

$$\frac{1}{r_k} = m_k.$$

Рис. 150. Элемент цепи, состоящей из диодов и противовключенной э. д. с.

Следовательно, с помощью параллельно включенных цепей (рис. 150) соответствующим подбором э. д. с. e_k и сопротивлений r_k можно воспроизвести любую, в том числе и квадратичную, вольт-амперную характеристику (4,73). Такой принцип получения квадратичной вольт-амперной характеристики, необходимой для получения постоянного тока, пропорционального замеряемой мощности, и положен в основу рассматриваемого измерительного элемента.

Схема измерительного элемента активной мощности на полупроводниковых диодах изображена на рис. 151. Источник стабильного напряжения U_0 в цепи каждого из диодов D_k создает э. д. с., равную и противоположную по знаку падению напряжения на сопротивлении r_k

$$|e_k| = \frac{r_k}{r_k + r'_k} U_0$$

и, следовательно, ток любого диода в цепи выпрямителя B_1 при $\frac{r_6}{2} \ll r_k$ и $\frac{r_6}{2} \ll r'_k$

$$i_{k1} = \frac{r_k + r'_k}{r_k r'_k} (U'_3 - e_k) = \frac{r_k + r'_k}{r_k r'_k} \left(U_3 - \frac{r_k}{r_k + r'_k} U_0 \right).$$

Ток любого диода в цепи выпрямителя B_2 определяется аналогично.

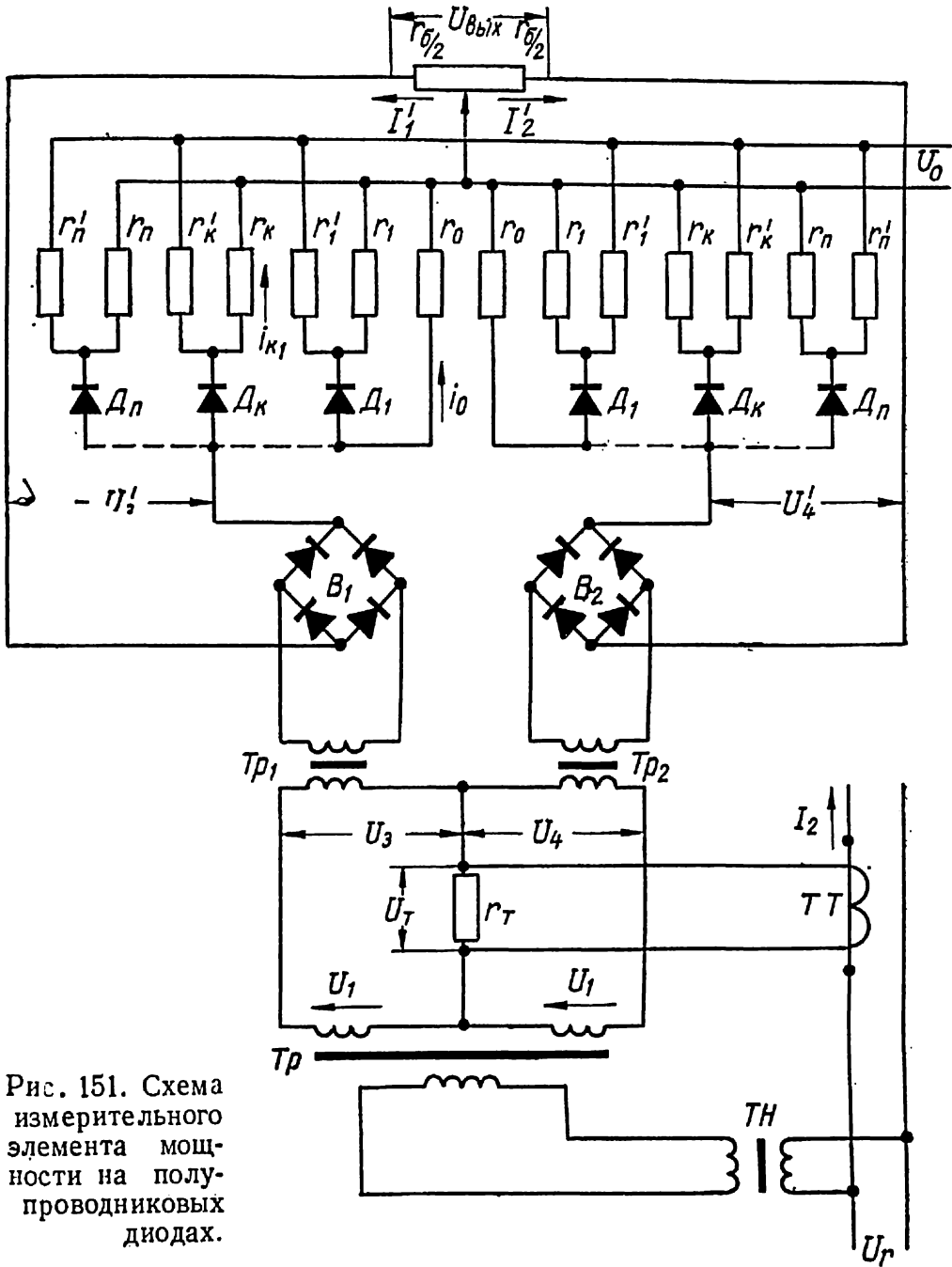


Рис. 151. Схема измерительного элемента мощности на полупроводниковых диодах.

Суммарный ток выпрямителя B_1 (или B_2)

$$I'_1 = i_0 + \sum_1^n i_{k1} = i_0 + \sum_1^n \frac{r_k + r'_k}{r_k r'_k} \left(U'_3 - \frac{r_k}{r_k + r'_k} U_0 \right). \quad (4,74)$$

Подбирая сопротивления r_k и r'_k , можно добиться того, что зависимость между током I'_1 и напряжением U'_3 (или I'_2 и U'_4) будет определяться ломаной линией, близкой к квадратичной зависимости, т. е.

$$I'_1 \approx aU_3'^2 \quad (4,75)$$

или

$$I'_2 \approx aU_4'^2.$$

Зависимость выпрямленного тока от выпрямленного напряжения тем ближе к квадратичной кривой, чем больше диодов D включено в цепь каждого выпрямителя.

Измерительный элемент активной мощности на полупроводниковых диодах имеет такую же фазочувствительную схему, как и электромагнитный измерительный элемент, но в отличие от него квадратичная зависимость между током и напряжением создается не в цепи переменного тока, а в цепи выпрямленного тока выпрямителей B_1 и B_2 .

Выходное напряжение рассматриваемого измерительного элемента

$$U_{\text{вых}} = \frac{r_6}{2} (I'_1 - I'_2) \quad (4,76)$$

или согласно выражениям (4,75) и (4,76)

$$U_{\text{вых}} = \frac{r_6 a}{2} (U_3'^2 - U_4'^2). \quad (4,77)$$

Учитывая, что

$$U_3' = k_1 U_3 \text{ и } U_4' = k_1 U_4,$$

а также выражения (4,62), (4,63), (4,70), (4,71), из соотношения (4,77) получим

$$U_{\text{вых}} = \frac{2r_6 a k_1^2}{N_u N_i N_T} U_2 I_2 \cos \varphi = kP, \quad (4,78)$$

где

$$k = \frac{2r_6 a k_1^2}{N_u N_i N_T}.$$

Таким образом, выходное напряжение пропорционально измеряемой активной мощности.

При достаточно стабильных диодах, высокой стабильности источника опорного напряжения U_0 и достаточном количестве диодов такое устройство можно выполнить с классом точности 1,5.

С помощью измерительных элементов, выполненных на полупроводниковых диодах, легко измерять и мощность трехфазной нагрузки, если два таких устройства включить по схеме двух ваттметров.

Ваттметр активной мощности с индукционным преобразователем. Индукционный преобразователь (рис. 152) представляет собой электромагнит, в поле которого помещены стальной сердечник и поворотная бескаркасная рамка, связанная с осью обычного ваттметра (или другого прибора). Возбуждение электромагнита осуществляется стабилизированным переменным напряжением U_B . Если угол поворота рамки отсчитывать от горизонтального положения, то индуктированная в ней э. д. с.

$$E_p = k_p U_B \sin \alpha,$$

где α — угол поворота рамки;

k_p — коэффициент пропорциональности.

Если $-\frac{\pi}{4} \ll \alpha \ll +\frac{\pi}{4}$, с достаточной точностью можно принять, что

$$E_p \approx k_p U_B \alpha,$$

т. е. э. д. с., индуктируемая в рамке, пропорциональна углу поворота α и, следовательно, активной мощности (или другой величине в зависимости от измерительного прибора, связанного с рамкой).

При изменении угла поворота α от $-\frac{\pi}{4}$ до $+\frac{\pi}{4}$ э. д. с. E_p изменяется от E'_p до E''_p с переходом через нуль и изменением фазы на 180° (кривая 1 на рис. 153).

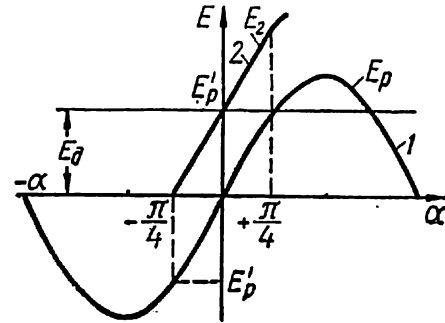


Рис. 153. Кривые зависимости выходного напряжения индукционного преобразователя от угла поворота рамки:

E_1 — без компенсационной обмотки;
 E_2 — с компенсационной обмоткой.

Чтобы при изменении α от $-\frac{\pi}{4}$ до $+\frac{\pi}{4}$ получить напряжение на выходе индукционного преобразователя, изменяющееся от нуля до максимума, последовательно с рамкой включается компенсационная обмотка, расположенная на сердечнике преобразователя, э. д. с. которой E_d по величине равна E'_p , но противо-

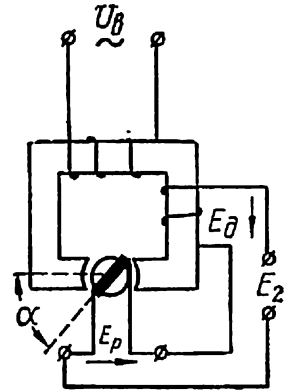


Рис. 152. Схема индукционного преобразователя.

положна ей по фазе. В этом случае выходное напряжение индукционного преобразователя

$$E_2 = E_p + E_d$$

и при изменении угла α от $-\frac{\pi}{4}$ до $+\frac{\pi}{4}$ оно изменяется от 0 до $2E_p'$ (кривая 2 на рис. 153).

Ваттметры активной мощности с индукционным преобразователем имеют класс точности 2 и применяются в основном в системах телеизмерения активной мощности, но могут быть применены и в системах АРЧМ.

Контрольные вопросы и упражнения

1. Сформулируйте основные задачи автоматического регулирования частоты и мощности в энергосистемах.
2. Как осуществляется регулирование частоты первичными регуляторами турбин и какие недостатки такого регулирования?
3. Сформулируйте основные принципы экономичного распределения нагрузки между агрегатами и станциями.
4. Чем обуславливаются требования к точности регулирования частоты в современных энергосистемах?
5. Объясните протекание процесса регулирования частоты по мнимостатическим характеристикам.
6. Объясните принцип построения схем принудительного выравнивания нагрузки между агрегатами и укажите область применения таких схем.
7. В чем заключается принцип распределения нагрузки между агрегатами по интегральному отклонению частоты и какие преимущества этого принципа?
8. Укажите особенности регулирования частоты несколькими станциями в крупных энергосистемах?
9. Объясните принцип построения системы АРЧМ, разработанной ОРГРЭС.
10. Почему во втором варианте системы ДЕСАУР ЧМ ВНИИ устанавливаются источники эталонной частоты?
11. Объясните принцип действия системы АРЧЭРАНУП, разработанной ВНИИЭ.
12. Какие преимущества имеют комбинированные системы АРЧЭРАНУП?
13. Выведите уравнения поправок к плановым величинам относительных приростов при отклонениях нагрузки энергосистемы от запланированной для комбинированных систем АРЧЭРАНУП, которые представлены на рис. 137.
14. Сформулируйте требования, предъявляемые к измерительным элементам частоты и мощности.
15. Объясните принцип действия измерительных элементов частоты ВНИИЭ и камертонного регулятора.
16. Поясните принцип действия магнитного датчика мощности МДМ-4.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

§ 1. КОМПЛЕКТ АППАРАТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ВНИИЭ

ДЕСАУР ЧМ, разработанная во ВНИИЭ [39], автоматически регулирует частоту и экономично распределяет нагрузку между регулируемыми станциями и агрегатами по интегральному отклонению согласно блок-схеме, приведенной на рис. 134.

С помощью комплекта аппаратуры ДЕСАУР ЧМ можно регулировать нагрузку станции по заданному графику согласно схеме, показанной на рис. 132, а его отдельные блоки могут быть использованы при осуществлении систем регулирования по принципу мнимого статизма.

Комплект аппаратуры ДЕСАУР ЧМ основан на применении магнитных усилителей и полупроводниковых выпрямителей. В ДЕСАУР ЧМ в качестве измерительного элемента частоты применен частотный полосовой фильтр, а в качестве измерительного элемента мощности — измерительный элемент мощности с функциональным диодным преобразователем (рис. 151). В комплект аппаратуры ДЕСАУР ЧМ входят следующие основные блоки и устройства:

- 1) измерительный блок;
- 2) устройство задания графика нагрузки (УЗГН);
- 3) измерители мощности (ИМ);
- 4) исполнительные блоки (ИБ);
- 5) устройство распределения нагрузок (УРАН).

Состав блоков, входящих в систему регулирования станции, определяется возлагаемыми на нее задачами. Если, например, на данной станции не предполагается регулирование нагрузки по заданному графику, то устройство задания графика нагрузки УЗГН из системы регулирования можно исключить.

Измерительный блок используется в качестве частотного измерительного органа системы АРЧМ при регулировании частоты и в качестве сумматора — корректора при регулировании активной нагрузки станции по заданному графику.

В соответствии с этим измерительный блок содержит:

- 1) частотный измерительный элемент;
- 2) корректор;
- 3) сумматор;
- 4) силовой орган.

Взаимодействие этих органов определяется блок-схемой, изображенной на рис. 154.

Если станция регулирует частоту, то сумматор отключается от измерительного блока, а корректор выполняет функции промежуточного усилительного элемента.

При регулировании активной нагрузки станции по заданному графику корректор настраивается так, что в системе регулирования создается необходимая зона нечувствительности по частоте (§ 3, гл. 4).

Принципиальная схема измерительного блока изображена на рис. 155. В качестве измерительного элемента частоты применено фазочувствительное устройство ($ТИ, ВИ_1, ВИ_2$) с частотным полосовым фильтром ($СLL_0$), описанное в § 6 гл. 4. Измерительный элемент включен на напряжение регулируемой частоты.

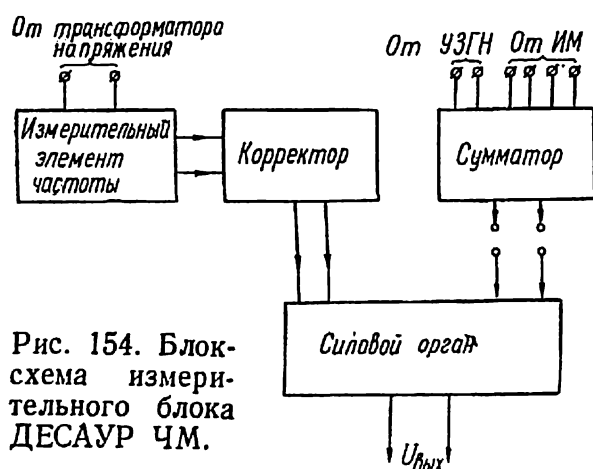


Рис. 154. Блок-схема измерительного блока ДЕСАУР ЧМ.

Корректор состоит из двух дроссельных магнитных усилителей $МУ_1$ и $МУ_2$ с внешней обратной связью и представляет собой двухтактный магнитный усилитель с выходом на постоянном токе. Магнитные усилители $МУ_1$ и $МУ_2$ корректора имеют две одинаковые управляющие обмотки ω_{y1} и ω_{y2} , питающиеся от выпрямителей $ВИ_1$ и $ВИ_2$ измерительного элемента частоты и две обмотки смещения (основная ω_c и дополнительная $\omega_{д.с}$), питающиеся от источника постоянного тока.

Управляющие обмотки ω_{y1} и ω_{y2} магнитных усилителей включены так, что их намагничивающие силы, создаваемые выходными токами измерительного элемента, в каждом из усилителей на-

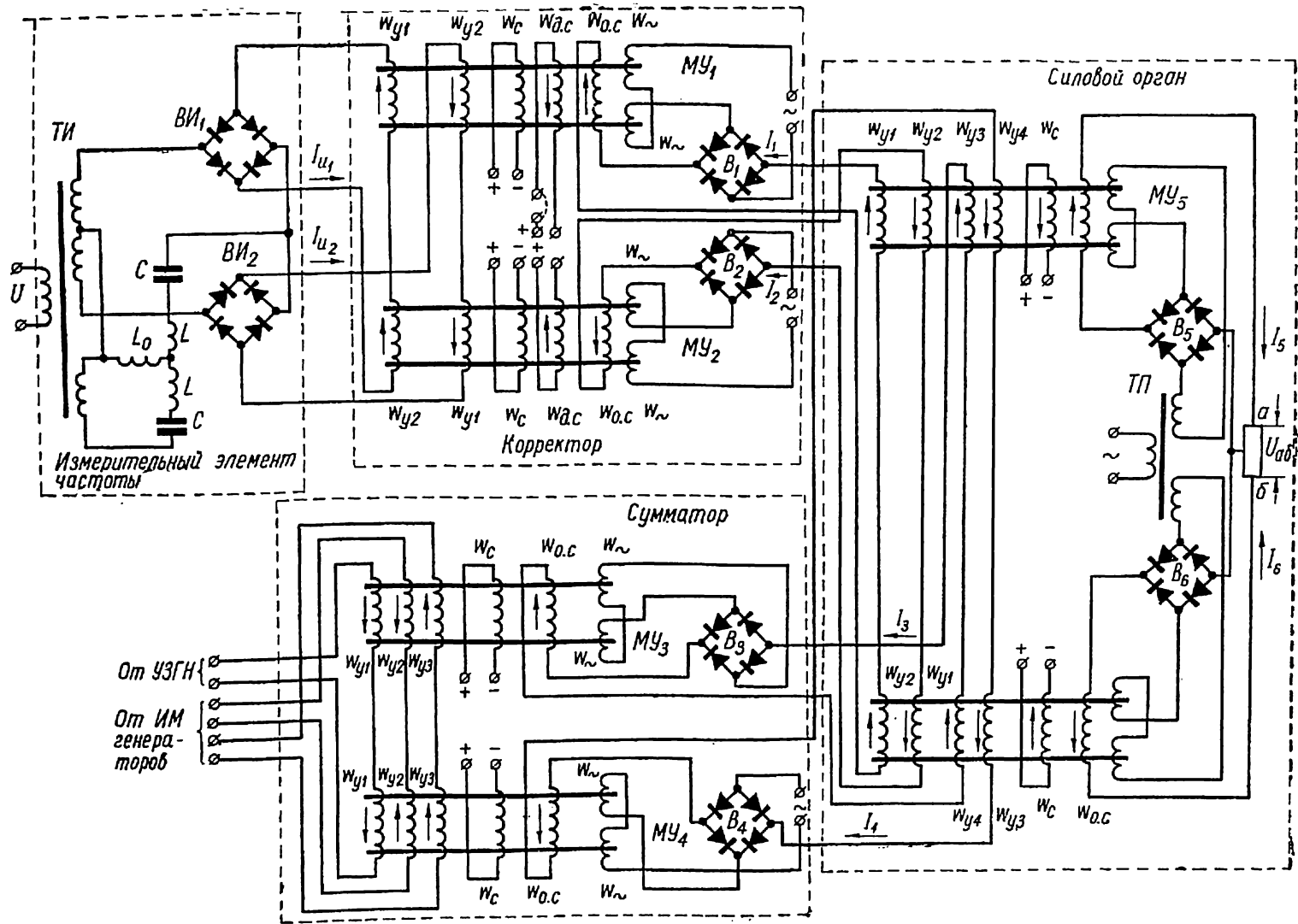


Рис. 155. Схема измерительного блока ДЕСАУР ЧМ.

правлены противоположно одна другой, причем намагничивающая сила обмоток ω_{y1} направлена согласованно с намагничивающей силой обмотки обратной связи $\omega_{o.c.}$, а намагничивающая сила обмоток ω_{y2} — против намагничивающей силы обмоток обратной связи.

В качестве положительного направления управляющей намагничивающей силы принимается направление намагничивающей силы обратной связи. Поэтому из рис. 155 легко определить, что

управляющие намагничивающие силы $F_{м. y_1}$ и $F_{м. y_2}$ усилителей $MУ_1$ и $MУ_2$ равны между собой и противоположны по знаку

$$F_{y.к} = F_{м. y_1} = -F_{м. y_2} = \omega_y (I_{и_1} - I_{и_2}), \quad (5,1)$$

где $F_{y.к}$ — управляющая н. с. корректора;

$I_{и_1}$ и $I_{и_2}$ — выходные токи фазочувствительного устройства;

ω_y — количество витков управляющих обмоток.

Обмотки смещения создают отрицательные намагничивающие силы, смещая нагрузочную

Рис. 156. Нагрузочные характеристики магнитных усилителей при:

1 — отсутствии тока в обмотках смещения; 2 — наличии тока в основной обмотке смещения; 3 — наличии токов в основной и дополнительных обмотках.

характеристику усилителя, которая построена в функции управляющей намагничивающей силы, параллельно самой себе в сторону положительной намагничивающей силы. На рис. 156 показаны нагрузочные характеристики одного из усилителей, например $MУ_1$.

Так как все параметры усилителей $MУ_1$ и $MУ_2$ одинаковы, а их управляющие намагничивающие силы равны и противоположны по знаку, нагрузочные характеристики этих усилителей

$$I_1 = f(F_{м. y_1}); \quad -I_2 = f(F_{м. y_2})$$

в одной системе координат располагаются симметрично относительно начала координат. На рис. 157 изображены нагрузочные характеристики 1 и 3 усилителей $MУ_1$ и $MУ_2$ и кривая 2 разности выходных токов $I_1 - I_2$ от управляющей намагничивающей силы корректора при наличии тока только в основной обмотке смещения. Аналогичные кривые 1—3 при наличии токов в основной и дополнительной обмотках смещения изображены на рис. 158.

Разность выходных токов магнитного усилителя корректора $I_1 - I_2$ создает управляющую намагничивающую силу в магнитных усилителях $МУ_5$ и $МУ_6$ силового органа.

Если частота системы равна заданной (номинальной) величине ($f = f_n$), то разность токов выхода измерительного элемента частоты $I_{и1}$ и $I_{и2}$ равна нулю, управляющая намагничивающая сила

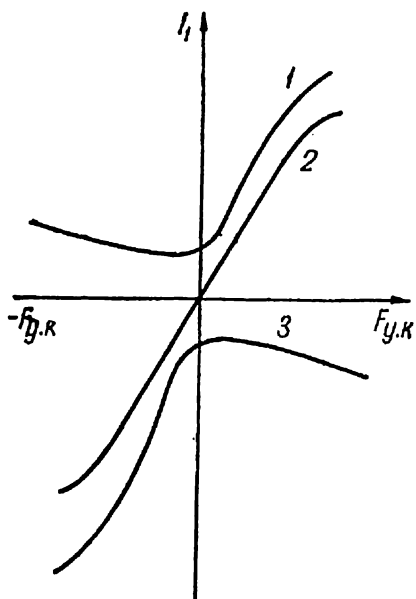


Рис. 157. Характеристики корректора ДЕСАУР ЧМ при наличии тока в основной обмотке смещения.

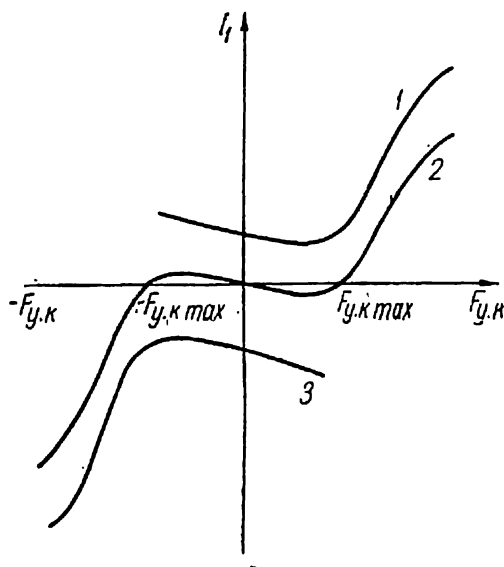


Рис. 158. Характеристики корректора ДЕСАУР ЧМ при наличии токов в основной и дополнительной обмотках смещения.

$F_{y.k}$ магнитных усилителей корректора равна нулю и, следовательно, разность выходных токов (рис. 157)

$$I_1 - I_2 = 0.$$

Если частота системы больше заданной ($f > f_n$), разность токов $I_{и1} - I_{и2} > 0$, $F_{y.k} > 0$ и при отсутствии тока в дополнительной обмотке смещения (рис. 157) на выходе корректора появляется положительная разность выходных токов

$$I_1 - I_2 > 0,$$

создающая положительную управляющую намагничивающую силу в усилителях силового органа.

При $f < f_n$ $I_{n_1} - I_{n_2} < 0$, $F_{y.k} < 0$ и разность выходных токов корректора и, следовательно, управляющая намагничивающая сила усилителей силового блока меняет знак на обратный, т. е.

$$I_1 - I_2 < 0.$$

Если токи протекают в основной и дополнительной обмотках смещения, то при $|F_{y.k}| \leq |F_{y.k \max}|$ и соответствующей некоторому заданному отклонению частоты $|\Delta f_{\max}|$ разность выходных токов усилителей корректора очень мала. Следовательно, корректор в этом случае практически не создает на входе силового органа регулирующее воздействие (рис. 158).

Если отклонение частоты превысит некоторое заданное значение ($|\Delta f| > |\Delta f_{\max}|$), то $|F_{y.k}| > |F_{y.k \max}|$ и на выходе корректора появляется разность выходных токов, знак которой определяется знаком отклонения частоты. В этом случае корректор имеет определенную зону нечувствительности $\pm \Delta f_{\max}$. Таким образом, при отсутствии тока в дополнительной обмотке смещения корректор выполняет функцию усилителя измерительного элемента частоты. Если основная и дополнительные обмотки смещения подключены к источникам постоянного тока, то корректор создает необходимую зону нечувствительности по частоте $\pm \Delta f_{\max}$ согласно зависимости, приведенной на рис. 131.

Сумматор, как и корректор, представляет собой двухтактный магнитный усилитель с выходом на постоянном токе, выполненный из двух дроссельных усилителей с обратной связью и одной обмоткой смещения.

Управляющая намагничивающая сила $F_{y.c}$ в усилителе сумматора создается разностью токов $\sum i_l$ (пропорциональных нагрузке каждого агрегата и создаваемых измерительными элементами мощности каждого агрегата) и тока, пропорционального активной нагрузке станции (от блока УЗГН), т. е.

$$F_{y.c} = F_{y.s} = -F_{y.n} = \omega_{y.c} (\sum i_l - i_s) = k_p \omega_{y.c} (\sum P_l - P_s), \quad (5,2)$$

где $\omega_{y.c}$ — количество витков управляющих обмоток усилителей сумматора (предполагается, что обмотки одинаковы);

k_p — коэффициент пропорциональности;

P_l — нагрузка l -го агрегата;

P_s — заданная нагрузка станции.

Зависимость разности выходных токов усилителей сумматора аналогична кривой 2 на рис. 157. Таким образом, при $\sum P_l = P_s$

разность выходных токов сумматора равна нулю и его регулирующее воздействие отсутствует. Если нагрузка станции отклоняется от заданного значения, на выходе сумматора появляется регулирующее воздействие соответствующих величины и знака.

Силовой орган измерительного блока частоты выполнен аналогично сумматору и состоит из двух дроссельных магнитных усилителей $MУ_5$ и $MУ_6$. Управляющая намагничивающая сила в магнитных усилителях $MУ_5$ и $MУ_6$ силового органа в общем случае создается разностью выходных токов корректора и разностью выходных токов сумматора

$$F_y = k_1 \omega'_y (I_1 - I_2) + k_2 \omega''_y (I_3 - I_4), \quad (5,3)$$

где I_3 и I_4 — выходные токи сумматора;

ω'_y — количество витков управляющих обмоток ω_{y1} и ω_{y2} силового органа;

ω''_y — количество витков управляющих обмоток ω_{y3} и ω_{y4} силового органа;

k_1 и k_2 — коэффициенты, характеризующие режим работы станции.

Если станция регулирует частоту, то $k_1 = 1$, $k_2 = 0$. При регулировании нагрузки станции по заданному графику и небольших отклонениях частоты ($\Delta f \leq \Delta f_{\max}$) $k_1 = 0$, $k_2 = 1$. Если в этом случае $\Delta f > \Delta f_{\max}$, то $k_1 = k_2 = 1$. Предполагая в некоторых небольших пределах зависимость между разностью токов измерительного элемента частоты и отклонением частоты от заданного значения линейной и считая линейными суммарные нагрузочные характеристики корректора и сумматора, выражение (5,3) можно записать в виде

$$F_y = k_1 k_{f1} \Delta f + k_2 k_{p1} (\sum P_l - P_3), \quad (5,4)$$

где k_{f1} и k_{p1} — соответствующие коэффициенты пропорциональности, включающие в себя числа витков управляющих обмоток.

Зависимость разности выходных токов $I_5 - I_6$ магнитных усилителей силового органа от управляющей намагничивающей силы аналогична зависимостям, изображенным на рис. 157. Выходное напряжение измерительного блока, снимаемое с сопротивления r ,

$$U_{ab} = \frac{r}{2} (I_5 - I_6).$$

Следовательно, зависимость выходного напряжения U_{ab} от намагничивающей силы (5,4) изображается в некотором масштабе так

же, как и зависимость разности выходных токов. Эта зависимость, которая в определенных пределах близка к линейной, показана на рис. 159.

