

**Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, И.М. Кац**

# **АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ В НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ**

**Часть 1**



*Учебное пособие*

**Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, И.М. Кац**

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ  
УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРО-  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ  
СИСТЕМАМИ В  
НОРМАЛЬНЫХ И  
АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ**

**Часть 1**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2013

УДК 621.311.001.1(075.8)

ББК 31.27в6я73

В16

**Вайнштейн Р.А.**

В16 Автоматическое управление электроэнергетическими системами в нормальных и аварийных режимах: учебное пособие. Часть 1 / Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, И.М. Кац; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 111 с.

В первой части пособия рассматриваются теоретические основы выполнения систем автоматического управления, регулирования напряжения и реактивной мощности, схемы и принципы действия автоматических систем регулирования возбуждения синхронных машин.

Предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», а также для аспирантов, научных сотрудников и специалистов, занимающихся проблемами в энергетике и в смежных с ней областях.

УДК 621.311.001.1(075.8)

ББК 31.27в6я73

*Рецензенты*

Первый заместитель директора – главный диспетчер  
филиала ОАО «СО ЕЭС» Томское РДУ

*П.В. Якис*

Ведущий специалист отдела устойчивости  
противоаварийной и режимной автоматики СЭР ОДУ Сибири

*Н.Р. Ваганов*

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013

© Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В.,  
Кац И.М., 2013

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Особенности электроэнергетической системы как объекта управления заключаются в следующем.

1. Территориальная разобщенность мест выработки и потребления электроэнергии.
2. Электроэнергия – особый вид продукции, который не складывается, поэтому в каждый момент времени необходимо поддерживать баланс активной и реактивной мощности при одновременном выполнении требований к качеству электроэнергии.
3. Наличие случайных изменений нагрузки в местах потребления.
4. Возможность случайных нарушений процесса производства и передачи электроэнергии, вызванными различными авариями.
5. Сложность и взаимосвязанность явлений, происходящих при изменении режима работы энергосистемы, в том числе и вызванных различными авариями.
6. Быстротечность электромагнитных и электромеханических переходных процессов при изменениях или аварийных нарушениях режима работы в электрической части энергосистемы.

Автоматическое управление не должно рассматриваться в отрыве от всего комплекса задач управления энергосистемами. Рассмотрим, какое место среди задач управления занимает автоматическое управление на основе временной и пространственной декомпозиции задач управления (рис. В.1).

Долгосрочное планирование охватывает месяц, квартал, год. При этом решаются следующие основные задачи:

- разработка плановых оптимальных режимов на длительные промежутки времени;
- расчет параметров устройств релейной защиты и автоматики;
- разработка планов перспективного развития энергосистемы.

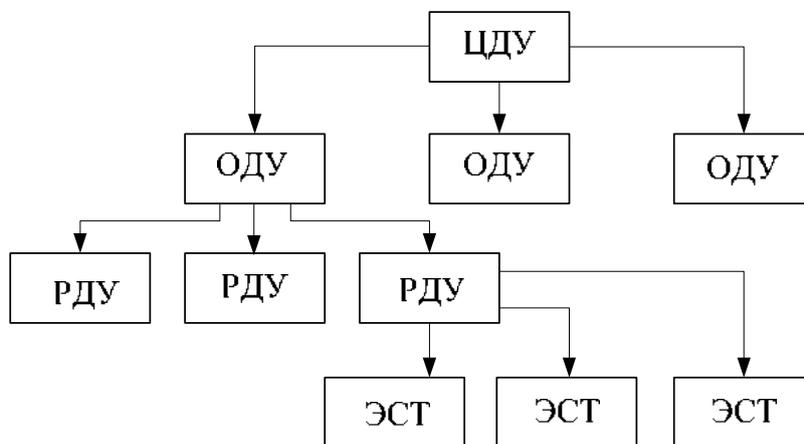
Краткосрочное планирование охватывает сутки или нескольких суток. При этом решаются задачи:

- разработка конкретных графиков нагрузок,
- разработка графиков ремонта электрооборудования и вспомогательных устройств, в том числе устройств релейной защиты и автоматики (РЗ и А).

На стадии оперативного управления осуществляется реализация запланированных мероприятий в реальном масштабе времени с учетом фактического состояния электроэнергетической системы (ЭЭС).



а



б

Рис. В.1. Структура временной (а) и пространственной (б) декомпозиции задач управления:

ЦДУ – центральное диспетчерское управление;

ОДУ – объединенное диспетчерское управление;

РДУ – региональное диспетчерское управление; ЭСТ – электростанция

Многие задачи по управлению не могут быть выполнены с достаточной степенью совершенства оперативным персоналом, а некоторые

задачи в принципе нельзя решить с помощью ручного управления из-за высокой скорости протекания процессов, поэтому эти задачи решаются с помощью автоматического управления.

В связи с развитием технической базы и, особенно, в связи с широким распространением высоконадежных программируемых цифровых средств обработки информации круг задач, решаемых автоматически, постоянно расширяется и повышается совершенство решения этих задач.

Пространственная декомпозиция задач управления рассматривается на основе сложившейся иерархической структуры управления единой энергосистемы (ЕЭС). На различных уровнях иерархической структуры управления используются методы и средства с различной степенью автоматизации.

Основные вопросы, которые будут рассматриваться в данном пособии, разделены на пять тем:

- 1) теоретические основы автоматического управления;
- 2) автоматическое регулирование возбуждения синхронных машин (АРВ);
- 3) автоматическое управление режимом работы ЭЭС по напряжению и по реактивной мощности;
- 4) автоматическое управление режимом работы ЭЭС по частоте и по активной мощности;
- 5) автоматическое управление для предотвращения развития аварий в ЭЭС в аварийных режимах (противоаварийная автоматика (ПА)).

# 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Системы автоматического управления строятся на принципе обратной связи, который заключается в том, что состояние объекта управления, характеризующиеся некоторыми параметрами  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (рис. 1.1) сравнивается в управляющем устройстве с заданным (желаемым) состоянием и в случае отличия текущего состояния от заданного в управляющем устройстве вырабатываются управляющие воздействия  $x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pt}$ , которые возвращают состояние объекта к заданному. Отклонение состояния объекта от заданного вызывается возмущающими воздействиями  $x_{в1}, x_{в2}, \dots, x_{вл}$ . Знание свойств объекта с учетом конкретной задачи управления является необходимым условием для полноценного анализа и разработки методов и средств для реализации управляющего устройства.

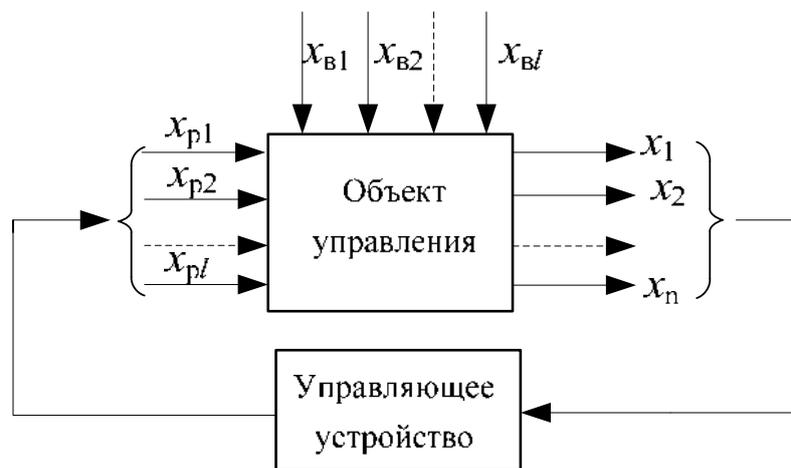


Рис. 1.1. Структурная схема системы автоматического управления

Частным случаем систем автоматического управления являются системы автоматического регулирования, с помощью которых решается задача поддержания на определенном уровне или обеспечение изменения по заданному закону ограниченного числа параметров, характеризующих состояние объекта.

Степень совершенства решения задачи автоматического регулирования по отношению к исходным требованиям к ней определяются характеристиками объекта регулирования и характеристиками управляющего устройства (регулятора).

Поскольку характеристики объекта являются заданными, то необходимые требования к системе регулирования должны обеспечиваться соответствующим выбором характеристик регулятора.

В частных случаях совместно с системой регулирования по принципу обратной связи, который называют также системой регулирования по отклонению регулируемого параметра, применяется регулирование по возмущению. Регулирование по возмущению заключается в том, что если между некоторыми возмущающими воздействиями и регулируемой величиной существует достаточно определенная связь, то можно, не дожидаясь появления отклонения, осуществлять воздействие на объект, препятствующее ожидаемому отклонению регулируемой величины.

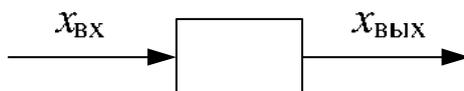
Так как реальные объекты и элементы регулятора являются инерционными, то применение регулирования по возмущению во многих случаях позволяет повысить быстродействие системы регулирования, что бывает принципиально важным при решении многих задач управления и регулирования в энергетике.

Для анализа свойств систем автоматического регулирования используется ряд методов, которые подробно излагаются в многочисленной литературе, например, по «Теории автоматического управления» [1, 2]. В данной главе приводятся основные сведения, необходимые для изложения материала учебного пособия.

### **1.1. Понятие звена системы автоматического регулирования и математическое описание свойств линейных звеньев**

Для анализа свойств систем автоматического регулирования используется их представление в виде структурной схемы, в которой отдельные элементы системы изображаются в виде звеньев, соединенных между собой в соответствии с соединением элементов, которые они замещают.

Отдельное звено характеризуется определенной математической связью между входной ( $x_{\text{вх}}$ ) и выходной ( $x_{\text{вых}}$ ) величинами (рис. 1.2).



*Рис. 1.2. Обобщенная структурная схема передаточного звена*

Звеньям системы предписывается свойство направленности действия, то есть способность одностороннего пропускания сигнала с входа на выход.

Для звеньев, содержащих в своем составе элементы с линейными характеристиками, связь между выходной и входной величинами линейного звена (или системы) выражается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n x_{\text{ВЫХ}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_{\text{ВЫХ}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-2} \frac{d^2 x_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + a_{n-1} \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + a_n x_{\text{ВЫХ}} = \\ = b_0 \frac{d^m x_{\text{ВХ}}}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x_{\text{ВХ}}}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-2} \frac{d^2 x_{\text{ВХ}}}{dt^2} + b_{m-1} \frac{dx_{\text{ВХ}}}{dt} + b_m x_{\text{ВХ}}. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Линейные дифференциальные уравнения имеют точное решение, которое, как известно, состоит из двух составляющих

$$x_{\text{ВЫХ}} = x_{\text{ВЫХ пер}} + x_{\text{ВЫХ } \infty}. \quad (1.2)$$

Первая переходная составляющая ( $x_{\text{ВЫХ пер}}$ ) есть общее решение однородного дифференциального уравнения, которое получается из (1.1) приравниванием его правой части к нулю.

В общем виде решение однородного уравнения отыскивается в виде

$$x_{\text{ВЫХ пер}} = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + \dots + C_n e^{p_n t}, \quad (1.3)$$

где  $p_1, p_2, \dots, p_n$  – корни характеристического уравнения, которое имеет вид

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-2} p^2 + a_{n-1} p + a_n = 0 \quad (1.4)$$

Коэффициенты  $C_1, C_2, \dots, C_n$  определяются по начальным условиям.

Принужденная составляющая ( $x_{\text{ВЫХ } \infty}$ ) есть частное решение неоднородного уравнения (1.1) (правая часть не равна нулю).

Если в установившемся режиме  $x_{\text{ВХ}}$  не является функцией времени (например, периодической), то принужденную составляющую можно найти, приравняв все производные к нулю, что дает

$$\begin{aligned} a_n x_{\text{ВЫХ } \infty} &= b_m x_{\text{ВХ } \infty}; \\ x_{\text{ВЫХ } \infty} &= \frac{b_m}{a_n} x_{\text{ВХ } \infty}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

### 1.1.1. Передаточная функция звена

Передаточная функция основана на применении операторного метода, в частности преобразования Лапласа. Формула прямого преобразования Лапласа для некоторой функции времени  $x(t)$  имеет следующий вид

$$x(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} x(t) dt, \quad (1.6)$$

где  $p$  – оператор Лапласа (комплексное число).

Примечание: мы применяем для оператора Лапласа и корней характеристического уравнения один и тот же символ « $p$ », хотя смысл этих величин различен. Целесообразность применения одинакового обозначения заключается в том, что знаменатель передаточной функции по структуре совпадает с левой частью характеристического уравнения.

Передаточная функция – это отношение операторного изображения выходной величины звена  $x_{\text{ВЫХ}}(p)$  к операторному изображению входной величины  $x_{\text{ВХ}}(p)$  при нулевых начальных условиях

$$W(p) = \frac{x_{\text{ВЫХ}}(p)}{x_{\text{ВХ}}(p)}. \quad (1.7)$$

Передаточная функция может быть получена непосредственно из дифференциального уравнения, если к нему применить преобразования Лапласа

$$\begin{aligned} a_0 p^n x_{\text{ВЫХ}}(p) + a_1 p^{n-1} \cdot x_{\text{ВЫХ}}(p) + \dots + a_{n-1} p x_{\text{ВЫХ}}(p) + a_n x_{\text{ВЫХ}}(p) = \\ = b_0 p^m x_{\text{ВХ}}(p) + b_1 p^{m-1} \cdot x_{\text{ВХ}}(p) + \dots + b_{m-1} p x_{\text{ВХ}}(p) + b_m x_{\text{ВХ}}(p). \end{aligned} \quad (1.8)$$

Из (1.8) нетрудно установить, что

$$W(p) = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n} = \frac{K(p)}{D(p)} \quad (1.9)$$

Важно обратить внимание, что знаменатель передаточной функции совпадает с левой частью характеристического уравнения, о чем упомянуто выше.

### 1.1.2. Переходная характеристика (или переходная функция)

Переходная функция  $h(t)$  – это закон изменения во времени выходной величины при изменении входной величины в виде единичной сту-

пенчатой функции (рис. 1.3). Единичная ступенчатая функция описывается следующим образом

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ 1 & \text{при } t \geq 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

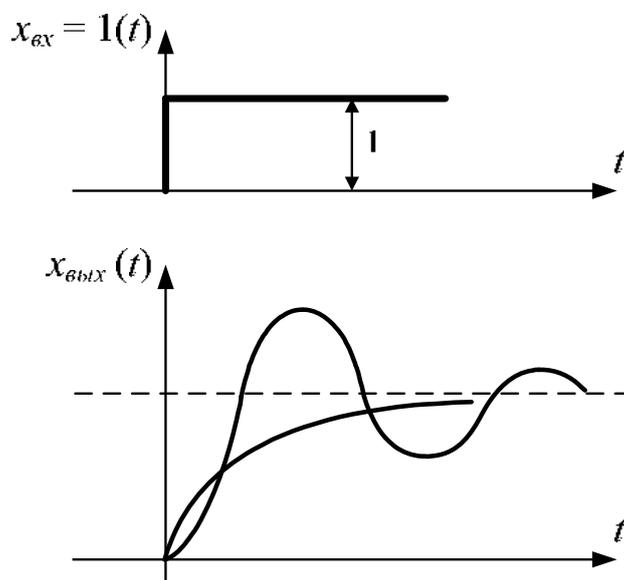


Рис. 1.3. Переходная функция

Связь между передаточной функцией и переходной функцией можно найти применив к функции  $1(t)$  преобразование Лапласа

$$1(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} \cdot 1 dt = \frac{1}{p}.$$

Следовательно, изображение переходной функции

$$h(p) = \frac{1}{p} W(p). \quad (1.11)$$

### 1.1.3. Импульсная переходная функции (весовая функция)

Импульсная переходная функция  $w(t)$  – это закон изменения выходной величины при изменении входной величины в виде единичной функции, называемой также дельта-функцией  $\delta(t)$ . Дельта функция описывается следующим образом

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0 \\ 0 & \text{при } t \neq 0; \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot dt = 1. \quad (1.12)$$

Связь между дельта-функцией и единичной ступенчатой функцией

$$\delta(t) = \frac{d1(t)}{dt}. \quad (1.13)$$

Для линейных звеньев, очевидно, такая же связь будет иметь место между весовой функцией и переходной функцией

$$w(t) = \frac{dh(t)}{dt}. \quad (1.14)$$

Следовательно, изображение по Лапласу весовой функции

$$w(p) = p \cdot h(p) = W(p). \quad (1.15)$$

#### 1.1.4. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФХ)

Амплитудно-фазовая частотная характеристика – это отношение комплексного изображения выходной величины к комплексному изображению входной, когда входная величина изменяется по гармоническому закону

$$x_{\text{вх}}(t) = A_{\text{вх}} \sin \omega t. \quad (1.16)$$

При изменении  $x_{\text{вх}}$  по (1.16) на выходе линейного звена в установившемся режиме выходная величина также будет изменяться по гармоническому закону с той же частотой, но с другой амплитудой и фазой

$$x_{\text{вых}}(t) = A_{\text{вых}} \sin(\omega t + \varphi). \quad (1.17)$$

Комплексное изображение (1.16) и (1.17)

$$\underline{X}_{\text{вх}} = A_{\text{вх}} e^{j\omega t}; \quad \underline{X}_{\text{вых}} = A_{\text{вых}} e^{j(\omega t + \varphi)}. \quad (1.18)$$

Следовательно, по определению АФХ, которая обозначается как  $W(j\omega)$ , равна

$$W(j\omega) = \frac{\underline{X}_{\text{вх}}}{\underline{X}_{\text{вых}}} = \frac{A_{\text{вх}}}{A_{\text{вых}}} e^{j\varphi} = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}. \quad (1.19)$$

В (1.19) функции  $A(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$  являются соответственно амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками звена.

Выражение для амплитудно-фазовой характеристики (1.19), являющейся комплексной величиной, можно представить в алгебраической форме

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega). \quad (1.20)$$

В (1.20)  $U(\omega)$  и  $V(\omega)$  соответственно вещественная и мнимая частотные характеристики.

Амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) однозначно связана с передаточной функцией. Если учесть, что выражение для производной  $k$ -го порядка от  $\underline{X}_{\text{ВХ}}$  и  $\underline{X}_{\text{ВЫХ}}$  равны

$$\begin{aligned} \frac{d^k \underline{X}_{\text{ВХ}}}{dt^k} &= (j\omega)^k A_{\text{ВХ}} e^{j\omega t} = (j\omega)^k \underline{X}_{\text{ВХ}}, \\ \frac{d^k \underline{X}_{\text{ВЫХ}}}{dt^k} &= (j\omega)^k A_{\text{ВЫХ}} e^{j\omega t} = (j\omega)^k \underline{X}_{\text{ВЫХ}}, \end{aligned} \quad (1.21)$$

то при подстановке (1.18) в дифференциальное уравнение (1.9) получим

$$W(j\omega) = \frac{b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \dots + b_{m-1}(j\omega) + b_m}{a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1}(j\omega) + a_n} = \frac{K(j\omega)}{D(j\omega)}. \quad (1.22)$$

Как видно из сопоставления (1.9) и (1.22), что выражение для амплитудно-фазовой характеристики можно получить подстановкой в выражение для передаточной функции  $p = j\omega$ .

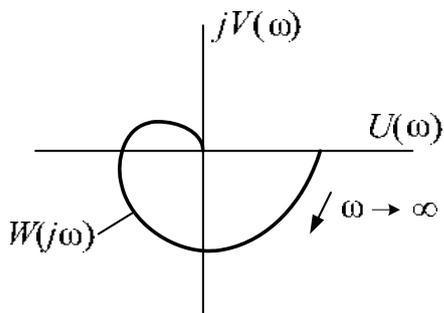


Рис. 1.4. Годограф

Для решения ряда практических задач анализа свойств систем автоматического регулирования используется графическое представление амплитудно-фазовой характеристики. Она строится на комплексной плоскости  $U(\omega)$  и  $V(\omega)$  в виде годографа, который представляет собой геометрическое место конца вектора  $W(j\omega)$  при изменении частоты от 0 до  $\infty$  (рис. 1.4).

Связь между входной и выходной величинами звена в установившемся режиме может быть получена, если в передаточной функции положить  $p = 0$  (все производные равны нулю). Таким образом

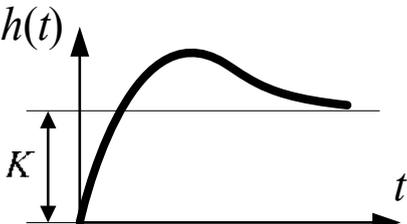
$$x_{\text{ВЫХ } \infty} = x_{\text{ВХ } \infty} \cdot W(0) = \frac{b_m}{a_n} = k. \quad (1.23)$$

Коэффициент  $k = \frac{b_m}{a_n}$  называют коэффициентом усиления звена.

Некоторые типовые звенья систем автоматического регулирования и их характеристики представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Тип звена	Передаточная функция	Переходная функция
1. Безинерционное звено	$W(p) = K$	
2. Идеальное дифференцирующее звено	$W(p) = T_d p$	
3. Реальное дифференцирующее звено	$W(p) = \frac{T_d p}{T_d p + 1}$	
4. Интегрирующее звено	$W(p) = \frac{1}{T_i p}$	
5. Инерционное звено первого порядка	$W(p) = \frac{K}{T_1 \cdot p + 1}$	
6. Инерционное звено второго порядка (колебательное)	$W(p) = \frac{K}{T_1 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + 1}$	<p>Корни характеристического уравнения  <math>p_1 = \alpha + j\omega</math>; <math>p_2 = \alpha - j\omega</math></p>

Тип звена	Передаточная функция	Переходная функция
7. Инерционное звено второго порядка (апериодическое)	$W(p) = \frac{K}{T_1 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + 1}$	<p>Корни характеристического уравнения <math>p_1 = -\alpha_1</math>; <math>p_2 = -\alpha_2</math></p> 

Все звенья можно разбить на две группы, принципиально отличающиеся по своим свойствам.

1. Статические звенья – это такие звенья, у которых в установившемся режиме (при  $p = 0$ ) между выходной и входной величинами имеется определенная связь. То есть эти звенья обладают свойством устойчивого равновесия. Из звеньев, приведенных в табл. 1.1, к статическим относятся все звенья кроме интегрирующего.
2. Астатические звенья обладают безразличным равновесием (нейтральные звенья). В табл. 1.1 это интегрирующее звено. При  $p = 0$ :  $W_{\text{и}}(0) \rightarrow \infty$ . Это означает, что при  $x_{\text{вх}} = 1(t)$  теоретически  $x_{\text{вых}} \rightarrow \infty$ . Если входное воздействие приложено на ограниченное время, то выходная величина сохраняет постоянное значение, равное интегралу от входной величины, за это время (рис. 1.5).

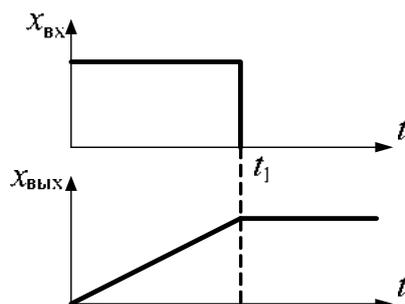


Рис. 1.5. Изменение входной и выходной величины астатического звена

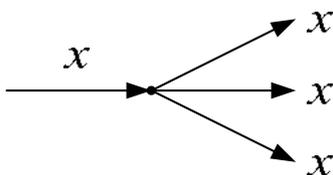
## 1.2. Получение передаточной функции системы автоматического регулирования по передаточным функциям звеньев

Передаточная функция системы по известным передаточным функциям звеньев может быть получена на основе замены групп, со-

единенных между собой звеньев эквивалентными передаточными функциями и на основе правил переноса воздействий.

При составлении структурных схем систем автоматического регулирования кроме условного изображения звена используются следующие символы, смысл которых ясен из приведенных ниже схем.

- знак разветвления сигнала



- знак алгебраического суммирования сигналов



### 1.2.1. Эквивалентные передаточные функции типовых соединений звеньев

Правила преобразования различных схем соединения звеньев представлены на рис. 1.6, 1.7, 1.8.

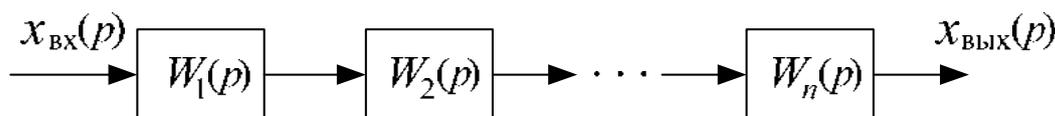


Рис. 1.6. Последовательное соединение звеньев

Из определения передаточной функции следует что при последовательном соединении звеньев передаточная функция равна

$$W_{\text{экв}}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot \dots \cdot W_n(p). \quad (1.24)$$

Параллельным соединением в данном случае принимается такое соединение звеньев, когда на вход всех звеньев подается одна и та же величина, а выходная величина формируется как сумма выходных величин всех звеньев.

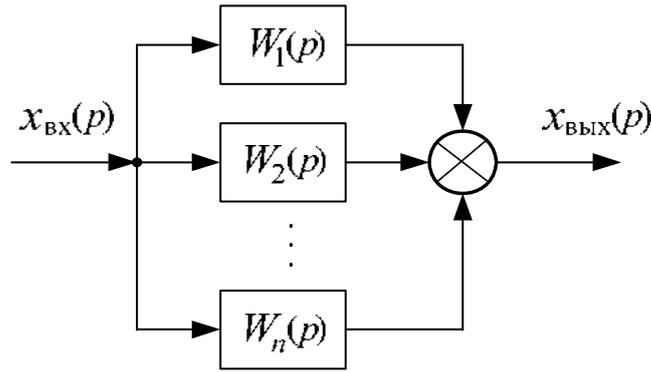


Рис. 1.7. Параллельное соединение звеньев

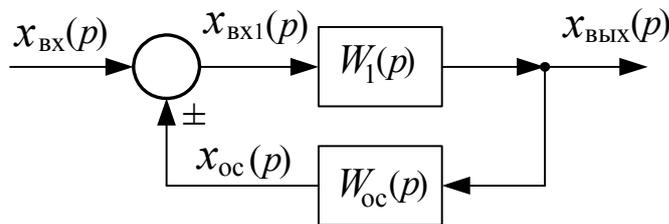


Рис. 1.8. Соединение с обратной связью  
(звено, охваченное обратной связью)

Достаточно очевидно, что при параллельном соединении эквивалентная передаточная функция будет равна

$$W_{\text{ЭКВ}}(p) = W_1(p) + W_2(p) + \dots + W_n(p). \quad (1.25)$$

В этом виде соединения на вход звена с передаточной функцией  $W_1(p)$  подается величина

$$x_{\text{BX1}}(p) = x_{\text{BX}}(p) \pm x_{\text{oc}}(p), \quad (1.26)$$

где

$$x_{\text{oc}}(p) = W_{\text{oc}}(p) \cdot x_{\text{ВЫХ}}(p).$$

В (1.26) знак «+» соответствует положительной обратной связи, а знак «-» – отрицательной.

Для того чтобы найти эквивалентную передаточную функцию звена, охваченного обратной связью запишем выражение, связывающее  $x_{\text{ВЫХ}}(p)$  и  $x_{\text{BX}}(p)$

$$x_{\text{ВЫХ}}(p) = W_1(p) \cdot [x_{\text{BX}}(p) \pm W_{\text{oc}}(p) \cdot x_{\text{ВЫХ}}(p)]. \quad (1.27)$$

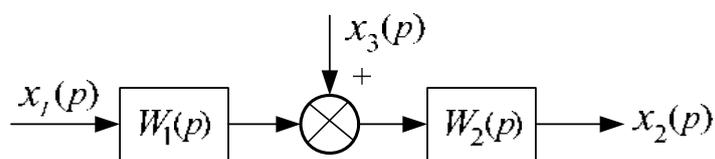
Из (1.27) выразим искомую передаточную функцию

$$W_{\text{ЭКВ}}(p) = \frac{x_{\text{ВЫХ}}(p)}{x_{\text{BX}}(p)} = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p) \cdot W_{\text{oc}}(p)} \quad (1.28)$$

Важно обратить внимание, что при получении формулы (1.28) знаки, соответствующие положительной и отрицательной обратной связи поменялись на противоположные. В (1.28) знак « $\leftarrow$ » соответствует положительной обратной связи, а знак « $\rightarrow$ » – отрицательной.

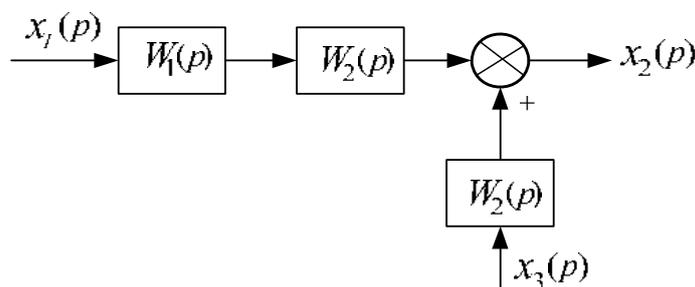
### 1.2.2. Правила переноса воздействий

Перенос воздействий позволяет отдельные фрагменты структурной схемы свести к рассмотренным выше трем видам соединения звеньев. Правила переноса воздействий, при которых сохраняется эквивалентность структурных схем, достаточно просты и иллюстрируются ниже.

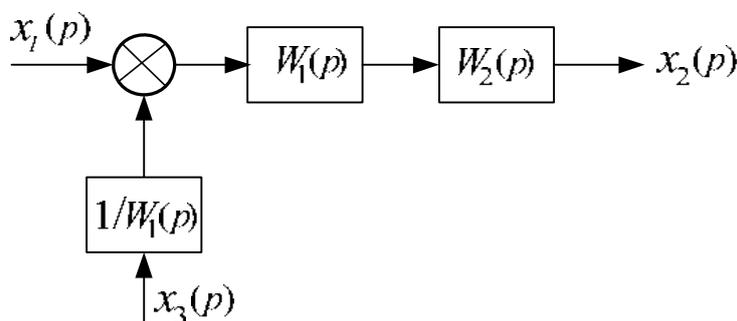


$$x_2(p) = [x_1(p) \cdot W_1(p) + x_3(p)] \cdot W_2(p).$$

a)



б)

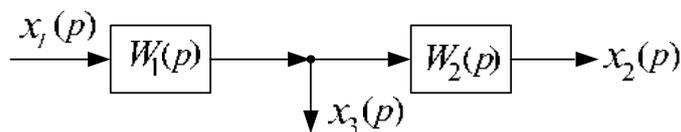


в

Рис. 1.9. Перенос точки суммирования:  
а – исходная схема, б – перенос на выход, в – перенос вход

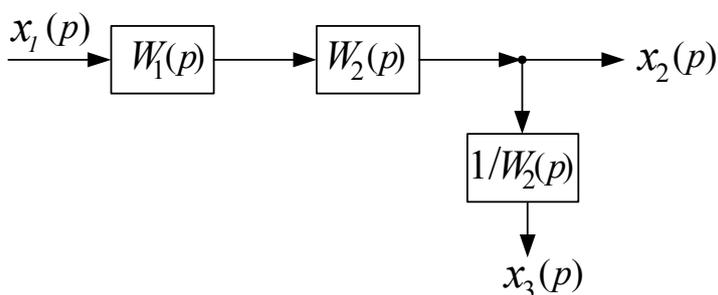
Нетрудно показать, что связь между  $x_2(p)$  и  $x_1(p)$  в схемах рис. 1.9 «б» и «в» такая же, как и в схеме «а».

Эквивалентность при переносе точки разветвления заключается в том, что связь должна сохраняться прежней между входной величиной  $x_1(p)$  и величиной в точке разветвления.

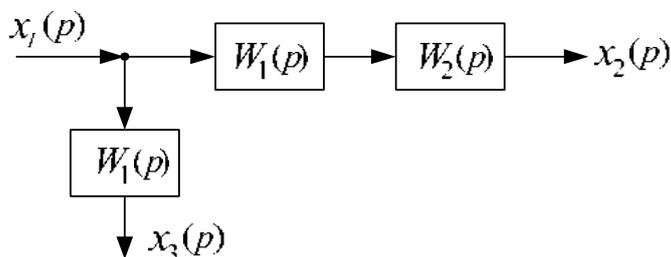


$$x_3(p) = W_1(p) \cdot x_1(p).$$

*a*



*б*



*в*

*Рис. 1.10. Перенос точки разветвления:  
а – исходная схема, б – перенос на выход, в – перенос вход*

Очевидно, что в схемах рис. 1.10 «б» и «в» также как и в схеме «а»

$$x_3(p) = W_1(p) \cdot x_1(p).$$

### 1.3. Обобщенная эквивалентная схема системы автоматического регулирования

Используя правила переноса воздействий и эквивалентного преобразования схем соединения звеньев, можно структурную схему любой системы автоматического регулирования свести к схеме из двух звеньев

(рис. 1.11). Одно из этих звеньев будем считать эквивалентным объектом регулирования с передаточной функцией  $W_{об}(p)$ , а второе эквивалентным регулятором с передаточной функцией  $W_p(p)$

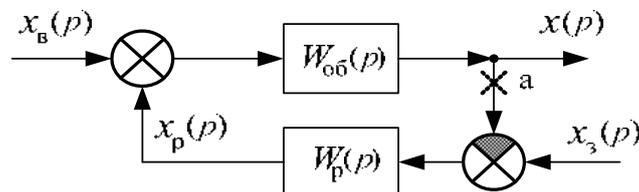


Рис. 1.11

В схеме, приведенной на рис. 1.11:

- $x$  – регулируемая величина,
- $x_з$  – задающее воздействие,
- $x_в$  – возмущающее воздействие,
- $x_p$  – регулирующее воздействие.

Чтобы выявить влияние закона формирования регулирующего воздействия на свойства системы автоматического регулирования, примем структурную схему регулятора в виде параллельного соединения трех звеньев: безынерционного, идеального дифференцирующего и интегрального (рис. 1.12).

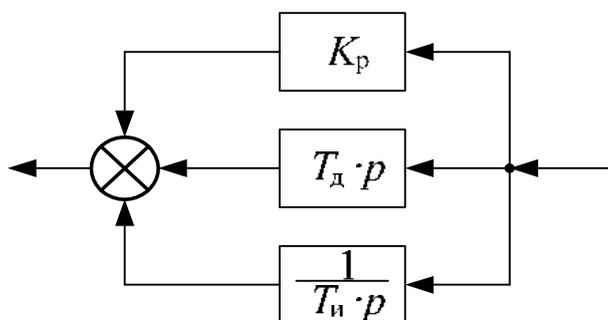


Рис. 1.12. Параллельное соединение трех звеньев

Передаточная функция регулятора в соответствии со схемой по рис. 1.12

$$W_p(p) = K_p + T_d p + \frac{1}{T_i p}. \quad (1.29)$$

Полученная эквивалентная схема позволяет выявить влияние параметров объекта и регулятора на свойства системы автоматического регулирования в установившемся и переходном режимах.

Очень важно на этом этапе подчеркнуть, что выбор параметров системы, исходя из желаемых свойств в установившемся режиме, нельзя вести в отрыве от анализа поведения системы в переходном режиме.

В системе теоретически, удовлетворяющей каким-либо требованиям в установившемся режиме, может иметь место неудовлетворительный переходный процесс или система может оказаться неустойчивой.

Свойства системы определяются характером зависимости регулируемой величины от входных воздействий – задающего и возмущающего.

Так как все звенья системы принимаются линейными, то для получения указанных зависимостей может использоваться принцип наложения. В соответствии с этим вводятся следующие передаточные функции.