Таким образом, если станция регулирует частоту ($k_1 = 1$, $k_2 = 0$), выходное напряжение U_{ab} примерно пропорционально отклонению частоты Δf ; если на станции регулируется активная нагрузка по заданному графику и $\Delta f \leq \Delta f_{\max}$ ($k_1 = 0$, $k_2 = 1$), напряжение U_{ab} пропорционально отклонению ΔP нагрузки станции от заданного значения. При $\Delta f > \Delta f_{\max}$ ($k_1 = k_2 = 1$) выходное напряжение U_{ab} пропорционально величине $k_{f1}(\Delta f - \Delta f_{\max}) + k_{p1}(\sum P_i - P_s)$, т. е. станция включается в процесс регулирования частоты и помогает ее восстановлению.

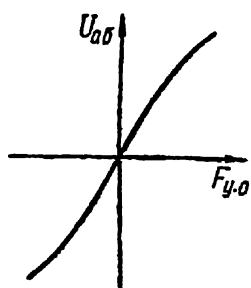


Рис. 159. Характеристика измерительного блока ДЕСАУР ЧМ.

Блок устройства задания графика нагрузки (рис. 160) состоит из:

- 1) коммутатора, выполненного из горизонтальных и вертикальных пластин, которые могут соединиться между собой в местах пересечения штекерами;
- 2) делительного реостата $R_{\text{дел}}$;
- 3) регулировочного реостата $R_{\text{рег}}$;
- 4) блока питания УЗГН;
- 5) контактного диска;

6) механизма прерывистой передачи, управляемого синхронным двигателем и перемещающим через равные промежутки времени (через 30 мин) щетку контактного диска на одну ламель.

Горизонтальные пластины подключены через равные интервалы к делительному реостату так, что между соседними пластинами напряжение

$$\Delta U = \frac{U}{n},$$

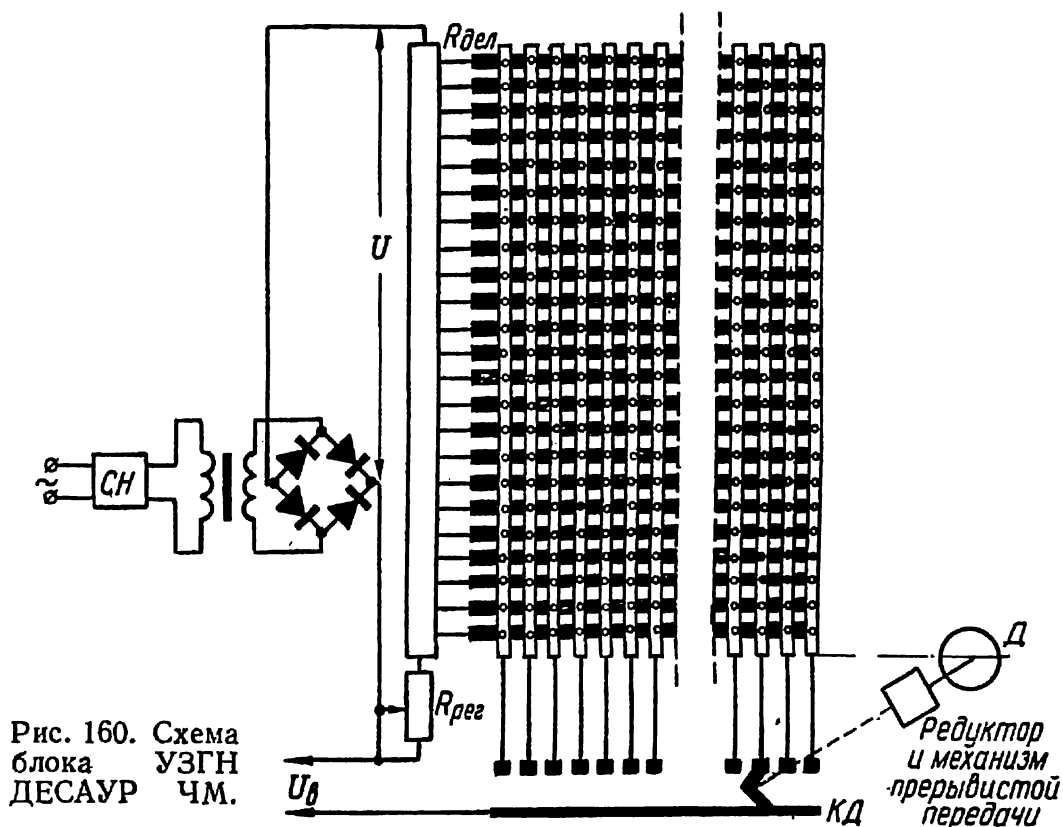
где U — стабильное напряжение, подведенное к делительному реостату;

n — количество горизонтальных пластин.

В коммутаторе имеется 48 вертикальных пластин. Щетки контактного диска переходят с одной пластины на другую через каждые 30 мин. Если вертикальные и горизонтальные пластины коммутатора соединены определенным образом, то при перемещении щетки контактного диска через равные промежутки времени выходное напряжение блока УЗГН изменяется по заданному

графику, подобному заданному графику нагрузки станции. С помощью штекеров можно набрать любой график нагрузки в прямоугольной (ступенчатой) форме.

При выборе соответствующего масштаба выходного напряжения блок УЗГН может формировать заданный суточный график активной нагрузки станции.



Исполнительный блок предназначен для управления электродвигателями МИС первичного регулятора и изменения таким образом впуска энергоносителя в турбину в процессе регулирования частоты и активной нагрузки. Исполнительный блок состоит из:

- 1) усилителя-сумматора;
- 2) силового органа;
- 3) органа отрицательной обратной связи.

Взаимодействие органов исполнительного блока определяется блок-схемой, изображенной на рис. 161. Принципиальная схема исполнительного блока показана на рис. 162.

Усилитель-сумматор силового блока выполнен аналогично сумматору измерительного блока. Управляющая намагничивающая

сила магнитных усилителей $MУ_7$ и $MУ_8$ сумматора равна алгебраической сумме намагничивающих сил, создаваемых выходным током $i_{н}$ измерительного блока, а также токами $i_{н.м}$ и $i_{у.р}$, соответственно пропорциональными фактической и заданной нагрузкам агрегата. Ток $i_{н.м}$ подается на вход исполнительного блока от измерительного элемента мощности агрегата, а ток $i_{у.р}$ — от УРАНа.

Намагничивающая сила, создаваемая током $i_{н.м}$, совпадает по направлению с намагничивающей силой обратной связи, а намагничивающая сила, создаваемая током $i_{у.р}$, — направлена против нее.

Направление намагничивающей силы, создаваемой током выхода измерительного блока, зависит от знака отклонения частоты Δf , так как с изменением знака Δf меняется полярность напряжения $U_{аб}$ на выходе измерительного блока.

Таким образом, управляющая намагничивающая сила усилителя-сумматора

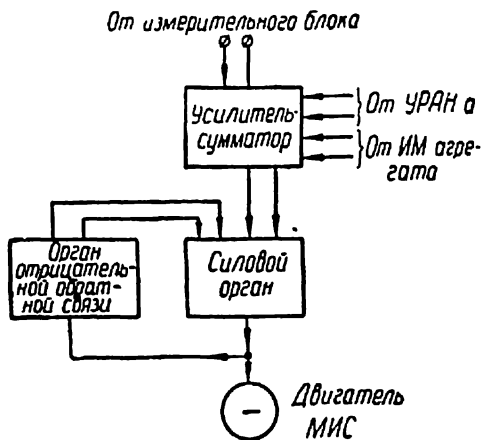


Рис. 161. Блок-схема исполнительного блока ДЕСАУР ЧМ.

$$F'_{у.н} = \omega_2 i_{н} + \omega_3 i_{н.м} - \omega_4 i_{у.р}, \quad (5,5)$$

где ω_2 , ω_3 и ω_4 — количества витков соответствующих управляющих обмоток.

Если принять $\omega_3 = \omega_4$ и учесть, что*

$$i_{н} = k'_f \Delta f;$$

$$i_{н.м} = k'_p P_i;$$

$$i_{у.р} = \varphi_l \left[\int_{t_0}^t F(\Delta f) dt \right],$$

(где k'_f и k'_p — коэффициенты пропорциональности), то

$$F'_{у.н} = k_f \Delta f + k_p \left\{ P_i - \frac{1}{k_p} \varphi_l \left[\int_{t_0}^t F(\Delta f) dt \right] \right\}, \quad (5,6)$$

где k_f и k_p — коэффициенты пропорциональности, учитывающие количество витков соответствующих обмоток;

* В случае регулирования частоты. Если регулируется нагрузка по заданному графику, то $i_{н} = k'_p \Delta P$.

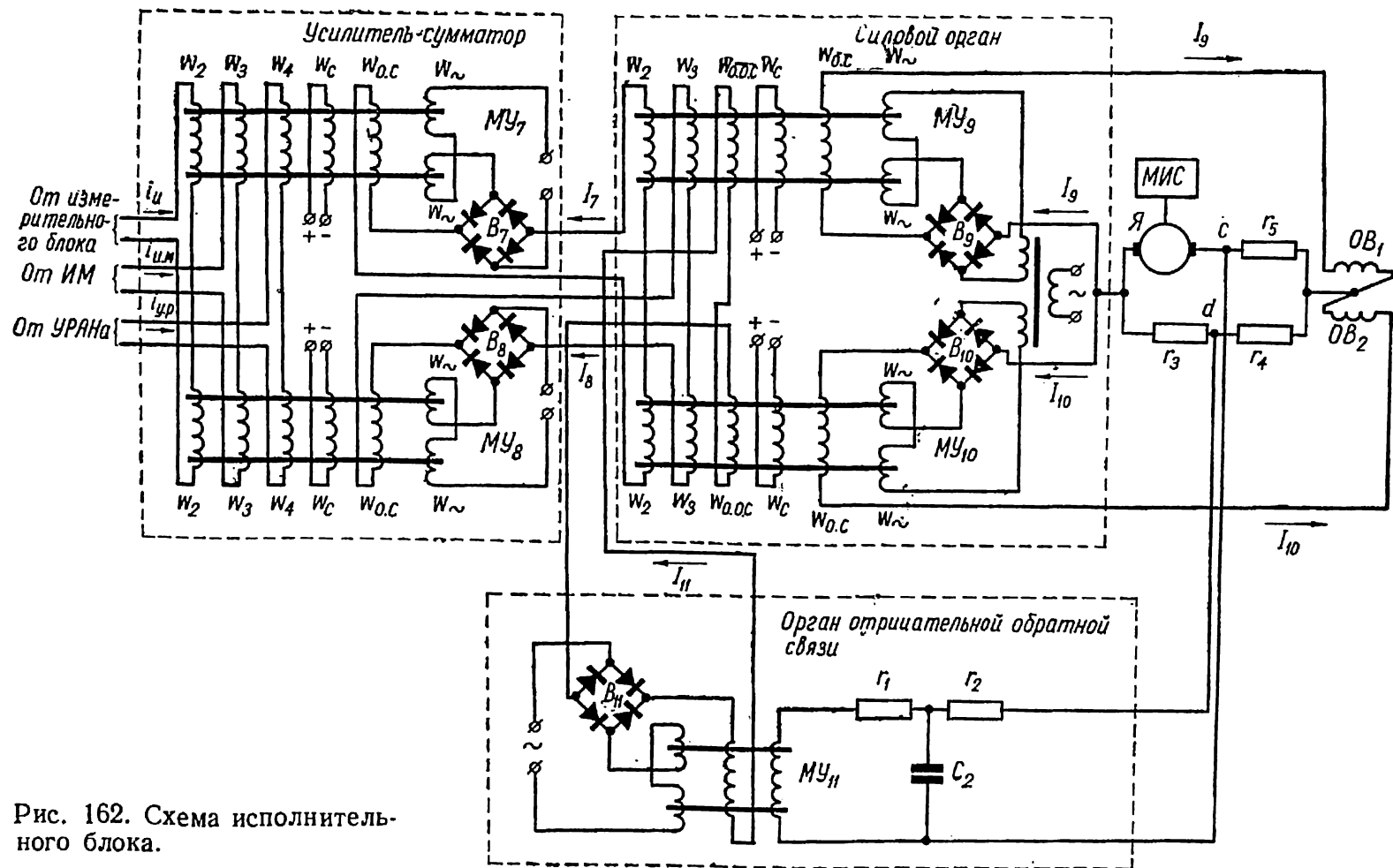


Рис. 162. Схема исполнительного блока.

φ_l — функция интегрального отклонения частоты, обрабатываемая УРАНОм и определяющая заданное значение нагрузки агрегата из условий экономичной работы станции (системы).

Если $F'_{y.н} = 0$, т. е.

$$k_f \Delta f + k_p \left\{ P_l - \frac{1}{k_p} \varphi_l \left[\int_{t_0}^t F(\Delta f) dt \right] \right\} = 0, \quad (5,7)$$

то разность выходных токов усилителя сумматора $I_7 - I_8$, создающих управляющую намагничивающую силу в магнитных усилителях силового органа, равна нулю, регулирующее воздействие отсутствует, и система регулирования находится в состоянии покоя.

При нарушении равенства (5,7), когда $F'_{y.н} > 0$ или $F'_{y.н} < 0$, на выходе усилителя-сумматора появляется разность выходных токов $I_7 - I_8$ соответствующих величины и знака, т. е. в магнитных усилителях силового органа появляется соответствующих величины и знака управляющая намагничивающая сила.

Силовой орган исполнительного блока питает реверсивный двигатель постоянного тока МИС, имеющий две одинаковые обмотки возбуждения.

Из схемы, приведенной на рис. 162, видно, что намагничивающая сила возбуждения двигателя, а следовательно, и поток возбуждения, создается разностью выходных токов $I_9 - I_{10}$ магнитных усилителей MU_9 и MU_{10} силового органа, а через якорь протекает часть суммы выходных токов $I_9 + I_{10}$.

Зависимости разности выходных токов $I_9 - I_{10}$ и их суммы $I_9 + I_{10}$ от управляющей намагничивающей силы $F''_{y.н}$ усилителей MU_9 и MU_{10} силового органа, построенные по нагрузочным характеристикам усилителей (рис. 163), показаны на рис. 164.

Из рис. 164 видно, что, если равенство (5,7) выполняется, $F'_{y.н} = 0$ и $F''_{y.н} = 0$, то разность токов $I_9 - I_{10}$, магнитное поле возбуждения отсутствует, через якорь протекает минимальный ток, и двигатель находится в состоянии покоя.

При нарушении равенства (5,7), если, например, $F'_{y.н} > 0$, то $F'_{y.н} > 0$, токи в обмотках возбуждения оказываются нескомпенсированными ($I_9 - I_{10} > 0$), в двигателе появляется магнитный поток возбуждения определенной величины и направления, ток в якоре увеличивается. Если вращающий момент двигателя окажется больше момента сопротивления, то двигатель начинает вращаться в определенном направлении со скоростью, примерно пропорциональной величине $F'_{y.н}$, воздействуя на МИС так, чтобы восстановить равенство (5,7).

Если $F'_{y.u} < 0$, то $F''_{y.u} < 0$ и разность токов в обмотках возбуждения изменяет знак, а ток в якоре сохраняет прежнее направление, и двигатель вращается в противоположном направлении до тех пор, пока не восстановится равенство (5,7). Моментом сопротивления на валу двигателя определяется зона нечувствительности системы регулирования.

Орган отрицательной обратной связи предназначен для обеспечения устойчивости про-

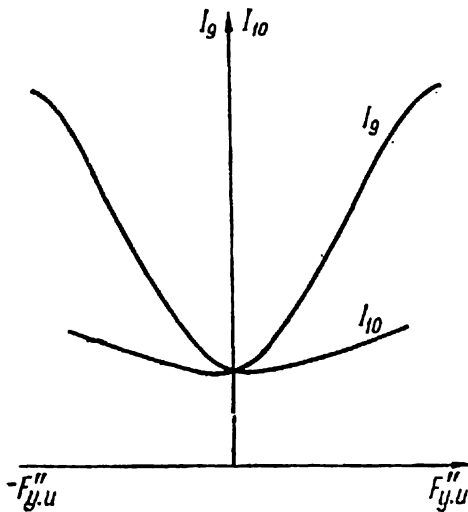


Рис. 163. Нагрузочные характеристики усилителей силового органа исполнительного блока ДЕСАУР ЧМ.

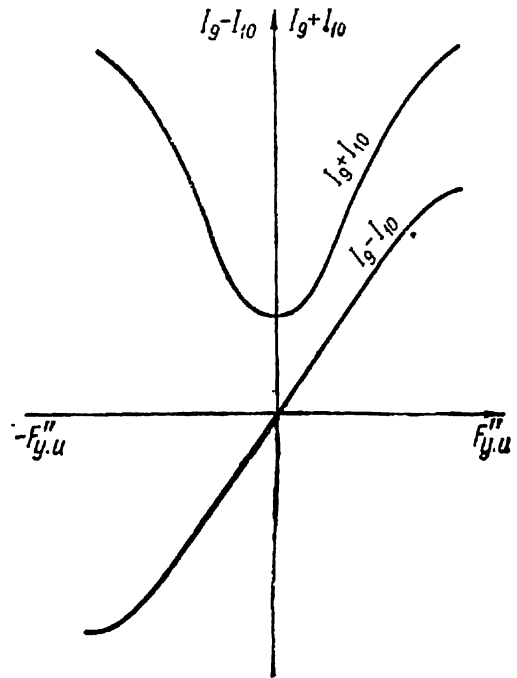


Рис. 164. Характеристики силового органа исполнительного блока ДЕСАУР ЧМ.

цесса регулирования и состоит из дроссельного магнитного усилителя $MУ_{11}$ и схемы запаздывания, собранной из активных сопротивлений r_1 и r_2 емкости C . С помощью этой схемы можно получить в цепи обратной связи большое запаздывание (более 10 сек).

Управляющая обмотка усилителя $MУ_{11}$ через схему запаздывания включена в диагональ cd мостовой схемы, одним из плеч которой является обмотка якоря $Я$ двигателя $MИС$. Выходной ток органа отрицательной обратной связи I_{11} протекает через обмотки $\omega_{o.o.c}$ магнитных усилителей $MУ_9$ и $MУ_{10}$ силового органа и создает намагничивающую силу, направленную против намагничивающей силы положительной обратной связи этих усилителей. Если двигатель находится в состоянии покоя, мостовая схема ($r_3, r_4, r_5, Я$) уравновешена, напряжение на ее диагонали cd

равно нулю, ток в управляющей обмотке отсутствует и выходной ток органа отрицательной обратной связи I_{11} имеет некоторое значение. Намагничивающая сила, создаваемая этим током, в усилителях силового органа MU_9 и MU_{10} скомпенсирована установленным током смещения этих усилителей.

Таким образом, до момента трогания двигателя отрицательная обратная связь не влияет на работу силового органа исполнительного блока и не изменяет чувствительность системы регулирования. При вращении двигателя в обмотке якоря наводится э. д. с., вследствие чего баланс мостовой схемы нарушается и в диагонали моста cd появляется напряжение, величина которого зависит от скорости вращения двигателя и величины его тока возбуждения. В этом случае в управляющей обмотке магнитного усилителя MU_{11} с запаздыванием, определяемым схемой запаздывания, возникает ток и, следовательно, выходной ток I_{11} органа отрицательной обратной связи возрастает примерно с тем же запаздыванием. При увеличении тока I_{11} намагничивающая сила обмоток $\omega_{o.o.c}$ усилителей MU_9 и MU_{10} , направленная против намагничивающей силы положительной обратной связи, увеличивается. Поэтому выходные токи силового органа уменьшаются, причем относительное уменьшение этих токов тем больше, чем больше скорость вращения двигателя. Вследствие уменьшения выходного тока силового органа скорость вращения двигателя МИС не может быстро увеличиться, что способствует предотвращению перерегулирования.

Схема запаздывания исключает действие отрицательной обратной связи при резких изменениях воздействий на входе силового органа от измерительного блока или УРАНа. Действительно, в этом случае двигатель в течение малого времени достигает большой скорости вращения, и орган отрицательной обратной связи, из-за наличия большого запаздывания, не успевает оказать существенного влияния на работу двигателя. При медленном изменении воздействия на входе силового органа выходной ток органа отрицательной обратной связи успевает достичь величины, достаточной для предотвращения значительного увеличения скорости вращения двигателя.

Таким образом, при введении отрицательной обратной связи со значительным запаздыванием улучшаются условия устойчивости системы регулирования, причем ее быстродействие не уменьшается.

Устройство распределения активной нагрузки представляет собой электромеханическое устройство, состоящее из восьми функ-

циональных преобразователей (семи агрегатных и одного стационарного), выполненных в виде потенциометров, движки которых взаимно жестко связаны и управляются электродвигателем (рис. 165). Электродвигатель УРАНа управляется исполнитель-

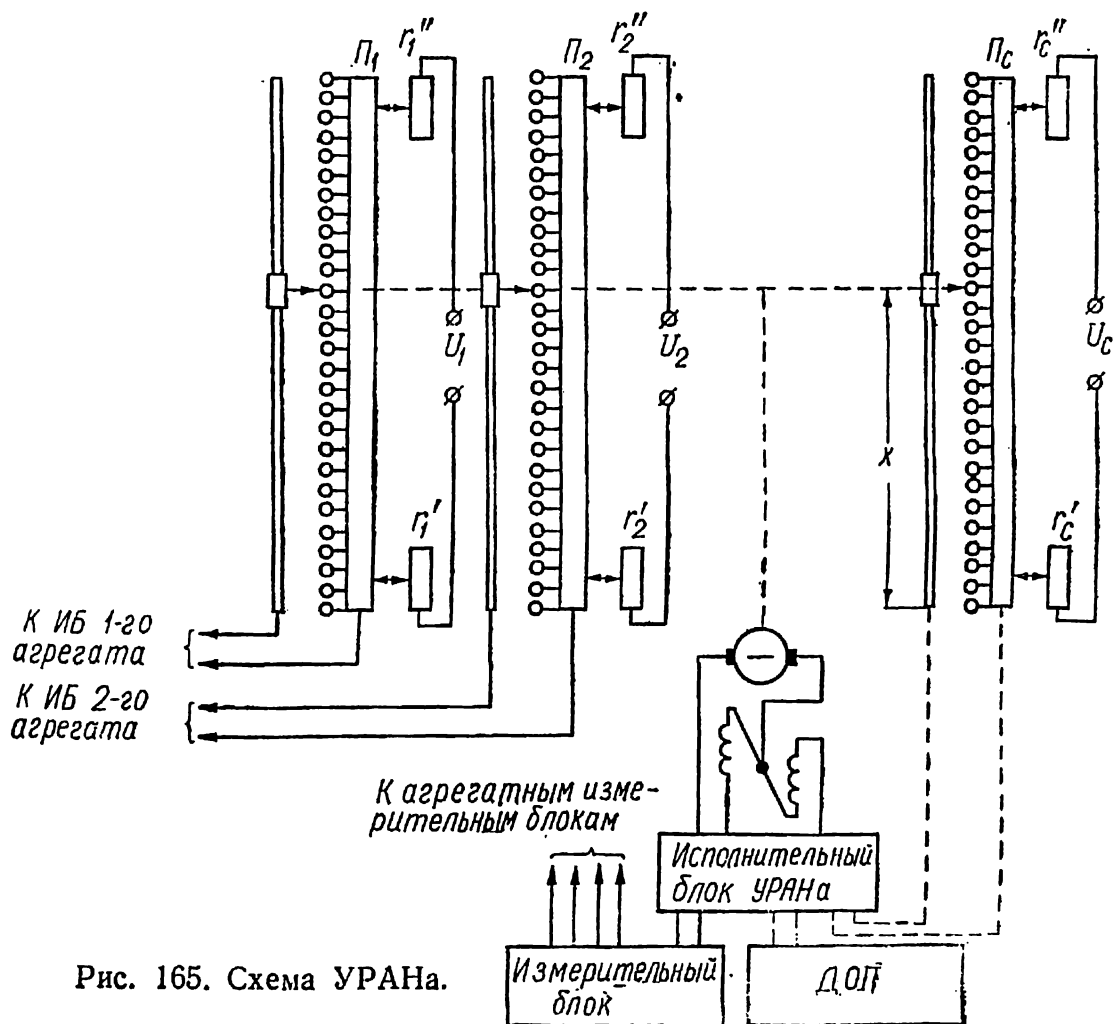


Рис. 165. Схема УРАНа.

ным блоком, выполненным аналогично агрегатному исполнительному блоку (рис. 162). На рис. 165 отрицательная обратная связь не показана.

Потенциометры УРАНа через сопротивления r_l' и r_l'' (где $l = 1, 2, \dots, 8$) питаются стабилизированным постоянным напряжением U_l , величиной которого в определенном масштабе определяется установленная мощность l -го агрегата. Сопротивления r_l' и r_l'' предназначены для ограничения минимальной и максимальной мощностей данного агрегата (станции).

Необходимая функциональная зависимость между напряжением, снимаемым с движка агрегатного потенциометра (определяющим экономичную нагрузку агрегата или относительный прирост, или суммарную нагрузку станции), осуществляется соответствующим соединением между ламелями и отпайками потенциометров.

Напряжением, снимаемым с движка стационарного потенциометра, определяется относительный прирост нагрузки станции. При регулировании частоты одной станцией или регулировании активной нагрузки станции по заданному графику на вход исполнительного блока УРАНа подается воздействие только от измерительного блока. В этом случае скорость вращения ω_d двигателя УРАНа будет являться функцией отклонения частоты или нагрузки станции от заданного значения:

$$\omega_d = F_1(\Delta f)$$

или

$$\omega_d = F_2(\Delta p).$$

Положение x движков потенциометров после окончания процесса регулирования пропорционально интегральной функции отклонения частоты или нагрузки

$$x \sim \int_{t_0}^t F_1(\Delta f) dt$$

или

$$x \sim \int_{t_0}^t F_2(\Delta p) dt.$$

Так как интегральной функцией отклонения частоты или нагрузки в определенном масштабе определяется относительный прирост или суммарная нагрузка станции, то с потенциометров УРАНа на вход агрегатных исполнительных блоков подается напряжение, пропорциональное экономичной нагрузке агрегата в функции относительного прироста или суммарной нагрузки станции.

Если частота регулируется несколькими станциями, то на вход исполнительного блока, кроме воздействия от измерительного блока регулятора, подаются воздействия от датчика относительного прироста ДОР и стационарного потенциометра P_c , причем эти воздействия противоположны одно другому по направлению. Элек-

тродвигатель УРАНа может находиться в состоянии покоя только в том случае, если сумма воздействия на входе его исполнительного блока равна нулю.

Суммарное воздействие на входе исполнительного блока равно нулю, если $\Delta f = 0$, а напряжение, подаваемое от ДОП, равно напряжению, снимаемому со стационарного потенциометра.

Напряжением ДОП определяется относительный прирост системы, а напряжением стационарного потенциометра — относительный прирост станции. Следовательно, после окончания процесса регулирования движки потенциометра установятся в таком положении, при котором относительные приросты станции и системы будут равны между собой, т. е. нагрузка станции и агрегатов будет наиболее экономичной.

§ 2. КОМПЛЕКТ АППАРАТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ОРГРЭС

Комплект аппаратуры системы АРЦМ ОРГРЭС выполнен в соответствии с блок-схемой, показанной на рис. 133. В комплект аппаратуры входят следующие основные блоки [53]:

1) диспетчерский автоматический распределитель активной нагрузки (АРАН-Д), устанавливаемый на диспетчерском пункте и предназначенный для автоматической обработки задания экономически наиболее выгодных нагрузок, регулирующих частоту станций в зависимости от отклонения частоты;

2) приемные устройства, устанавливаемые на каждой регулирующей станции и воспринимающие задание нагрузки станции от АРАН-Д (приемные устройства связаны с АРАН-Д высокочастотными телеканалами связи);

3) частотные корректоры, устанавливаемые на каждой регулирующей станции и предназначенные для коррекции задаваемых от АРАН-Д нагрузок при значительных отклонениях частоты, а также для получения статической характеристики регулирования нагрузки станции по частоте при нормальных отклонениях частоты;

4) стационарные автоматические распределители активных нагрузок (АРАН-С), предназначенные для экономического распределения нагрузки между агрегатами регулирующей станции;

5) блоки регулирования мощности (БРМ), предназначенные для управления двигателем МИС и изменения, таким образом, нагрузки агрегата в зависимости от отклонения частоты и в соответствии с экономически наиболее выгодным заданием.

Количество блоков БРМ на каждой регулирующей станции определяется количеством агрегатов, регулирующих частоту.

Диспетчерский автоматический распределитель активной нагрузки (рис. 166) состоит из:

1) измерительного элемента частоты $2T\Phi_1$, выполненного в виде двойного Т-образного фильтра (см. рис. 136), питающегося от трансформатора Tr_1 через фазоповорачивающее устройство (ФПУ);

2) электронного усилителя переменного напряжения $У$;

3) двухфазного асинхронного двигателя $Д$, одна из обмоток статора которого $ОД_1$ питается от выходного трансформатора Tr_2 электронного усилителя через мостовую схему $МС$ отрицательной обратной связи;

4) каретки с шаблонами, поступательно перемещаемой двигателем $Д$ посредством винтовой передачи;

5) передатчиков, представляющих собой электронные генераторы напряжения звуковой частоты с конденсаторами C_3 и C_p переменной емкости.

АРАН-Д питается синусоидальным напряжением U регулируемой частоты.