1. Передаточная функция по каналу задающего воздействия

$$W_3(p) = \frac{x(p)}{x_3(p)} \quad \text{при } x_B(p) = 0.$$

2. Передаточная функция по каналу возмущающего воздействия

$$W_B(p) = \frac{x(p)}{x_B(p)} \quad \text{при } x_3(p) = 0.$$

Для анализа также используется передаточная функция системы в разомкнутом состоянии. Для определения этой передаточной функции разомкнем систему в точке «а» (рис. 1.11) и положим  $x_B(p) = 0$ . Тогда

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{x(p)}{x_3(p)}.$$

На основе правил преобразования структурных схем получим

$$W_3(p) = \frac{W_{\text{об}}(p) \cdot W_p(p)}{1 + W_{\text{об}}(p) \cdot W_p(p)}; \quad (1.30)$$

$$W_B(p) = \frac{W_{\text{об}}(p)}{1 + W_{\text{об}}(p) \cdot W_p(p)}; \quad (1.31)$$

$$W_{\text{раз}}(p) = W_{\text{об}}(p) \cdot W_p(p). \quad (1.32)$$

В соответствии с методом наложения

$$x(p) = W_3(p) \cdot x_3(p) + W_B(p) \cdot x_B(p). \quad (1.33)$$

Далее проанализируем влияние передаточной функции регулятора, определяющей закон формирования регулирующего воздействия на свойства системы автоматического регулирования. При этом во всех

случаях будем считать, что передаточная функция объекта неизменна и является статическим звеном, то есть выполняется условие: при  $p = 0$   $W_{об}(p) = K_{об}$ .

#### 1.4. Свойства системы автоматического регулирования в установившемся режиме

Связь между регулируемой величиной и возмущающим воздействием в установившемся режиме может быть получена по (1.33) при  $p = 0$

$$x_{\infty} = W_3(0) \cdot x_{3\infty} + W_B(0) \cdot x_{B\infty}. \quad (1.34)$$

Далее рассмотрим установившийся режим при применении регуляторов различного типа.

##### Пропорциональный регулятор (П-регулятор)

Передаточная функция регулятора в этом случае

$$W_p(p) = K_p. \quad (1.35)$$

То есть в (1.29) принято  $T_d = 0$ ;  $T_i \rightarrow \infty$ .

С учетом того, что  $W_{об}(0) = K_{об}$  то по (1.33) с учётом (1.30) и (1.31) получим при  $p = 0$

$$x_{\infty} = \frac{K_{об} \cdot K_p}{1 + K_{об} \cdot K_p} \cdot x_{3\infty} \pm \frac{K_{об}}{1 + K_{об} \cdot K_p} \cdot x_{B\infty}. \quad (1.36)$$

Двойной знак в (1.36) принят в связи с тем, что в конкретных случаях возмущающее воздействие может приводить как к увеличению, так и к уменьшению регулируемой величины.

Как видно из (1.36), при использовании П-регулятора для объекта, описываемого статическим звеном, имеется некоторая ошибка в воспроизведении задающего воздействия, равная

$$\Delta x_3 = \left( \frac{K_{об} \cdot K_p}{1 + K_{об} \cdot K_p} - 1 \right) \cdot x_{3\infty}. \quad (1.37)$$

Также остается некоторое влияние на регулируемую величину возмущающего воздействия, количественно равное

$$\Delta x_B = \pm \frac{K_{об}}{1 + K_{об} \cdot K_p} \cdot x_{B\infty}. \quad (1.38)$$

Из (1.37) и (1.38) следует, что, чем выше коэффициент усиления регулятора, тем точнее воспроизводится задающее воздействие и тем меньше влияние возмущающего воздействия.

Системы автоматического регулирования, у которых принципиально остается некоторое остаточное влияние возмущающего воздействия принято называть статическими системами. Зависимость регулируемой величины от возмущающего воздействия показана на рис. 1.13.

В некоторых технических областях зависимость  $x_\infty(x_{B\infty})$  принято называть характеристикой регулирования, а коэффициент наклона этой характеристики – коэффициентом статизма, который определяется следующим образом (рис. 1.13)

$$K_c = \frac{\Delta x}{\Delta x_B}$$

При назначении для  $x$  и  $x_B$  некоторых базовых значений  $x_0$  и  $x_{B0}$  коэффициент статизма может быть определен в относительных единицах

$$K_{c^*} = \frac{\Delta x}{x_0} \cdot \frac{x_{B0}}{\Delta x_B} \quad (1.39)$$

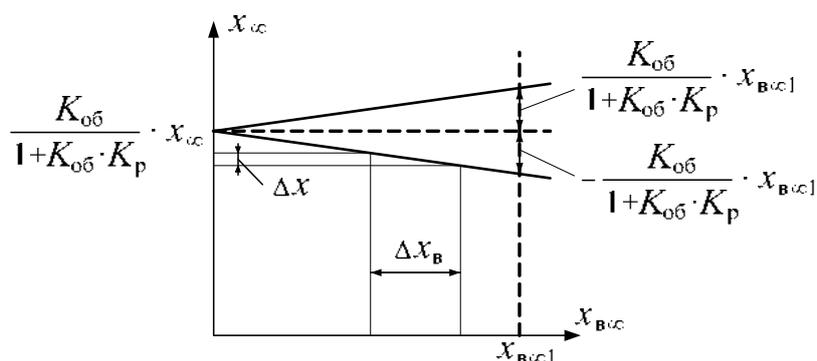


Рис. 1.13. Характеристики регулирования

**Пропорционально-дифференциальный регулятор (ПД-регулятор).** Регулятор такого типа имеет передаточную функцию (при  $T_i \rightarrow \infty$ )

$$W_p(p) = K_p + T_d \cdot p \quad (1.40)$$

Так как при  $p = 0$   $W_p(p) = K_p$ , то свойства системы с П-Д регулятором в установившемся режиме полностью соответствуют системе с П-регулятором.

Составляющая пропорциональная производной отклонения регулируемой величины оказывает существенное влияние на свойства системы автоматического регулирования в переходном режиме.

### Интегральный регулятор (И-регулятор)

Передаточная функция И-регулятора (при  $K_p = 0$ ;  $T_d = 0$ )

$$W_p(p) = \frac{1}{T_i p}. \quad (1.41)$$

Передаточные функции по задающему и возмущающему воздействиям в системе с И-регулятором

$$W_3(p) = \frac{W_{об}(p)}{T_i p + W_{об}(p)}, \quad (1.42)$$

$$W_B(p) = \frac{W_{об}(p) T_i p}{T_i p + W_{об}(p)}. \quad (1.43)$$

При  $p = 0$   $W_3(0) = 1$ ;  $W_B(0) = 0$ . Таким образом, в принятой эквивалентной структурной схеме, применение интегрального регулятора принципиально обеспечивает точное воспроизведение задающего воздействия и полностью устраняет влияние возмущающего воздействия на регулируемую величину.

Системы автоматического регулирования, в которых регулируемая величина не зависит от возмущающего воздействия, называются астатическими.

### Пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор).

Передаточная функция регулятора

$$W_p(p) = K_p + \frac{1}{T_i p}. \quad (1.44)$$

Передаточные функции по каналу задающего и возмущающего воздействий

$$W_3(p) = \frac{W_{об}(p)(K_p T_i p + 1)}{T_i p + W_{об}(p)(K_p T_i p + 1)}, \quad (1.45)$$

$$W_B(p) = \frac{W_{об}(p) T_i p}{T_i p + W_{об}(p)(K_p T_i p + 1)}. \quad (1.46)$$

Также как и в системе с И-регулятором при  $p = 0$   $W_3(0) = 1$ ;  $W_B(0) = 0$ .

Следовательно, добавление к пропорциональной части интегрального воздействия также обеспечивает астатизм системы регулирования.

## Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор). Передаточная функция

$$W_p(p) = K_p + T_d p + \frac{1}{T_i p} \quad (1.47)$$

Очевидно, что в установившемся режиме ( $p = 0$ ) свойства системы с ПИД-регулятором такие же, как и у системы с ПИ-регулятором.

### 1.5. Устойчивость систем автоматического регулирования

Система автоматического регулирования устойчива, если свободная составляющая решения линейного (или линеаризованного) уравнения (1.1) стремится к нулю при  $t \rightarrow \infty$ .

Корни характеристического уравнения могут быть действительными или комплексными сопряженными. Действительным корням соответствуют составляющие решения, изменяющиеся по аperiодическому закону, а каждой паре сопряженных комплексных корней соответствуют колебательные составляющие. Если все действительные корни и действительные части всех сопряженных комплексных корней отрицательны, то все составляющие решения (1.3) затухают и система является устойчивой.

Если среди корней есть хотя бы один положительный действительный корень или хотя бы одна пара сопряженных комплексных корней с положительной вещественной частью, то этим корням соответствует бесконечно нарастающая составляющая решения и система в целом является неустойчивой.

#### 1.5.1. Критерии устойчивости систем автоматического регулирования

Алгебраические уравнения высокого порядка не решаются в общем виде и отыскание их корней затруднительно. Поэтому практически используются специальные критерии, которые без решения уравнения позволяют установить имеются ли среди корней положительные вещественные или комплексные с положительной вещественной частью.

Удобство использования критериев по сравнению с прямым определением корней заключается в ряде случаев также и в том, что проще установить влияние на устойчивость параметров системы.

В связи с развитием компьютерных технологий, в виде математических пакетов и программ схемотехнического моделирования в настоящее время критерии устойчивости в большей степени приобретают методическое значение.

Известны алгебраические критерии и частотные критерии. Далее рассмотрены частные случаи алгебраического критерия – критерий Гурвица и частотного критерия – критерий Найквиста.

### Алгебраический критерий Гурвица

Алгебраический критерий оперирует с коэффициентами характеристического уравнения (1.4). Критерий Гурвица формулируется следующим образом.

1. Необходимое условие устойчивости.

Все коэффициенты характеристического уравнения положительны

$$a_0 > 0; a_1 > 0; a_{n-1} > 0; a_n > 0.$$

2. Достаточное условие.

Составленный по определенному правилу из коэффициентов характеристического уравнения определитель (определитель Гурвица) и все его диагональные миноры должны быть положительными.

Определитель Гурвица составляется по следующему правилу.

На главной диагонали располагаются коэффициенты от  $a_1$  до  $a_n$  и затем каждая строка в соответствии с номером диагонального элемента дополняется коэффициентами с нечетными или четными номерами. Положения, требующие формально номера большего « $n$ » или меньшего «0», заполняются нулями.

В качестве примера ниже приведен определитель для уравнения 5-го порядка.

$$a_0 \cdot p^5 + a_1 \cdot p^4 + a_2 \cdot p^3 + a_3 \cdot p^2 + a_4 \cdot p + a_5 = 0.$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 \end{vmatrix}$$

Миноры определителя  $\Delta_5$  получают последовательным вычеркиванием последней строки и последнего столбца.

Таким образом, кроме положительности коэффициентов, должны выполняться следующие условия устойчивости

$$\Delta_5 > 0; \Delta_4 > 0; \Delta_3 > 0; \Delta_2 > 0.$$

## Частотный критерий Найквиста

Критерий Найквиста позволяет судить об устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования по амплитудно-фазовой характеристике системы в разомкнутом состоянии.

Далее здесь рассмотрен критерий Найквиста для простого частного случая, когда система в разомкнутом состоянии заведомо устойчива или нейтральна.

Для структурной схемы обобщенной эквивалентной системы автоматического регулирования передаточная функция системы в разомкнутом состоянии (1.32)

$$W_{\text{раз}}(p) = W_{\text{об}}(p) \cdot W_p(p),$$

а соответствующая ей амплитудно-фазовая характеристика ( $p = j\omega$ )

$$W_{\text{раз}}(j\omega) = W_{\text{об}}(j\omega) \cdot W_p(j\omega). \quad (1.48)$$

Из сопоставления (1.30) и (1.32) следует, что

$$W_3(p) = \frac{W_{\text{раз}}(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p)}. \quad (1.49)$$

Следовательно, замкнутая система образуется замыканием отрицательной обратной связи через звено с единичной передаточной функцией (пояснение на рис. 1.14). Критерий Найквиста для случая, когда система в разомкнутом состоянии устойчива, может быть сформулирован следующим образом.

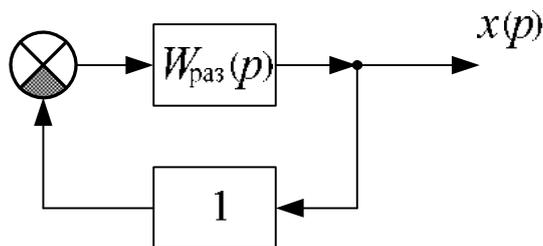


Рис. 1.14. Отрицательная обратная связь через звено с единичной передаточной функцией

«Система автоматического регулирования в замкнутом состоянии устойчива, если годограф амплитудно-фазовой характеристики системы в разомкнутом состоянии при изменении частоты от нуля до бесконечности не охватывает точку с координатами  $-1; j0$ .»

Простое физическое толкование этого критерия следует из выражения амплитудно-фазовой характеристики замкнутой системы через амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы. Из (1.49)

$$W_3(j\omega) = \frac{W_{\text{раз}}(j\omega)}{1 + W_{\text{раз}}(j\omega)}. \quad (1.50)$$

Если в диапазоне частот от 0 до  $\infty$  при некотором ее значении  $\omega = \omega_{\text{кр}}$  одновременно выполняются условия, когда амплитуда  $W_{\text{раз}}(\omega_{\text{кр}}) = 1$  и фаза  $\varphi(\omega_{\text{кр}}) = \pi$ , то знаменатель (1.50) становится равным нулю и амплитуда  $W_3(\omega)$  стремится к бесконечности. Это означает, что система находится на границе устойчивости. Годографы характеристики  $W_{\text{раз}}(j\omega)$  существенно отличаются друг от друга в зависимости от типа эквивалентного звена, которым описывается разомкнутая система, в частности от того является разомкнутая система статической или астатической, то есть содержит в своем составе интегрирующие звенья.

Примеры годографов амплитудно-фазовых характеристик разомкнутых систем приведены на рис. 1.15 и 1.16.

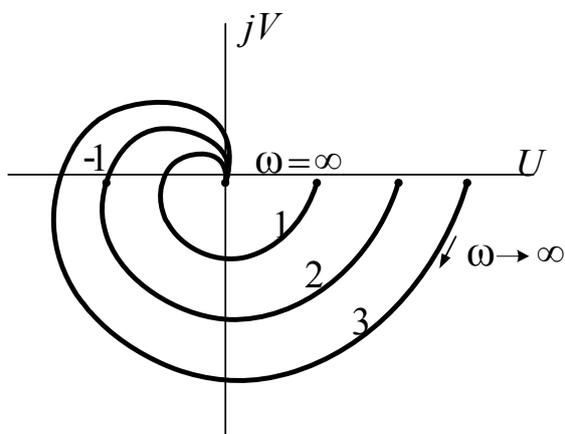


Рис. 1.15. Годографы статических, устойчивых в разомкнутом состоянии систем для случаев, когда система в замкнутом состоянии:  
1 – устойчива;  
2 – находится на границе устойчивости;  
3 – не устойчива

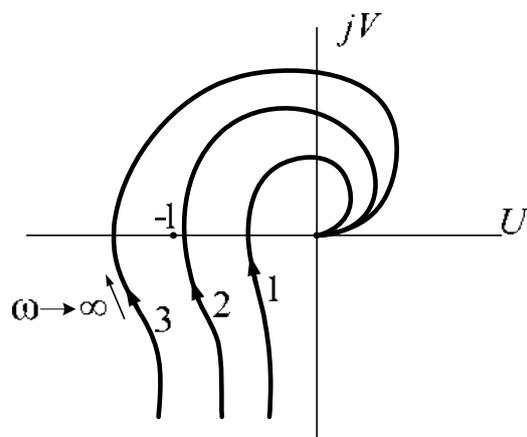


Рис. 1.16. Годографы систем в разомкнутом состоянии, содержащие в своем составе одно интегрирующее звено (астатизм 1-го порядка), для случаев, когда система в замкнутом состоянии:  
1 – устойчива;  
2 – находится на границе устойчивости;  
3 – не устойчива

## 1.6. Оценка качества систем автоматического регулирования в переходном режиме

Для оценки качества переходного процесса используются следующие количественные характеристики (рис. 1.17).

1. Максимальное перегуливание (о.е.)

$$x_{\text{Пм}^*} = \frac{x_{\text{Пм}}}{x_{\infty 2} - x_{\infty 1}}.$$

2. Время регулирования.

Время, в течение которого амплитуда выходной величины затухает до значения, отличающегося от установившегося на 5 %.

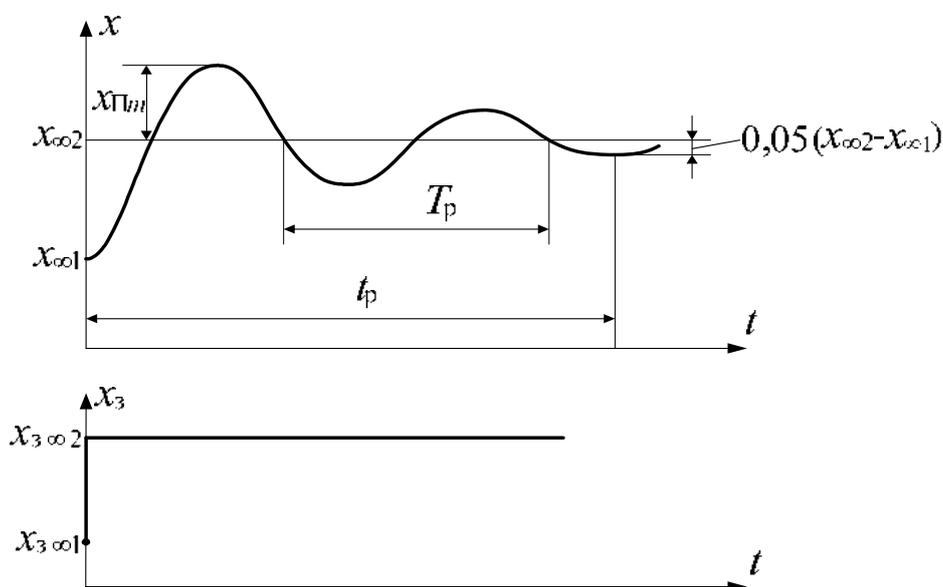


Рис. 1.17. Характеристики переходного процесса

3. Колебательность.