Параметры измерительного элемента частоты $2T\Phi_1$ рассчитаны так, что при номинальной частоте f_n напряжение на его выходе $U_2 = 0$. При относительно небольших отклонениях частоты $\pm \Delta f$ от номинального значения на выходе двойного Т-образного фильтра $2T\Phi_1$ появ-

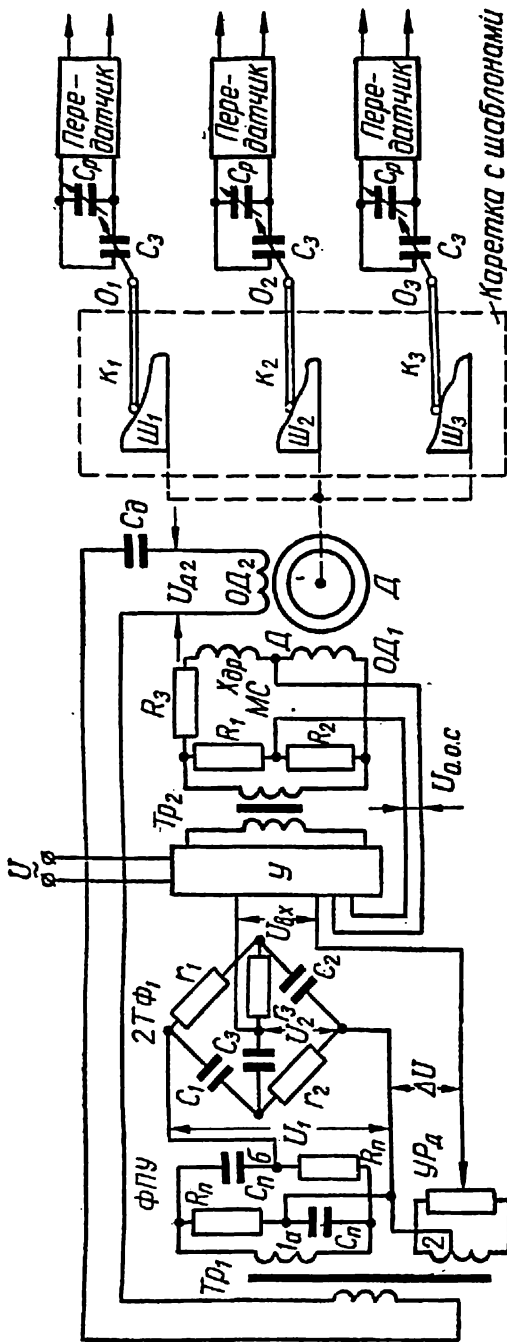


Рис. 166. Упрощенная схема диспетчерского распределителя активной нагрузки.

нальной частоте f_n напряжение на его выходе $U_2 = 0$. При относительно небольших отклонениях частоты $\pm \Delta f$ от номинального значения на выходе двойного Т-образного фильтра $2T\Phi_1$ появ-

ляется напряжение U_2 , пропорциональное отклонению частоты и сдвинутое по фазе относительно входного напряжения U_1 на угол, примерно равный $\pm \frac{\pi}{2}$ (см. рис. 139).

Параметры R_n и C_n фазоповорачивающего устройства подобраны так, что угол сдвига фаз между напряжением питания U и напряжением U_1 равен $\frac{\pi}{2}$. Следовательно, выходное напряжение U_2 измерительного элемента частоты в зависимости от знака Δf совпадает по фазе с напряжением U или находится с ним в противофазе.

Величина и фаза напряжения ΔU зависят от положения движка установочного реостата $УР_d$: если движок находится в среднем положении, $\Delta U = 0$; при смещении движка от среднего положения напряжение $\Delta U \neq 0$. Величина напряжения ΔU пропорциональна смещению движка и оно совпадает по фазе с напряжением питания при перемещении движка в одну сторону и находится в противофазе с напряжением U — при перемещении движка в противоположную сторону от среднего положения. Алгебраическая сумма выходного напряжения U_2 измерительного элемента частоты и напряжения ΔU подается на вход электронного усилителя, т. е. на вход усилителя подается регулирующее воздействие

$$U_{\text{вх}} = U_2 \pm \Delta U = k'_f \Delta f \pm \Delta U,$$

где k'_f — коэффициент пропорциональности.

Напряжение $U_{\text{вх}}$ усиливается электронным усилителем по амплитуде при неизменной фазе. Во вторичной обмотке выходного трансформатора Tr_2 индуктируется напряжение U_y , пропорциональное напряжению $U_{\text{вх}}$ и совпадающее с ним по фазе и, следовательно, совпадающее по фазе или находящееся в противофазе (в зависимости от фазы напряжения $U_{\text{вх}}$) с питающим напряжением U

$$U_y = k_y U_{\text{вх}} = k_y (k'_f \Delta f \pm \Delta U).$$

К обмотке $ОД_1$ двухфазного асинхронного двигателя подводится напряжение $U_{д1}$, пропорциональное напряжению U_y ,

$$U_{д1} = k_{м.с} U_y = k_{м.с} k_y (k'_f \Delta f \pm \Delta U),$$

где $k_{м.с}$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от соотношения сопротивления обмотки $ОД_1$ и сопротивлений мостовой схемы обратной связи R_3 и $X_{др}$.

Напряжение $U_{д1}$ примерно совпадает по фазе с напряжением U_y и, следовательно, с питающим напряжением U .

Напряжение $U_{д2}$ на второй обмотке вследствие наличия конденсатора C_d сдвинуто по фазе относительно напряжения U примерно на угол $\frac{\pi}{2}$ и, следовательно, сдвинуто по фазе на $\frac{\pi}{2}$ относительно напряжения $U_{д1}$.

Предположим, что движок установочного реостата $УР_d$ находится в среднем положении и $\Delta U = 0$. В этом случае при номинальной частоте ($\Delta f = 0$) напряжение на обмотке двигателя $U_{д1} = 0$, в двигателе создается только пульсирующее магнитное поле током обмотки $ОД_2$, его вращающий момент равен нулю и, следовательно, АРАН-Д находится в состоянии покоя. Если $\Delta f \neq 0$, то на обмотке $ОД_1$ двигателя появляется напряжение $U_{д1} = k_{м.с} k_y k_j' \Delta f$, которое в зависимости от знака отклонения частоты Δf сдвинуто по фазе относительно напряжения $U_{д2}$ на угол $\pm \frac{\pi}{2}$. В двигателе создается вращающееся магнитное поле, появляется вращающий момент, и ротор двигателя начинает вращаться в сторону, определяемую знаком величины Δf , причем скорость вращения зависит от величины Δf , т. е.

$$\omega_d = F(\Delta f).$$

Вращение ротора двигателя прекращается, если частота восстанавливается, т. е. когда $\Delta f = 0$.

При вращении ротора двигателя каретка, на которой установлены шаблоны $Ш_1 - Ш_3$, посредством винтовой передачи перемещается в горизонтальном направлении. Перемещение каретки, а следовательно, и шаблонов в горизонтальном направлении пропорционально величине

$$x \equiv \int_{t_0}^t \omega_d dt \equiv \int_{t_0}^t F(\Delta f) dt,$$

т. е. пропорционально интегральной функции отклонения частоты или в некотором масштабе суммарной нагрузке системы.

Количество шаблонов, установленных на каретке, равно количеству станций, регулирующих частоту, и их форма выполнена в соответствии с графиком экономичной нагрузки станции, суммарной нагрузки системы или относительного прироста.

При перемещении каретки по шаблонам скользят копиры, которые, поворачиваясь вокруг точки O , посредством зубчатой

передачи изменяют емкость задающих конденсаторов C_3 , входящих в контуры настройки передатчиков. Вследствие изменения емкости конденсаторов C_3 соответственно изменяется частота выходного напряжения передатчиков. Таким образом, положением шаблонов определяются частоты выходных напряжений передатчиков. Так как шаблоны выполнены в соответствии с графиком экономической нагрузки каждой станции, то частоты выходного напряжения передатчиков пропорциональны экономическим нагрузкам станций.

При изменении частоты на величину Δf ротор двигателя начинает вращаться и будет вращаться до тех пор, пока частота не восстановится. В конечном счете двигатель перемещает шаблоны в горизонтальном направлении на величину, пропорциональную изменению суммарной нагрузки системы, и частоты выходных напряжений передатчиков изменяются в соответствии с изменением задания экономичных нагрузок станций.

Если движок установочного реостата $УР_d$ смещен относительно среднего положения ($\Delta U \neq 0$), двигатель находится в состоянии покоя, и выполняется равенство

$$\Delta f = \mp \frac{\Delta U}{k_f'}$$

т. е. установившийся режим наступает не при номинальной частоте f_n , а при некоторой другой частоте

$$f_1 = f_n + \Delta f = f_n \mp \frac{\Delta U}{k_f'}$$

Таким образом, перемещая движок $УР_d$, можно изменить уставку системы АРЧМ по частоте, т. е. изменить в некоторых пределах автоматически поддерживаемое значение частоты в системе.

Конденсаторы C_p предназначены для изменения задания нагрузки станции вручную независимо от ее экономической нагрузки. При изменении емкости C_p так же, как и емкости C_3 , частота выходного напряжения передатчика изменяется.

Отрицательная обратная связь предназначена для уменьшения коэффициента усиления усилителя в процессе регулирования и, таким образом, повышения качества регулирования. При неподвижном двигателе мостовая схема $МС$ уравновешена ($U_{o.o.c} = 0$).

Если ротор двигателя вращается, в обмотке $ОД_1$ индуцируется э. д. с., равновесие мостовой схемы нарушается ($U_{o.o.c} \neq 0$),

и на вход электронного усилителя подается напряжение. Под действием этого напряжения коэффициент усиления электронного усилителя уменьшается, и, следовательно, скорость вращения двигателя понижается, что предотвращает перерегулирование.

Выходные напряжения передатчиков, частоты которых лежат в звуковом диапазоне и пропорциональны экономичной нагрузке станции, через телеканалы передаются на станции.

Телеканалы могут исказить форму напряжения, амплитуду, но частота от диспетчерского пункта до станции передается без искажений, и, следовательно, телеканалы даже большой протяженности не могут внести существенной погрешности в регулирование нагрузки. Вследствие этого в системе АРЧМ ОРГРЭС принят частотный принцип телерегулирования, как наиболее точный и широко применяемый в различных областях техники.

Приемное устройство (рис. 167), устанавливаемое на регулирующей станции, представляет собой следящую систему. В зависимости от частоты напряжения, поступающего на вход системы от передатчиков АРАН-Д, на выходе системы появляется напряжение промышленной частоты, величина которого пропорциональна частоте входного напряжения, т. е. пропорциональна экономичной нагрузке станции при данной суммарной нагрузке системы.

Выходное напряжение передатчика АРАН-Д через телеканал подается на входное устройство приемника, которое усиливает это напряжение и стабилизирует его по амплитуде, не изменяя частоты. Таким образом, на вход измерительного элемента звуковой частоты $2T\Phi_2$ приемного устройства подается напряжение U_1 стабильной амплитуды и переменной частоты, причем частота изменяется пропорционально экономичной нагрузке станции.

На вход усилителя U подается напряжение, равное сумме выходного напряжения U_2 измерительного элемента $2T\Phi_2$ и напряжения U_k , снимаемого с компенсирующего потенциометра R_k . Частота напряжения U_k равна частоте напряжения U_1 , а фаза сдвинута относительно фазы напряжения U_1 примерно на угол $\frac{\pi}{2}$ (сдвиг по фазе осуществляется емкостью C_k). Параметры двойного Т-образного фильтра $2T\Phi_2$ рассчитаны так, что при минимальной звуковой частоте $f_{зв \min}$, соответствующей минимальному заданию нагрузки станции, напряжение U_2 совпадает по фазе с напряжением U_1 (ненулевая настройка фильтра).

При $f_{зв} > f_{мин}$, что соответствует увеличению задания нагрузки станции от АРАН-Д, напряжение U_2 сдвинуто по фазе относительно напряжения U_1'' , причем составляющая выходного напряжения U_2 , сдвинутая по фазе относительно напряжения U_1 на $\frac{\pi}{2}$, пропорциональна разности $\Delta f_{зв}$ данной и минимальной частот:

$$U_2'' = \alpha \Delta f_{зв} = \alpha (f_{зв} - f_{зв \min}), \quad (5,8)$$

где α — коэффициент пропорциональности.

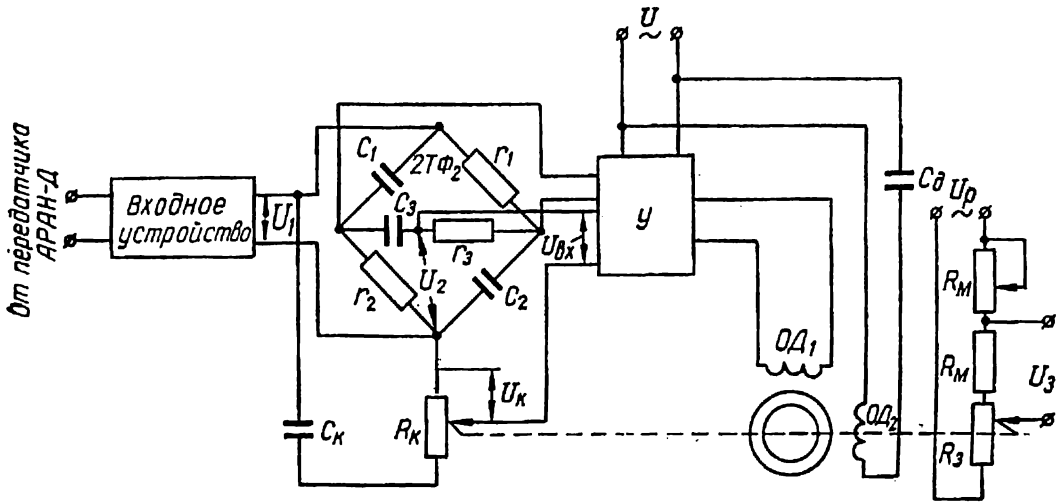


Рис. 167. Упрощенная схема приемного устройства регулятора ОРГРЭС.

Компенсирующий потенциометр R_k включен так, что напряжение U_k , снимаемое с его движка, противоположно по фазе составляющей выходного напряжения U_2'' . Таким образом, составляющая входного напряжения электронного усилителя, сдвинутая по фазе относительно напряжения U_1 на угол $\pm \frac{\pi}{2}$,

$$U_{вх}'' = U_2'' - U_k. \quad (5,9)$$

Электронный усилитель выполнен так, что при наличии на его входе напряжения любой достаточно высокой (звуковой) частоты, сдвинутого по фазе относительно напряжения U_2 на угол $\pm \frac{\pi}{2}$, на его выходе появляется напряжение промышленной частоты, совпадающее по фазе с питающим напряжением U или находящимся с ним в противофазе.

Усилитель не реагирует на входное напряжение, совпадающее по фазе с напряжением U_1 . При минимальном задании нагрузки станции, когда частота $f_{зв} = f_{зв \min}$, напряжение U_2 совпадает по

фазе с напряжением U_1 . Движки компенсирующего R_k и задающего R_3 потенциометров, связанные посредством общей механической передачи с двигателем, находятся в крайних положениях ($U_k = 0$; $U_3 = U_{3 \min}$), $U_{вх}'' = 0$, и приемное устройство находится в состоянии покоя.

Если задание нагрузки станции, обрабатываемое АРАН-Д, возрастает, то увеличивается звуковая частота входного напряжения U_1 :

$$\begin{aligned} U_2'' &= \alpha (f_{зв} - f_{зв \min}) > 0; \\ U_{вх}'' &= U_2'' - U_k > 0 \end{aligned}$$

и на выходе усилителя появляется напряжение промышленной частоты, совпадающее по фазе с питающим напряжением U и приложенное к обмотке $ОД_1$ двигателя.

К обмотке $ОД_2$ напряжение от источника питания подведено через емкость C_d , вследствие чего это напряжение сдвинуто по фазе относительно напряжения U на угол, близкий к $\frac{\pi}{2}$. В двигателе образуется вращающееся магнитное поле, и его ротор начинает вращаться в определенном направлении, перемещая движки R_k и R_3 в сторону увеличения снимаемых с них напряжений.

При таком положении движков, когда

$$U_k = U_{вх}'' = \alpha (f_{зв} - f_{зв \min})$$

и, следовательно, $U_{вх}'' = 0$, выходное напряжение усилителя вновь становится равным нулю и двигатель останавливается.

Таким образом, в установившемся режиме напряжение $U_k = \alpha (f_{зв} - f_{зв \min})$, т. е. перемещение движка потенциометра R_k пропорционально изменению звуковой частоты входного напряжения и, следовательно, изменению задания нагрузки, обрабатываемого АРАН-Д.

Так как движки потенциометров R_3 и R_k перемещаются двигателем через общую механическую передачу, то перемещение движка потенциометра R_3 также пропорционально изменению задания нагрузки. Следовательно, напряжение U_3 , снимаемое с задающего потенциометра, пропорционально экономичной нагрузке станции:

$$U_3 = k_p P_{з. эк}. \quad (5,10)$$

Если задание нагрузки уменьшается, то уменьшается звуковая частота напряжения U_1 , $U_{вх}'' = U_2'' = U_k'' < 0$, фаза входного напряжения $U_{вх}''$ усилителя изменяется на противоположную. Фаза

выходного напряжения усилителя изменяется на угол π , и ротор двигателя вращается в противоположном направлении, перемещая движки потенциометров R_k и R_3 в сторону уменьшения напряжений U_k и U_3 до тех пор, пока вновь напряжение U_k не станет равным напряжению $U''_{вх}$.

В этом случае напряжение U_3 уменьшается на величину, пропорциональную уменьшению задания нагрузки станции.

Задающий потенциометр R_3 питается напряжением промышленной частоты через регулируемое сопротивление R_m , с помощью которого может измениться масштабный коэффициент задания нагрузки.

Частотный корректор создает регулирующее воздействие по мгновенному отклонению частоты системы. Упрощенная принципиальная схема частотного корректора изображена на рис. 168. Основным отличием этой схемы от схемы АРАН-Д является осуществление жесткой обратной связи по положению двигателя, для чего движок компенсирующего потенциометра R_k через механическую передачу связан с двигателем. Через механическую передачу с двигателем также связан движок выходного потенциометра, с которого снимается напряжение, зависящее от отклонения частоты в системе.

Двойной Т-образный фильтр частотного корректора настроен на номинальную частоту 50 гц и питается так же, как и двойной Т-образный фильтр АРАН-Д. На вход электронного усилителя U подается напряжение $U_{вх}$, равное разности напряжений U_2 и U_k между движками потенциометра $УР_ч$ и компенсирующего потенциометра R_k (напряжения U_2 и U_k находятся в противофазе). При номинальной частоте системы ($U_2 = 0$) движок R_k установлен в такое положение, что $U_k = 0$, $U_{вх} = 0$ и двигатель находится в состоянии покоя. В этом случае движок выходного потенциометра корректора $R_{ч.к}$ находится в среднем положении, и выходное напряжение корректора $U_{ч.к} = 0$.

При отклонении частоты системы от номинального значения на величину $+\Delta f$ на выходе фильтра $2T\Phi_3$ появляется напряжение U_2 , совпадающее по фазе с питающим напряжением U , и ротор двигателя начинает вращаться в определенном направлении, перемещая движки потенциометров R_k и $R_{ч.к}$. В этом случае между движками потенциометров $УР_ч$ и R_k появляется напряжение U_k , напряжение $U_{вх}$ уменьшается и, когда движок потенциометра R_k переместится на такую величину, что $U_2 = U_k$, входное напряжение усилителя станет равным нулю, и частотный корректор вновь придет в состояние покоя.

В установившемся режиме перемещение движка потенциометра $R_{ч.к}$ пропорционально отклонению частоты и при определенном знаке отклонения Δf фаза напряжения $U_{ч.к}$ имеет определенное значение, т. е.

$$U_{ч.к} = k_f \Delta f. \quad (5,11)$$

Если знак отклонения частоты системы меняется на обратный, фаза напряжения U_2 изменяется на противоположную, ротор

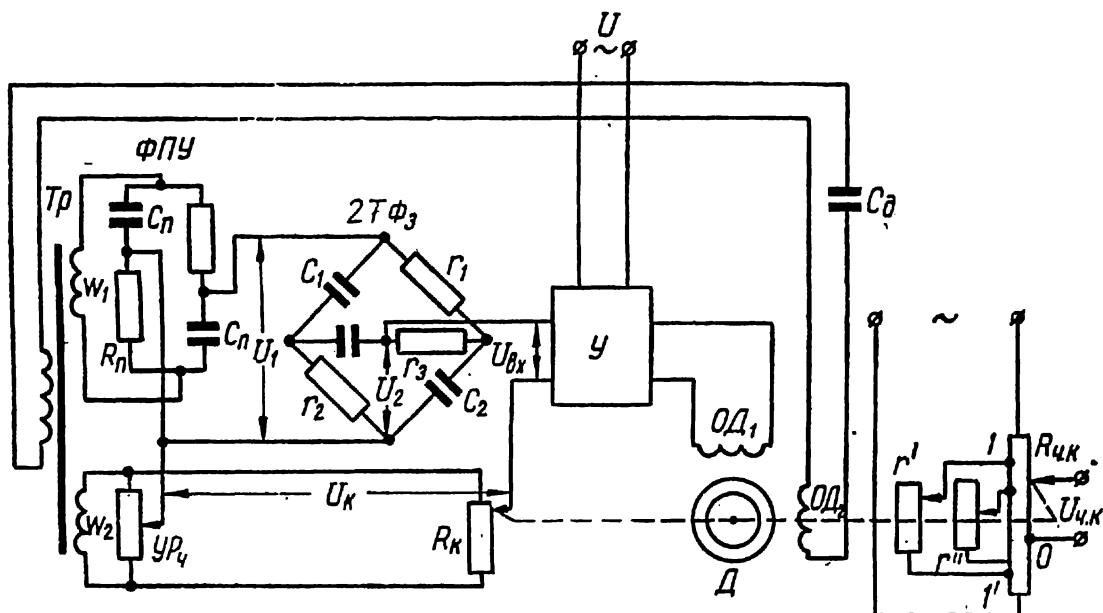


Рис. 168. Упрощенная схема частотного корректора.

двигателя вращается в другую сторону, движок $R_{ч.к}$ переместится на определенную величину в противоположном направлении от среднего положения и, следовательно, фаза выходного напряжения частотного корректора изменится на противоположную.

Сопротивления r' и r'' и предназначены для уменьшения коэффициента пропорциональности между перемещением движка потенциометра $R_{ч.к}$ и напряжением $U_{ч.к}$, а следовательно, и между напряжением $U_{ч.к}$ и отклонением частоты Δf при небольших отклонениях частоты ($\pm 0,2$ гц).

При отклонениях частоты, не превышающих $\pm 0,2$ гц, движок потенциометра $R_{ч.к}$ не выходит за пределы, ограниченные точками 1 и 1' присоединения сопротивления r' . Поэтому напряжение $U_{ч.к}$, отнесенное к единице перемещения, в этом случае не велико.

Если $\Delta f > 0,2$ гц, движок потенциометра $R_{ч.к}$ выходит за пределы, ограниченные точками 1 и 1', и величина напряжения $U_{ч.к}$, отнесенная к единице перемещения, значительно возрастает. Выходная характеристика корректора изображается ломаной линией (кривая 1 на рис. 169). При такой характеристике корректора в случае нормальных эксплуатационных отклонений частоты ($\pm 0,2$ гц) в системе АРЧМ создается некоторый небольшой статизм по частоте. При аварийных отклонениях частоты выходное напряжение $U_{ч.к}$ быстро увеличивается, резко возрастает регулирующее воздействие по мгновенному отклонению частоты и значительно ускоряется мобилизация вращающегося резерва, необходимого для устранения дефицита мощности в системе. Если $r' = r'' = 0$, то частотный корректор имеет зону нечувствительности $\pm 0,2$ гц (кривая 2 на рис. 169), аналогично корректору системы регулирования ВНИИЭ.

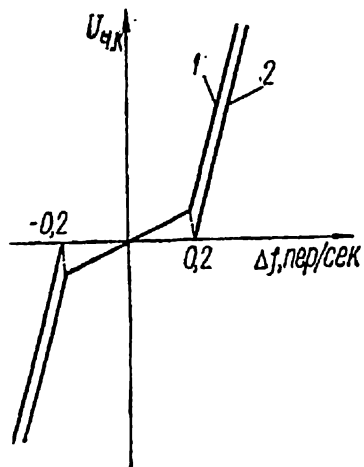


Рис. 169. Характеристики частотного корректора.

Станционный автоматический распределитель активной нагрузки.

Упрощенная принципиальная схема станционного автоматического распределения активной нагрузки изображена на рис. 170. Электронный усилитель $У$ управляет двухфазным реверсивным асинхронным двигателем $Д$, ротор которого при вращении посредством винтовой передачи перемещает каретку с шаблонами $Ш$. Форма шаблонов выполнена в соответствии с графиком экономичной загрузки агрегата станции в функции общего параметра задания.

В АРАН-С общим параметром задания является величина перемещения каретки с шаблонами в горизонтальном направлении. Так как изменение величины перемещения каретки качественно совпадает с изменением величины напряжения U_3 (при увеличении U_3 изменение перемещения положительно, при уменьшении U_3 — отрицательно), снимаемого с выходного потенциометра приемного устройства и пропорционального заданию нагрузки станций отработанному АРАН-Д, то общий параметр задания (перемещения) в некотором масштабе отражает задание нагрузки станции. Если каретка перемещается, по шаблонам скользят копии, которые, поворачиваясь вокруг осей O_1 , O_2 и O_3 , посредством зубчатой передачи поворачивают рамки соответствующих индукционных преобразователей ИП. Выходное напряжение

преобразователя *ИП* пропорционально углу поворота рамки. Следовательно, выходное напряжение соответствующего индукционного преобразователя U_m пропорционально экономически наиболее выгодной нагрузке агрегата

$$U_{mi} = k'_p P_{i \text{ эк.}} \quad (5,12)$$

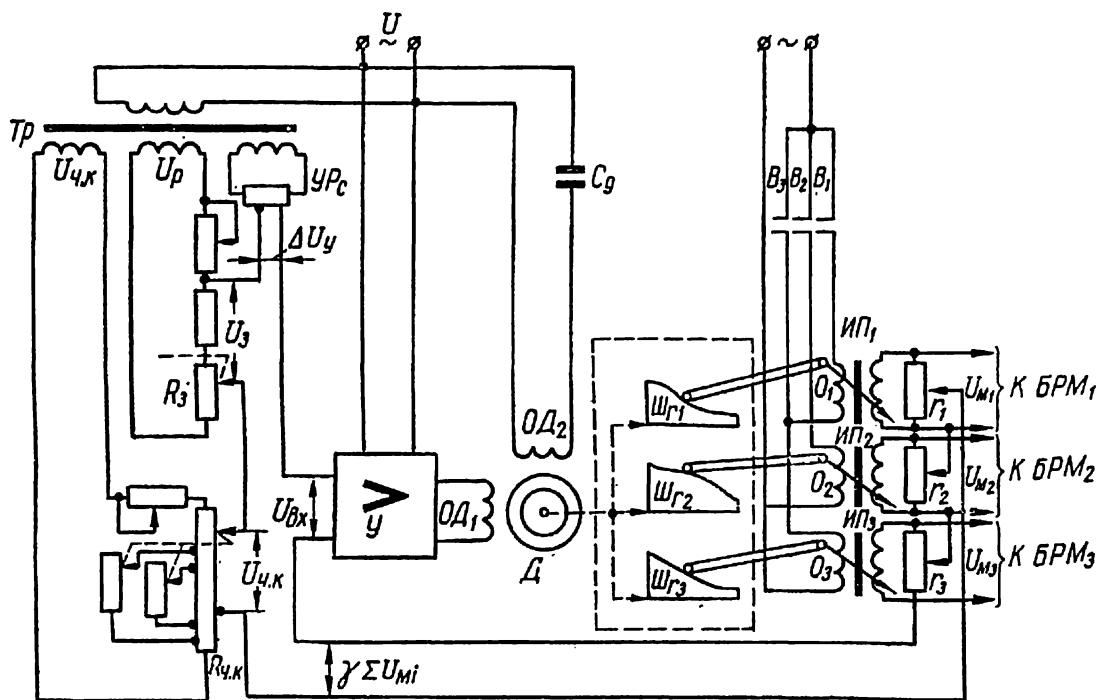


Рис. 170. Упрощенная схема стационарного автоматического распределителя нагрузки.

Делители напряжения (сопротивления $r_1 — r_3$) предназначены для суммирования определенных (равных) частей γ выходных напряжений индукционных преобразователей *ИП*, пропорциональных экономическим нагрузкам агрегата.

На вход усилителя $У$ в общем случае подается сумма четырех напряжений, причем напряжения U_3 и $\gamma \sum_1^n U_{mi}$ находятся в противофазе. Фазы напряжений $U_{ч.к}$ и ΔU_y , снимаемых с потенциометра частотного корректора и установочного реостата $УРс$, зависят от положения движков относительно среднего положения, при этом

$$U_{вх} = \Delta U_y + U_{ч.к} + U_3 - \gamma \sum_1^n U_{mi}.$$

В установившемся режиме двигатель D находится в состоянии покоя и

$$U_{\text{вх}} = \Delta U_y + U_{\text{ч.к}} + U_{\text{э}} - \gamma \sum_1^n U_{m_i} = 0. \quad (5,13)$$

Если движок установочного реостата $УР_c$ находится в среднем положении, то $\Delta U_y = 0$ и с учетом выражений (5,10) — (5,12) уравнение (5,13) можно записать в виде

$$k_f \Delta f + k_p P_{\text{з.эк}} - \gamma k'_p \sum_1^n P_{i_{\text{эк}}} = 0. \quad (5,14)$$

Отпайки на делителях напряжения r_i установлены так, что

$$\gamma k'_p = k_p.$$

Следовательно, уравнение (5,14) примет вид

$$k_f \Delta f + k_p (P_{\text{з.эк}} - \sum_1^n P_{i_{\text{эк}}}) = 0. \quad (5,15)$$

При настройке частотного корректора на номинальную частоту в установившемся режиме $\Delta f = 0$ (движок сопротивления $R_{\text{ч.к}}$ находится в среднем положении) и

$$\sum_i^n P_{i_{\text{эк}}} = P_{\text{з.эк}}, \quad (5,16)$$

т. е. сумма заданных экономически наиболее выгодных нагрузок отдельных агрегатов равна заданной экономической нагрузке станции. Таким образом, АРАН-С обрабатывает экономически наиболее выгодные задания нагрузки отдельным агрегатом в соответствии с заданной нагрузкой станции.

Уравнение (5,15) определяет характеристику регулирования системы АРЧМ на станции. Из этого уравнения видно, что частотный корректор создает регулирующее воздействие по мгновенному отклонению частоты.

Если движок сопротивления $УР_c$ не находится в среднем положении ($\Delta U_y \neq 0$), а корректор настроен на частоту

$$f_1 = f_n + \Delta f_1,$$

то в установившемся режиме, когда двигатель D находится в состоянии покоя,

$$\sum_1^n P_{i_{\text{эк}}} = P_{\text{з.эк}} + \frac{k_f}{k_p} \Delta f_1 + \frac{1}{k_p} \Delta U_y, \quad (5,17)$$

т. е. сумма заданий нагрузок агрегатов оказывается больше или меньше (в зависимости от фаз напряжений $U_{ч.к}$ и ΔU_y) заданной нагрузки станции. Таким образом, воздействуя на сопротивление $УР_с$ и настройку частотного корректора, можно изменить нагрузку станции независимо от заданий, получаемых от АРАН-С. Если один из генераторов отключен, то блок-контактами выключателя этого генератора B_l разрывается цепь питания соответствующего индукционного преобразователя, и задание нагрузки станции распределяется между агрегатами, продолжающими работать.

Блок регулирования мощности устанавливается на каждом агрегате станции. Упрощенная принципиальная схема блока БРМ изображена на рис. 171. Блок БРМ через исполнительный блок управляет двигателем МИС первичного регулятора, который изменяет впуск энергоносителя в турбину. Исполнительный блок можно выполнить по различным схемам с применением различных усилителей и, в частности, можно выполнить точно так, как исполнительный блок системы регулирования ВНИИЭ.

В качестве измерительного элемента мощности в блоке БРМ, измеряющего нагрузку l -го агрегата, применен трехфазный ваттметр W с индукционным преобразователем $ИП_{wl}$. Напряжение на выходе индукционного преобразователя

$$U_{wl} = k'_{pl} P_l, \quad (5,18)$$

где P_l — активная нагрузка l -го агрегата;
 k'_{pl} — коэффициент пропорциональности.

Индукционные преобразователи ваттметра и станционного распределителя $ИП$ питаются от одного источника напряжения U промышленной частоты, их рамки включены последовательно так, что напряжения U_{wl} и U_{ml} находятся в противофазе.

Таким образом, на вход электронного усилителя $У$ подается напряжение $U_{вх}$, равное алгебраической разности выходных напряжений индукционных преобразователей, т. е. с учетом выражения (5,12)

$$U_{вх} = U_{ml} - U_{wl} = k'_{pl} (P_{l_{эк}} - P_l). \quad (5,19)$$

Выходное напряжение $U_{в}$ электронного усилителя совпадает по фазе с напряжением $U_{вх}$ и, следовательно, в зависимости от соотношения заданной $P_{l_{эк}}$ с фактической P_l нагрузок агрегата, совпадает по фазе с питающим напряжением или находится с ним в противофазе.

Выход электронного усилителя включен на вход фазочувствительного устройства $ФЧУ_{брм}$ так, что напряжения на его выпря-

мителях $U_{в1}$ и $U_{в2}$, соответственно равны алгебраической сумме и разности напряжений:

$$\left. \begin{aligned} U_{в1} &= U' - U_{в}; \\ U_{в2} &= U' + U_{в}. \end{aligned} \right\} \quad (5,20)$$

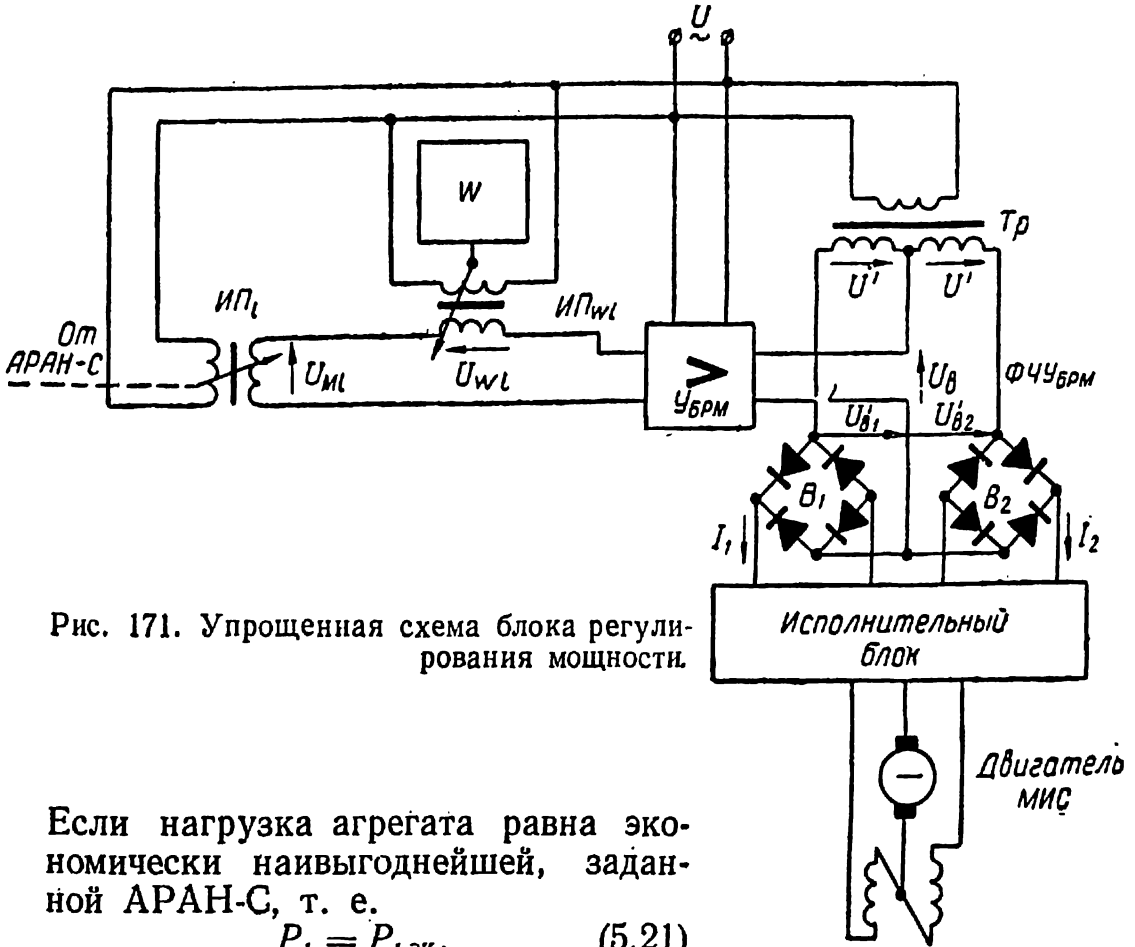


Рис. 171. Упрощенная схема блока регулирования мощности.

Если нагрузка агрегата равна экономически наивыгоднейшей, заданной АРАН-С, т. е.

$$P_l = P_{l эк}, \quad (5,21)$$

то $U_{вх} = 0$, $U_{в} = 0$ и напряжения на выпрямителях ФЧУ одинаковы

$$U_{в1} = U_{в2}.$$

Следовательно, токи на входе усилителей исполнительного блока равны между собой

$$I_1 = I_2.$$

В этом случае управляющая намагничивающая сила в магнитных усилителях исполнительного блока равна нулю, и двигатель МИС находится в состоянии покоя.

Если $P_1 < P_{1.эж}$, то напряжение $U_{вх} > 0$ (совпадает по фазе с питающим напряжением), $U_{в} > 0$, $U_{в2} > U_{в1}$, $I_2 > I_1$ и в исполнительном блоке появляется управляющая намагничивающая сила определенной величины и направления, якорь двигателя МИС начинает вращаться в сторону увеличения нагрузки агрегата. При восстановлении равенства (5,21) вращение якоря двигателя прекращается. Если $P_1 > P_{1.эж}$, напряжение $U_{вх} < 0$ (находится в противофазе с напряжением U), $U_{в} < 0$, $U_{в2} < U_{в1}$, $I_2 < I_1$, и в исполнительном блоке появляется управляющая намагничивающая сила противоположного направления, якорь двигателя вращается в сторону уменьшения нагрузки агрегата до тех пор, пока вновь не установится равенство (5,21).

Таким образом, нагрузка агрегата в установившемся режиме всегда равна заданной экономически наиболее выгодной величине.

§ 3. КАМЕРТОННЫЙ РЕГУЛЯТОР ЧАСТОТЫ

Камертонный регулятор частоты (КРЧ), разработанный в ЭНИН АН СССР, предназначен для автоматического регулирования частоты и равномерного (пропорционального) распределения активной нагрузки между агрегатами по методу мнимого статизма. Поэтому регулятор КРЧ в большинстве случаев целесообразно устанавливать на гидростанциях и на тепловых станциях с одноподобными агрегатами. Регулятор КРЧ может астатически регулировать частоту в энергосистеме одной станцией, регулировать частоту со статизмом по активной мощности в линии, соединяющей станцию с энергосистемой, а также со статизмом по суммарной нагрузке станции. Камертонный регулятор частоты можно применить для экономичного распределения нагрузки между агрегатами по относительным приростам, если дополнительно к регулятору КРЧ установить УРАН, измерительные элементы мощности для каждого агрегата, сумматор и датчик относительного прироста, выполненные так, как в системе ДЕСАУР ЧМ [39].

Камертонный регулятор частоты состоит из (рис. 172):

- 1) блоков измерения активной мощности БИМ;
- 2) блока измерения частоты БИЧ;
- 3) блока измерения суммарной мощности линий передач БИМЛ;
- 4) блока задания мощности БЗМ;
- 5) блока суммирования БС;
- 6) блоков промежуточных усилителей БПУ;
- 7) блоков выходных усилителей БВУ.

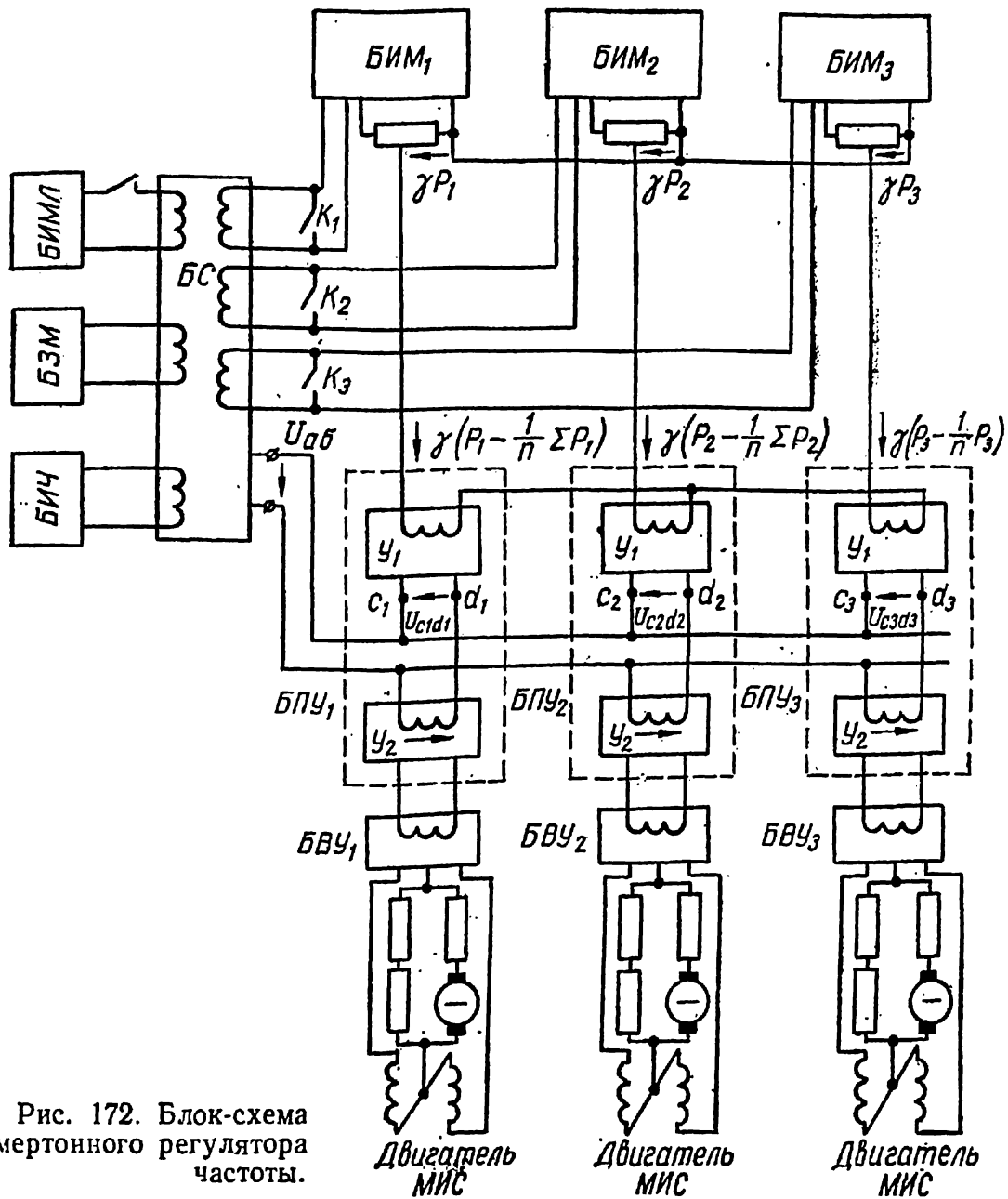


Рис. 172. Блок-схема камертонного регулятора частоты.

Количества блоков БИМ, БПУ и БВУ соответствуют количеству агрегатов станции.

Блоки измерения мощности агрегатов имеют два выхода, напряжения которых пропорциональны мощности агрегата. Первые из выходов могут быть подключены к соответствующим входным обмоткам блока суммирования, а вторые — совместно с управляющими обмотками ω_{y1} первых каскадов блоков БПУ соединяются в схему многолучевой звезды. На вход блока суммирования,

помимо воздействия, пропорционального суммарной нагрузке $\sum P_i$ от БИМ подаются воздействия, пропорциональные отклонению частоты Δf от БИЧ и заданной суммарной нагрузке станции $P_{з.с}$ от БЗМ, причем воздействия от блоков БИМ и БЗМ взаимно противоположны.

Выходное напряжение $U_{аб}$ блока суммирования БС в этом случае определяется алгебраической суммой величин, пропорциональных входным воздействиям, т. е.

$$U_{аб} = k_f \Delta f + k_{рс} \left(\sum_1^n P_i - P_{з.с} \right). \quad (5,22)$$

Если на вход блока суммирования подключен выход блока БИМЛ (при этом существующие выходы блока измерения мощности зашунтированы),

$$U_{аб} = k_f \Delta f + k_{рл} (P_{л} - P_{з.л}), \quad (5,23)$$

где $P_{л}$ и $P_{з.л}$ — фактическая и заданная мощности перетока в линиях передачи.

Токи, протекающие в управляющих обмотках первых каскадов блоков БПУ, которые соединены совместно с блоками БИМ в схему многолучевой звезды, при одинаковых положениях движков выходных-потенциометров блока БИМ, пропорциональны разности мощности l -го агрегата и средней мощности всех агрегатов станции. Следовательно, напряжение U_{cd} на выходе соответствующих усилителей $У$

$$U_{cd} = k_y \left(P_l - \frac{1}{n} \sum_1^n P_i \right), \quad (5,24)$$

где k_y — коэффициент пропорциональности.

Напряжение U_{y2} , приложенное к управляющей обмотке соответствующего усилителя $У_2$ блока промежуточных усилителей, равно сумме выходных напряжений $U_{аб}$ блока БС и усилителя $У_1$, и система регулирования находится в состоянии покоя, если

$$U_{y2} = U_{аб} + U_{cd} = k_f \Delta f + k_{рс} \left(\sum_1^n P_i - P_{з.с} \right) + k_y \left(P_l - \frac{1}{n} \sum_1^n P_i \right) = 0. \quad (5,25)$$

Уравнение (5,25) представляет собой уравнение характеристики регулятора КРЧ для l -го агрегата, если на вход блока суммирования подаются воздействия от измерительных блоков мощности каждого агрегата.

Записав уравнения характеристик регулирования для всех агрегатов и просуммировав их, легко убедиться в том, что

$$k_f \Delta f + k_{pc} \left(\sum_1^n P_i - P_{з.с} \right) = 0; \quad (5,26)$$

$$P_l = \frac{1}{n} \sum_1^n P_i. \quad (5,27)$$

Из выражений (5,26) и (5,27) видно, что регулятор КРЧ регулирует частоту со статизмом по суммарной нагрузке станции (коэффициент статизма $k_c = \frac{k_{pc}}{k_f}$) и выравнивает нагрузку между агрегатами. Если на вход блока БС включен выход блока БИМЛ, то частота регулируется со статизмом по активной мощности в линиях передачи, т. е.

$$k_f \Delta f + k_{pl} (P_n - P_{з.л}) = 0.$$

Если блок БИМЛ отключен и соответствующие выходы блоков измерения мощности зашунтированы, то $k_{pc} = k_{pl} = 0$ и регулятор КРЧ астатически регулирует частоту.

От мостовой схемы, в одно из плеч которой включен якорь двигателя, осуществляется отрицательная обратная связь (на схеме не показанная) на входы усилителей $У_1$ и $У_2$ блока БПУ. Отрицательная обратная связь в отличие от обратной связи в исполнительном блоке ВНИИЭ не имеет запаздывания, но ее воздействие на два промежуточных усилителя повышает качество регулирования.

Блок измерения частоты (измерительный блок) предназначен для получения воздействия на последующие элементы, пропорционального отклонению частоты Δf от заданного (номинального) значения. Упрощенная принципиальная схема блока измерения частоты изображена на рис. 173.

В качестве измерительного элемента частоты применен камертон K , настроенный на номинальную частоту. Обмотка возбуждающего электромагнита $ЭМ_1$ камертона питается от вторичной обмотки трансформатора $Тр_1$ через фазоповорачивающее устройство ФПУ.

Э. д. с., индуцируемая в обмотке электромагнита $\mathcal{E}M_2$, подается на вход двухкаскадного усилителя $У_к$, собранного на транзисторах и питающегося выпрямленным напряжением (от выпрямителя B_3), сглаженным фильтром r_6 , C_4 и C_5 . Выходное пере-

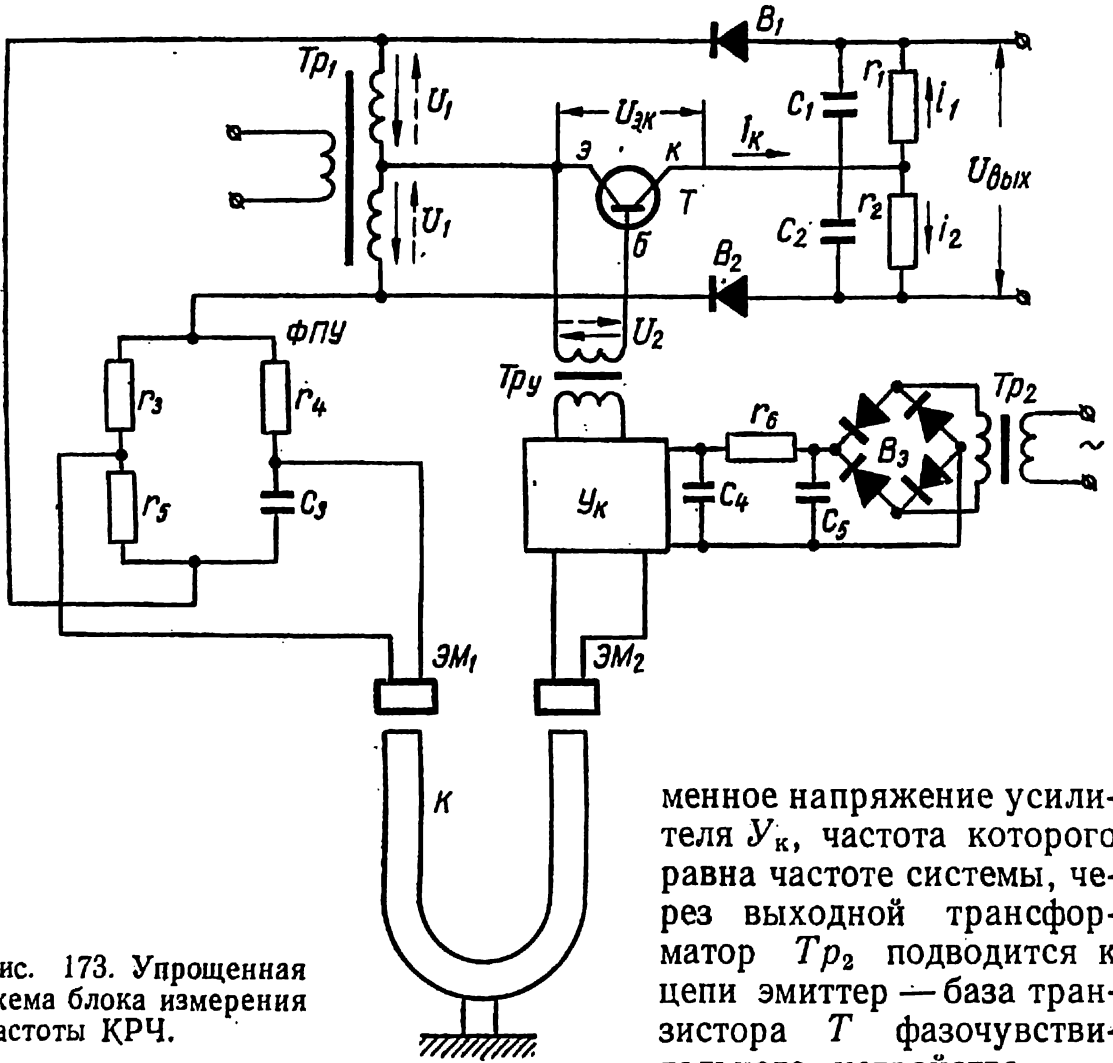


Рис. 173. Упрощенная схема блока измерения частоты КРЧ.

менное напряжение усилителя $У_к$, частота которого равна частоте системы, через выходной трансформатор Tr_2 подводится к цепи эмиттер — база транзистора T фазочувствительного устройства.

Если частота системы равна номинальной, то э. д. с., индуцируемая в обмотке электромагнита $\mathcal{E}M_2$, сдвинута по фазе относительно напряжения в обмотке электромагнита $\mathcal{E}M_1$ на $\frac{\pi}{2}$. Фазоповорачивающее устройство $ФПУ$ настроено так, что оно компенсирует фазовую погрешность усилителя $У_к$ и выходного трансформатора Tr_2 . Поэтому при номинальной частоте системы угол сдвига фаз между напряжениями U_1 и U_2 равен $\frac{\pi}{2}$. Если частота отклоняется от номинального значения, угол сдвига фаз

ψ между напряжениями U_1 и U_2 становится больше или меньше $\frac{\pi}{2}$. К цепи эмиттер — коллектор транзистора T приложено выпрямленное напряжение U_1 . В один полупериод, например, нечетный к цепи эмиттер — коллектор транзистора прикладывается напряжение U_1 через вентиль B_1 , а в другой (четный) — через вентиль B_2 .

Таким образом, если транзистор T не заперт, в один из полупериодов (или часть полупериода) ток i_1 может протекать только через сопротивление r_1 , а в другой полупериод ток i_2 — через сопротивление r_2 . Токи i_1 и i_2 направлены противоположно один другому и при $r_1 = r_2 = r$ среднее значение выходного напряжения

$$U_{\text{вых}} = r(I_1 - I_2), \quad (5,28)$$

где I_1 и I_2 — средние значения токов i_1 и i_2 .

Таким образом, в один из полупериодов напряжения U_2 (направление условно показано штрихом) транзистор открыт, а в другой полупериод — заперт. На рис. 174, а показаны кривые напряжений U_1 , U_2 , $U_{\text{эк}}$ тока коллектора i_k и токов i_1 и i_2 в функции времени при номинальной частоте системы, когда угол сдвига фаз между напряжениями U_1 и U_2 равен $\frac{\pi}{2}$. Из этих кривых вид-

но, что для $\psi = \frac{\pi}{2}$ токи i_1 и i_2 протекают в течение четверти периода каждый, в результате чего их средние значения равны, и выходные напряжения $U_{\text{вых}} = 0$.

Если частота системы меньше номинальной $f < f_n$, то угол $\psi < \frac{\pi}{2}$ и ток i_1 протекает в течение времени большего четверти периода, а ток i_2 — в течение времени меньшего четверти периода (рис. 174, б). Среднее значение тока i_1 увеличивается, а тока i_2 — уменьшается ($I_1 > I_2$), и на выходе измерительного элемента появляется среднее напряжение определенной величины и полярности: $U_{\text{вых}} > 0$.

Если $f > f_n$, то $\psi > \frac{\pi}{2}$, $I_1 < I_2$ (рис. 174, в) и полярность выходного напряжения изменяется на обратную: $U_{\text{вых}} < 0$. Конденсаторы C_1 и C_2 предназначены для сглаживания пульсаций выходного напряжения.

Таким образом, выходное напряжение блока измерения частоты примерно пропорционально отклонению частоты Δf от номиналь-

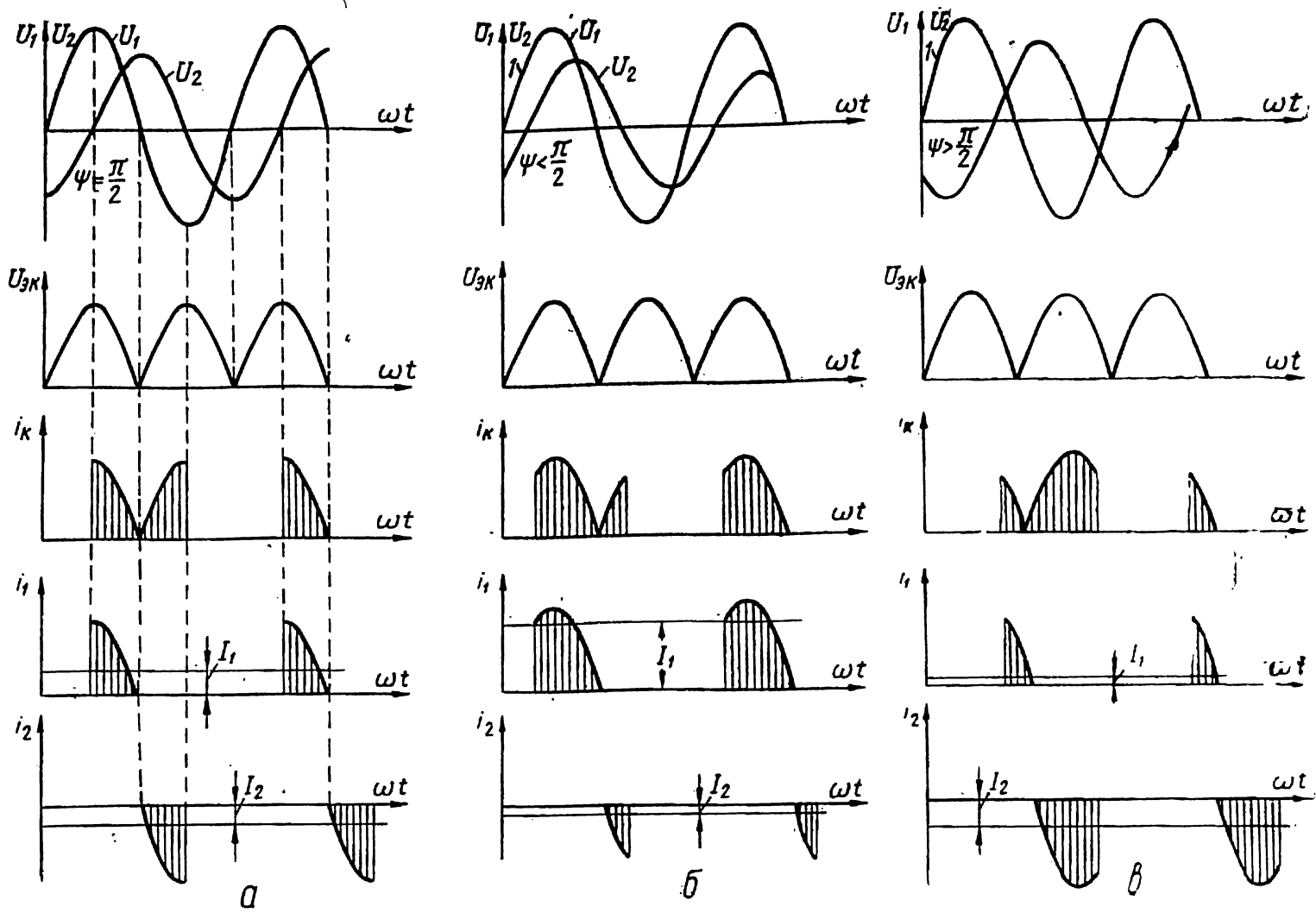


Рис. 174. Кривые напряжений и токов блока измерения частоты КРЧ:
 а — $f = f_H$; б — $f < f_H$; в — $f > f_H$.

ного значения, причем с изменением знака Δf изменяется полярность $U_{\text{вых}}$.

Блок измерения мощности состоит из измерительного элемента активной мощности типа МДМ-4 и двухтактного магнитного усилителя, составленного из двух дроссельных усилителей с внутренней обратной связью и выходом на постоянном токе.

Принципиальная схема блока измерения мощности изображена на рис. 175. Магнитные усилители MU_1 и MU_2 питаются от транс-

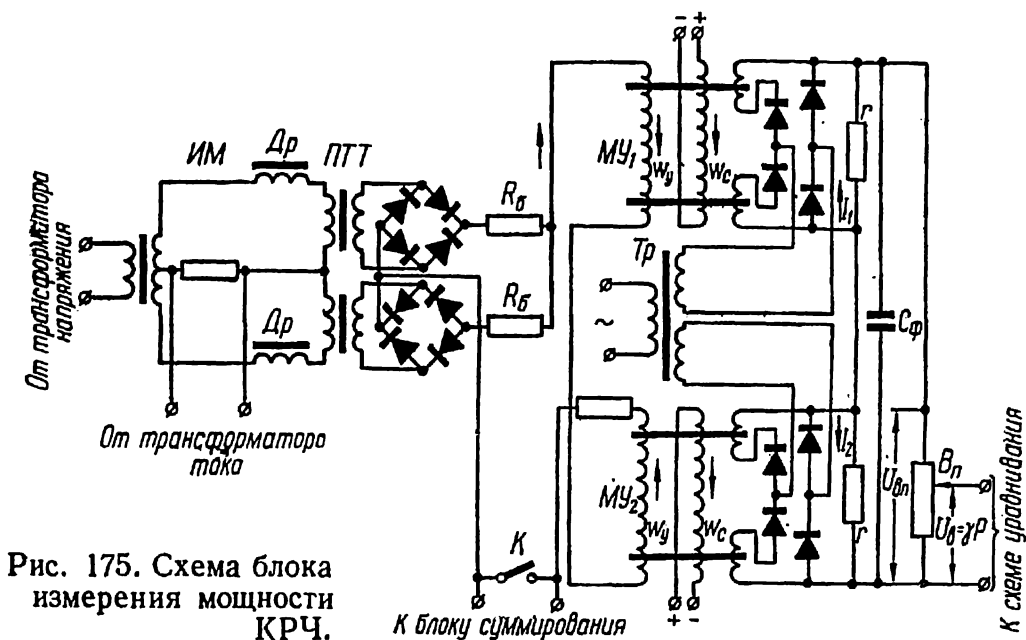


Рис. 175. Схема блока измерения мощности КРЧ.