Число полных колебаний (периодов) изменения выходной величины за время регулирования

$$M = \frac{t_p}{T_p}.$$

Предельно плохие показатели качества переходного процесса имеет система автоматического регулирования, находящаяся на границе устойчивости. В этом случае переходный процесс представляет собой незатухающие колебания и поэтому

$$x_{\text{Пм}^*} = 1; \quad t_p \rightarrow \infty; \quad M \rightarrow \infty.$$

Очевидно, что, чем ближе система находится к границе устойчивости, тем хуже качество переходного процесса. На основе этого обстоятельства вводятся косвенные показатели качества переходного процесса, использующие критерии устойчивости.

Рассмотрим такие показатели, основанные на критерии Найквиста. На рис. 1.18 приведена некоторая амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы устойчивой в замкнутом состоянии.

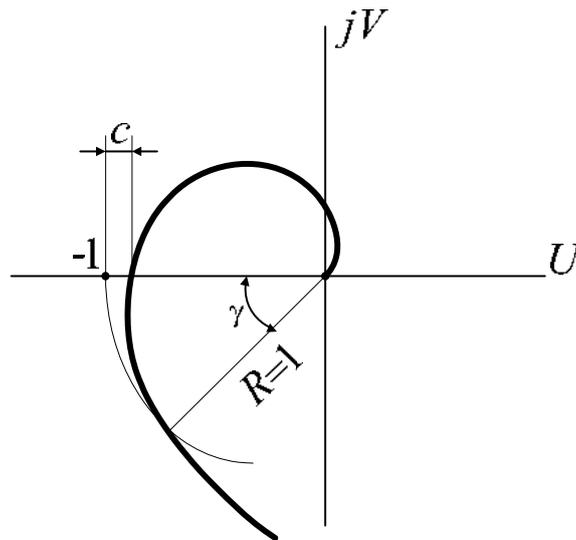


Рис. 1.18. Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы устойчивой в замкнутом состоянии

Как видно система может выйти на границу устойчивости либо за счет изменения модулей, либо за счет поворота векторов амплитудно-фазовой характеристики в сторону точки с координатами  $-1; j0$ .

Поэтому в качестве косвенных показателей качества переходного процесса вводятся обозначенные на рис. 1.18 величины:

«с» – запас устойчивости по модулю,

«γ» – запас устойчивости по фазе.

**Влияние типа и параметров регулятора на запасы устойчивости по модулю и по фазе.** Представление амплитудно-фазовой характеристики системы в разомкнутом состоянии на комплексной плоскости позволяет просто и наглядно рассмотреть вопрос о влиянии типа и параметров регулятора на запасы устойчивости.

При анализе будем, как и ранее, считать, что передаточная функция объекта известна, следовательно, известна и его амплитудно-фазовая характеристика  $W_{об}(j\omega)$ .

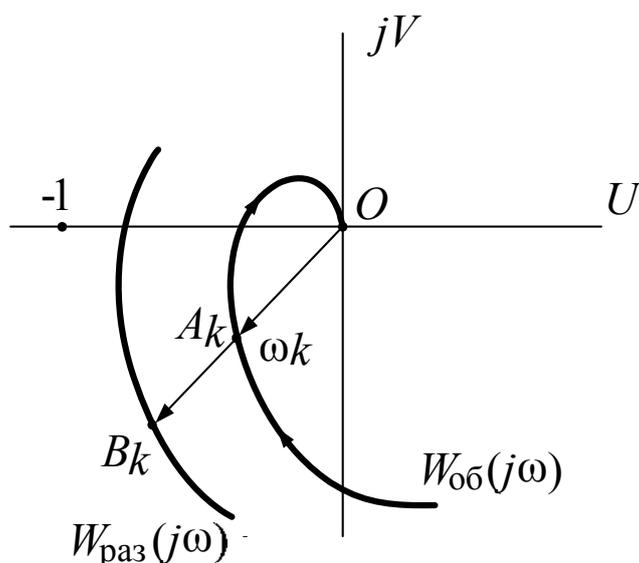
Влияние вида и параметров регулятора можно выявить, представив конкретный вектор амплитудно-фазовой характеристики системы в разомкнутом состоянии при некоторой частоте  $\omega_k$  в следующем виде

$$\begin{aligned}
 W_{\text{раз}}(j\omega_k) &= W_{\text{об}}(j\omega_k)W_p(j\omega_k) = \\
 &= W_{\text{об}}(j\omega_k) \left[ K_p + T_d j\omega_k + \frac{1}{T_i j\omega_k} \right] = \quad (1.51) \\
 &= W_{\text{об}}(j\omega_k) \cdot K_p + W_{\text{об}}(j\omega_k)T_d \omega_k e^{j90^\circ} + W_{\text{об}}(j\omega_k) \frac{e^{-j90^\circ}}{T_i j\omega_k}.
 \end{aligned}$$

Соотношение (1.51) дает очевидное правило построения вектора амплитудно-фазовой характеристики системы в разомкнутом состоянии

Рассмотрим частные случаи.

1. П-регулятор ( $K_p > 0$ ;  $T_d = 0$ ;  $T_i \rightarrow \infty$ ).



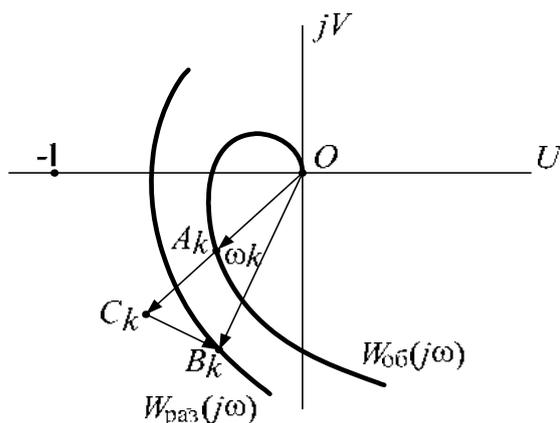
$$W_{\text{об}}(j\omega_k) = \overline{OA_k};$$

$$W_{\text{раз}}(j\omega_k) = \overline{OB_k} = \overline{OA_k} \cdot K_p$$

Рис. 1.19.

Как показано выше в системе с П-регулятором увеличение  $K_p$  приводит к повышению статической точности (снижению статизма). Одновременно, как это видно из рис. 1.19, увеличение  $K_p$  может приводить к снижению запасов устойчивости, а при некотором достаточно большом значении  $K_p$  может произойти нарушение устойчивости.

2. ПД-регулятор ( $K_p > 0$ ;  $T_d > 0$ ;  $T_i \rightarrow \infty$ ).



$$W_{об}(j\omega_k) = \overline{OA_k};$$

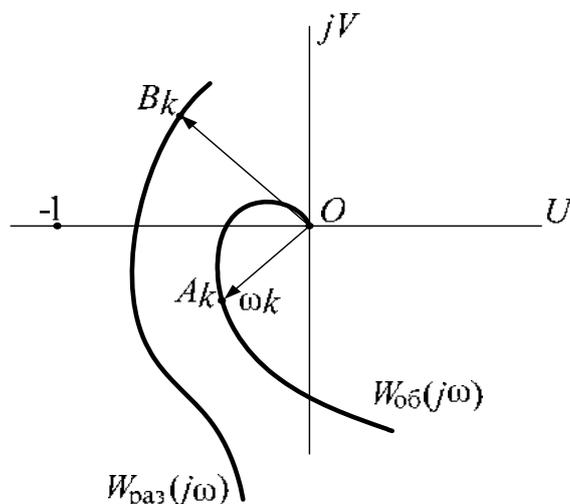
$$W_{раз}(j\omega_k) = \overline{OA_k} \cdot K_p + \overline{C_k B_k};$$

$$\overline{C_k B_k} = \overline{OA_k} \cdot T_d \cdot \omega_k \cdot e^{j90^\circ}$$

Рис. 1.20

Дифференциальная составляющая не влияет на свойства системы в установившемся режиме, но, как видно из рис. 1.20, при прочих равных условиях приводит к увеличению запасов устойчивости, так как удаляет конец вектора  $OB_k$  от точки  $(-1, j0)$ .

3. И-регулятор ( $K_p = 0$ ;  $T_d = 0$ ;  $T_i > 0$ ).



$$W_{об}(j\omega_k) = \overline{OA_k};$$

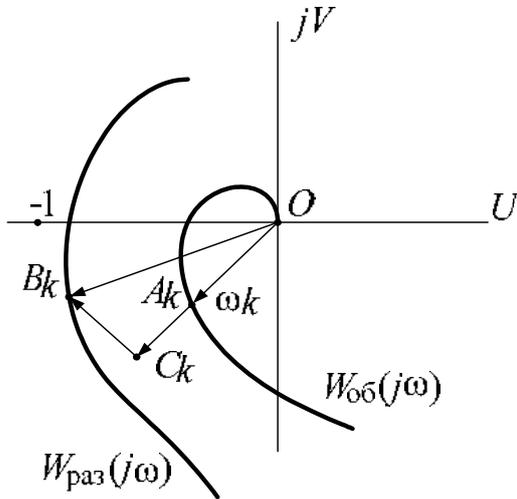
$$W_{раз}(j\omega_k) = \overline{OB_k} = \overline{OA_k} \cdot \frac{1}{T_i \omega_k} e^{-j90^\circ}.$$

Рис. 1.21

В установившемся режиме в системе с И-регулятором принципиально отсутствуют статические ошибки (нулевой статизм). Однако, как видно из рис. 1.21, вместе с этим интегральный регулятор приводит

к снижению запасов устойчивости, так как все векторы  $W_{\text{раз}}(j\omega)$  поворачиваются на  $90^\circ$  в сторону точки  $-1; j0$ .

4. ПИ-регулятор ( $K_p > 0$ ;  $T_d = 0$ ;  $T_i > 0$ ).



$$W_{\text{об}}(j\omega_k) = \overline{OA_k};$$

$$W_{\text{раз}}(j\omega_k) = \overline{OA_k} \cdot K_p + \overline{C_k B_k};$$

$$\overline{C_k B_k} = \overline{OA_k} \cdot \frac{e^{-j90^\circ}}{T_i \cdot \omega_k}.$$

Рис. 1.22

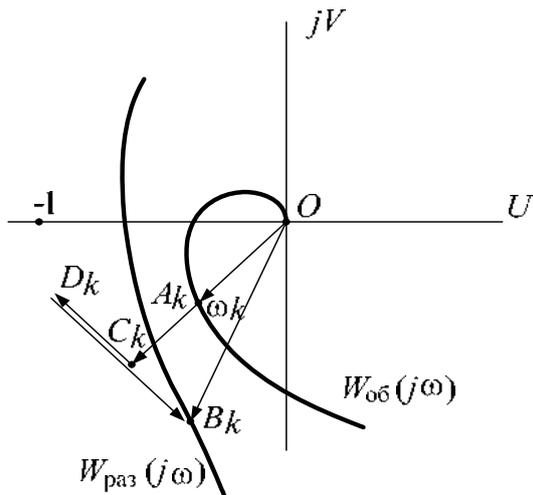
Интегральная составляющая в законе регулирования приводит к полному устранению статических ошибок, но одновременно при прочих равных условиях снижает запасы устойчивости (за счет составляющей  $B_k C_k$  на рис. 1.22).

Сопоставление влияния типа регулятора и его параметров на свойства системы в установившемся режиме и на запасы устойчивости позволяет установить, что условие повышения точности работы системы автоматического регулирования, и условие повышение запасов устойчивости являются противоречивыми. Именно поэтому, как было обращено внимание выше, вопросы о характеристиках системы в установившемся режиме должны решаться одновременно с вопросами о свойствах системы в переходном режиме и ее устойчивости.

Основным путем разрешения противоречия между точностью и устойчивостью системы является изменение структуры системы, введением дополнительных связей.

В качестве примера использования такого пути является применение системы с ПИД-регулятором. Установившийся режим такой системы рассмотрен выше и установлено, что при этом в системе отсутствуют статические ошибки.

На рис. 1.23 иллюстрируется влияние всех трех составляющих на положение амплитудно-фазовой характеристики системы в разомкнутом состоянии.



$$W_{об}(j\omega_k) = \overline{OA_k};$$

$$W_{раз}(j\omega_k) = \overline{OC_k} + \overline{C_k D_k} + \overline{D_k B_k};$$

$$\overline{OC_k} = \overline{OA_k} \cdot K_p;$$

$$\overline{C_k D_k} = \overline{OA_k} \cdot \frac{e^{-j90^\circ}}{T_n \cdot \omega_k};$$

$$\overline{D_k B_k} = \overline{OA_k} \cdot T_d \cdot \omega_k \cdot e^{j90^\circ}.$$

Рис. 1.23

Из рис. 1.23 очевидно, что снижение запаса устойчивости за счет интегральной составляющей (вектор  $C_k D_k$ ), может быть устранено за счет одновременного использования дифференциальной составляющей (вектор  $D_k B_k$ ).

Таким образом, важно отметить, что свойства системы в установившемся режиме и при переходных процессах жестко взаимосвязаны. Причем требования получения малых статических ошибок принципиально противоречиво требованию получения высоких качественных показателей в переходном процессе. Поэтому задачи достижения необходимой статической точности и качества переходного процесса нельзя рассматривать независимо друг от друга.

## 2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

Неотъемлемой частью синхронных машин является комплекс технических средств для создания и соответствующего регулирования тока возбуждения. Регулируемый источник постоянного тока для питания обмотки возбуждения принято называть системой возбуждения (СВ).

Для нормальной работы синхронных генераторов в составе энергосистемы ток возбуждения должен регулироваться по определенному закону, который реализуется с помощью устройства автоматического регулирования возбуждения (АРВ). АРВ является многофункциональным устройством и с его помощью решаются следующие задачи:

1. Поддержание напряжения в определенных точках энергосистемы, чаще всего на выводах генератора. Может также ставиться и решаться задача обеспечения изменения напряжения в некоторой точке по определенному закону в зависимости от других режимных параметров, например, от тока. Этим обеспечивается участие генераторов вместе с другими техническими средствами в решении задачи управления режимом работы электрических сетей по напряжению и реактивной мощности.
2. АРВ в большей или меньшей степени способствует повышению статической и динамической устойчивости параллельной работы генераторов. Эффективность выполнения этих двух функций принципиально зависит от характеристик системы возбуждения, АРВ и собственно генератора.

Обобщенная схема соединения генератора, системы возбуждения и АРВ приведена на рис. 2.1.

Напряжение на выходе системы возбуждения  $U_f$  и ток возбуждения  $i_f$  изменяются под действием сигнала, поступающего от АРВ. Требуемый вид этого сигнала зависит от технического исполнения системы возбуждения. В целом схема рис. 2.1 представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования, управляемую на основе обработки по определенному алгоритму режимных параметров, получаемых от трансформаторов напряжения и тока.

Применяемые в настоящее время системы возбуждения рассмотрим в последовательности, соответствующей степени совершенства вы-

полнения ими основных функций. Очень важной функцией систем возбуждения является обеспечение форсировки возбуждения, под которой понимается увеличение напряжения возбуждения до технически допустимых значений за возможно минимальное время. Поэтому сравнительные характеристики различных систем возбуждения принято рассматривать в режиме форсировки возбуждения.

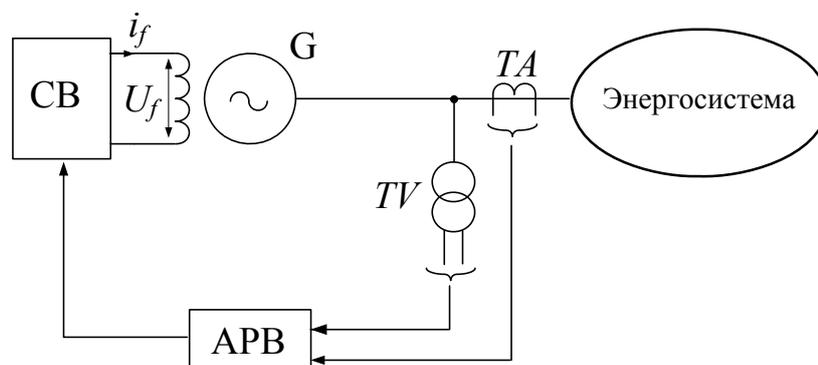


Рис. 2.1. Обобщенная схема соединения генератора, системы возбуждения и АРВ

## 2.1. Тиристорные системы возбуждения прямого управления

Наиболее существенной особенностью систем возбуждения этого вида является то, что элементы для регулирования тока возбуждения (управляемые тиристорные выпрямители) находятся непосредственно в цепи обмотки возбуждения генератора. В зависимости от используемого для питания управляемых выпрямителей источника переменного тока тиристорные системы прямого управления подразделяются на две группы: системы независимого возбуждения и системы зависимого возбуждения (самовозбуждения). На рис. 2.2 приведена упрощенная схема тиристорной системы независимого возбуждения.

В этой системе первичным источником энергии для питания цепи возбуждения является вспомогательный синхронный трехфазный генератор ( $GE$ ), вырабатывающий ток с частотой 50 Гц. Ротор вспомогательного генератора находится на одном валу с ротором основного генератора. Обмотка статора этого генератора имеет промежуточный вывод, примерно от середины обмотки. Далее от промежуточного вывода и от всей обмотки питаются две группы управляемых тиристорных выпрямителей  $VS_p$  и  $VS_\phi$  (рис. 2.2). Те из них, которые питаются от промежуточного вывода ( $VS_p$ ), образуют рабочую группу вентиля, которая используется для регулирования возбуждения в нормальном режиме. Вторая группа питается от всей обмотки и образует форсировочную

группу вентилях ( $VS_{\Phi}$ ), которые в нормальном режиме практически полностью закрыты и открываются только при введении форсировки возбуждения.