форматора Tr . При отсутствии тока I_y в управляющих обмотках магнитных усилителей выходные токи I_1 и I_2 равны между собой и напряжение $U_{\text{в.п}}$ на выходном потенциометре B_p равно нулю. Если ток протекает в управляющих обмотках, создается намагничивающая сила, которая в одном из усилителей (например, MU_1) направлена согласованно с намагничивающей силой обмотки смещения, а в другом — против нее, ток I_1 увеличивается, а ток I_2 уменьшается, и на потенциометре B_p появляется напряжение

$$U_{\text{в.п}} = r(I_1 - I_2).$$

Токи в обмотках смещения подобраны так, что в широких пределах изменения I_y напряжение $U_{\text{в.п}}$ примерно пропорционально этому току. Ток I_y , являющийся выходным током измерительного элемента мощности, пропорционален нагрузке агре-

гата и; следовательно, выходное напряжение блока измерения мощности пропорционально активной нагрузке

$$U_{\text{вых}} = \gamma P.$$

Блок задания суммарной мощности представляет собой потенциометр, питаемый через выпрямитель от стабилизатора напряжения. Задание (уставка) мощности изменяется при изменении напряжения, снимаемого с потенциометра.

Блок суммирования представляет собой двухкаскадный двухтактный магнитный усилитель, каждый каскад которого выполнен с внутренней обратной связью, аналогично выходному усилителю блока измерения мощности. Первый каскад, помимо смещения, имеет управляющие обмотки (по количеству агрегатов), на вход которых подаются воздействия от агрегатных блоков измерения мощности (рис. 172), управляющую обмотку, к которой может быть подключен выход блока *БИМЛ*, и обмотку для воздействия от блока *БЗМ*. На второй каскад блока суммирования подается регулирующее воздействие от первого каскада и воздействие от блока измерения частоты.

Магнитные усилители блока промежуточных усилителей $У_1$, $У_2$ выполнены аналогично выходным усилителям блока измерения мощности. Блок выходных усилителей, непосредственно управляющий двигателем *МИС*, представляет собой однокаскадный двухтактный усилитель с внутренней обратной связью, схема которого аналогична схеме усилителя блока измерения мощности, а двигатель *МИС* подключен так же, как и к исполнительному блоку системы регулирования *ВНИИЭ*.

§ 4. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ГИДРОТУРБИН

В большинстве энергетических систем задача автоматического регулирования частоты и активной мощности решается с помощью вторичных регуляторов (АРЧМ), воздействующих через гидромеханические первичные регуляторы на режим работы турбин. Вторичные регуляторы являются сложными электрическими устройствами, органически не связанными с системами регулирования турбин. Поэтому усложняется система регулирования частоты и мощности на станции и снижается надежность ее работы.

Качество регулирования турбин (и других объектов) можно значительно повысить, если ввести некоторые дополнительные воздействия (например, по ускорению турбины). Так как гидромеханические первичные регуляторы имеют механический или гидродинамический измерительный элемент скорости вращения, введение дополнительных регулирующих воздействий на вход первичного регулятора через его измерительный элемент связано со значительными затруднениями. Реализация же дополнительных регулирующих воздействий, таких как ускорение, через вторичные регуляторы не имеет смысла, так как последние изменяют настройку первичных регуляторов через МИС, что требует значительного времени.

В связи с бурным ростом энергетических систем их объединением и укрупнением мощностей электрических станций значительно повышаются требования к системам регулирования первичных двигателей и ощущаются недостатки, связанные с применением сложных вторичных регуляторов. Вот почему в последнее десятилетие научно-техническая мысль была направлена на усовершенствование системы регулирования первичных двигателей генераторов.

Режим работы гидравлических турбин изменить значительно проще, чем паровых турбин. Поэтому эти усовершенствования прежде всего коснулись систем регулирования гидростанций. Это оправдывается еще и тем, что в энергосистемах с мощными многоагрегатными гидростанциями частота регулируется такими станциями. К созданию новых первичных регуляторов паровых турбин приступили только в последнее время.

Электромагнитные и электрогидравлические корректоры первичного регулятора гидротурбин. Первым этапом усовершенствования гидротурбин явилось создание таких автоматических систем, которые регулируют частоту обычными первичными гидромеханическими регуляторами с астатической настройкой, дополненными для принудительного распределения (выравнивания) нагрузки между агрегатами специальными электромагнитными или электрогидравлическими корректорами. Корректоры имеют более простую электрическую схему по сравнению со вторичными регуляторами и в отличие от последних воздействуют на первичный регулятор не через МИС, а непосредственно через рычаг золотника первого каскада гидравлического усилителя (побудительного золотника). Таким образом, применяя электромагнитные или электрогидравлические корректоры, можно осуществлять регулирование не только по отклонению основных регули-

руемых величин (скорость вращения, нагрузка), но и по их производимым (ускорение) или другим параметрам, которые могут быть поданы на вход корректора в виде электрических сигналов. Важным преимуществом применения корректоров вместо вторичных регуляторов является возможность относительно простого осуществления группового первичного регулирования мощ-

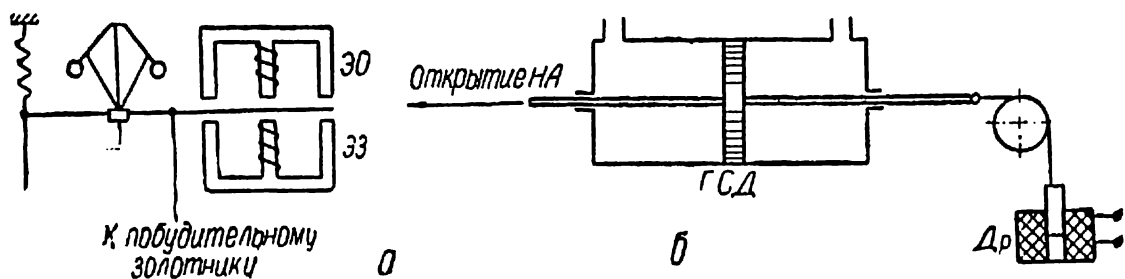


Рис. 176. Элементы электромагнитного корректора первичного регулятора гидротурбин:

а — электромагниты; б — переменная индуктивность.

ности гидроэлектростанций, т. е. одновременного регулирования всех агрегатов станции как единого агрегата.

Электромагнитный корректор первичного регулятора гидротурбин разработан канд. техн. наук Д. З. Альтерманом и установлен в настоящее время на некоторых гидроэлектростанциях Советского Союза [2]. Этот корректор состоит из двух электромагнитов, воздействующих на рычаг побудительного золотника и переменной индуктивности (дресселя), величина которой зависит от положения направляющего аппарата. Переменная индуктивность может быть выполнена в виде сельсина, включенного по схеме вариометра. Электромагнит Э0 (рис. 176, а) действует на побудительный золотник в сторону открытия направляющего аппарата, а электромагнит ЭЗ — в сторону закрытия.

Переменная индуктивность (рис. 176, б) выполнена в виде катушки (соленоида), внутри которой перемещается ферромагнитный сердечник, связанный с помощью троса и механической передачи со штоком поршня главного серводвигателя ГСД первичного регулятора (направляющим аппаратом турбины НА). При увеличении открытия направляющего аппарата сердечник движется вверх и индуктивность дресселя Др уменьшается.

Если гидроэлектростанция регулирует частоту в системе, то корректор должен распределять (выравнивать) нагрузку между

агрегатами. Выравнивание нагрузки осуществляется по открытию направляющих аппаратов. Схема выравнивания нагрузки электромагнитными корректорами изображена на рис. 177,а. Обмотки электромагнитов корректоров и переменные индуктивности соот-

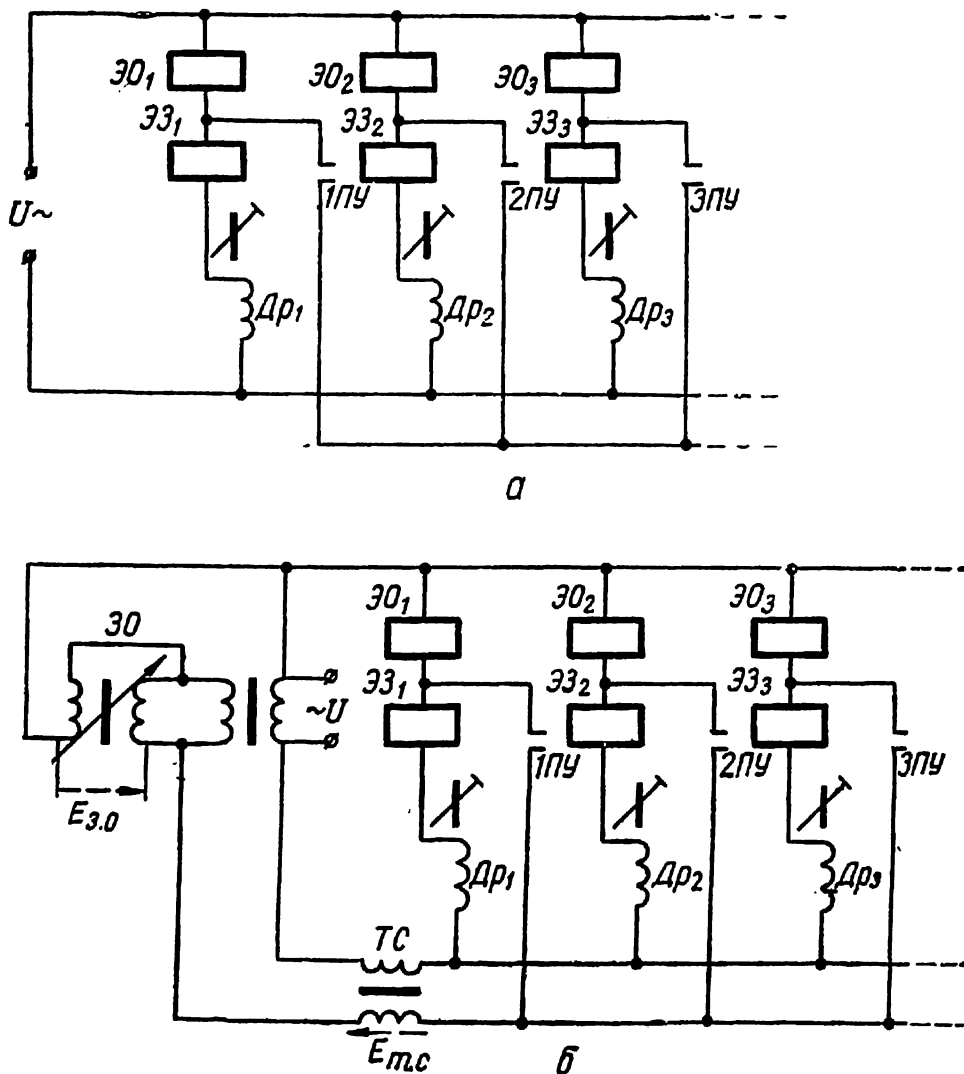


Рис. 177. Схемы включения элементов электромагнитного корректора первичного регулятора гидротурбин.

ветствующих агрегатов соединены последовательно. Общие точки обмоток электромагнитов открытия ($\mathcal{E}O_1, \mathcal{E}O_2, \dots, \mathcal{E}O_n$) и закрытия ($\mathcal{E}З_1, \mathcal{E}З_2, \dots, \mathcal{E}З_n$) всех агрегатов соединены между собой через контакты переключателей управления ПУ (поперечная связь). Схема выравнивания питается переменным напряжением 380 или 220 в. Все электромагниты ЭО и ЭЗ выполнены одинаковыми,

и индуктивные сопротивления соответствующих обмоток равны между собой:

$$z_{э. о_1} = z_{э. о_2} = \dots = z_{э. о_n} = z_{э. о};$$

$$z_{э. з_1} = z_{э. з_2} = \dots = z_{э. з_n} = z_{э. з}.$$

Переменные индуктивности Dp всех агрегатов имеют одинаковую зависимость сопротивления $z_{др}$ в функции открытия направляющего аппарата.

При одинаковом открытии направляющих аппаратов гидротурбин сопротивления обмоток дросселей Dp всех агрегатов равны между собой, токи в обмотках электромагнитов ЭО и ЭЗ каждого агрегата одинаковы и их результирующее воздействие на рычаг побудительного золотника равно нулю. Если один из направляющих аппаратов (например, первый) откроется больше других, сопротивление соответствующего дросселя (например, Dp_1) будет меньше сопротивлений дросселей других агрегатов и равенство токов в обмотках электромагнитов нарушится. Ток обмотки электромагнита ЭЗ₁ увеличится и станет больше тока обмотки электромагнита ЭО₁, а токи обмоток остальных электромагнитов закрытия уменьшатся относительно токов обмоток соответствующих электромагнитов открытия.

Результирующее воздействие электромагнитов корректоров на рычаг побудительного золотника в данном случае окажется не равным нулю, причем воздействие корректора первого агрегата будет направлено в сторону закрытия направляющего аппарата, а всех остальных корректоров — в сторону открытия. При восстановлении равенства открытия всех направляющих аппаратов сопротивления всех индуктивностей Dp вновь окажутся равными между собой, и система придет в состояние покоя.

Если один из агрегатов отключается, контакт ПУ отключает корректор этого агрегата от поперечной связи и тем самым исключает влияние соответствующего дросселя Dp на работу схемы.

В тех случаях, когда гидроэлектростанция (ГЭС) регулирует частоту, целесообразно осуществлять групповое регулирование нагрузки гидроэлектростанции с принудительным уравниванием нагрузок агрегатов.

Принципиальная схема группового регулирования нагрузки ГЭС с электромагнитными корректорами по открытию направляющих аппаратов показана на рис. 177,б. Отличие этой схемы от схемы выравнивания заключается в том, что между одним из зажимов питания корректоров и поперечной связью вводятся две, нахо-

дящиеся в противофазе, э. д. с.: $E_{т.с}$ — трансформатора статизма $ТС$ и $E_{з.о}$ задатчика открытия $ЗО$, выполненного в виде индукционного преобразователя.

Э. д. с. вторичной обмотки трансформатора $ТС$ зависит от открытия направляющих аппаратов турбин, так как с изменением открытия изменяется индуктивность дросселей $Др$ и, следовательно, изменяется напряжение на первичной обмотке трансформатора $ТС$.

Если открытия направляющих аппаратов одинаковы, то $x_{др_1} = x_{др_2} = \dots = x_{др_n} = x_{др}$ и равенство тока в обмотках электромагнитов $ЭО$ и $ЭЗ$ соблюдается при условии

$$E_{з.о} = E_{т.с} + \frac{U x_{з.о}}{x_{з.о} + x_{з.з} + x_{др}}, \quad (5,29)$$

где $x_{з.о}$ и $x_{з.з}$ — индуктивные сопротивления обмоток соответствующих электромагнитов.

Условие (5,29) получено после расчета схемы на рис. 177,б методом наложения в предположении малой величины активного сопротивления обмоток электромагнитов по сравнению с их индуктивным сопротивлением.

Э. д. с. $E_{з.о}$ и $E_{т.с}$ пропорциональны напряжению питания U и так как э. д. с. $E_{т.с}$ является функцией сопротивления $x_{др}$, то в установившемся режиме (токи электромагнитов равны между собой) между положением задатчика открытия (величиной э. д. с. $E_{з.о}$) и открытием направляющих аппаратов турбин (величиной сопротивления $x_{др}$) существует однозначная зависимость. Если открытия направляющих аппаратов не равны между собой, схема действует так же, как и схема выравнивания нагрузки, приведенная на рис. 177, а.

Таким образом, изменяя положение задатчика открытия, можно осуществлять групповое регулирование нагрузки ГЭС по открытию направляющих аппаратов с принудительным уравниванием этих открытий.

Недостатком электромагнитных корректоров рассматриваемой системы является наличие относительно мощных электромагнитов переменного тока, в результате чего иногда штоки серводвигателей первичного регулятора начинают вибрировать, регулирование становится неустойчивым. Неустойчивость регулирования в некоторых режимах является следствием квадратичной зависимости усилий электромагнитов от токов в их обмотках. Недостатком схемы, приведенной на рис. 177, б, является и то, что задание нагрузки

ГЭС осуществляется по открытию исправляющих аппаратов, неоднозначно связанному с активной нагрузкой агрегатов, особенно при переменном напряжении.

Этих недостатков не имеет устройство группового регулирования нагрузки (УГРМ), разработанное ОАТН Гидроэнергопроекта [22]. Принципиальная схема УГРМ изображена на рис. 178. Датчиками открытия направляющих аппаратов ДНА являются сельсины, работающие в трансформаторном режиме и роторы которых связаны со штоками главных серводвигателей. В качестве испол-

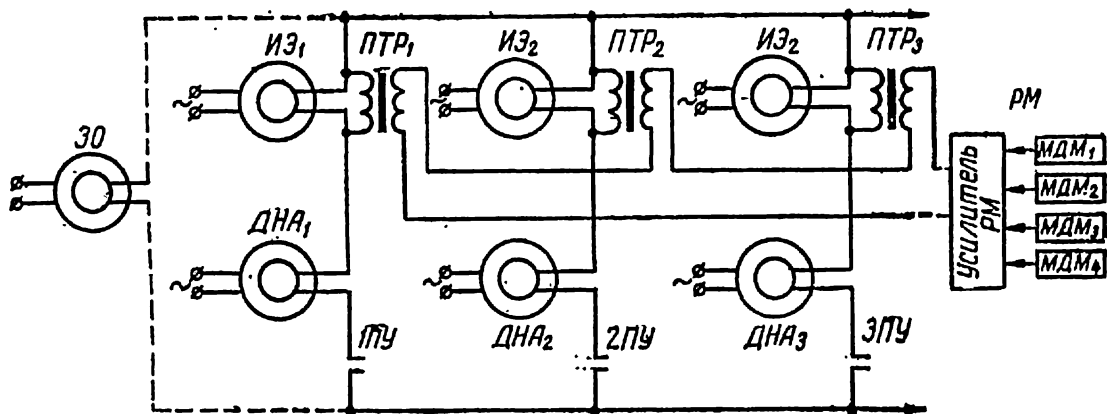


Рис. 178. Схема УГРМ системы ОАТН Гидроэнергопроекта.

нительных элементов (ИЭ₁, ИЭ₂, ..., ИЭ_n), воздействующих на побудительные золотники, применены сельсины, работающие в режиме моментного двигателя. Роторы исполнительных элементов связаны с побудительными золотниками первичных регуляторов турбин посредством кривошипно-шатунных механизмов.

Нагрузка ГЭС задается регулятором мощности РМ, представляющим собой двухтактный магнитный усилитель с выходом на переменном токе, на вход которого подаются противоположно направленные токи, пропорциональные фактической суммарной мощности ГЭС (от измерителя мощности МДМ) и заданной нагрузке (от задатчика мощности ЗМ). Выходное переменное напряжение усилителя регулятора мощности РМ, пропорциональное разности заданной и фактической мощности ГЭС, через промежуточные трансформаторы ПТР подводится к роторам исполнительных элементов. Фаза выходного напряжения (0 или π) зависит от знака отклонения фактической нагрузки ГЭС от заданной. При равенстве заданной и фактической нагрузок ГЭС выходное напряжение усилителя регулятора мощности РМ равно нулю.

Ротор исполнительного элемента расположен так, что при среднем положении побудительного золотника магнитное поле статора не индуцирует в нем э. д. с. При таком расположении ротора и наличии в нем тока от постороннего источника исполнительный элемент развивает максимальный момент, направление которого зависит от фазы тока (0 или π) относительно магнитного потока статора. Если ток в роторе исполнительного элемента отсутствует, то момент на его валу равен нулю. В случае одинакового открытия направляющих аппаратов турбин и равенства заданной и фактической нагрузок ГЭС э. д. с., индуцируемые в роторах датчиков ДНА, равны между собой, и токи в обмотках роторов исполнительных элементов ИЭ отсутствуют, так как элементы ИЭ и датчики ДНА соединены в многолучевую звезду. Если открытие направляющего аппарата одной из турбин отличается от открытия других турбин, то э. д. с. датчика ДНА этого аппарата не равна э. д. с. других датчиков открытия. Вследствие неравенства э. д. с. датчиков открытия направляющих аппаратов турбин появятся уравнительные токи в роторах исполнительных элементов, причем фаза уравнительного тока в роторе исполнительного элемента агрегата с большим открытием будет противоположна фазе тока в роторах остальных исполнительных элементов. В результате этого исполнительные элементы начнут воздействовать на побудительные золотники в сторону выравнивания открытия направляющих аппаратов. При восстановлении равенства открытий уравнительные токи исчезнут, и система вновь придет в состояние покоя.

Нагрузка ГЭС (или группы агрегатов) изменяется изменением тока на входе усилителя регулятора мощности РМ от задатчика мощности ЗМ. При нарушении равенства намагничивающих сил от задатчика и измерителя мощности на выходе регулятора РМ появляется напряжение соответствующей величины и фазы, под действием которого в роторах исполнительных элементов протекают токи, вызывающие вращающие моменты на их валах. В этом случае все исполнительные элементы ГЭС (группы агрегатов) воздействуют на побудительные золотники в определенном направлении, и нагрузки агрегатов изменяются. При достижении нагрузки ГЭС заданной величины равенство намагничивающих сил на входе усилителя регулятора РМ восстанавливается, и система приходит в состояние покоя. Групповое задание нагрузки может осуществляться по открытию направляющих аппаратов от задатчика открытия ЗО, выполненного в виде индукционного преобразователя (показанного штрихом на рис. 178). На вход усилителя регулятора

РМ может быть подано любое воздействие в виде тока (ускорение напор и др.).

Электрогидравлические корректоры выполняются с гидравлическим усилителем, воздействующим на побудительный золотник первичного регулятора турбины. Гидравлический усилитель корректора через свой золотник управляется магнитоэлектрическим преобразователем. Так как имеется гидроусилитель, то необходимы маломощные электромагнитные преобразователи с постоянными магнитами. Магнитоэлектрический преобразователь *МЭП* имеет две рабочие (подвижные) обмотки, одна из которых питается от регулятора мощности и служит для осуществления группового регулирования, а вторая — включена в схему уравнивания открытий направляющих аппаратов турбин (рис. 179). Обмотки питаются постоянным (выпрямленным) током. Усилие магнитоэлектрического преобразователя линейно зависит от токов в рабочих обмотках, а знак усилия — от знака результирующей намагничивающей силы рабочих обмоток. Общим преимуществом электромагнитных и электрогидравлических корректоров является простота конструкции и возможности их пристройки к существующим гидромеханическим первичным регуляторам гидротурбин. Однако при использовании этих корректоров недостатки системы автоматического регулирования частоты, связанные с наличием механического измерительного элемента скорости вращения (значительная зона нечувствительности и постоянная времени, наличие рычажных передач и др.) не исключаются.

Для введения дополнительного импульса по ускорению необходим электрический измерительный элемент скорости вращения турбины.

Кроме того корректоры, как и вторичные регуляторы, органически не связаны с первичными регуляторами турбин, а являются приставками к ним. Дальнейшим развитием применения корректоров явилось создание электрогидравлических первичных регуляторов гидротурбин как единого целого.

Электрогидравлический первичный регулятор гидротурбин. В состав электрогидравлического регулятора (*ЭГР*) входят электрическая и гидромеханическая части. К электрической части относятся измерительный элемент скорости вращения турбины, различные датчики (например, датчики ускорения, открытия направляющего аппарата), гибкая и жесткая обратные связи, суммирующий усилитель и магнитоэлектрический преобразователь электрических импульсов в механические перемещения (*МЭП*) побудительного золотника. Гидромеханическая часть регулятора представляет собой двухкаскадный гидравлический усилитель, воздействующий на

направляющий аппарат турбины и управляемый электрическими элементами регулятора посредством магнитоэлектрического преобразователя.

Сочетание преимуществ электрических систем регулирования (точность измерения регулируемой величины, простота введения и суммирование различных воздействий) с преимуществами гидрав-

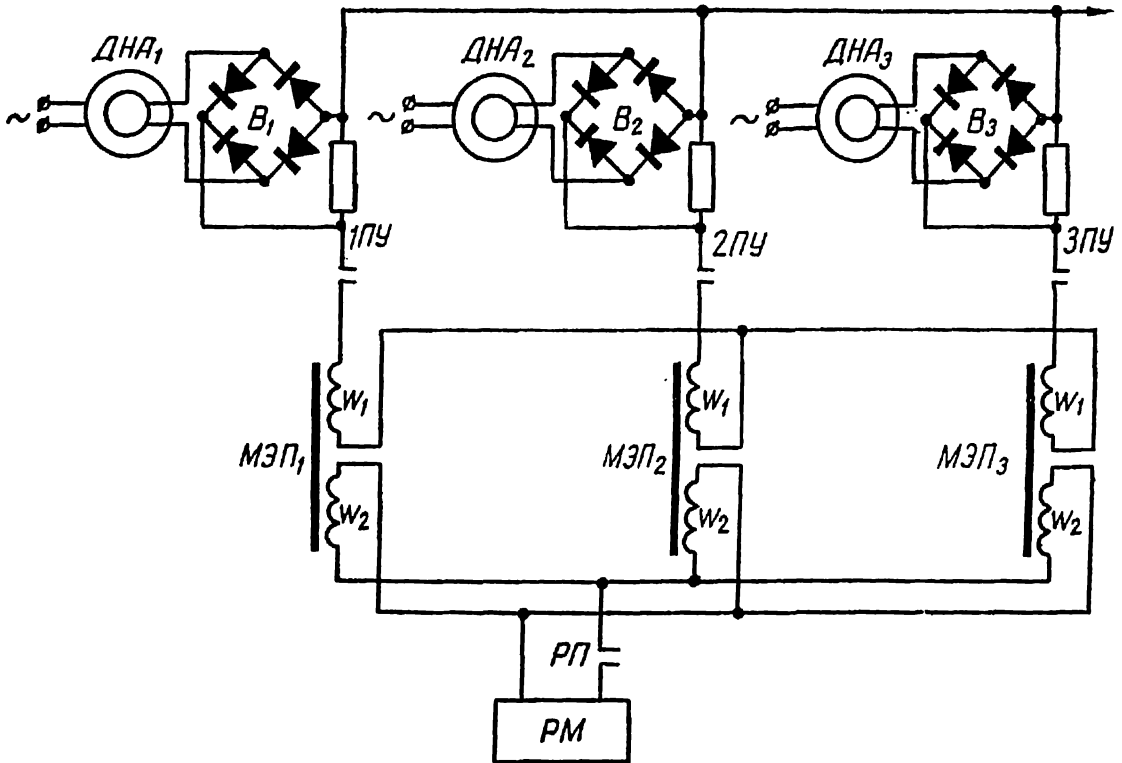


Рис. 179. Схема УГРМ с электрогидравлическими корректорами.

лических усилителей (простота конструкции, быстроедействие, большие механические усилия) позволяет с помощью электрогидравлического регулятора создать надежную, точную и эффективную систему первичного регулирования ГЭС.

В Советском Союзе за последние годы разработаны две конструкции электрогидравлических первичных регуляторов гидротурбин: электрогидравлический регулятор Ленинградского металлического завода (ЛМЗ) и регулятор, созданный Харьковским политехническим институтом имени В. И. Ленина совместно с Харьковским турбинным заводом имени С. М. Кирова (ХПИ — ХТГЗ).

В регуляторе ЛМЗ выходным усилителем электрической части является электронная лампа и входные сигналы суммируются на переменном токе.

В регуляторе ХПИ — ХТГЗ выходным усилителем электрической части является магнитный усилитель и сигналы суммируются на постоянном токе. При использовании магнитных усилителей вместо электронных ламп повышается эксплуатационная надежность регулятора, а суммирование сигналов на постоянном токе облегчает наладку системы регулирования в целом. Рассмотрим только электрогидравлический регулятор системы ХПИ — ХТГЗ [1].

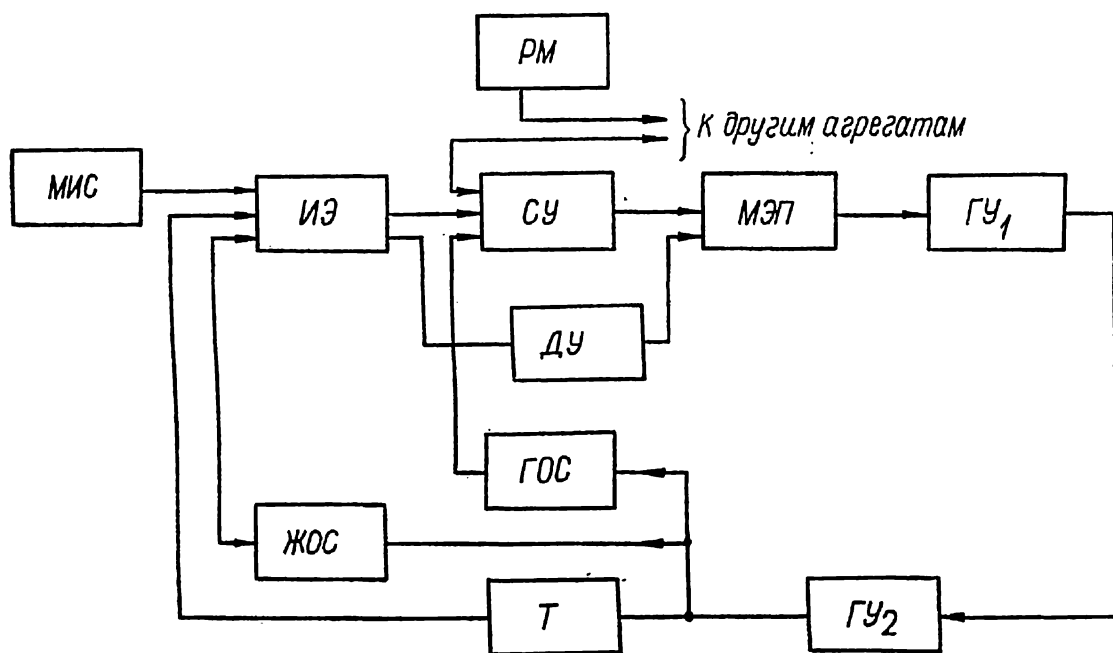


Рис. 180. Упрощенная элементная схема электрогидравлического регулятора гидротурбин системы ХПИ — ХТГЗ.