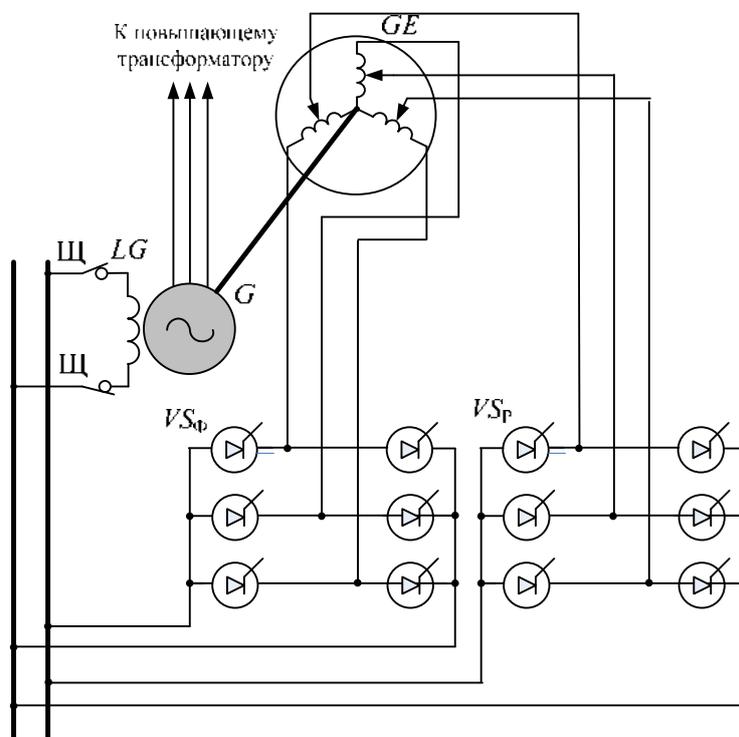


Рис. 2.2. Упрощенная схема тиристорной системы независимого возбуждения

На выходе токи выпрямителей суммируются и направляются в обмотку возбуждения генератора ( $LG$ ). Благодаря тому, что управляемые тиристоры являются практически безынерционными элементами, достигается высокая скорость регулирования напряжения возбуждения ( $U_f$ ).

Сигнал от АРВ в данном случае представляет собой последовательность импульсов тока, подаваемых на управляющие электроды тиристоров. Среднее значение выпрямленного тока изменяется за счет изменения фазы этих импульсов относительно переменного напряжения, приложенного к выпрямителям.

Эта система является независимой, так как для ее питания используется генератор, режим работы которого практически не зависит от электрического режима работы главного генератора. Вспомогательный генератор  $GE$  также имеет свою систему возбуждения.

Система зависимого возбуждения отличается от независимой тем, что вместо вспомогательного генератора источником питания является трансформатор  $T$ , который подключен параллельно к выводам генератора  $G$  (рис. 2.3).



го ( $ST$ ) трансформаторов суммируются, поэтому снижение напряжения при коротком замыкании на параллельном трансформаторе компенсируется увеличением напряжения на последовательном трансформаторе.

При вводе генератора в работу для запуска системы в обмотку возбуждения кратковременно подается постоянный ток от автомата начального возбуждения (АНВ), питающегося от трансформатора собственных нужд (ТСН).

## 2.2. Электромашинные системы возбуждения

В рассматриваемых далее системах возбуждения для создания тока возбуждения используются электрические машины того или иного вида. В этих системах регулирование тока возбуждения генератора осуществляется косвенно путем изменения тока в обмотках возбуждения вспомогательных электрических машин. Поэтому электромашинные системы возбуждения являются принципиально более инерционными по сравнению с тиристорными системами прямого управления.

### 2.2.1. Бесщеточная система возбуждения

Наиболее современной и перспективной электромашинной системой возбуждения является бесщеточная система (рис. 2.4).

Во всех типах систем возбуждения для подачи тока во вращающуюся обмотку возбуждения генератора используются контактно-щеточный аппарат. В бесщеточной системе ток возбуждения подается в обмотку возбуждения без применения контактных колец и щеток благодаря тому, что в этой системе возбуждения применены следующие элементы: обращенный синхронный генератор ( $GE$ ) и вращающийся выпрямитель ( $V$ ).

У обращенного синхронного генератора обмотка переменного тока помещается на роторе, а обмотка возбуждения – на статоре. Переменный ток от обращенного генератора выпрямляется с помощью выпрямителя  $3$ , который тоже находится на вращающейся части (рис. 2.4).

Управление возбуждением осуществляется путем изменения тока возбуждения в обмотке возбуждения ( $LGE$ ) обращенного генератора ( $GE$ ). В приведенной схеме регулирование тока в обмотках возбуждения обращенного генератора осуществляется с помощью двух групп управляемых тиристорных выпрямителей  $VS_p$  и  $VS_\phi$ . Группа  $VS_p$  обеспечивает работу генератора в нормальном режиме, а вторая  $VS_\phi$  – в режиме форсировки возбуждения.

Для питания АРВ и обмотки возбуждения обращенного синхронного генератора  $GE$  имеется еще одна электрическая машина переменного тока – подвозбудитель  $GEA$ .



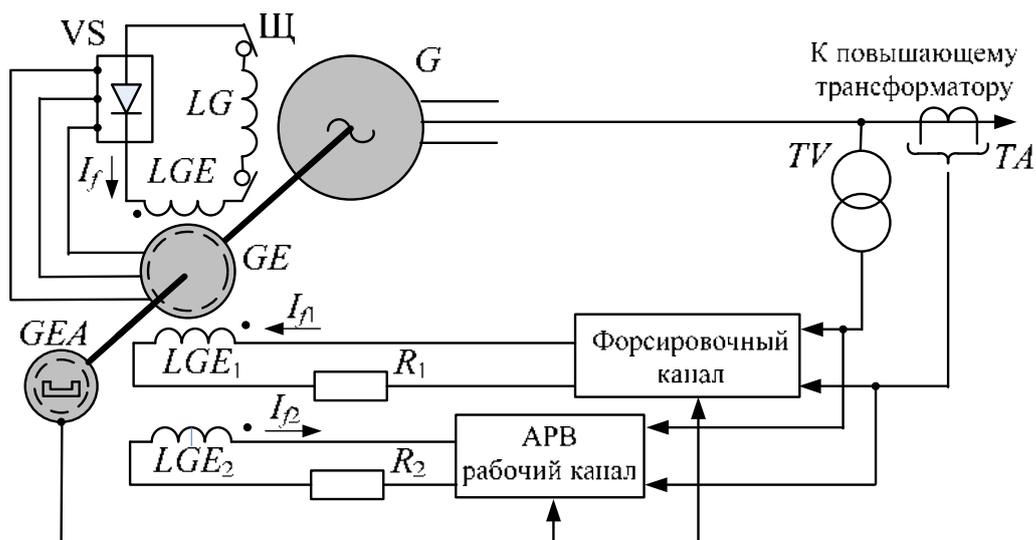


Рис. 2.5. Упрощенная схема высокочастотной системы возбуждения

АПВ и соответственно обмотки  $LGE_1$  и  $LGE_2$  получают питание от подвозбудителя  $GEA$ , который представляет собой генератор переменного тока, возбуждаемый постоянными магнитами.

В настоящее время высокочастотные системы модернизируются путем применения для регулирования тока в обмотке возбуждения индукторного генератора управляемого тиристорного выпрямителя вместо магнитных усилителей, а также за счет применения АПВ на базе микропроцессоров.

### 2.2.3. Система возбуждения с генератором постоянного тока

Система возбуждения с генератором постоянного тока в настоящее время встречается только на электростанциях ранней постройки и по своим характеристикам уступает всем другим системам возбуждения. В этой системе источником энергии для создания тока ротора является генератор постоянного тока параллельного самовозбуждения  $GE$  (рис. 6). Напряжение на выходе этого генератора  $U_f$  определяется суммарной намагничивающей силой обмотки самовозбуждения  $LGE$  и обмоток  $LGE_1$  и  $LGE_2$ , которые используются для автоматического регулирования возбуждения. В данном случае, выходным сигналом АПВ должен быть постоянный ток. Форсировка возбуждения осуществляется шунтированием с помощью контактора  $K$  резистора  $R_{III}$  (шунтового реостата) в цепи обмотки возбуждения.

Электромашинная система такого вида используется на турбогенераторах до 100 МВт и на гидрогенераторах до 150 МВт. Мощность генератора постоянного тока должна быть порядка 0.4÷0.6 % от мощности

главного генератора. При такой большой мощности генератора постоянного тока трудно обеспечить надежную работу его коллектора. В последнее время систему возбуждения такого типа практически не применяют даже на генераторах малой мощности.

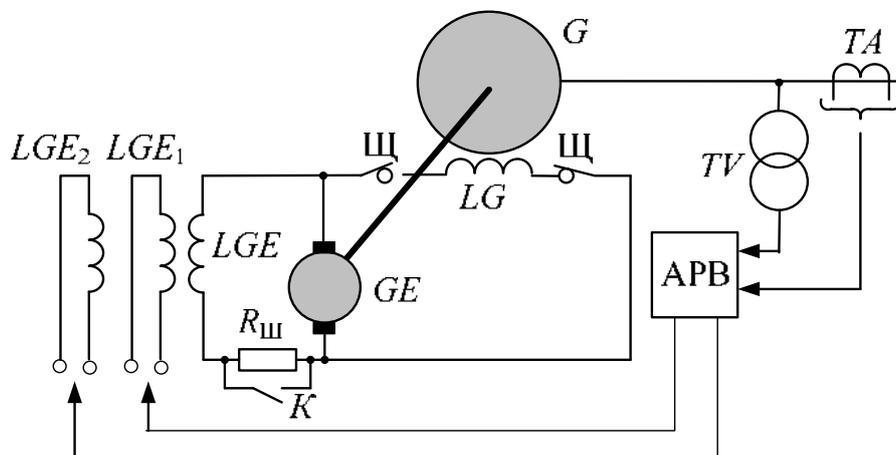


Рис. 2.6. Упрощенная схема системы возбуждения с генератором постоянного тока

### 2.3. Количественные характеристики систем возбуждения

Для определения основных количественных характеристик систем возбуждения по ГОСТ-21558 вводятся следующие понятия.

**Потолочное (предельное) установившееся напряжение системы возбуждения:** постоянное напряжение, возникающее при форсировке на обмотке возбуждения в момент достижения потолочного тока возбуждения. Если система возбуждения оснащена устройством ограничения максимального тока возбуждения, то потолочное установившееся напряжение возбуждения определяется в момент, предшествующий началу работы этого устройства.

**Кратность форсировки возбуждения по напряжению:** потолочное установившееся напряжение системы возбуждения, выраженное в долях номинального напряжения возбуждения.

**Потолочный (предельный) ток возбуждения:** наибольший ток возбуждения, создаваемый системой возбуждения в конце регламентированной длительности форсировки возбуждения.

**Кратность форсировки возбуждения по току:** потолочный ток возбуждения, выраженный в долях номинального тока возбуждения.

**Скорость изменения напряжения возбуждения:** скорость нарастания или снижения напряжения системы возбуждения или возбудителя при необходимости изменения этого напряжения, выраженная в вольтах

в секунду или в относительных единицах в секунду по отношению к номинальному напряжению возбуждения синхронной машины.

**Средняя скорость изменения напряжения возбуждения:** скорость изменения напряжения системы возбуждения или возбуждателя, вычисленная заменой фактической кривой изменения напряжения отрезком прямой, имеющим такое же среднее значение, что и фактическая кривая в течение регламентированного интервала времени.

Регламентированный интервал времени определяется от  $t = 0$  до момента  $t = t_1$ , когда напряжение возбуждения изменится от начального значения на  $0,632\Delta U_{f\Pi}$  (точка  $b$ ), где  $\Delta U_{f\Pi}$  – максимальное изменение напряжения,  $t_{огр}$  – момент времени ввода ограничения форсировки (рис. 2.7).

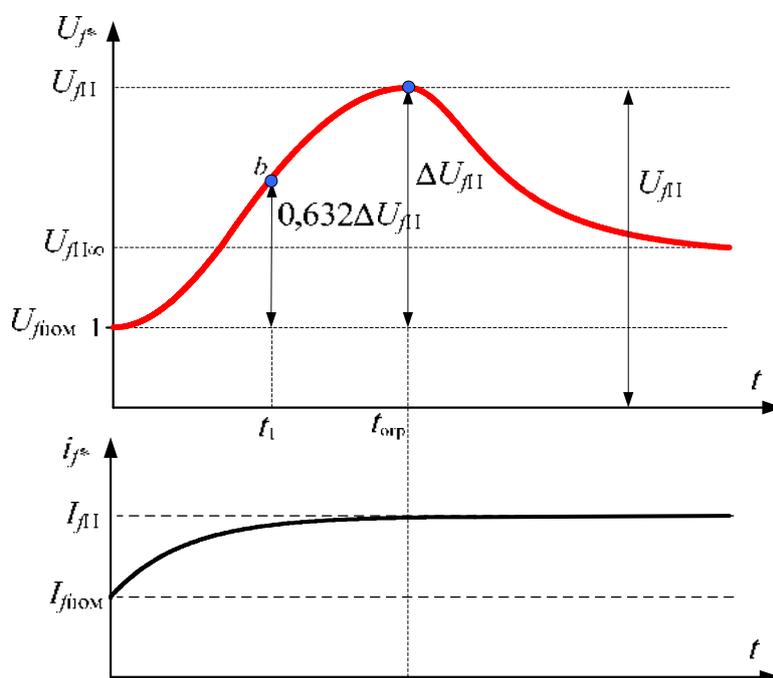


Рис. 2.7. Изменение напряжения и тока возбуждения при форсировке

Ордината точки  $b$  выбирается из условия замены реального процесса экспоненциальным, когда напряжение возбуждения имело бы такое же значение через одну постоянную времени  $T_b = t_1$ .

В соответствии с изложенным количественные характеристики систем возбуждения определяются следующим образом.

### 1. Кратность форсировки возбуждения по напряжению

$$K_{\Phi,U} = \frac{U_{f\Pi}}{U_{fНОМ}},$$

где  $U_{f\Pi}$  – потолочное напряжение СВ,  $U_{fНОМ}$  – номинальное напряжение СВ.

Для современных СВ

$$K_{\Phi,U} = 3 - 4.$$

## 2. Кратность форсировки возбуждения по току

$$K_{\Phi,I} = \frac{I_{f\Pi}}{I_{fНОМ}},$$

где  $I_{f\Pi}$  – потолочный ток СВ,  $I_{fНОМ}$  – номинальный ток СВ.

Для современных СВ

$$K_{\Phi,I} = 2.$$

## 3. Скорость изменения напряжения возбуждения:

$$\nu_f = \frac{0.632\Delta U_{f\Pi}}{t_1 U_{fНОМ}}, \text{ о.е./с.}$$

Так как скорость  $\nu_f$  определяется по точке эквивалентного экспоненциального процесса, то представляется возможным заменить в приближенных исследованиях систему возбуждения инерционным звеном первого порядка с передаточной функцией

$$W_f(p) = \frac{K_f}{1 + T_B p},$$

где  $K_f$  – коэффициент усиления звена, замещающего систему возбуждения,  $T_B$  – постоянная времени звена.

Различные системы возбуждения имеют ориентировочно следующие постоянные времени:

- |   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| 1. Тиристорные                                    | $T_B = 0.02 \div 0.04 \text{ с.}$ |
| 2. Бесщеточная                                    | $T_B = 0.1 \div 0.15 \text{ с.}$  |
| 3. Высокочастотная                                | $T_B = 0.35 \text{ с.}$           |
| 4. Электромашинная с генератором постоянного тока | $T_B = 0.3 \div 0.5 \text{ с.}$   |

### 2.3.1. Общие принципы выполнения устройств АРВ

В зависимости от конкретных требований режимного характера, связанных с энергосистемой, а также в зависимости от типа применяемой системы возбуждения устройства АРВ могут выполняться двух видов:

1. АРВ пропорционального действия;
2. АРВ сильного действия.

Эти два вида АРВ отличаются способом формирования параметра регулирования, который зависит от режима работы генератора, и опре-

деляет действие системы регулирования. В той и другой системе обязательно используются в качестве основного параметра отклонение напряжения от заданного значения  $\Delta U$ . По этому параметру замыкается главная обратная связь устройства АРВ. Отличие этих двух систем в том, что в законе регулирования используется различный состав некоторых дополнительных параметров.

В АРВ ПД может использоваться только отклонение напряжения, либо еще дополнительно ток генератора. В систему регулирования вводятся величины, пропорциональные отклонению напряжения и току статора генератора.

Для АРВ СД характерно следующее: используются большие коэффициенты усиления по каналу отклонения напряжения. Кроме этого, в закон регулирования вводятся величины, пропорциональные производным от некоторых параметров режима.

Функционирование систем АРВ ПД и АРВ СД принципиально отличаются только в переходном режиме. В установившемся режиме их работа подчиняется одинаковым закономерностям.

### 2.3.2. Характеристики генераторов, оборудованных устройством АРВ, в установившихся режимах

Для решения ряда задач управления режимами по напряжению и реактивной мощности важно, чтобы генераторы, оснащенные устройством АРВ, имели определенную внешнюю характеристику, под которой в данном случае понимается зависимость напряжения на выводах генератора от тока статора. Естественная внешняя характеристика нерегулируемого генератора может быть получена по схеме замещения, приведенной на рис. 2.8. Для упрощения схема замещения принята для генератора с неявновыраженными полюсами на роторе ( $X_d = X_q$ ).

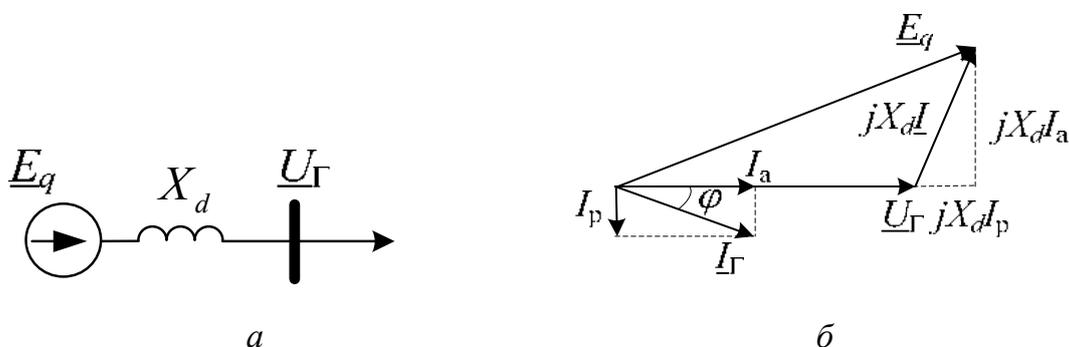


Рис. 2.8.