Упрощенная структурная схема такого регулятора изображена на рис. 180. Измерительный элемент регулятора (рис. 181) выполнен с полосовым частотным фильтром аналогично измерительному элементу системы ДЕСАУР ЧМ ВНИИЭ. Отличие заключается в том, что фазочувствительная схема включена последовательно с фильтром через промежуточный трансформатор тока $ПТТ_n$, вследствие чего сравниваются фазы входного и выходного токов фильтра (в измерительном элементе ВНИИЭ), сравниваются фазы напряжений. При таком включении фильтра можно повысить чувствительность измерительного элемента в случае его работы на низкоомную нагрузку, которой является вход суммирующего магнитного усилителя. Настройка измерительного элемента, а следовательно, и всего регулятора, изменяется изменением индуктивности L_f , которая выполнена в виде сельсина, включенного вариометром.

Таким образом, сельсин L_f совместно с редуктором является механизмом изменения скорости вращения (МИС) электрогидравлического регулятора.

Жесткая обратная связь в регуляторе осуществляется с помощью сельсина L_c , также включенного вариометром. Ротор сельсина L_c через тросы и механические передачи связан с направляющим аппа-

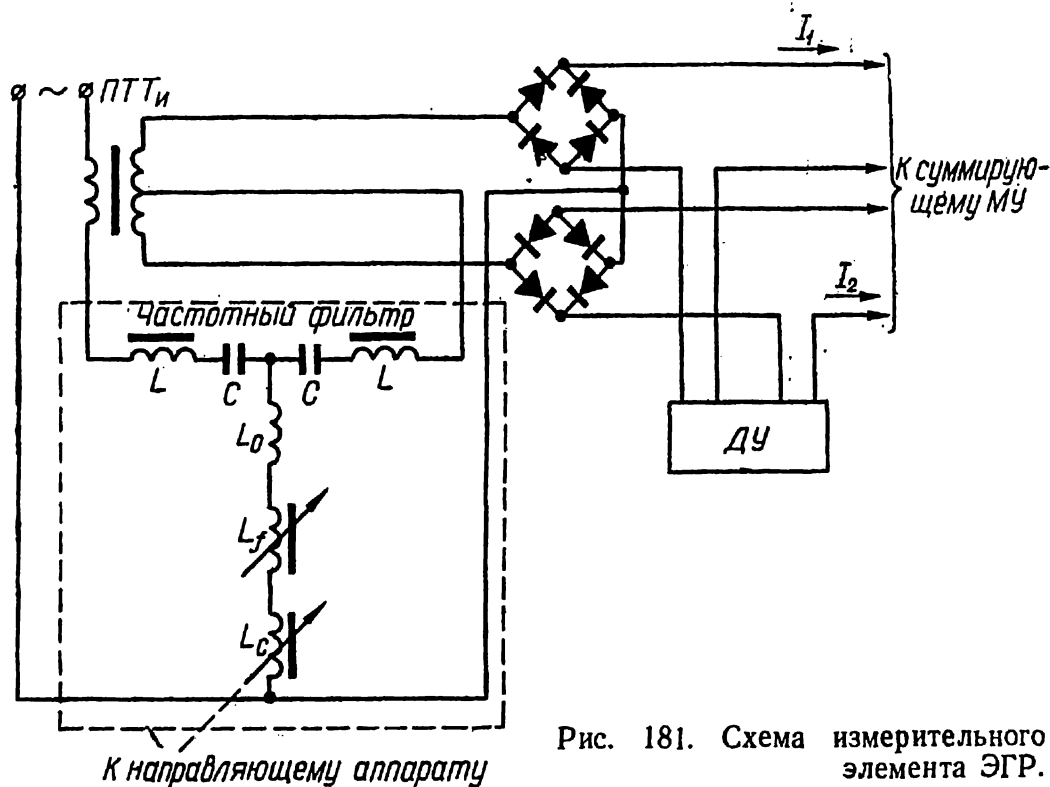


Рис. 181. Схема измерительного элемента ЭГР.

ратом турбины и, следовательно, с изменением его открытия изменяется настройка фильтра.

Выходные токи I_1 и I_2 измерительного элемента подаются на управляющие обмотки суммирующего усилителя, последовательно с которыми включен вход датчика ускорения.

Датчик ускорения, выходной ток которого пропорционален ускорению (первой производной по времени от частоты), воздействует непосредственно на магнитоэлектрический преобразователь, т. е. минуя суммирующий усилитель (рис. 180). При таком включении датчика ускорения исключается влияние запаздывания суммирующего усилителя и повышается эффективность влияния импульса по ускорению на качество процесса регулирования. Упрощенная принципиальная схема датчика ускорения изображена на рис. 182. Он состоит из входного трансформаторного магнит-

ного усилителя $TМУ_1$, фазочувствительного транзисторного усилителя $\PhiУ$, выполненного на плоскостных германиевых транзисторах T_1 и T_2 , и дифференцирующего трансформатора $ДТ$.

Трансформаторный и полупроводниковый усилители питаются напряжением одинаковой фазы.

Вторичная обмотка дифференцирующего трансформатора включена на одну из рабочих обмоток преобразователя $МЭП$. Трансформаторный магнитный усилитель выполнен с двумя выходными

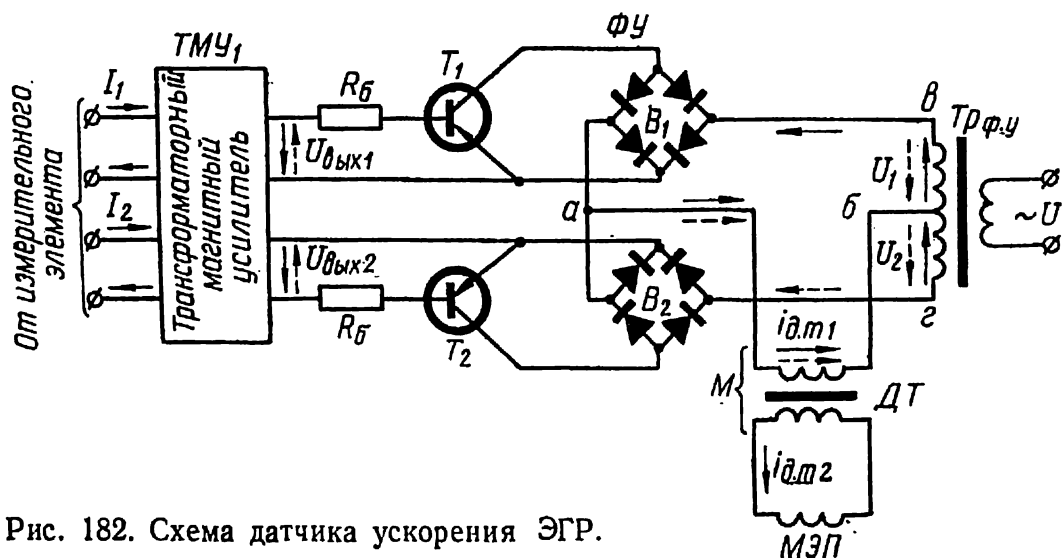


Рис. 182. Схема датчика ускорения ЭГР.

обмотками, одна из которых питает цепь эмиттер—база транзистора T_1 , а другая—транзистора T_2 . Выходные обмотки магнитного усилителя $TМУ_1$ подключены к транзисторам так, что напряжения, действующие в цепях эмиттер—база этих транзисторов, находятся в противофазе.

Две управляющие обмотки усилителя $TМУ_1$ обтекаются выходными токами измерительного элемента регулятора, которые создают в них встречно направленные намагничивающие силы (рис. 181) (питание усилителя $TМУ_1$ и его обмотки смещения на схеме не показаны). При номинальной частоте (скорости вращения турбины) выходные токи I_1 и I_2 измерительного элемента равны между собой, управляющая намагничивающая сила усилителя $TМУ_1$ равна нулю и его выходные напряжения $U_{\text{вых}1}$ и $U_{\text{вых}2}$ равны нулю. В этом случае через выпрямители B_1 и B_2 протекают нулевые коллекторные токи транзисторов T_1 и T_2 , и в первичной обмотке дифференцирующего трансформатора $ДТ$ протекает переменный ток, амплитуда которого определяется нулевым коллекторным током транзисторов; во вторичной обмотке индук-

тируется также переменный ток, среднее значение которого за период равно нулю.

При отклонении частоты от номинального значения на величину Δf равенство выходных токов измерительного элемента нарушается и в усилителе $TМУ_1$ создается управляющая намагничивающая сила.

Под действием этой намагничивающей силы на выходе трансформаторного магнитного усилителя появляются напряжения $U_{\text{вых } 1}$ и $U_{\text{вых } 2}$, пропорциональные отклонению частоты Δf . В зависимости от знака отклонения частоты Δf напряжение $U_{\text{вых } 1}$ совпадает по фазе или находится в противофазе с питающим напряжением U .

Предположим, что знак отклонения частоты такой, что напряжение $U_{\text{вых } 1}$ совпадает по фазе с напряжением U_1 , а $U_{\text{вых } 2}$ находится по отношению к нему в противофазе.

В первый полупериод напряжения $U_{\text{вых } 1}$, $U_{\text{вых } 2}$, U_1 и U_2 условно направим так, как это показано на рис. 182 сплошными стрелками. При таком направлении напряжений в первый полупериод транзистор T_1 окажется открытым, а T_2 — закрытым, и ток будет протекать только через выпрямитель B_1 и, следовательно, через первичную обмотку трансформатора $ДТ$ в направлении от a до b (на рис. 182 направление тока в первичной обмотке трансформатора $ДТ$ в этом случае показано сплошной стрелкой). В следующий полупериод (направление напряжения показано на рис. 182 штриховыми стрелками) транзистор T_1 окажется закрытым, а T_2 — открытым, и ток будет протекать только через выпрямитель B_2 так, как это показано штриховыми стрелками. Таким образом, и во второй полупериод ток протекает через первичную обмотку трансформатора $ДТ$ в направлении от a до b , т. е. при данном знаке отклонения частоты через первичную обмотку трансформатора $ДТ$ протекает выпрямленный ток определенного направления. Если знак отклонения частоты изменится, направление тока $i_{д.т1}$ изменится на противоположное, так как изменятся на угол π фазы напряжений $U_{\text{вых } 1}$ и $U_{\text{вых } 2}$.

Кривые тока $i_{д.т1}$ в функции времени при различных установившихся значениях отклонений частоты Δf показаны на рис. 183. Транзисторы T_1 и T_2 работают в режиме усиления и, следовательно, среднее за период значение тока $I_{д.т1}$ примерно пропорционально отклонению частоты Δf , т. е.

$$I_{д.т1} = k_y \Delta f, \quad (5,30)$$

где k_y — коэффициент пропорциональности.

При работе транзисторов в режиме усиления их внутреннее сопротивление значительно больше сопротивления нагрузки. Следовательно, весь фазочувствительный усилитель относительно дифференцирующего трансформатора можно рассматривать как источник тока. В этом случае среднее значение тока во вторичной обмотке дифференцирующего трансформатора

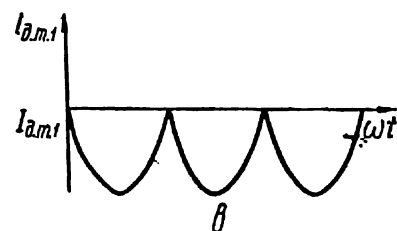
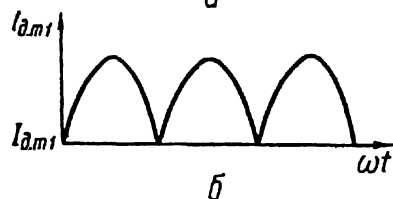
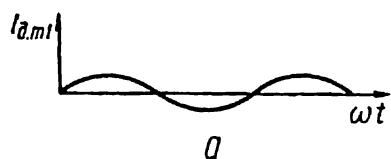


Рис. 183. Кривые тока в первичной обмотке дифференцирующего трансформатора при различных отклонениях частоты:

$a - \Delta f = 0$; $б - \Delta f > 0$;
 $в - \Delta f < 0$.

$$I_{д.т.2} \approx \frac{M}{r_{11} + r_2} \frac{dI_{д.т.1}}{dt} = \frac{k_y M}{r_{11} + r_2} \frac{d(\Delta f)}{dt}, \quad (5,31)$$

где M — взаимдуктивность между первичной и вторичной обмотками дифференцирующего трансформатора ДТ;

r_{11} — активное сопротивление рабочей обмотки преобразователя МЭП;

r_2 — активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора ДТ.

Таким образом, выходной ток датчика ускорения регулятора ЭГР примерно пропорционален первой производной по времени от отклонения частоты, т. е. ускорения турбины (системы).

Электрическая гибкая обратная связь ГОС в электрогидравлическом регуляторе отличается от гидромеханических:

изодромов возможностью плавной регулировки в широких пределах постоянной времени и интенсивности (временного статизма).

Упрощенная принципиальная схема блока электрической гибкой обратной связи изображена на рис. 184. Датчик открытия направляющего аппарата, выполненный в виде поворотного трансформатора (сельсина), через повысительный трансформатор T_p , выпрямитель B , сглаживающий фильтр $R_{\phi}C_{\phi}$ и потенциометры R_1 и R_2 питает контур RC , включенный последовательно с управляющей обмоткой магнитно-транзисторного усилителя. Магнитно-транзисторный усилитель, питающий одну из управляющих обмоток суммирующего магнитного усилителя $СУ$, выполнен аналогично схеме, показанной на рис. 182.

Намагничивающая сила SU , создаваемая блоком гибкой обратной связи, направлена против намагничивающей силы, создаваемой измерительным элементом. В установившемся режиме конденсатор C заряжен до напряжения

$$U_c = \gamma U_\alpha,$$

где U_α — напряжение, пропорциональное открытию направляющего аппарата;

γ — коэффициент пропорциональности, определяемый положением движков потенциометров R_1 и R_2 .

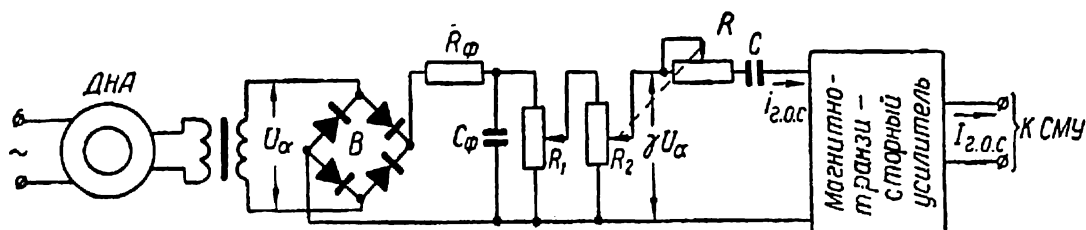


Рис. 184. Схема блока гибкой обратной связи ЭПР.

Ток в управляющей обмотке магнитно-транзисторного усилителя в установившемся режиме $i_{г. о. с} = 0$. Среднее значение выходного тока блока гибкой обратной связи в установившемся режиме $I_{г. о. с}$ также равно нулю.

При изменении открытия направляющего аппарата на некоторую величину напряжение U_α изменится на величину $\pm \Delta U_\alpha$ и в цепи RC появится ток, изменяющийся по закону,

$$i_{г. о. с} = \frac{\gamma \Delta U_\alpha}{R_\Sigma + R_y + R} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5,32)$$

где R_Σ — эквивалентное сопротивление питающей цепи (R_ϕ, R_1, R_2); R_y — сопротивление управляющей обмотки магнитно-транзисторного усилителя;

$$\tau = (R_\Sigma + R_y + R) C. \quad (5,33)$$

Выражение (5,32) получено в предположении мгновенного изменения открытия направляющего аппарата и малого влияния индуктивности управляющей обмотки на величину тока $i_{г. о. с}$. Так как

$$R_\Sigma \ll R \text{ и } R_y \ll R,$$

то выражения (5,32) и (5,33) можно записать в виде

$$i_{г.о.с} = \frac{\gamma \Delta U_a}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (5,34)$$

$$\tau = RC. \quad (5,35)$$

Постоянная времени магнитно-транзисторного усилителя очень мала по сравнению с величиной τ , его характеристика приближается к линейной и, следовательно, закон изменения выходного тока блока гибкой обратной связи определяется выражением

$$I_{г.о.с} = \frac{\gamma k \Delta U_a}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5,36)$$

где k — коэффициент усиления усилителя.

Кривая изменения тока $I_{г.о.с}$ в функции времени при внезапном изменении открытия направляющего аппарата изображена на рис. 185. Величина постоянной времени гибкой обратной связи регулируется сопротивлением R , а ее интенсивность (временный статизм) — потенциометром R_1 .

Движки сопротивлений R и R_2 жестко связаны между собой, вследствие чего постоянная времени и интенсивность регулируются независимо одно от другого.

В регуляторе ХПИ—ХТГЗ временной статизм можно регулировать в пределах от 0 до 40%, а постоянная времени τ — от 1 до 25 сек.

Суммирующий магнитный усилитель СУ выполнен в виде двухтактного усилителя с выходом на постоянном токе. Помимо управляющих обмоток, питающихся от измерительного элемента и блока гибкой обратной связи, усилитель имеет еще две управляющие обмотки: обмотку выравнивания открытий направляющих аппаратов и обмотку группового регулирования мощности гидроагрегатов. Обмотка выравнивания нагрузки регуляторов всех агрегатов включается в схему многолучевой звезды. Намагничивающая сила, создаваемая этой обмоткой,

$$F_y = s_1 \left(\alpha_i - \frac{1}{n} \sum_1^n \alpha_i \right), \quad (5,37)$$

где s_1 — коэффициент пропорциональности;

α_i — величина открытия направляющего аппарата $i = \dot{y}$ турбины.

Обмотки группового регулирования мощности агрегатов всех регуляторов ЭГР станции включены последовательно между собой и питаются от регулятора мощности.

Регулятор мощности РМ ГЭС выполнен в виде магнитно-транзисторного усилителя аналогично схеме, приведенной на рис. 182: На вход этого усилителя подаются токи от магнитных датчиков мощности агрегатов МДМ и задатчика мощности ЗМ ГЭС. Намагничивающая сила $F_{гр}$, создаваемая обмоткой группового регулирования ГЭС, в суммирующем магнитном усилителе

$$F_{гр} = s_2 \left(\sum_1^n P_i - P_3 \right), \quad (5,38)$$

где P_i — нагрузка i -го агрегата;

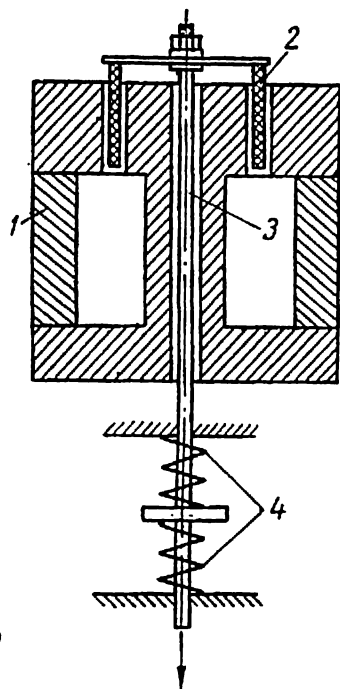
P_3 — заданная нагрузка станции;

s_2 — коэффициент пропорциональности (статизм).

Выходной ток суммирующего магнитного усилителя подается на одну из рабочих обмоток магнитоэлектрического преобразователя.

Магнитоэлектрический преобразователь МЭП (рис.186) выполнен с постоянным магнитом 1 цилиндрической формы. В радиальном воздушном зазоре стальной магнитной цепи преобразователя расположена катушка 2, состоящая из нескольких рабочих обмоток. Катушка 2 посредством штока 3 выполненного из неферромагнитного материала, связана с побудительным золотником. Катушка уравновешена двумя противоположно действующими пружинами 4. При отсутствии токов в рабочих обмотках вес катушки и всех связанных с ней частей (штока, иглы золотника) уравновешен пружинами, и игла золотника занимает среднее положение.

Если в одной из рабочих обмоток появляется ток, возникает электромагнитная сила, действующая на эту обмотку, и катушка вместе с золотником смещается относительно среднего положения, причем величина и направление этого смещения зависят от величины и полярности тока. В катушке магнитоэлектрического преобразователя предусмотрены четыре рабочие обмотки:



К побудительному золотнику

Рис. 186. Конструкция магнитоэлектрического преобразователя ЭГР.

главная рабочая обмотка, питающаяся от усилителя СУ;
 обмотка, питающаяся от датчика ускорения;
 обмотка дистанционного пуска агрегата;
 обмотка вибрации.

Обмотка вибрации питается переменным током промышленной частоты, вследствие чего создается вибрация иглы золотника с очень малой амплитудой (0,02—0,03 мм). Эта вибрация необходима для устранения сухого трения в золотнике и почти полного устранения, таким образом, зоны нечувствительности регулятора.

Работа первичного электрогидравлического регулятора в целом. В установившемся режиме выходные токи датчика ускорения и блока гибкой обратной связи равны нулю. Выходной ток суммирующего магнитного усилителя равен нулю, если его управляющая намагничивающая сила равна нулю, т. е. установившийся режим одного регулятора ЭГР можно описать уравнением

$$k_f \Delta f + s_1 \left(\alpha_l - \frac{1}{n} \sum_1^n \alpha_i \right) + s_2 \left(\sum_1^n P_i - P_3 \right) = 0. \quad (5,39)$$

Если частота регулируется станцией, регулятор мощности РМ отключается ($s_2 = 0$) и регулятор осуществляет регулирование по мнимостатическим характеристикам. При групповом регулировании мощности агрегатов и совместном действии всех регуляторов ЭГР ГЭС, имеющих идентичные характеристики, суммарная нагрузка станции регулируется со статизмом по частоте.

Действительно, после выравнивания открытий направляющих аппаратов турбин

$$\left. \begin{aligned} \alpha_l &= \frac{1}{n} \sum_1^n \alpha_i; \\ \sum P_i &= P_3 - \frac{k_f}{s_2} \Delta f. \end{aligned} \right\} \quad (5,40)$$

Если в системе другие станции астатически регулируют частоту ($\Delta f = 0$), то регулятор ЭГР поддерживает нагрузку на заданном уровне, т. е.

$$\sum_1^n P_i = P_3.$$

§ 5. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

При изолированной работе агрегата турбина—генератор на холостом ходу или на выделенную нагрузку первичный регулятор турбины выполняет функции регулятора скорости вращения. В этом случае особенно при холостом ходе агрегата условия устойчивости системы первичного регулирования являются более тяжелыми, чем при параллельной работе синхронных генераторов в энергосистеме. Это объясняется тем, что в случае параллельной работы синхронного генератора с электрической системой наличие синхронизирующего момента способствует затуханию колебаний скорости вращения после изменения режима работы агрегата. Поэтому исследуем устойчивость системы автоматического регулирования скорости вращения при изолированной работе агрегата.

Элементная схема системы автоматического регулирования скорости вращения двигателя центробежным регулятором с жесткой обратной связью изображена на рис. 15, б. Отдельные элементы этой системы описываются следующими дифференциальными уравнениями:

измерительный элемент (центробежный маятник)

$$(T_p^2 p^2 + T_k p + \delta) \eta = \varphi;$$

усилительный элемент (золотник)

$$\sigma = \eta - \xi;$$

исполнительный элемент (гидравлический серводвигатель)

$$T_{1c} p \dot{\xi} = \sigma;$$

объект регулирования (агрегат)

$$(T_1 p + k_1) \varphi = \mu.$$

Если система регулирования замкнута, т. е. шток гидравлического серводвигателя соединен с регулирующим элементом агрегата (парорегулирующими клапанами, направляющим аппаратом), то

$$\Delta y = -\Delta h$$

и, следовательно, в соответствии с уравнениями (1,22) и (1,40)

$$\xi = -\beta \mu, \quad (5,41)$$

где

$$\beta = \frac{h_{\max}}{y_{\max}}. \quad (5,42)$$

В этом случае уравнения усилительного и исполнительного элементов примут вид

$$\begin{aligned}\sigma &= \eta + \beta\mu; \\ \beta T_{1c} p \mu &= -\sigma.\end{aligned}$$

Прежде чем приступить к исследованию устойчивости системы регулирования скорости, выясним физический смысл некоторых ее параметров, влияющих на динамику процесса регулирования.

Физический смысл параметров САР регулирования скорости вращения. Коэффициент β , определяемый выражением (5,42), характеризует степень жесткой обратной связи регулятора. Он численно равен относительному перемещению золотника регулятора при полном ходе поршня серводвигателя от положения холостого хода агрегата до номинальной нагрузки ($\mu = 1$) и закрепленной в среднем положении муфты центробежного маятника ($\eta = 0$). Величину коэффициента жесткой обратной связи β можно изменять, изменяя соотношение плеч рычага AB регулятора (см. рис. 15, а).

Коэффициент δ в уравнении исполнительного элемента называют неравномерностью центробежного маятника. В установившемся режиме ($p = 0$)

$$\delta \eta_{\infty} = \varphi_{\infty} \quad (5,43)$$

и, следовательно,

$$\delta = \frac{\varphi_{\infty}}{\eta_{\infty}}. \quad (5,44)$$

Из выражения (5,44), видно, что неравномерность центробежного маятника численно равна установившемуся относительному отклонению скорости вращения от номинального значения, при котором муфта маятника перемещается относительно среднего положения на максимальную величину ($\eta_{\infty} = 1$).

Легко показать, что неравномерность маятника δ и коэффициент жесткой обратной связи β определяют величину коэффициента статизма системы автоматического регулирования скорости вращения. Действительно, в установившемся режиме золотник находится в среднем положении, т. е.

$$\sigma_{\infty} = 0$$

и

$$\eta_{\infty} = -\beta \mu_{\infty}. \quad (5,45)$$

Подставив выражение (5,45) в (5,43), получим

$$k_c = -\frac{\varphi_{\infty}}{\mu_{\infty}} = \delta \beta, \quad (5,46)$$

где k_c — коэффициент статизма системы регулирования скорости вращения, выраженный в относительных единицах.

При этом принимаем, что относительное изменение возмущающего воздействия (момента) равно μ_∞ . Из выражения (5,46) видно, что коэффициент статизма k_c пропорционален коэффициенту β и, следовательно, настроить регулятор на определенный статизм (неравномерность) можно изменением коэффициента жесткой обратной связи. При астатической настройке регулятора $\beta = 0$.

Выясним физический смысл коэффициента βT_{1c} в уравнении движения гидравлического серводвигателя. Для этого перепишем это уравнение в канонической форме и подставим в него из выражения (1,22) значение μ . Тогда получим

$$\beta T_{1c} \frac{1}{h_{\max}} \left| \frac{d\Delta h}{dt} \right| = |\sigma|, \quad (5,47)$$

где $\frac{d\Delta h}{dt} = v_c$ — скорость перемещения поршня серводвигателя при относительном перемещении золотника σ .

При условно максимальном перемещении золотника относительно среднего положения, когда

$$\sigma = \sigma_{\max} = 1,$$

скорость перемещения поршня серводвигателя имеет максимальное значение, т. е.

$$\left| \frac{d\Delta h}{dt} \right|_{\sigma_{\max}} = v_{c \max}. \quad (5,48)$$

Из уравнений (5,47) и (5,48) легко определить, что

$$\beta T_{1c} = \frac{h_{\max}}{v_{c \max}} = T_c. \quad (5,49)$$

Следовательно, коэффициент $\beta T_{1c} = T_c$, имеющий размерность времени, численно равен времени перемещения поршня серводвигателя от положения холостого хода до номинальной нагрузки (h_{\max}) при максимальной скорости его движения (v_{\max}), определяемой максимальным открытием золотника.

Коэффициент k_1 в уравнении агрегата называют коэффициентом самовывравнивания. Он характеризует влияние скорости вращения турбин на величину ее движущего момента при неизменном положении регулирующего элемента агрегата.

Как известно, величина T_1 , имеющая размерность времени и называемая постоянной инерции агрегата, численно равна времени

его разворота от состояния покоя до номинальной скорости вращения под действием номинального избыточного момента.

Анализ устойчивости. Для исследования устойчивости САР скорости вращения составим характеристическое уравнение замкнутой системы регулирования. Это уравнение легко получается, если совместно решить уравнения отдельных звеньев.

Предварительно из уравнений (1,43) и (1,45) с учетом (5,49) определим уравнение звена, эквивалентного звену, состоящему из двух последовательно включенных звеньев (золотника и гидравлического серводвигателя), охваченных жесткой обратной связью,

$$(T_c p + \beta) \mu = -\eta. \quad (5,50)$$

Перемножив левые и правые части уравнений измерительного элемента и объекта регулирования и уравнения (5,50), получим искомое характеристическое уравнение САР

$$(T_p^2 p^2 + T_k p + \delta)(T_1 p + k_1)(T_c p + \beta) + 1,$$

или после преобразований

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0, \quad (5,51)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= T_p^2 T_1 T_c; \\ a_1 &= T_p^2 T_1 \beta + T_p^2 T_c k_1 + T_k T_1 T_c; \\ a_2 &= T_p^2 k_1 \beta + T_k T_1 \beta + T_k T_c k_1 + T_1 T_c \delta; \\ a_3 &= T_k k_1 \beta + T_1 \sigma \beta + T_c k_1 \delta; \\ a_4 &= \delta \beta k_1 + 1. \end{aligned} \right\} \quad (5,52)$$

Из уравнения (5,51) видно, что САР скорости вращения центробежным регулятором описывается уравнением четвертого порядка и, следовательно, анализировать ее устойчивость целесообразно с помощью критерия Рауса—Гурвица.

Согласно критерию Рауса—Гурвица необходимые и достаточные условия устойчивости САР, характеристическое уравнение которой представлено уравнением (5,51), запишутся при $a_0 > 0$ следующим образом:

$$a_1 > 0; \quad a_2 > 0; \quad a_3 > 0; \quad a_4 > 0; \quad (5,53)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 a_3 0 \\ a_0 a_2 a_4 \\ 0 a_1 a_3 \end{vmatrix} = (a_1 a_2 - a_0 a_3) a_3 - a_4 a_1^2 > 0. \quad (5,54)$$

Времена, характеризующие динамические свойства звеньев системы регулирования скорости вращения и неравномерность маятника, всегда положительны:

$$T_p > 0; T_k > 0; T_1 > 0; T_c > 0; \delta > 0.$$

Исследованием условий (5,52) и (5,54) установлено, что САР скорости вращения может быть устойчивой в том случае, если один из коэффициентов β или k_1 имеет положительное значение. Например, если коэффициент самовыравнивания $k_1 = 0$, то система может быть устойчивой только тогда, когда статизм ее положителен

$$k_c = \delta\beta > 0,$$

так как в противном случае $a_3 < 0$ и условия устойчивости не выполняются. Очевидно, что при $k_1 = \beta = 0$ САР скорости вращения будет неустойчивой, так как $a_3 = 0$ и условие (5,54) не выполняется.

Это ясно и при рассмотрении элементной схемы регулирования скорости вращения, которая в этом случае содержит два последовательно включенных интегрирующих звена и, следовательно, без применения специальных корректирующих устройств (обратной связи, дифференцирующих звеньев) является структурно неустойчивой.

Приближенный анализ устойчивости. В современных конструкциях центробежных первичных регуляторов постоянные времена T_p и T_k , характеризующие динамические свойства центробежного маятника, значительно меньше постоянных инерции агрегата T_1 и времени гидравлического серводвигателя T_c . Поэтому при анализе устойчивости и качестве регулирования САР скорости вращения можно полагать

$$T_p = T_k = 0$$

и рассматривать центробежный маятник как пропорциональное звено, описываемое уравнением

$$\delta\eta = \varphi. \tag{5,55}$$

В этом случае коэффициенты уравнения (5,51)

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= a_1 = 0; \\ a_2 &= T_1 T_c \delta = a'_0; \\ a_3 &= T_1 \delta \beta + T_c k_1 \delta = a'_1; \\ a_4 &= \delta \beta k_1 + 1 = a'_2 \end{aligned} \right\} \tag{5,56}$$

и характеристическое уравнение САР скорости вращения примет вид

$$a'_0 p^2 + a'_1 p + a'_2 = 0. \quad (5,57)$$

Таким образом, если центробежный маятник считать пропорциональным звеном, то САР скорости вращения описывается уравнением второго порядка.

Согласно критерию Рауса-Гурвица процесс регулирования будет устойчивым, если

$$a'_0 = T_1 T_c \delta > 0; \quad (5,58)$$

$$a'_1 = T_1 \sigma \beta + T_c k_1 \delta > 0; \quad (5,59)$$

$$a'_2 = \delta \beta k_1 + 1 > 0. \quad (5,60)$$

При положительных коэффициентах самовыравнивания ($k_1 > 0$) и статизма ($k_c = \delta \beta > 0$) условия (5,58) — (5,60) всегда выполняются и, следовательно, система должна быть всегда устойчивой.

Необходимо учитывать, что уравнение (5,57) достаточно точно характеризует динамику процесса регулирования скорости вращения паровых турбин.

На процесс регулирования скорости вращения гидравлических турбин существенно влияет инерция массы воды, не учитываемая уравнением (5,57). Поэтому полученные выводы об устойчивости справедливы для реальных систем регулирования скорости паровых турбин. Относительно САР скорости вращения гидравлических турбин эти выводы являются приближенными и при выполнении условий (5,58) и (5,60) не всегда обеспечивается устойчивость урегулирования реальных систем. Например, при небольшом положительном коэффициенте статизма ($k_c = \delta \beta < 0,15$) на холостом ходу агрегата, когда коэффициент самовыравнивания мал ($k_1 = 0,1 \div 0,2$), САР скорости вращения гидротурбины неустойчива, хотя условия (5,58) — (5,60) выполняются.

Качество регулирования. Для нормальной работы агрегата выполнение условий устойчивости регулирования скорости вращения является необходимым, но не достаточным. С точки зрения обеспечения требуемого качества электроэнергии и нормальной работы энергосистемы в целом необходимо, чтобы режим агрегата изменялся достаточно быстро, без колебаний скорости вращения (апериодическое регулирование) или с минимальным числом колебаний (не более одного-двух) относительно установившегося значения.

Определим, при каких соотношениях параметров САР скорости вращения может обеспечить необходимое качество регулирования. Процесс регулирования САР, описываемый уравнением второго

порядка, будет устойчивым и аperiodическим, если выполняются условия (5,58) — (5,60) и дискриминант ее характеристического уравнения положителен, т. е.

$$(a'_1)^2 - 4a'_0a'_2 > 0. \quad (5,61)$$

Подставив в это неравенство (5,61) значения соответствующих коэффициентов из выражения (5,56), после преобразований получим условие аperiodичности процесса регулирования скорости вращения

$$(T_1k_0 - T_c k_1 \delta)^2 > 4T_1 T_c \delta, \quad (5,62)$$

где

$$k_c = \delta \beta.$$

Из неравенства (5,62) легко установить, что для получения аperiodического процесса регулирования необходимо, чтобы коэффициент статизма k_0 САР скорости вращения был

$$k_c > \frac{T_c}{T_1} k_1 \delta + 2 \sqrt{\frac{T_c}{T_1} \delta} \quad (5,63)$$

или

$$k_c < \frac{T_c}{T_1} k_1 \delta - 2 \sqrt{\frac{T_c}{T_1} \delta}. \quad (5,64)$$

В современных первичных регуляторах неравномерность центробежного маятника $\delta \approx 0,01$. Коэффициент самовыравнивания при холостом ходе агрегата $k_1 = 0,1 \div 0,2$, а при работе агрегата на изолированную нагрузку — $k_c = 1,5 \div 2$ [30].

В САР скорости вращения паровых турбин время серводвигателя $T_{с.п}$ значительно меньше постоянной времени агрегата

$$T_{с.п} = (0,025 \div 0,05) T_1.$$

Время главного серводвигателя первичного регулятора гидравлических турбин $T_{с.г}$ значительно больше, чем у паровых турбин, и имеет тот же порядок, что и постоянная времени агрегата, т. е.

$$T_{с.г} = (0,5 \div 1) T_1.$$

Выполнение серводвигателя регулятора гидравлических турбин со значительным временем перемещения его поршня обуславливается необходимостью предотвращения гидравлического удара в трубопроводах при изменениях режима работы турбины.

Подставив приведенные средние значения параметров САР скорости вращения $\delta = 0,01$; $k_1 = 0,15$; $T_{с.п} = 0,037T_1$ и $T_{с.г} = 0,75T_1$ в неравенство (5,63) найдем, что для аperiodического процесса

регулирования скорости вращения агрегата на холостом ходу необходимо, чтобы коэффициент статизма был для паровых турбин

$$k_c > 0,039$$

и для гидравлических турбин

$$k_c > 0,175.$$

САР скорости вращения паровых турбин имеют статизм 4—6% и при этом обеспечивают достаточно высокое качество регулирования.

Для устойчивого и качественного регулирования скорости вращения гидравлических турбин, как это следует из неравенства (5,63), необходимо, чтобы ее система регулирования с жесткой обратной связью в рассматриваемом примере имела статизм более 17,5%, что практически недопустимо. Этим и объясняется необходимость применения гибкой (издромной) обратной связи в первичных регуляторах гидротурбин.

Из условия (5,64) вытекает, что при некоторых соотношениях параметров САР скорости вращения можно обеспечить аperiodическое регулирование для астатической настройки регулятора, но эти соотношения неприемлемы. Действительно, при $k_c = 0$ условие аperiodичности (5,64) запишется в виде

$$\frac{T_c}{T_1} k_1 \delta > 2 \sqrt{\frac{T_c}{T_1} \delta},$$

откуда

$$T_c > \frac{4T_1}{k_1^2 \delta}. \quad (5,65)$$

Для обеспечения аperiodического процесса регулирования скорости вращения при холостом ходе агрегата согласно неравенству (5,65) и указанных значениях δ и k_1 необходимо, чтобы

$$T_c > 18\,000T_1,$$

и при работе агрегата на выделенную нагрузку —

$$T_c > 130T_1.$$

Постоянная времени агрегата примерно равна 4—10 сек и применение регуляторов с такими большими временами перемещения сервоприводов (сотни и тысячи секунд) совершенно недопустимо.

Из неравенства (5,65) видно, что условия устойчивости САР скорости вращения при холостом ходе агрегата тяжелее, чем в случае его работы на нагрузку, так как коэффициент самовыравнивания при холостом ходе значительно меньше, чем в случае работы агрегата под нагрузкой.

Приведенное исследование качества регулирования является приближенным, но позволяет сделать практически важные выводы о необходимых соотношениях параметров САР. Если выполняются условия апериодичности (5,63), реальная система регулирования скорости вращения, особенно гидротурбин, может и не обеспечить идеального апериодического переходного процесса, но в этом случае число колебаний скорости вращения при изменении режима работы агрегата будет ограниченным.

§ 6. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Исследование устойчивости регулирования частоты и активной мощности в энергосистеме с учетом всех факторов, влияющих на динамику процесса регулирования, представляет собой очень сложную задачу.

При регулировании частоты несколькими станциями, агрегаты которых имеют различные характеристики и связь между которыми осуществляется через различные линии передач, трансформаторы и реакторы, практически невозможно даже составить элементную схему системы регулирования. Первичные регуляторы агрегатов энергосистемы, не участвующие в регулировании частоты при ее изменении, в той или иной степени воздействуют на соответствующие агрегаты и влияют на динамику процесса регулирования частоты.

Регулирование частоты сопровождается распределением нагрузки между регулируемыми станциями и агрегатами внутри станции, причем эти два процесса протекают одновременно. Все это приводит к тому, что исследование устойчивости регулирования частоты и активной мощности в общем виде с учетом особенностей параллельной работы синхронных генераторов не представляется возможным. Поэтому рассмотрим только частный случай работы системы АРЧМ типа ДЕСАУР ЧМ, в значительной степени идеализируем ее и примем следующие упрощающие предположения:

1) частота в энергосистеме регулируется только одной станцией, имеющей однотипные агрегаты, включенные непосредственно на общие шины;

2) все остальные станции энергосистемы снабжены регуляторами мощности, более быстродействующими, чем система АРЧМ регулирующей станции, и поддерживающие в течение определенного времени нагрузки соответствующих агрегатов неизменными. В этом случае при небольших отклонениях частоты используется вращающийся резерв только регулирующей станции;

3) процесс регулирования частоты и распределения нагрузки между агрегатами регулирующей станции протекает следующим образом. При нарушении баланса генерируемых и потребляемых мощностей, вызывающем отклонение частоты, система АРЧМ приходит в действие и изменяет впуск энергоносителя одновременно во все агрегаты регулирующей станции, нагрузка которых изменяется с одинаковой скоростью. После восстановления частоты в системе заданная величина нагрузки каждого агрегата остается неизменной. Если при этом окажется, что нагрузки агрегатов не равны заданным, то на входах соответствующих исполнительных блоков появятся регулирующие воздействия, определяемые разностью заданной и фактической нагрузки, и система регулирования будет изменять нагрузки агрегатов при неизменной частоте в энергосистеме. В этом случае нагрузки одних агрегатов увеличиваются, а других — уменьшаются, но суммарная нагрузка регулирующей станции остается неизменной.

Таким образом, третье допущение, по существу, сводится к тому, что весь процесс регулирования частоты и распределения нагрузки искусственно разбивается на два этапа. На первом этапе регулирующая станция по отношению ко внешней электрической системе рассматривается как единый эквивалентный агрегат, снабженный регулятором частоты, который действует по ее отклонению от заданного значения при отсутствии воздействия по нагрузке.

На втором этапе рассматривается один из агрегатов регулирующей станции в предположении работы на шины системы бесконечно большой мощности (неизменная частота) и снабженный регулятором активной нагрузки. В соответствии с этим рассмотрим основные соотношения, характеризующие устойчивость системы АРЧМ в отдельности на этапе регулирования частоты и на этапе регулирования нагрузки.

Регулирование частоты. Система регулирования частоты ДЕСАУР ЧМ состоит из измерительного (одного на станцию) и исполнительного (по количеству агрегатов) блоков, управляющих двигателями МИС первичных регуляторов турбин. При регулировании частоты корректор работает в режиме промежуточного усилителя. Следовательно, можно считать, что измерительный блок

состоит из измерительного элемента частоты и двухкаскадного магнитного усилителя (корректора и силового органа).

Измерительный элемент (фазочувствительная схема с полосовым фильтром) имеет очень малую постоянную времени и может рассматриваться как пропорциональное звено. Двухкаскадный магнитный усилитель можно заменить одним эквивалентным усилителем. Из теории магнитных усилителей известно, что в отношении динамических свойств усилители можно представить в виде обычных аperiodических звеньев первого порядка.

Таким образом, в элементной схеме системы регулирования частоты измерительный блок можно заменить двумя звеньями — пропорциональным и аperiodическим первого порядка.

Измерительный блок воздействует одновременно на все исполнительные блоки агрегатов. Поэтому при последовательном соединении входных цепей функциональных преобразователей можно предположить, что каждый агрегат имеет свой регулятор частоты с отдельным измерительным блоком, коэффициент усиления которого в n (где n — количество агрегатов) раз меньше действительного коэффициента усилителя реального, измерительного блока. Если каждый агрегат имеет индивидуальный измерительный блок, то коэффициент усиления эквивалентного измерительного блока принимается равным коэффициенту усиления одного блока.

Исполнительный блок состоит из двух магнитных усилителей, причем силовой орган охвачен отрицательной обратной связью.

Так как на первом этапе регулирования (регулировании частоты) пренебрегаем воздействием от УРАНа по каналу задания нагрузки и измерительного элемента мощности, усилительный орган можно рассматривать как аperiodическое звено с одним входом от измерительного блока частоты.

Силовой орган является аperiodическим звеном, на вход которого подаются два воздействия — от усилителя-сумматора и от отрицательной обратной связи. Блок отрицательной обратной связи условно можно представить одним аperiodическим звеном первого порядка.

Упрощенная элементная схема регулятора частоты, отнесенная к одному агрегату регулирующей станции и учитывающая сделанные допущения, изображена на рис. 187.

Составим уравнения отдельных звеньев в относительных единицах, из которых легко можно получить уравнение регулятора частоты в целом.

Измерительный элемент (пропорциональное звено) в опреде-

ленных пределах изменения частоты имеет линейную зависимость между отклонением частоты и условным выходным током i_1 (разностью выходных токов)

$$i_1 = \gamma_1 \Delta f, \quad (5,66)$$

где γ_1 — коэффициент усиления измерительного элемента.

При небольшом отклонении частоты Δf_m , для которого еще сохраняется линейная зависимость между i_1 и Δf , выходной ток

$$i_{1m} = \gamma_1 \Delta f_m. \quad (5,67)$$

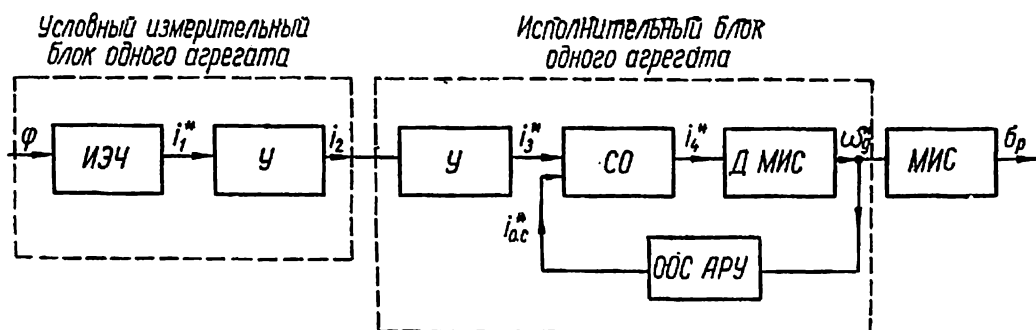


Рис. 187. Упрощенная элементная схема регулятора частоты, отнесенного к одному агрегату.

Разделив выражение (5,66) на (5,67), получим

$$\delta_p i_1^* = \varphi, \quad (5,68)$$

где

$$i_1^* = \frac{i_1}{i_{1m}}; \quad \varphi = \frac{\Delta f}{f_n} = \frac{\Delta \omega}{\omega_n}; \quad \delta_p = \frac{\Delta f_m}{f_m} = \frac{\Delta \omega_m}{\omega_n};$$

f_n — номинальная частота;

δ_p — неравномерность измерительного блока одного агрегата.

Коэффициент усиления измерительного блока в n раз меньше действительного и его уравнение можно записать в виде

$$(T_{1m} p + 1) i_2 = \frac{\gamma_2}{n} i_1, \quad (5,69)$$

где T_{1m} — эквивалентная постоянная времени двухкаскадного усилителя измерительного блока;

γ_2 — коэффициент усиления реального измерительного блока;

i_2 — выходной ток измерительного блока.

В установившемся режиме ($p = 0$) при

$$i_1 = i_{1m}; \quad i_2 = i_{2m}$$

из выражения (5,69) определим, что

$$i_{2m} = \frac{\gamma_2}{n} i_{1m}. \quad (5,70)$$

Разделив выражение (5,69) на (5,70), получим уравнение усилителя условного измерительного блока в относительных единицах

$$(T_{1m}p + 1) i_{2*} = i_{1*}, \quad (5,71)$$

где

$$i_2^* = \frac{i_2}{i_{2m}}.$$

Усилитель исполнительного блока представляет собой апериодическое звено, на вход которого подается одно воздействие, и его уравнение можно получить аналогично предыдущему

$$(T_{2m}p + 1) i_{3*} = i_{2*}, \quad (5,72)$$

где T_{2m} — постоянная времени усилителя;

$i_{3*} = \frac{i_3}{i_{3m}}$ — относительное значение условного выходного тока, отнесенное к выходному току i_{3m} при $i_2 = i_{2m}$.

Силовой орган как апериодическое звено с двумя противоположно направленными входными воздействиями описывается уравнением

$$(T_{3m}p + 1) i_4 = \gamma_4 i_3 - \gamma_{o.c} i_{o.c}, \quad (5,73)$$

где T_{3m} — постоянная времени силового органа, которая предполагается одинаковой для двух входных воздействий;

γ_4 — коэффициент усиления силового органа относительно входной величины;

$\gamma_{o.c}$ — коэффициент усиления силового органа относительно воздействия со стороны отрицательной обратной связи.

Чтобы получить уравнение силового органа в относительных единицах, предположим, что в случае отсутствия отрицательной обратной связи при $i_3 = i_{3m}$ установившийся выходной ток равен i_{4m} , причем

$$i_{4m} = \gamma_4 i_{3m}. \quad (5,74)$$

Если $i_4 = i_{4m}$, выходной ток блока отрицательной обратной связи в установившемся режиме силового блока имеет некоторое значение $i_{o.c m}$, которое можно принять пропорциональным выходному току силового органа, т. е.

$$i_{o.c m} = \gamma_5 i_{4m}. \quad (5,75)$$

Разделив выражение (5,73) на (5,74), с учетом равенства (5,75) получим уравнение силового органа в относительных единицах

$$(T_{3M\rho} + 1) i_{4*} = i_{3*} - \alpha_{o.c} i_{o.c*}, \quad (5,76)$$

где

$$i_{4*} = \frac{i_4}{i_{4m}}; \quad i_{o.c*} = \frac{i_{o.c}}{i_{o.cm}}; \quad \alpha_{o.c} = \gamma_{o.c} \gamma_5.$$

Двигатель МИС в случае пренебрежения электромагнитными переходными процессами в первом приближении можно рассматривать как аperiodическое звено, на вход которого подается условный ток i_4 силового органа, а выходной величиной является угловая скорость вала двигателя ω_d , которую можно принять пропорциональной току i_4 . Очевидно, что уравнение двигателя *МИС* можно записать так:

$$(T_{d\rho} + 1) \omega_d = \gamma_6 i_4, \quad (5,77)$$

где T_d — постоянная времени, определяемая моментом инерции ротора двигателя и вращающихся частей *МИС*;

γ_6 — коэффициент усиления.

При $i_4 = i_{4m}$ в установившемся режиме силового блока угловая скорость двигателя

$$\omega_{dm} = \gamma_6 i_{4m}$$

и уравнение двигателя в относительных единицах запишется в виде

$$(T_{d\rho} + 1) \omega_{d*} = i_{4*}, \quad (5,78)$$

где

$$\omega_{d*} = \frac{\omega_d}{\omega_{dm}}.$$

Блок отрицательной обратной связи описывается уравнением в относительных единицах аналогично предыдущим аperiodическим звеньям с одним регулирующим воздействием

$$(T_{o.c\rho} + 1) i_{o.c*} = \omega_{d*}, \quad (5,79)$$

где $T_{o.c}$ — эквивалентная постоянная времени блока.

МИС представляет собой механическую передачу, через которую двигатель исполнительного блока воздействует на золотник первичного регулятора. Скорость перемещения золотника, вы-

званного воздействием регулятора частоты, пропорциональна скорости вращения двигателя исполнительного блока

$$\frac{d\Delta z_p}{dt} = \gamma_7 \omega_d, \quad (5,80)$$

где Δz_p — перемещение золотника под действием регулятора частоты;

γ_7 — коэффициент усиления (пропорциональности) МИС.

При $\omega_d = \omega_m$ скорость перемещения золотника

$$v_{pm} = \left| \frac{d\Delta z_p}{dt} \right|_m = \gamma_7 \omega_{dm}. \quad (5,81)$$

Разделив выражение (5,80) на (5,81) и учитывая, что $\Delta z_p = z_{\max} \sigma_p$, получим уравнение МИС в операторной форме

$$T_f p \sigma_p = \omega_{d*}, \quad (5,82)$$

где $T_f = \frac{z_{\max}}{v_{pm}}$ — время перемещения золотника первичного регулятора на величину x_{\max} при отклонениях частоты $\Delta f = \Delta f_m$.

Из уравнения (5,82) видно, что МИС представляет собой интегрирующее звено.

Уравнение регулятора частоты, отнесенное к одному агрегату, составляется после совместного решения уравнений его отдельных звеньев. Предварительно составим уравнение звена, эквивалентного звеньям силового органа и двигателя МИС, охваченным отрицательной обратной связью. Для этого из уравнений (5,78) и (5,79) подставим в уравнение (5,76) операторные изображения i_{4*} и $i_{o.c*}$ и после некоторых преобразований получим $[(T_{3m} p + 1)(T_d p + 1)(T_{o.c} p + 1) + \alpha_{o.c}] \omega_{d*} = (T_{o.c} p + 1) i_{3*}$. (5,83)

Перемножив левые и правые части уравнений отдельных звеньев (5,68), (5,71), (5,72), (5,82) и (5,83), получим искомое уравнение регулятора частоты

$$\delta_p T_f p (T_{1m} p + 1) (T_{2m} p + 1) [(T_{3m} p + 1) (T_d p + 1) (T_{o.c} p + 1) + \alpha_{o.c}] \sigma_p = (T_{o.c} p + 1) \varphi,$$

или

$$d_f(p) \sigma_p = m_f(p) \varphi, \quad (5,84)$$

где

$$d_f(p) = \delta_p T_f p (T_{1m} p + 1) (T_{2m} p + 1) [(T_{3m} p + 1) (T_d p + 1) (T_{o.c} p + 1) + \alpha_{o.c}]; \quad (5,85)$$

$$m_f(p) = T_{o.c} p + 1. \quad (5,86)$$

Уравнение эквивалентного агрегата. Дифференциальное уравнение движения всех агрегатов и вращающейся нагрузки системы имеет вид

$$\left(\sum_1^m J_i + \sum J_n \right) \frac{d\Delta\omega_\partial}{dt} = M_p + M_c - M_n, \quad (5,87)$$

где $\sum_1^m J_i$ — сумма моментов инерции всех агрегатов системы, приведенных к угловой скорости, равной номинальной круговой частоте ω_n ;

$\sum J_n$ — сумма моментов инерции вращающейся нагрузки, приведенных к угловой скорости ω_n ;

M_p — суммарный вращающийся момент первичных двигателей регулирующей станции;

M_c — суммарный вращающийся момент первичных двигателей всех остальных станций системы;

M_n — суммарный момент нагрузки электросистемы;

$\Delta\omega_\partial$ — отклонение скорости вращения эквивалентного агрегата от значения в избранном равновесном режиме;

m — количество агрегатов энергосистемы.

Равновесный режим агрегата будет, если

$$\omega_\partial = \omega_n.$$

При малых отклонениях частоты и соответственно малых перемещениях регулирующего органа агрегата относительно равновесного состояния вращающиеся моменты первичных двигателей регулирующей станции и нагрузки системы можно определить из выражений (1,14) и (1,15):

$$M_p = M_{p0} + \left. \frac{\partial M_p}{\partial h} \right|_0 \Delta h_\partial + \left. \frac{\partial M_p}{\partial \omega} \right|_0 \Delta \omega_\partial;$$

$$M_n = M_{n0} + \left. \frac{dM_n}{d\omega} \right|_0 \Delta \omega_\partial,$$

где Δh_∂ — перемещение эквивалентного регулирующего органа эквивалентного агрегата.

Согласно принятым допущениям нагрузка всех нерегулирующих станций системы P_c поддерживается неизменной при любой частоте, т. е.

$$P_c = M_c \omega = P_{c0} = M_{c0} \omega_n \quad (5,88)$$

и, следовательно,

$$M_c = \frac{M_{c0} \omega_n}{\omega}, \quad (5,89)$$

где P_{c0} и M_{c0} — нагрузка и вращающий момент первичных двигателей нерегулирующих станций при номинальной частоте ω_n .

Из выражения (5,89) видно, что в обусловленном режиме работы нерегулирующих станций суммарный момент их первичных двигателей не зависит от перемещения регулирующего органа, а является только функцией частоты и при малых ее отклонениях может быть определен по формуле

$$M_c = M_{c0} + \left. \frac{dM_c}{d\omega} \right|_{\omega_n} \Delta\omega_\varepsilon = M_{c0} - \frac{M_{c0}}{\omega_n} \Delta\omega_\varepsilon. \quad (5,90)$$

Подставив значения M_p , M_n и M_c из выражений (1,14), (1,15) и (5,90) в уравнение (5,87), с учетом

$$M_{p0} + M_{c0} = M_{n0}$$

получим линеаризованное дифференциальное уравнение эквивалентного агрегата

$$\begin{aligned} \left(\sum_1^m J_i + \sum J_n \right) \frac{d(\Delta\omega_\varepsilon)}{dt} + \left[\left(\frac{dM_n}{d\omega} \right)_0 + \frac{M_{c0}}{\omega_n} \left(\frac{\partial M_p}{\partial \omega} \right)_0 \right] \Delta\omega_\varepsilon = \\ = \left(\frac{\partial M_p}{\partial h} \right)_0 \Delta h_\varepsilon. \end{aligned} \quad (5,91)$$

Уравнение (5,91) можно упростить, если выразить его в относительных единицах и предположить линейную зависимость между вращающим моментом эквивалентного агрегата и перемещением его регулирующего органа (штока эквивалентного гидравлического серводвигателя). Последнее предположение достаточно близко соответствует действительности. В этом случае можно записать, что:

$$\Delta\omega_\varepsilon = \omega_n \varphi_\varepsilon; \quad (5,92)$$

$$\Delta h_\varepsilon = h_{\max} \mu_\varepsilon; \quad (5,93)$$

$$\left(\frac{\partial M_p}{\partial h} \right)_0 = \frac{M_{p,n}}{h_{\max}}, \quad (5,94)$$

где φ_ε — относительное отклонение скорости вращения (частоты) эквивалентного агрегата от номинального значения;

$\mu_{\text{э}}$ — относительное перемещение эквивалентного регулирующего органа;

$M_{\text{р. н}}$ — номинальный вращающий момент всех агрегатов регулирующей станции;

h_{max} — перемещение регулирующего органа одного агрегата регулирующей станции, соответствующее изменению момента на величину $M_{\text{р. н}}$.

Значение производной от момента суммарной нагрузки по угловой скорости вращения при номинальном ее значении можно выразить следующим образом:

$$\left(\frac{dM_{\text{н}}}{d\omega}\right)_0 = \frac{P_{\text{н. н}}}{\omega_{\text{н}}^2} \left[\frac{d\left(\frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н. н}}}\right)}{d\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}}\right)} \right]_0 = \frac{P_{\text{н. н}}}{\omega_{\text{н}}^2} \left| \frac{dP_{\text{н}*}}{df_*} \right|_0 = \frac{P_{\text{н. н}}}{\omega_{\text{н}}^2} k, \quad (5,95)$$

где $P_{\text{н. н}} = M_{\text{н. н}}\omega_{\text{н}}$ — суммарная мощность нагрузки энергосистемы при номинальной частоте до момента ее изменения;

$P_{\text{н}*} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н. н}}}$ — относительная мощность нагрузки энергосистемы;

$f_* = \frac{f}{f_{\text{н}}} = \frac{\omega}{\omega_{\text{н}}}$ — относительное значение частоты;

$k = \left| \frac{dP_{\text{н}*}}{df_*} \right|_0$ — коэффициент регулирующего эффекта нагрузки.

Подставив значения из выражений (5,88), (5,92), и (5,93) — (5,95) в уравнение (5,91) и учитывая, что

$$M_{\text{р. н}} = \frac{P_{\text{р. н}}}{\omega_{\text{н}}}$$

(где $P_{\text{р. н}}$ — номинальная мощность регулирующей станции), после некоторых простых преобразований получим линеаризованное уравнение эквивалентного агрегата в относительных единицах

$$\frac{\sum_1^m J_i + \sum J_{i\text{н}}}{P_{\text{р. н}}} \omega_{\text{н}}^2 \frac{d\varphi_{\text{э}}}{dt} + \frac{kP_{\text{н. н}} + P_{\text{с}} = \omega_{\text{н}}^2 \left(\frac{\partial M_{\text{р}}}{\partial \omega}\right)_0}{P_{\text{р. н}}} \varphi_{\text{э}} = \mu_{\text{э}}. \quad (5,96)$$

В уравнении (5,96) величина

$$\frac{kP_{н.н} + P_0 - \omega_n^2 \left(\frac{\partial M_p}{\partial \omega} \right)_0}{P_{р.н}} = k_{1э} \quad (5,97)$$

представляет собой коэффициент самовыравнивания эквивалентного агрегата, а

$$\frac{\sum_1^m J_i + \sum J_{ин}}{P_{р.н}} \omega_n^2 = T_{1э} \quad (5,98)$$

его постоянную инерции.