*a* – схема замещения генератора, *б* – векторная диаграмма

Сопротивление генератора принято чисто индуктивным, так как активная составляющая этого сопротивления у мощных генераторов очень мала. Все электрические величины и сопротивление принимаются для установившегося режима.

Построим векторную диаграмму для стороны переменного тока (рис. 2.8, б), согласно которой

$$E_q = \sqrt{(U_{\Gamma} + X_d I_p)^2 + (X_d I_a)^2}.$$

Из векторной диаграммы видно, что падение напряжения от активной составляющей тока слабо влияет на значение ЭДС, а падение напряжения от реактивной составляющей, наоборот. На этом основании можно принять

$$E_q = U_{\Gamma} + X_d I_p.$$

Отсюда

$$U_{\Gamma} = E_q - X_d I_p. \quad (2.1)$$

Из последнего выражения следует, что при постоянной ЭДС, которая зависит однозначно от тока возбуждения, регулируемая величина изменяется при изменении реактивной составляющей тока, поэтому в задачах установившегося режима по отношению к регулируемой величине  $U_2$  принимают основным возмущающим воздействием реактивную нагрузку генератора. В некоторых случаях возмущающее воздействие  $I_p$  рассматривают через две его составляющие – полный ток генератора и коэффициент мощности ( $I_p = I_{\Gamma} \sin \varphi$ ).

Из выражения (2.1) ясно, что должно быть принято как регулирующее воздействие. Очевидно, что для поддержания  $U_{\Gamma}$  при изменении тока генератора следует изменять  $E_q$ , а это можно сделать за счет изменения тока возбуждения. Связь между ЭДС генератора и током возбуждения называется *характеристикой холостого хода генератора*. Эта характеристика нелинейная из-за насыщения магнитной цепи генератора. Далее зависимость между током возбуждения и ЭДС принимается линейной, что не вносит принципиальных искажений в рассматриваемые процессы. Выражение (2.1) при  $E_q = \text{const}$  и есть внешняя характеристика нерегулируемого генератора (рис. 2.9).

При наличии АРВ изменение напряжения должно, во-первых, изменяться в значительно меньшей степени и, во-вторых, его изменение должно определяться в основном реактивной составляющей тока генератора. Внешние характеристики при этом имеют вид, показанный на рис. 2.10.

Тангенс угла наклона характеристики, определяемый как относительное изменение напряжения к относительному изменению реактивного тока, называется коэффициентом статизма

$$K_C = \frac{\Delta U}{U_{\text{НОМ}}} \frac{I_{\text{НОМ}}}{\Delta I_P}$$

Для спадающей характеристики принимается  $K_C > 0$ , для возрастающей характеристики  $K_C < 0$ . Горизонтальная характеристика при  $K_C = 0$  называется астатической.

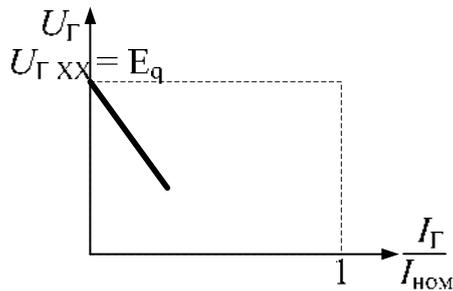


Рис. 2.9. Внешняя характеристика нерегулируемого генератора

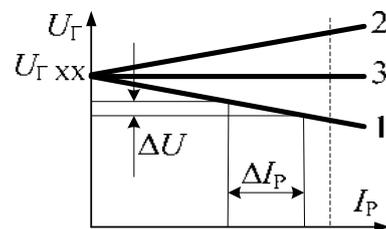


Рис. 2.10. Внешние характеристики регулируемого генератора

Задача получения необходимой внешней характеристики решается тем, что в измерительном органе устройства АРВ к сигналу пропорциональному напряжению генератора добавляется сигнал, пропорциональный реактивному току. Один из возможных вариантов решения задачи иллюстрируется на схеме рис. 2.11.

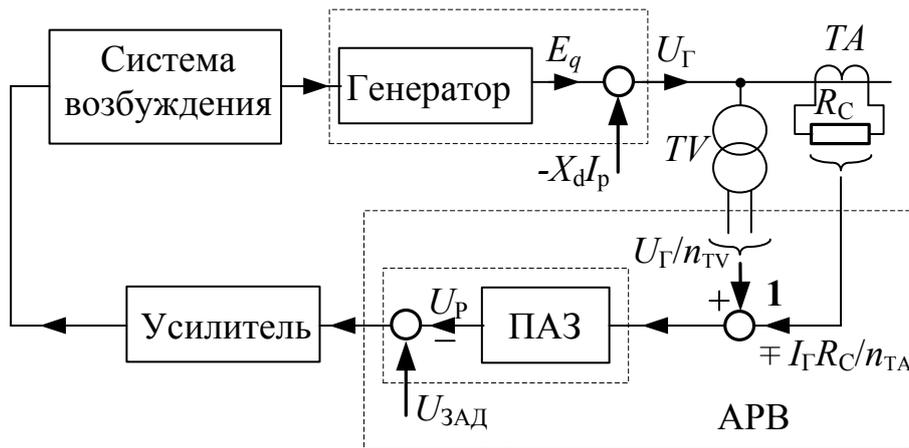


Рис. 2.11. Система автоматического регулирования

На выходе преобразователя абсолютного значения (ПАЗ) формируется электрическая величина, равная

$$U_p = \left| \frac{\dot{U}_\Gamma}{n_{TV}} \pm \frac{\dot{I}_\Gamma R_C}{n_{TA}} \right|,$$

где  $R_C$  – сопротивление резистора в цепи трансформатора тока,  $n_{TV}$  и  $n_{TA}$  – коэффициенты трансформации трансформаторов напряжения и тока.

Для того чтобы коэффициент статизма определялся в основном реактивной составляющей, сочетание фаз токов и напряжений, подводимых к регулятору, принимается следующим

$$\underline{I}_A - \underline{U}_{BC}, \underline{I}_B - \underline{U}_{CA}, \underline{I}_C - \underline{U}_{AB}.$$

Векторная диаграмма для одного из этих сочетаний и векторная диаграмма электрических величин на входе преобразователя абсолютного значения приведены на рис. 2.12.

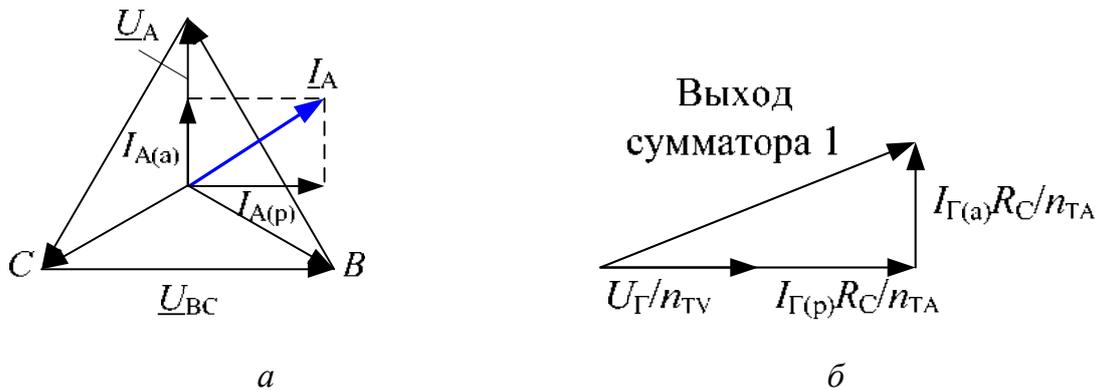


Рис. 2.12. Векторные диаграммы:

а – токов и напряжений, подводимых к регулятору;

б – напряжений на входе преобразователя абсолютного значения

Из векторной диаграммы рис. 2.12, б очевидно, что абсолютное значение сигнала на выходе сумматора существенно зависит от реактивной составляющей тока и слабо зависит от его активной составляющей. Поэтому геометрическую сумму соответствующих величин можно приблизительно заменить алгебраической суммой и учитывать только реактивную составляющую тока.

Поэтому

$$U_p \approx \frac{U_\Gamma}{n_{TV}} \pm \frac{I_p R_C}{n_{TA}} U_p.$$

Теперь для системы автоматического регулирования (рис. 2.11) можно записать следующее уравнение

$$\left[ U_{\text{Зад}} n_{TV} - \left( U_{\Gamma} \pm I_{\text{P}} R_{\text{C}} \frac{n_{TV}}{n_{TA}} \right) \right] K - X_{\text{d}} I_{\text{P}} = U_{\Gamma},$$

где  $K$  – результирующий коэффициент передачи от входа ПАЗ до выхода звена генератора.

Выразив из этого уравнения  $U_{\Gamma}$  и сгруппировав слагаемые, содержащие  $I_{\text{P}}$ , получим

$$U_{\Gamma} = U_{\text{Зад}} n_{TV} \frac{K}{1+K} - I_{\text{P}} \left( X_{\text{d}} \frac{1}{1+K} \pm R_{\text{C}} \frac{n_{TV}}{n_{TA}} \frac{K}{1+K} \right).$$

Коэффициент статизма определяется значением множителя перед  $I_{\text{P}}$  и, как видно, зависит не только от естественного статизма системы, определяемого коэффициентом  $K$ , но и значением сопротивления  $R_{\text{C}}$  и поэтому может регулироваться.

При достаточно большом коэффициенте  $K$

$$\frac{K}{1+K} \approx 1, \quad \frac{1}{1+K} \approx 0.$$

Следовательно

$$U_{\Gamma} = U_{\text{Зад}} n_{TV} \mp I_{\text{P}} R_{\text{C}} \frac{n_{TV}}{n_{TA}}.$$

То есть коэффициент статизма в этом случае фактически определяется только значением  $R_{\text{C}}$ , а его знак зависит от полярности соединения цепей тока и напряжения на входе АРВ.

### 2.3.3. Выполнение устройств АРВ для систем возбуждения различного типа

В настоящее время в эксплуатации находятся устройства АРВ, выполненные на различной элементной базе. Начиная с 40-х – 50-х годов прошлого века в устройствах АРВ широко использовалась электромагнитная техника, в частности, магнитные усилители. До сих пор в эксплуатации находится большое число устройств АРВ, выполненных на базе магнитных усилителей.

По мере развития полупроводниковой элементной базы были разработаны и соответствующие устройства АРВ. В последние годы в технике АРВ, как и в других задачах управления и защиты, начинает широко использоваться микропроцессорная (цифровая) элементная база.

## Устройства АРВ для быстродействующих систем возбуждения (тиристорных и бесщеточных)

На генераторах, оборудованных тиристорными системами возбуждения, в принципе могут применяться, как АРВ ПД, так и АРВ СД. Практически на генераторах, работающих в энергосистеме, целесообразно во всех случаях в сочетании с тиристорной системой возбуждения применять АРВ СД. Во-первых, это позволяет реализовать системный эффект, который дает АРВ СД, а, во-вторых, в устройствах АРВ СД при необходимости может быть реализован и алгоритм АРВ ПД.

**Автоматические регуляторы возбуждения сильного действия.** Как отмечалось выше, АРВ является многофункциональным устройством, поскольку при соответствующем выполнении кроме поддержания напряжения обеспечивает повышение пределов статической устойчивости, а также и повышение динамической устойчивости. АРВ СД по сравнению с АРВ ПД характеризуется следующими свойствами.

1. АРВ СД имеет высокие коэффициенты усиления по основному каналу отклонения напряжения  $\Delta U$  и поэтому обеспечивает поддержание напряжения на выводах генератора с высокой точностью.
2. Кроме основного канала по отклонению напряжения для формирования управляющего воздействия на систему возбуждения используется ряд параметров, характеризующих режим при переходных процессах.

Применение АРВ с большими коэффициентами усиления по каналу напряжения  $\Delta U$  при некоторых сочетаниях схемы и режима примыкающих к генератору линий электропередачи может стать причиной самораскачивания роторов генераторов, то есть привести к нарушению колебательной устойчивости. Устранение самораскачивания достигается правильным выбором состава и интенсивности воздействий, вводимых дополнительно помимо  $\Delta U$ .

Обычно канал по  $\Delta U$  принято называть *основным каналом*, а средства для формирования дополнительных воздействий – *каналами стабилизации*. Естественно, что в качестве параметров стабилизации должны быть приняты такие, которые характеризуют режим работы генератора с точки зрения устойчивости. Естественным было бы использование непосредственно угла  $\delta$ , который характеризует положение ротора генератора относительно, например, вектора напряжения системы.

Для непосредственного измерения угла требуются сложные технические средства, в том числе с использованием телеканалов. Поэтому для формирования каналов стабилизации используются заменяющие величины, которые характеризуют изменение во времени угла и его производных.

Покажем на примере простейшей схемы энергосистемы, в которой эквивалентный генератор через линию электропередачи соединен с системой бесконечной мощности (рис. 2.13)/

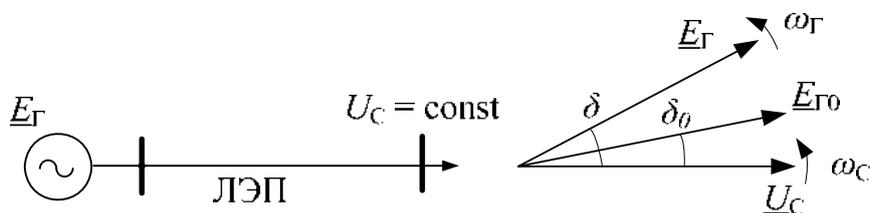


Рис. 2.13. Схема простейшей энергосистемы и ее векторная диаграмма

В общем случае при электромеханическом переходном процессе частота вектора ЭДС генератора  $\omega_G$  не равна частоте вектора напряжения системы  $\omega_C$ . При этом текущее значение угла  $\delta$  определяется следующим образом

$$\delta = \int (\omega_G - \omega_C) dt + \delta_0 = \delta \int \Delta \omega dt + \delta_0,$$

где  $\delta_0$  – начальное значение угла.

Первая и вторая производные угла, то есть скорость и ускорение его изменения, соответственно равны

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega = 2\pi\Delta f, \quad \frac{d^2\delta}{dt^2} = 2\pi \frac{d\Delta f}{dt}.$$

Поэтому в составе каналов стабилизации используется воздействие по отклонению частоты и по первой производной частоты. Кроме этих величин используется первая производная напряжения на выводах генератора и первая производная тока ротора генератора.

Канал по отклонению частоты должен действовать только в переходном режиме, поэтому отклонение частоты формируется не от какого-либо постоянного значения, а от значения в предшествующем установившемся режиме и для этой величины принимается обозначение  $\Delta'f$ . Формирование величины  $\Delta'f$  может быть выполнено с помощью схемы, приведенной на рис. 2.14.

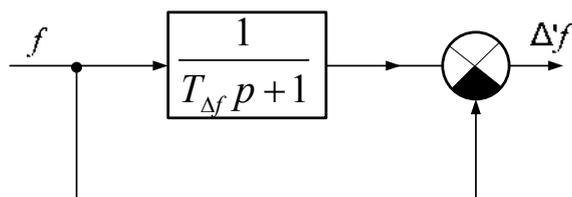


Рис. 2.14. Схема формирования отклонения частоты  $\Delta'f$  в АРВ СД

Текущее значение частоты сравнивается с ее значением на выходе инерционного звена первого порядка

$$\Delta f = \frac{1}{T_{\Delta f} p + 1} \cdot f - f = \frac{T_{\Delta f} p}{T_{\Delta f} p + 1} \cdot f.$$

Схема на рис. 2.14 эквивалентна реальному дифференцирующему звену. Величина, пропорциональная производной частоты  $f'$ , также формируется с помощью дифференцирующего звена с передаточной функцией  $\frac{T_f p}{T_f p + 1}$ .

Различие этих звеньев в том, что постоянная времени  $T_{\Delta f}$  значительно больше постоянной времени  $T_f$ . Таким образом, в целом может использоваться следующий закон формирования регулирующего воздействия в АРВ СД

$$P_{\text{рег}} = K_{0U} \Delta U + (K_{1U} U' + K_{0f} \Delta f + K_{1f} \Delta f' + K_{1if} i_f'). \quad (2.2)$$

где  $K_{0U}$  – коэффициент усиления по основному каналу,  $K_{1U}$  – коэффициент усиления канала по производной напряжения,  $K_{0f}$  – коэффициент усиления канала по отклонению частоты,  $K_{1f}$  – коэффициент усиления канала по производной частоты,  $K_{1if}$  – коэффициент усиления канала по производной тока возбуждения.

Устройства АРВ выпуска до 1983 г., в которых реализован алгоритм по (2.2) выполнены на базе магнитного усилителя, с помощью которого выполняется усиление и суммирование сигналов, формируемых в соответствии с (2.2). В последующие годы было разработано устройство на интегральных микросхемах типа АРВ СДП [22] и несколько вариантов микропроцессорных АРВ, например АРМ-М.

Основное требование, которое предъявляется к элементам регулятора любого исполнения – это обеспечение по возможности малых постоянных времени при формировании сигналов, входящих в состав параметра регулирования. Для улучшения качества переходного процесса системы регулирования, в частности в режимах холостого хода и малых нагрузок по реактивной мощности, в системах АРВ применяются также внутренние (местные) обратные связи. Такой связью, например, является обратная связь по производной тока ротора. Совокупность элементов для формирования воздействия по производной тока ротора и других возможных внутренних (местных) обратных связей принято называть по их назначению стабилизатором внутреннего движения.

Для повышения пределов статической и динамической устойчивости, устранения самораскачивания и улучшения демпфирования син-

хронных качаний используются стабилизирующие воздействия в соответствии с (2.2). Элементы для формирования этих воздействий образуют системный стабилизатор.

Обобщенная функциональная схема регулирования возбуждения генератора приведена на рис. 2.15.