Уравнение эквивалентного агрегата в операторной форме запишется в виде

$$(T_{1э}P + k_{1э}) \varphi_э = \mu_э. \quad (5,99)$$

Постоянную инерции эквивалентного агрегата $T_{1э}$ можно выразить через постоянные времени отдельных агрегатов и вращающейся нагрузки. Действительно, постоянная инерции вращающейся машины (агрегата, двигателя)

$$T_i = \frac{J_i \omega_n^2}{P_{ин}},$$

где $P_{ин}$ — номинальная мощность i -й вращающейся машины.

Следовательно, из выражения (5,98) можно определить $T_{1э}$ следующим образом:

$$T_{1э} = \frac{\sum_1^m T_i P_{ин} + \sum T_{ин} P_{ин}}{P_{р.н}}. \quad (5,100)$$

Из уравнения (5,89) видно, что, если не учитывать влияние первичных регуляторов агрегатов нерегулирующих станций на режим работы энергосистемы, предполагая их нагрузки постоянными, эквивалентный агрегат можно описать дифференциальным уравнением первого порядка и представить аperiodическим звеном.

Исследованиями установлено, что, если учесть влияние первичных регуляторов нерегулирующих станций, то эквивалентный агрегат можно приближенно описать уравнением второго порядка и представить колебательным звеном.

Передающая функция и амплитудно-фазовая характеристика эквивалентной САР частоты. Элементная схема разомкнутой САР частоты двухагрегатной станции, учитывающая упрощающие предположения, представлена на рис. 188. Аналогично можно составить элементную схему САР частоты для станции с любым

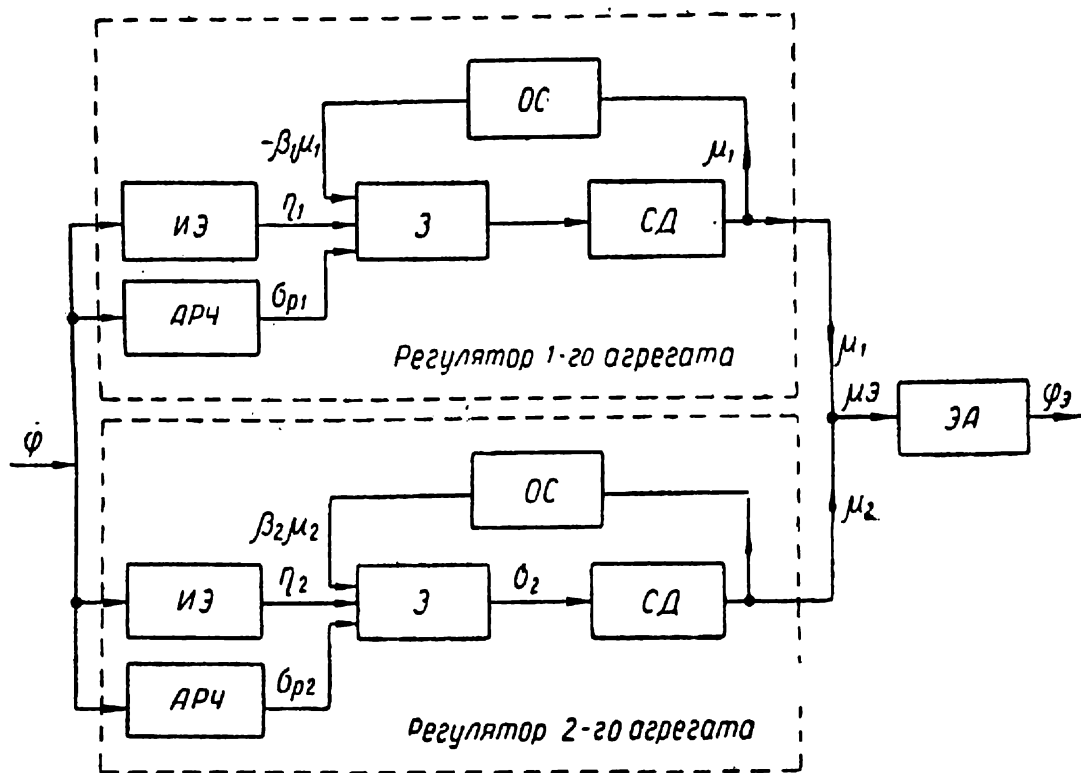


Рис. 188. Упрощенная элементная схема разомкнутой цепи САР частоты двухагрегатной станции.

числом агрегатов. Составим предварительно уравнение регулятора одного k -го агрегата с учетом действия регулятора частоты АРЧ. Согласно элементной схеме (рис. 187) имеем для регулятора любого k -го агрегата

$$\sigma_k = \eta_k + \sigma_{pk} - \beta_k \mu_k. \quad (5,101)$$

Подставив в уравнение (5,101) значения соответствующих величин из уравнений первичного регулятора (без учета изменения знака) (5,49), (5,55) и (5,84) и учитывая, что относительное отклонение частоты φ одинаково для всех агрегатов, получим искомое уравнение регулятора одного агрегата

$$\delta_k d_{fk}(p) (T_{c.kp} + \beta_k) \mu_k = [d_{fk}(p) + \delta_k m_{fk}(p)] \varphi. \quad (5,102)$$

Суммируя уравнения регуляторов всех агрегатов и учитывая, что все регуляторы станции имеют одинаковые параметры:

$$\begin{aligned} \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 &= \delta; \\ T_{c1} = T_{c2} = T_{c3} &= T_c; \\ \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 &= \beta; \\ d_{f1}(p) = d_{f2}(p) = d_{f3}(p) &= d_f(p); \\ m_{f1}(p) = m_{f2}(p) = m_{f3}(p) &= m_f(p), \end{aligned}$$

получим уравнение эквивалентного регулятора частоты энергосистемы

$$\delta d_f(p) (T_c p + \beta) \mu_\varepsilon = n [d_f(p) + \delta m_f(p)] \varphi, \quad (5,103)$$

где $\mu_\varepsilon = \sum_1^n \mu_k$ — относительное перемещение эквивалентного регулирующего органа;

n — количество агрегатов регулирующей станции.

Из уравнений эквивалентного регулятора частоты (5,103) и эквивалентного агрегата (5,99) легко получить уравнение разомкнутой системы регулирования

$$\delta d_f(p) (T_c p + \beta) (T_{1\varepsilon} p + k_{1\varepsilon}) \varphi_\varepsilon = n [d_f(p) + \delta m_f(p)] \varphi. \quad (5,104)$$

Так как функция оператора $d_f(p)$, определяемая равенством (5,85), представляет собой полином шестого порядка, то очевидно, что САР частоты энергосистемы при сделанных допущениях описывается уравнением восьмого порядка.

Устойчивость такой системы автоматического регулирования можно исследовать с помощью амплитудно-фазового критерия.

Передаточная функция и комплексная частотная функция САР частоты определяется из уравнения (5,104):

$$W(p) = \frac{\varphi_\varepsilon}{\varphi} = \frac{n [d_f(p) + \delta m_f(p)]}{\delta d_f(p) (T_c p + \beta) (T_{1\varepsilon} p + k_{1\varepsilon})}; \quad (5,105)$$

$$W(j\omega) = \frac{n [d_f(j\omega) + \delta m_f(j\omega)]}{\delta d_f(j\omega) (T_c j\omega + \beta) (T_{1\varepsilon} j\omega + k_{1\varepsilon})} \quad (5,106)$$

Если параметры САР частоты известны, то по уравнению (5,106) можно построить амплитудно-фазовую характеристику, по которой определить устойчивость регулирования частоты.

Согласно работе [39] постоянные времени магнитных усилителей, применяемых в системе регулирования частоты ВНИИЭ, которая работает в режиме регулирования частоты (без учета

распределения нагрузки), зависят от коэффициентов усиления. Они имеют следующие значения (большие значения соответствуют большим коэффициентам усиления): $T_{1м} \cong 0,8 \div 1,7 \text{ сек}$; $T_{2м} \cong 0,7 \div 0,9 \text{ сек}$ для двигателя исполнительного блока мощностью 250 *вт* (для тепловых станций); $T_{2м} \cong 0,6 \div 1,2 \text{ сек}$ — мощностью 40 *вт* (для гидростанций); $T_{3м} \cong 0,5 \div 0,9 \text{ сек}$ — мощностью 250 *вт*; $T_{3м} = 0,2 \div 0,35 \text{ сек}$ — мощностью двигателя 40 *вт*.

Постоянная времени блока отрицательной обратной связи составляет несколько секунд. Постоянная времени двигателя мощностью 40 *вт* равна 3,5 *сек*, а двигателя мощностью 250 *вт* — 4 *сек*.

Регулирование нагрузки. Элементная схема САР нагрузки одного агрегата регулирующей станции при работе его на шины бесконечно большой мощности (второй этап регулирования) изображена на рис. 189. При этом предполагается, что величина заданной нагрузки агрегата остается постоянной.

Уравнения большинства элементов системы регулирования нагрузки остаются такими же, как и в системе регулирования частоты (рис. 188). Усилитель исполнительного блока, как и в схеме на рис. 188, описывается уравнением первого порядка (5,72), но его постоянная времени $T'_{2м}$ имеет другое значение, чем в системе регулирования частоты. Это объясняется тем, что измерительный элемент мощности и функциональный преобразователь УРАНа включены на различные управляющие обмотки усилителя.

Согласно работе [39] $T'_{2м} \approx 2,5 \div 2,9 \text{ сек}$. Измерительный элемент мощности имеет очень малую постоянную времени и может быть представлен пропорциональным звеном

$$\Delta i_p = k_p \Delta P_1, \quad (5,107)$$

где Δi_p — изменение выходного тока измерительного элемента мощности при отклонении нагрузки агрегата от заданного значения на величину ΔP_1 ;

k_p — коэффициент усиления измерительного элемента мощности.

Предполагая зависимость между выходным током измерительного элемента мощности и измеряемой нагрузкой линейной, можно записать, что

$$i_{p.н} = k_p P_н, \quad (5,108)$$

где $P_н$ — номинальная мощность агрегата;

$i_{p.н}$ — выходной ток измерительного элемента мощности при $P = P_н$.

Разделив уравнение (5,107) на (5,108), получим уравнение измерительного элемента мощности в относительных единицах

$$\Delta i_{p*} = \Delta P_{1*}, \quad (5,109)$$

где

$$\Delta i_{p*} = \frac{\Delta i_p}{i_{p.н}}; \quad \Delta P_{1*} = \frac{\Delta P_1}{P_n}.$$

Поскольку базисное значение входной величины системы регулирования нагрузки отличается от базисного значения входной

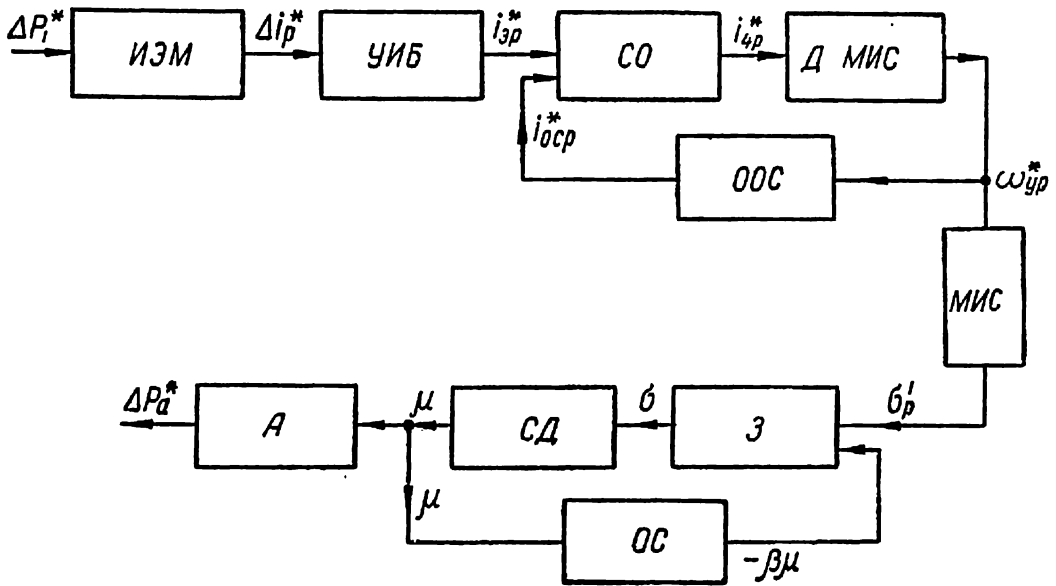


Рис. 189. Упрощенная элементная схема разомкнутой цепи САР нагрузки.

величины САР частоты, то во всех уравнениях последующих звеньев также изменятся базисные значения и в уравнении (5,82) МИС вместо времени T_f необходимо подставить время T_p .

Величина T_p равна времени перемещения золотника первичного регулятора на величину z_{max} под действием регулятора нагрузки при условии, что его входной ток равен току $i_{p.н}$.

Если пренебречь инерцией энергоносителя, то с точки зрения регулирования нагрузки агрегат можно представить пропорциональным звеном.

При линейной зависимости между нагрузкой агрегата P_a и перемещением регулирующего органа h уравнение агрегата в относительных единицах запишется в виде

$$\Delta P_a^* = \mu, \quad (5,110)$$

где $\Delta P_a^* = \frac{\Delta P_a}{P_n}$ — относительное изменение нагрузки агрегата.

Решив совместно уравнения (1,45) (без учета перемены знака) (5,49), (5,72), (5,82), (5,83) с учетом оговоренных изменений и уравнения (5,109) и (5,110), получим уравнение разомкнутой САР нагрузки агрегата

$$T_{p\rho} (T'_{2m\rho} + 1) (T_{c\rho} + \beta) [(T_{3m\rho} + 1) (T_{d\rho} + 1) (T_{o.c\rho} + 1) + \alpha_{o.c}] \Delta P_{a*} = (T_{o.c\rho} + 1) \Delta P_{1*}. \quad (5,111)$$

Система регулирования нагрузки описывается уравнением шестого порядка и ее устойчивость целесообразно исследовать также с помощью критерия Найквиста-Михайлова.

Передаточная функция САР нагрузки

$$W_p(P) = \frac{\Delta P_a^*}{\Delta P_1^*} = \frac{T_{o.c\rho} + 1}{T_{p\rho} (T'_{2m\rho} + 1) (T_{c\rho} + \beta) [(T_{3m\rho} + 1) (T_{d\rho} + 1) \times \cdot \times (T_{o.c\rho} + 1) + \alpha_{o.c}]} \quad (5,112)$$

После подстановки в уравнение (5,112) $p = j\omega$ получим уравнение амплитудно-фазовой характеристики, построив которую можно определить системы регулирования нагрузки.

Из выражения (5,112) видно, что чем больше время T_p , тем вероятнее устойчивость системы, так как все точки амплитудно-фазовой характеристики с ростом T_p приближаются к началу координат и, следовательно, увеличивается вероятность того, что характеристика не охватит точку $(-1, j0)$.

Приведенные в этом параграфе соотношения для исследования устойчивости системы АРЧМ приближенно описывают действительный характер переходного процесса регулирования частоты и активной мощности в энергосистеме.

Чтобы рассчитать амплитудно-фазовую характеристику САР частоты или мощности по этим соотношениям, необходимо затратить много времени и труда. В конечном счете только приблизительно можно оценить динамические свойства системы регулирования. Для оценки характера переходного процесса и суждения об устойчивости системы АРЧМ целесообразно полученные уравнения решать с помощью электронных вычислительных машин. С помощью вычислительных машин на основе приведенных соотношений можно построить границу области устойчивости в функции двух параметров (например, $\alpha_{o.c}$ и $T_{o.c}$), а также определить параметры системы, обеспечивающие оптимальный переходный процесс в системе АРЧМ.

Контрольные вопросы и упражнения

1. Объясните принцип действия и назначение корректора измерительного блока системы ДЕСАУР ЧМ.
 2. Как регулируется нагрузка по заданному графику системой ДЕСАУР ЧМ?
 3. Объясните назначение и принципиальную схему УРА на ДЕСАУР ЧМ.
 4. На какие элементы УРА на ДЕСАУР ЧМ необходимо воздействовать, чтобы изменить порядок загрузки агрегатов станции?
 5. Как действует отрицательная обратная связь исполнительного блока системы ДЕСАУР ЧМ?
 6. Поясните назначение и принцип действия частотного корректора системы АРЧМ ОРГРЭС.
 7. Изменится ли нагрузка станции, регулируемая системой АРЧМ ОРГРЭС, если аварийно отключится один из генераторов?
 8. Поясните принцип действия измерительного блока камертонного регулятора частоты.
 9. Пользуясь выражением (5,29), установите, как изменяется чувствительность электромагнитного корректора первичного регулятора гидротурбин с изменением нагрузки.
 10. Объясните принцип действия устройства группового регулирования нагрузки ОАТН Гидроэнергопроекта.
 11. Как можно изменить коэффициент статизма электрогидравлического регулятора ХПИ—ХТГЗ?
 12. Как осуществляется групповое регулирование нагрузки и распределение ее между агрегатами с помощью электрогидравлических регуляторов?
 13. Почему в первичных регуляторах гидротурбин применяется гибкая отрицательная обратная связь?
 14. Выведите уравнение эквивалентного генератора в системе регулирования частоты.
 15. Зависят ли условия устойчивости регулирования частоты от состава нагрузки системы?
 16. Определите передаточную функцию регулятора частоты при отсутствии обратной связи по скорости вращения двигателя.
-

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамова Л. И. и др., Электрогидравлический регулятор гидротурбин, «Энергомашиностроение», 1962, № 10.
2. Альтерман Д. З., Некоторые возможности автоматизации гидростанций, «Электрические станции», 1957, № 2.
3. Борозинец Б. В. и др., Вычислительная машина РЭР и опыт ее эксплуатации в ОДУ ЕЭС, «Электричество», 1964, № 3.
4. Брук И. С. и др., Электронный регулятор частоты, «Автоматика и телемеханика», 1948, № 2.
5. Бенин В. Л. Ваттметр на карборундовых сопротивлениях, «Автоматика и телемеханика», 1955, № 2.
6. Веников В. А., Применение кибернетики в электрических системах, Сб. «Кибернетику—на службу коммунизму», т. 1, Госэнергоиздат, 1961.
7. Веников В. А., Электромеханические переходные процессы в электрических системах, Госэнергоиздат, 1958.
8. Веников В. А. и др., Сильное регулирование возбуждения, Госэнергоиздат, 1963.
9. Воронов А. А., Основы теории автоматического управления, ч. I, «Энергия», 1965, Оборонгиз, 1954.
10. Герценберг Г. Р. и др., Сильное регулирование возбуждения и новые вопросы устойчивости электросистем, Труды I Международного конгресса Международной Федерации по автоматическому управлению, т. V, изд-во АН СССР, 1961.
11. Гинзбург С. А., Нелинейные цепи и их функциональные характеристики, Госэнергоиздат, 1958.
12. Гинзбург С. А., Статические преобразователи мощности, «Автоматика и телемеханика», 1955, № 2.
13. Горнштейн В. М., Пути автоматизации регулирования частоты и активных нагрузок в энергосистемах, «Электричество», 1959, № 1.
14. Горнштейн В. М., Наивыгоднейшее распределение активной нагрузки между электростанциями, Труды ЦНИЭЛ, вып. VI, Госэнергоиздат, 1957.
15. Егоров К. В., Основы автоматического регулирования, Госэнергоиздат, 1955.

16. Зайцев Н. Г. и др., Станционное устройство для автоматизации наивыгоднейшего распределения активных нагрузок в энергосистемах, «Электричество», 1963, № 12.
17. Ивахненко А. Г., Электроавтоматика, Гостехиздат УССР, 1957.
18. Ивахненко А. Г., Техническая кибернетика, Гостехиздат УССР, 1962.
19. Иносов В. Л., Цукерник Л. В., Компаундирование и электромагнитный корректор напряжения синхронных генераторов, Госэнергоиздат, 1954.
20. Казанский В. Е., Телеизмерение в энергосистемах, Госэнергоиздат, 1957.
21. Казанский В. Е., Измерение частоты посредством двойной Т-образной схемы, «Электричество», 1959, № 1.
22. Каюк Г. П., Муратов В. А., Устройство группового регулирования мощности, Филиал ВИНТИ, Передовой научно-технический и производственный опыт, 1959, № Э-59-70/3.
23. Кирчмайер Л. К., Автоматическая оптимизация режимов системы энергоснабжения с применением вычислительных устройств, Труды I Международного конгресса Международной Федерации по автоматическому управлению, т. V, изд-во АН СССР, 1961.
24. Конев Ю. И., Полупроводниковые триоды в автоматике, «Советское радио», 1960.
25. Костюк О. М. и др., Новые автоматические регуляторы возбуждения синхронных машин, «Электрические станции», 1959, № 11.
26. Костюк О. М. и др., Расширение области применения электромагнитных автоматических регуляторов напряжения, «Энергетика и электротехническая промышленность», 1963, № 4.
27. Красовский А. А., Поспелов Г. С., Основы автоматизации и технической кибернетики, Госэнергоиздат, 1962.
28. Кухтенко А. И., Проблема инвариантности в автоматике, Гостехиздат УССР, 1963.
29. Кучкин М. Д., Автоматическое регулирование режима работы крупных энергообъединений по частоте и активной мощности, «Электричество», 1962, № 3.
30. Кучкин М. Д., Спицын Н. А., Автоматизация гидрорезервуарных станций, Госэнергоиздат, 1957.
31. Лернер А. Я., Введение в теорию автоматического регулирования, Машгиз, 1958.
32. Лернер А. Я., Фельдбаум А. А., Кибернетика техническая, энциклопедия «Автоматизация производства и промышленная электроника», т. 2, «Советская энциклопедия», 1963.
33. Маркович И. М., Режимы энергетических систем, Госэнергоиздат, 1963.
34. Маркович И. М., Основные режимные принципы автоматического регулирования частоты и активной мощности в объединениях энергосистем, 1959, № 1.
35. Маркович И. М. и др., Современное состояние применения вычислительной техники при эксплуатации и проектировании энергосистем, «Электричество», 1960, № 11.

36. Маркович И. М., и др., О задачах в области применения вычислительной техники при эксплуатации и проектировании энергосистем, «Электричество», 1960, № 12.
37. Мееров М. В., Дианов В. Г., Теория автоматического регулирования и авторегуляторы, Гостоптехиздат, 1963.
38. Москалев А. Г., Регулятор частоты типа МФРЧ, Труды ЦНИЭЛ, вып. I, 1953.
39. Москалев А. Г., Автоматическое регулирование режима энергетической системы по частоте и активной мощности, Госэнергоиздат, 1960.
40. Москалев А. Г., Самонастраивающаяся децентрализованная система автоматического регулирования режима работы энергосистемы по частоте и активной мощности, «Электричество», 1960, № 10.
41. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л., Теоретические основы электротехники, ч. II, Госэнергоиздат, 1959.
42. Основы автоматического управления, под ред. В. С. Пугачева, Физматиздат, 1963.
43. Паутин Н. В., Сидоров А. А., Методы регулирования частоты и экономического распределения активной мощности в энергетических системах, ЦИТЭИ, Передовой научно-технический и производственный опыт, тема 42, 1959.
44. Попов Е. П., Автоматическое регулирование и управление, Физматиздат, 1962.
45. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей, Госэнергоиздат, 1961.
46. Правила устройства электроустановок, «Энергия», 1964.
47. Розенблат М. А., Магнитные усилители, «Советское радио», 1960.
48. Синьков В. М. и др., Вычислительные устройства в системе комплексной автоматизации энергетических объединений, «Электричество», 1965, № 1.
49. Синьков В. М. и др., Вычислительные устройства для расчета наиболее выгодного распределения активных нагрузок в сложных энергосистемах, Сб. «Автоматизация и приборостроение», вып. II, Гостехиздат УССР, 1961.
50. Синьков В. М., Коваленко В. П., Счетно-решающее устройство «Экран-2» для экономического распределения активной нагрузки в энергосистемах, Сб. «Автоматизация и приборостроение», вып. I, Гостехиздат УССР, 1959.
51. Соловьев И. И., Автоматизация энергетических систем, Госэнергоиздат, 1956.
52. Стернсон Л. Д., Автоматическое регулирование частоты и активной мощности в энергосистемах, серия «Энергетика за рубежом», Госэнергоиздат, 1957.
53. Стернсон Л. Д., Автоматическое регулирование частоты и мощности по методу ОРГРЭС, Госэнергоиздат, 1959.
54. Сыромятников И. А., Режимы работы синхронных генераторов, Госэнергоиздат, 1952.
55. Уланов Г. М., Регулирование по возмущению, Госэнергоиздат, 1960.
56. Усов С. В. и др., Автоматическое устройство для распределения нагрузок в энергосистемах, «Электричество», 1960, № 4.

57. Усов С. В., и др. Вычислительное устройство для распределения нагрузок в энергосистемах с гидростанциями, «Электричество», 1962, № 3.

58. Фатеев А. В., Основы линейной теории автоматического регулирования, Госэнергоиздат, 1954.

59. Ципцюра Р. Д., Автоматическое регулирование частоты с комбинированным распределением активных нагрузок между всеми станциями энергосистемы, «Энергетика и электротехническая промышленность», 1963, № 3.

60. Цукерник Л. В., Устойчивость связанной системы автоматического регулирования при внутригрупповой симметрии, Изв. АН СССР—Энергетика и автоматика, 1959, № 4.

61. Цукерник Л. В. и др., Управляемое фазовое компаундирование синхронных машин с коррекцией по напряжению, «Электричество», 1958, № 2.

62. Якубайтис Э. А., Основы технической кибернетики, Изд-во АН Латвийской ССР, 1962.

63. Analog and digital techniques control electric power system, «Automatic Control», 1962, № 1.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Общие сведения из теории автоматического регулирования	7
§ 1. Принципы автоматического регулирования	7
§ 2. Некоторые понятия и определения	12
§ 3. Центробежные регуляторы скорости вращения	24
§ 4. Звенья систем автоматического регулирования	35
§ 5. Уравнения звеньев системы регулирования скорости вращения	40
§ 6. Передаточные функции, переходные функции и амплитудно-фазовые характеристики	52
§ 7. Основные виды линейных звеньев	62
Контрольные вопросы и упражнения	79
Глава 2: Динамика систем автоматического регулирования	80
§ 1. Уравнения и передаточные функции систем регулирования	80
§ 2. Устойчивость систем регулирования	91
§ 3. Методы исследования устойчивости. Алгебраический критерий устойчивости Рауса—Гурвица	97
§ 4. Критерий устойчивости Михайлова	102
§ 5. Амплитудно-фазовый критерий устойчивости	112
§ 6. Исследование устойчивости систем регулирования по отклонению, по возмущению и комбинированных	120
§ 7. Качество регулирования. Улучшение динамических свойств САР без изменения ее структуры	124
§ 8. Влияние структуры систем регулирования на их динамические свойства	129
Контрольные вопросы и упражнения	140

Глава 3. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных генераторов	141
§ 1. Общие сведения об автоматическом регулировании возбуждения	141
§ 2. Релейные устройства форсировки возбуждения и развозбуждения. Автоматические регуляторы возбуждения	150
§ 3. Магнитные усилители	158
§ 4. Компаундирование синхронных генераторов по току с коррекцией напряжения	174
§ 5. Управляемое фазовое компаундирование синхронных машин с коррекцией напряжения	191
§ 6. Быстродействующий регулятор возбуждения с управляемым фазовым компаундированием	198
§ 7. Регуляторы возбуждения сильного действия	212
§ 8. Регулирование реактивной мощности синхронных генераторов	221
§ 9. Анализ устойчивости регулирования возбуждения синхронных генераторов	236
Контрольные вопросы и упражнения	244
Глава 4. Принципы автоматического регулирования частоты и активной мощности	246
§ 1. Общие положения	246
§ 2. Автоматическое регулирование частоты одной станцией и распределение нагрузки между агрегатами	261
§ 3. Распределение нагрузки между агрегатами по интегральному отклонению частоты	270
§ 4. Принцип построения систем АРЧМ при регулировании частоты несколькими станциями энергосистемы	280
§ 5. Регулирование частоты и экономическое распределение нагрузки с учетом потерь в сети	289
§ 6. Измерительные элементы частоты	303
§ 7. Измерительные элементы мощности	312
Контрольные вопросы и упражнения	322
Глава 5. Системы автоматического регулирования частоты и активной мощности	323
§ 1. Комплект аппаратуры системы автоматического регулирования частоты и активной мощности ВНИИЭ	323
§ 2. Комплект аппаратуры системы автоматического регулирования частоты и активной мощности ОРГРЭС	339
§ 3. Камертонный регулятор частоты	354
§ 4. Электродинамические регуляторы гидротурбин	362
§ 5. Анализ динамики регулирования скорости вращения центробежным регулятором	381
§ 6. Исследование устойчивости регулирования частоты и активной мощности	389
Контрольные вопросы и упражнения	405
Л и т е р а т у р а	406
	411

*Сергей Николаевич Баженов,
канд. техн. наук
Владимир Львович Бенин,
канд. техн. наук*

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

*Редакторы издательства инж. Л. Н. Ткаченко,
Т. Г. Хренина*

*Переплет художника В. М. Флакса
Художественные редакторы Б. В. Валуенко,
И. Т. Лагутин*

*Технический редактор В. Н. Куренной
Корректоры Л. Н. Седякина, В. П. Оровецкая*

Сдано в набор 17.I 1966 г. Подписано к печати
5.V 1966 г. Формат бумаги 60×84¹/₁₆. Объем:
25,75 физ. л.; 23,95 усл. л., 21,93 уч.-изд. л.
Тираж 4900. БФ 37001. Цена 95 коп.

Издательство «Техніка», Киев, 4, Пушкинская, 28

Отпечатано с матриц Книжной фабрики им. Фрунзе Комитета по печати при Совете Министров УССР, Харьков, ул. Донец-Захаржевская, 6/8, в Книжной типографии «Коммунист» Комитета по печати при Совете Министров УССР, Харьков, Пушкинская, 29. Зак. 595.