В настоящее время на базе АРВ-М разработан микропроцессорный регулятор ARV-2М [22]. Принципиальной особенностью устройства на микропроцессорной элементной базе является их гибкость в части возможности изменения алгоритма, по которому вырабатываются регулирующие воздействия в зависимости от конкретных условий применения.

Задача регулирования напряжения на выводах генератора с определенным статизмом по реактивному току или по реактивной мощности в таких АРВ решается применением пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) закона. Особенностью здесь является применение интегральной составляющей в законе регулирования. Поэтому результирующий статизм определяется только искусственным введением в систему регулирования составляющей, пропорциональной реактивному току или реактивной мощности, например, как описано в п. 2.3.2.

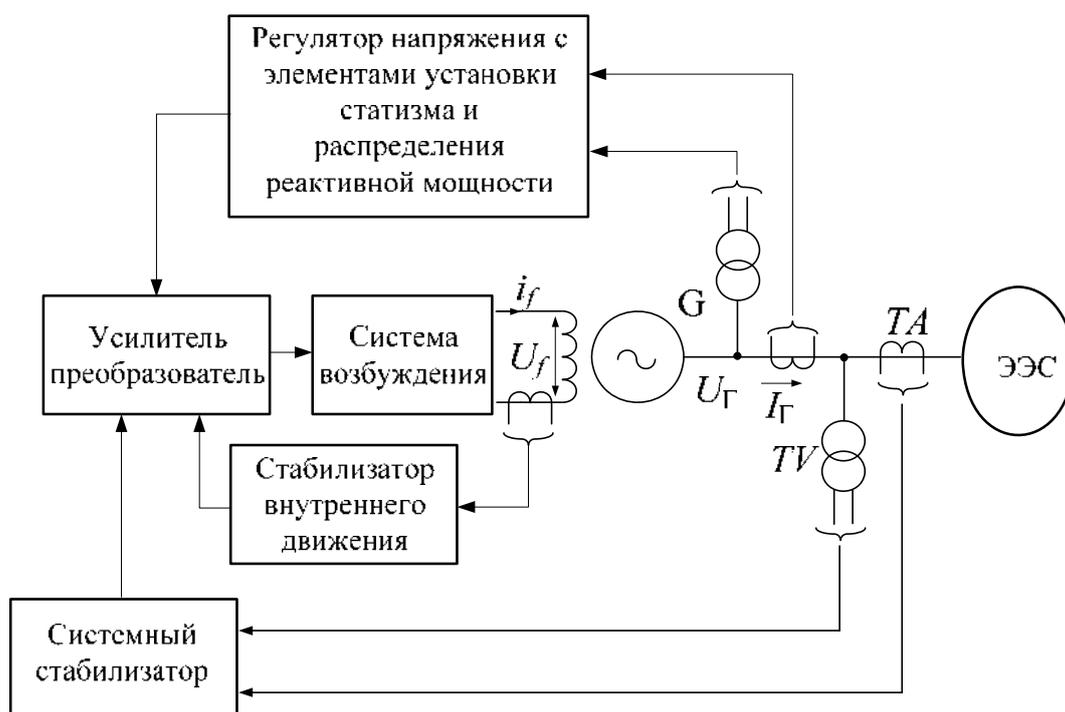


Рис. 2.15. Обобщенная функциональная схема регулирования возбуждения генератора

Кроме основных функций современные устройства АРВ выполняют также еще ряд защитных и технологических функций.

### Основные защитные функции, выполняемые устройствами АРВ:

1. Ограничение тока ротора на двухкратном уровне при форсировке возбуждения. Эта функция реализуется в том случае, когда кратность форсировки по напряжению возбуждения принимается более двух для повышения скорости нарастания тока ротора (рис. 2.7).
2. Ограничение перегрузки по току ротора и статора временем, зависящем от кратности перегрузки по отношению к номинальным значениям.
3. Ограничение потребляемой реактивной мощности на уровне, зависящем от текущей активной мощности, для предотвращения нарушения статической устойчивости и перегрева торцевых зон обмотки статора (в соответствии с диаграммой мощности генератора). Эта задача решается с помощью ограничителя минимального возбуждения (ОМВ), имеющегося в составе АРВ.

Один из возможных алгоритмов ОМВ реализует зависимость минимально допустимой реактивной составляющей от активной составляющей тока статора в следующем виде

$$I_{p \min} = I_{p \min}^{(0)} - KI_a. \quad (2.3)$$

где  $I_{p \min}^{(0)}$  – минимально допустимый реактивный ток статора при  $I_a = 0$  и номинальном напряжении,  $I_a$  – активная составляющая тока статора.

Соотношение (2.3) приближенно отображает то обстоятельство, что допустимая потребляемая реактивная мощность увеличивается при снижении активной мощности генератора.

Коэффициент  $K$  может быть определен по известным значениям допустимой потребляемой реактивной мощности при

$$P_\Gamma = 0 - Q_{\Gamma \text{потр}}^{(\max)} \text{ и } P_\Gamma = P_{\text{ном}} - Q_{\Gamma \text{потр}}^{(\min)}. \quad (2.4)$$

Выразив токи в (2.4) через мощности и напряжения можно получить

$$Q_{\Gamma \text{потр}} = Q_{\Gamma \text{потр}}^{(\max)} \frac{U_\Gamma}{U_{\text{ном}}} - KP_\Gamma. \quad (2.5)$$

При номинальных условиях  $U_\Gamma = U_{\text{ном}}$ ,  $P_\Gamma = P_{\text{ном}}$ , значит

$$K = \frac{Q_{\text{потр}}^{(\max)} - Q_{\text{потр}}^{(\min)}}{P_{\text{ном}}}.$$

4. Ограничение напряжения на выводах генератора для исключения насыщения магнитопровода трансформатора блока с учетом фак-

тического значения частоты, исходя из условия постоянства отношения амплитуды напряжения к частоте. Такой закон ограничения напряжения для этой задачи вытекает из того, что амплитуда индукции в магнитопроводе трансформатора связана с напряжением генератора и частотой следующим образом

$$B_m = \frac{\sqrt{2}U_{\Gamma}}{2\pi fSw}, \quad (2.6)$$

где  $S$  и  $w$  – соответственно площадь поперечного сечения и число витков обмотки низкого напряжения блочного трансформатора.

Как видно для удержания значения индукции на некотором заданном значении, в частности на значении меньшем индукции насыщения, отношение напряжения к частоте должно оставаться постоянным.

Некоторые из основных технологических функций АРВ включают в себя:

1. Выравнивание напряжения генератора с напряжением шин электростанции при включении генератора по способу точной синхронизации,
2. Гашение поля в тиристорных системах возбуждения прямого управления переводом тиристорного преобразователя в инверторный режим, При аварийном отключении генератора гашение поля осуществляется включением АГП с последующим переводом тиристорного преобразователя в инверторный режим.

## **2.4. Устройства АРВ для высокочастотной системы возбуждения и систем возбуждения на основе генераторов постоянного тока**

На большинстве электростанций, где эксплуатируются генераторы с высокочастотной системой возбуждения, используются устройства АРВ на магнитных усилителях. В настоящее время в эксплуатации также находится большое количество систем возбуждения с генератором постоянного тока, в составе которых используются устройства АРВ на электромагнитных элементах, основными из которых являются магнитные усилители. Подробные сведения о магнитных усилителях имеются в [13, 16, 19].

### **2.4.1. Краткие сведения о магнитных усилителях**

Магнитный усилитель (рис. 2.16) состоит из двух одинаковых магнитных сердечников А и Б. На каждом сердечнике имеется по две обмотки: обмотка переменного тока (рабочая обмотка) с числом витков  $W_{\sim}$  и обмотка постоянного тока (обмотка управления) с числом витков  $W_{\text{У}}$ .

Постоянный ток управления  $I_Y$  является усиленным сигналом. Полезная нагрузка усилителя с сопротивлением  $R_H$  включена в цепь рабочих обмоток через двухполупериодный выпрямитель. Обмотки  $W_{\sim}$  и обмотки  $W_Y$  соединены попарно между собой так, что ЭДС основной частоты в обмотках  $W_Y$  взаимно компенсируются.

Основные соотношения, характеризующие свойства магнитного усилителя, можно получить при замене характеристики намагничивания тремя прямыми, как показано на рис. 2.17.

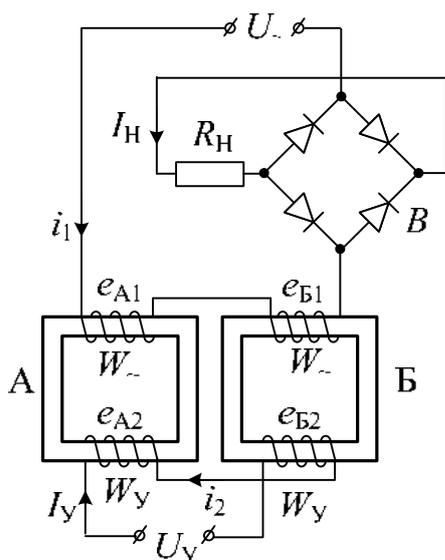


Рис. 2.16. Схема простейшего магнитного усилителя

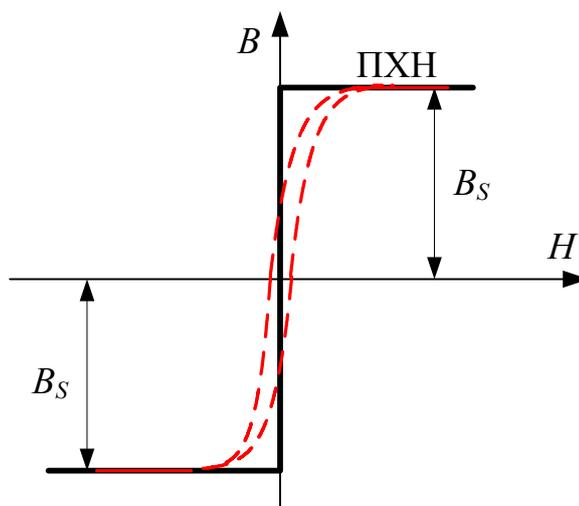


Рис. 2.17. Идеализированная (прямоугольная) характеристика намагничивания

Для принятой идеализированной характеристики магнитная проницаемость на различных участках равна

$$\mu = \frac{dB}{dH} = \infty, \text{ при } |B| < B_S,$$

$$\mu = \frac{dB}{dH} = 0, \text{ при } |B| = B_S.$$

Также примем следующие условия:

- сопротивление к току чётных гармоник, которые наводятся в цепи обмоток  $W_Y$  мало и им можно пренебречь;
- напряжение приложенное к обмоткам  $W_{\sim}$  синусоидально и его амплитуда такова, что амплитуда индукции в сердечниках А и Б при  $I_Y=0$  меньше индукции насыщения

$$U_{\square} = U_m \sin \omega t,$$

$$B_{A\sim} = B_{B\sim} = \frac{1}{2W_{\sim}S} \int U_m \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{2\omega W_{\sim}S} \cos \omega t,$$

$$B_m = \left| \frac{U_m}{2\omega W_{\sim}S} \right| < B_S, \quad (2.7)$$

где  $W_{\sim}$  – число витков обмотки, к которой приложено синусоидальное напряжение,

$S$  – площадь поперечного сечения магнитных сердечников.

Эпюры напряжения  $U_{\sim}$  и индукции в сердечниках при отсутствии постоянного тока в обмотках  $W_Y$  (пунктирная кривая) приведены на рис. 2.18.

При протекании по обмоткам  $W_Y$  постоянного тока в сердечниках А и Б появляется постоянная составляющая индукции с разными знаками по отношению к мгновенным значениям переменной составляющей индукции, поэтому

$$B_A = B_{A\sim} + B_0, \quad (2.8)$$

$$B_B = B_{B\sim} - B_0, \quad (2.9)$$

где  $B_0$  – постоянная составляющая индукции.

Вычтем из (2.8) выражение (2.9) и получим

$$B_A - B_B = 2B_0$$

или

$$B_A = B_B + 2B_0. \quad (2.10)$$

В каждый момент времени индукции в сердечниках отличаются на величину равную  $2B_0$ .

Наличие постоянной составляющей индукции приводит к тому, что в некоторые интервалы времени результирующее значение индукции становится равной  $B_S$  и сердечники входят в состояние насыщения.

Примем, что в начальный момент времени  $t = 0$  соотношения знаков мгновенных значений переменной и постоянной составляющей индукции было таким, что сердечник Б насыщен  $B_B = B_{B0} = B_S$ , а сердечник А ненасыщен и индукция  $B_A = B_{A0}$  (рис. 2.18). при этом в соответствии с формулой (2.10)  $B_{A0} - B_{B0} = 2B_0$ . При изменении напряжения источника питания индукции  $B_A$  и  $B_B$  увеличиваются. Это приводит к тому, что сердечник Б выходит из состояния насыщения, а индукция в сердечнике А изменяется следующим образом

$$B_A = B_{A0} + B_{A\sim} = B_{A0} + \frac{U_m}{2W_{\sim}S} \int_0^t \sin \omega t dt = B_{A0} - B_m \cos \omega t \Big|_0^t = B_{A0} - B_m (1 - \cos \omega t).$$

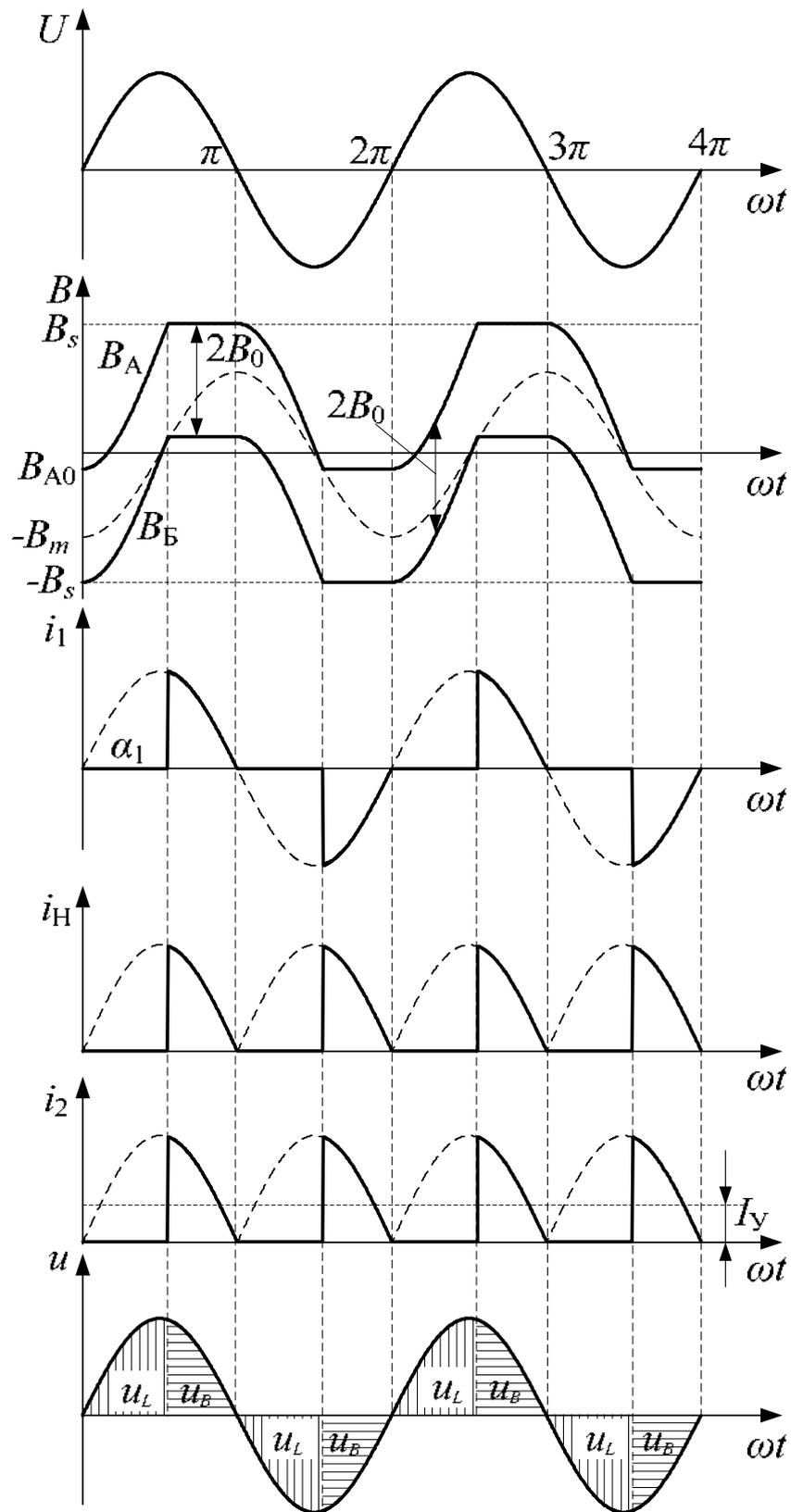


Рис. 2.18. Токи, напряжения и индукции в идеальном усилителе

Индукция  $B_A$  может увеличиваться до тех пор, пока её значение не достигнет индукции насыщения. Момент времени  $t_1$  или угол  $\alpha_1 = \omega t_1$ , при котором насыщается сердечник А, может быть найден из уравнения

$$B_{A0} - B_m(1 - \cos \alpha_1) = B_S. \quad (2.11)$$

Отсюда

$$\cos \alpha_1 = 1 - \frac{B_S - B_{A0}}{B_m}.$$

С момента насыщения сердечника А ( $B_A = B_S$ ) изменение индукции в нём прекращается, поэтому ЭДС, наводимые на его обмотках  $W_{\sim}$  и  $W_Y$  становятся равными нулю ( $e_{A1} = e_{A2} = 0$ ). Так как принято, что сопротивление цепи обмоток управления мало ( $R_Y \approx 0$ ), то обмотка управления  $W_Y$  у ненасыщенного сердечника Б оказывается замкнутой накоротко, вследствие чего ЭДС  $e_{B2} = 0$ . Так как  $e_{B2} = 0$ , то  $B_B = \text{const}$ , а следовательно и ЭДС на обмотке переменного тока  $W_{\sim}$  сердечника Б равна нулю ( $e_{B1} = 0$ ).

Вывод о постоянстве индукции в сердечнике Б в течение времени насыщенного состояния сердечника А можно сделать также из соотношения (2.10), из которого следует, что если  $B_A = B_S = \text{const}$ , то  $B_B = \text{const}$ .

Из приведённого анализа возможных состояний сердечников идеального магнитного усилителя следует, что в промежутки времени, когда оба сердечника не насыщены, индуктивность обмоток равна бесконечности ( $\mu \rightarrow \infty$ ), и токи в обмотках  $W_{\sim}$  и  $W_Y$ , приведенные к одному числу витков, равны. В промежутках времени, когда насыщен хотя бы один из сердечников, индукции в обоих сердечниках постоянны, их индуктивности равны нулю и в обмотках будет протекать ток, ограничиваемый только активными сопротивлениями цепей обмоток.

Эпюры токов в обмотке  $W_{\sim}$ , в нагрузке (выпрямленный ток) и в обмотке  $W_Y$  показаны на рис. 2.18, в, з, д.

В интервалы времени насыщенного состояния одного из сердечников ток в цепи обмоток  $W_{\sim}$  равен

$$i_1 = \frac{U_m \sin \omega t}{R_H + R_B + R_{\sim}}, \quad (2.12)$$

где  $R_H$ ,  $R_B$  и  $R_{\sim}$  – соответственно активные сопротивления нагрузки, выпрямителя в прямом направлении и обмоток  $W_{\sim}$ .

Ток, определяемый по (2.12), протекает в цепи обмоток  $W_{\sim}$  и в нагрузке до тех пор, пока напряжение  $U_{\sim}$  не снизится до 0 при  $\omega t = \pi$ . При  $\omega t > \pi$  знак напряжения  $U_{\sim}$  изменяется, что вызывает уменьшение  $B_A$ . Оба сердечника будут находиться в ненасыщенном состоянии до до-

стижения углом значения  $\alpha_2 = \omega t_2 = \alpha_1 + \pi$ , при котором индукция  $B_B$  станет равной  $B_S$ . В интервале углов  $\alpha_2 \leq \omega t \leq 2\pi$  в цепи обмоток  $W_{\sim}$  будет протекать ток в соответствии с (2.12).

Ток в цепи обмоток управления при принятой идеальной характеристике намагничивания определяется законом полного тока для ненасыщенного сердечника, у которого  $H = 0$ . Поэтому в течении полупериода, когда ненасыщен сердечник Б

$$H_B l_{cp} = i_1 W_{\sim} - i_2 W_y = 0 \text{ или } i_2 = i_1 \frac{W_{\sim}}{W_y} \quad (2.13)$$

В следующем полупериоде, когда ненасыщен сердечник А, имеем

$$H_A l_{cp} = i_1 W_{\sim} + i_2 W_y = 0 \text{ или } i_2 = -i_1 \frac{W_{\sim}}{W_y} \quad (2.14)$$

Как следует из (2.13) и (2.14) из-за взаимно противоположного соединения обмоток  $W_{\sim}$  и  $W_y$  разнополярным импульсам тока  $i_1$  соответствуют однополярные импульсы тока  $i_2$  с такой же формой мгновенных значений, но отличающиеся от тока  $i_1$  в  $\left( \frac{W_{\sim}}{W_y} \right)$  раз.

Так как ток нагрузки – это выпрямленный ток  $i_1$ , то из (2.13) и (2.14) вытекает, что  $|i_1| W_{\sim} = i_H W_{\sim}$ . Отмеченные обстоятельства позволяют вместо двух уравнений намагничивающих сил (2.13) и (2.14) рассматривать одно уравнение

$$i_H W_{\sim} = i_2 W_y. \quad (2.15)$$

Мгновенные значения токов  $i_2$  и  $i_H$  отличаются, только постоянным множителем, поэтому и их постоянные составляющие (средние значения) тоже связаны между собой этим же постоянным множителем. При этом следует учесть, что постоянная составляющая тока  $i_2$ , равная его среднему значению, не может появиться за счёт трансформации тока и обусловлена только усиливаемым сигналом  $I_y$ .

Следовательно, окончательно имеем

$$I_H W_{\sim} = I_y W_y, \quad (2.16)$$

где  $I_H$  – среднее значение тока нагрузки.

Из (2.16) следует, что рассматриваемый магнитный усилитель является усилителем тока с коэффициентом усиления

$$K_I = \frac{I_H}{I_y} = \frac{W_y}{W_{\sim}}. \quad (2.17)$$

Коэффициент усиления по мощности равен отношению мощности, выделяющейся на нагрузке, к мощности, затрачиваемой в цепи управления, которые соответственно равны

$$P_H = I_H^2 R_H, \quad P_Y = I_Y^2 R_Y. \quad (2.18)$$

С учётом (2.18) коэффициент усиления по мощности

$$K_P = \frac{P_H}{P_Y} = K_I^2 \frac{R_H}{R_Y}. \quad (2.19)$$

Далее определим предельные условия, при которых ещё сохраняется линейная зависимость тока нагрузки от тока управления по (2.17). Предельные условия наступают при таком значении постоянной составляющей индукции, когда угол насыщения  $\alpha_1 = 0$  для сердечника А или  $\alpha_2 = \pi$  для сердечника Б.

При любом значении  $\alpha_1$  постоянная составляющая тока нагрузки равна

$$I_H = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\pi} i_H d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\pi} \frac{U_m \sin \omega t}{R_{\Sigma}} dt = \frac{U_m}{\pi R} (1 + \cos \alpha_1) \quad (2.20)$$

При  $\alpha_1 = 0$

$$I_H = I_{H\max} \frac{2U_m}{\pi R_{\Sigma}} = \frac{U_{\text{cp}}}{R_{\Sigma}}, \quad (2.21)$$

где  $U_{\text{cp}} = \frac{2}{\pi} U_m$  – средневыпрямленное значение синусоидального напряжения, приложенного к обмоткам  $W_{\sim}$ .

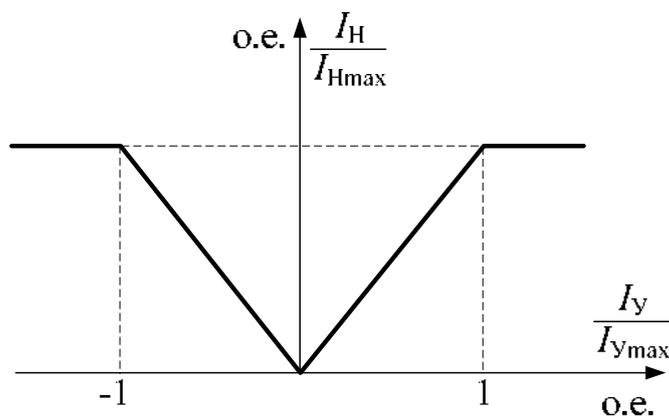


Рис. 2.19. Зависимость тока нагрузки от тока управления у идеального магнитного усилителя

Максимальному значению тока  $I_H$  соответствует ток управления

$$I_y = I_{y_{\text{макс}}} = \frac{U_{\text{ср}}}{R_{\Sigma}} \frac{W_{\sim}}{W_y}. \quad (2.22)$$

При увеличении тока управления сверх значения  $I_{y_{\text{макс}}}$ , ток нагрузки остаётся равным  $I_{H_{\text{макс}}}$ .

На рис. 2.19 показана зависимость тока нагрузки от тока управления у идеального магнитного усилителя для условий, при которых получены соотношения (2.21), (2.22).

### Магнитные усилители с обратной связью

**Магнитный усилитель с внешней обратной связью.** Внешняя обратная связь осуществляется путём включения последовательно в цепь нагрузки обмоток обратной связи  $W_{\text{ос}}$ , которые соединяются согласно с обмоткой управления, как показано на рис. 2.20.

Для идеального магнитного усилителя, рассмотренного выше, влияние обратной связи легко установить, если в уравнения намагничивающих сил (2.13) и (2.14) добавить намагничивающую силу  $i_H W_{\text{ос}}$ .

$$H_A l = i_1 W_{\sim} + (i_2 W_y \pm i_H W_{\text{ос}}) = 0, \quad (2.23)$$

$$H_B l = i_1 W_{\sim} - (i_2 W_y \pm i_H W_{\text{ос}}) = 0. \quad (2.24)$$

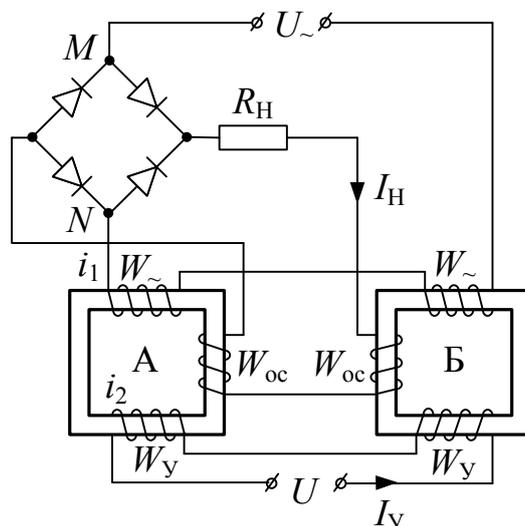


Рис. 2.20. Схема магнитного усилителя с внешней обратной связью

В выражениях (2.23) и (2.24) знак «плюс» соответствует положительной обратной связи, а знак «минус» – отрицательной.

С учётом того, что средневыпрямленное значение тока  $i_1$  и среднее значение тока  $I_H$  равны, из соотношений (2.23) и (2.24) может быть получена связь между средним значением тока нагрузки и током управления для усилителя с внешней обратной связью

$$I_H W_{\sim} = I_y W_y \pm I_H W_{oc}. \quad (2.25)$$

Из (2.25) коэффициент усиления по току

$$K_{loc} = \frac{I_H}{I_y} = \frac{W_y}{W_{\sim} \mp W_{oc}}. \quad (2.26)$$

Следует обратить внимание, что в выражении (2.26) знак «минус» соответствует положительной обратной связи, а знак «плюс» – отрицательной обратной связи.

Выражение для коэффициента усиления по току принято представлять следующим образом

$$K_{loc} = K_I \frac{1}{1 \mp K_{oc}}, \quad (2.27)$$

где  $K_{oc} = \frac{W_{oc}}{W_{\sim}}$  – коэффициент обратной связи.

На рис. 2.21 приведена зависимость тока нагрузки от тока управления для идеального магнитного усилителя с обратной связью. При построении этой зависимости учтено, что при изменении направления (знака) тока управления изменяется характер обратной связи. Это следует из (2.25).

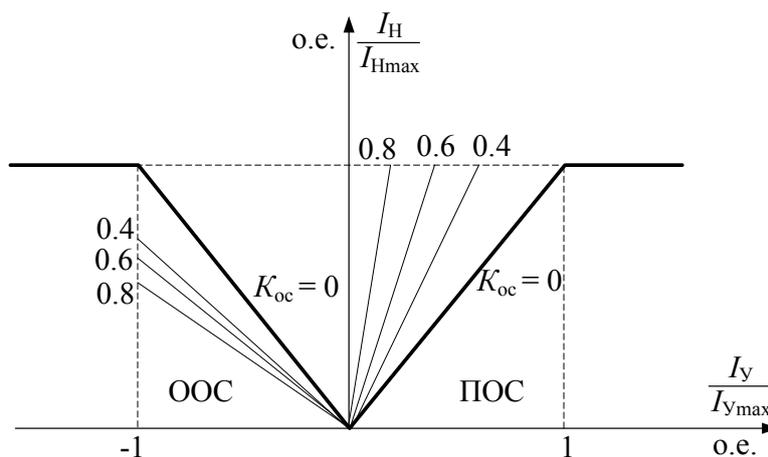


Рис. 2.21. Характеристика идеального магнитного усилителя с внешней обратной связью при различных коэффициентах обратной связи: ООС – отрицательная обратная связь, ПОС – положительная обратная связь

Характеристики усилителей, выполненных на магнитных сердечниках с реальными характеристиками, отличаются от характеристик идеальных магнитных усилителей, приведённых на рис. 2.21. Наиболее существенное и важное практическое отличие реальных магнитных усилителей от идеальных – наличие некоторого тока нагрузки при  $I_y = 0$ . Этот ток принято называть током холостого хода ( $I_{XX}$ ).

Вид характеристик реального магнитного усилителя с обратной связью приведён на рис. 2.22. Особенно важно обратить внимание на рост тока холостого хода при увеличении коэффициента обратной связи.

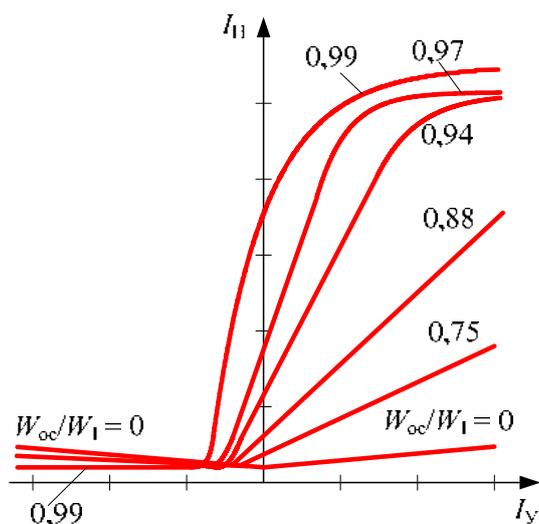


Рис. 2.22. Характеристика реального магнитного усилителя с внешней обратной связью

**Магнитные усилители с внутренней обратной связью.** Магнитные усилители с внутренней обратной связью, называемые также усилителями с самонасыщением, получили широкое применение на практике (рис. 2.23).

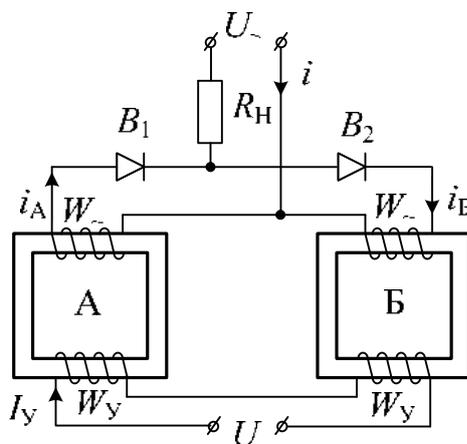


Рис. 2.23. Схема усилителя с внутренней обратной связью

Диоды в цепи обмоток переменного тока включены так, что ток по обмотке сердечника А может протекать в течение положительного полупериода, а по обмотке сердечника Б – в течение отрицательного полупериода. В нагрузке усилителя по схеме рис. 2.23 протекает переменный ток.

Эпюры электрических и магнитных величин одного из сердечников приведены на рис. 2.24 при допущении, что характеристика намагничивания принята в виде, показанном на рис. 2.25.

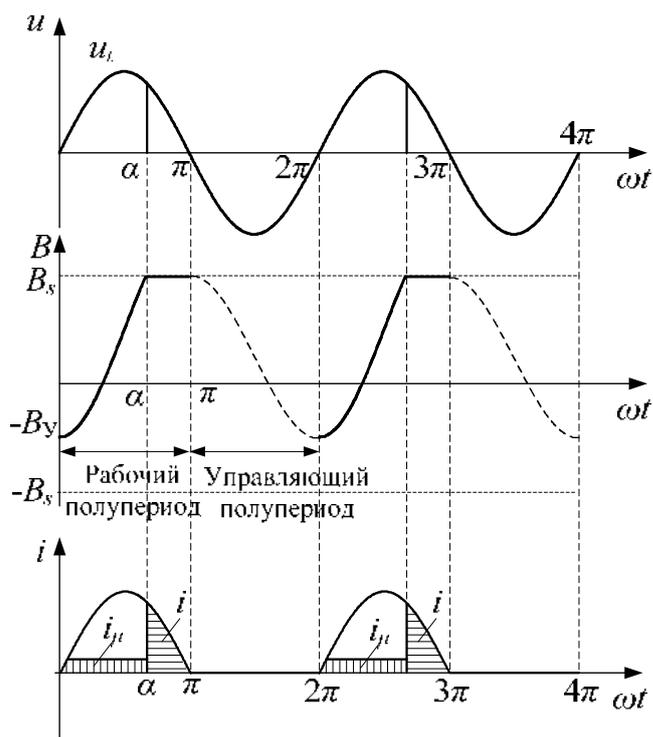


Рис. 2.24. Эпюры магнитных и электрических величин

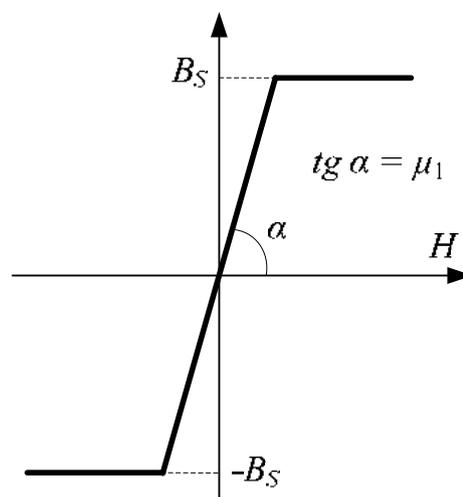


Рис. 2.25. Характеристика намагничивания

При такой характеристике, в отличие от идеальной по рис. 2.17, магнитная проницаемость  $\mu_1 = \frac{dB}{dH}$  при  $B < B_s$  не равна бесконечности. При рассмотрении процессов в магнитном усилителе с внутренней обратной связью принято полупериод, при котором диод открыт, называть рабочим полупериодом, а полупериод, когда диод закрыт – управляющим.

Допустим, что к началу рабочего полупериода под действием тока управления в сердечнике установилась индукция  $B_y < B_s$ . В рабочем полупериоде питающее напряжение приложено сначала к рабочей обмотке  $W_p$  и вызывает изменение индукции от начального значения  $B_y$ , до индукции насыщения  $B_s$ . При этом в рабочей обмотке и нагрузке протекает

небольшой намагничивающий ток  $i_\mu$ . При  $\omega t = \alpha$  сердечник насыщается и напряжение оказывается приложенным к нагрузке, через которую теперь протекает относительно большой ток  $i = \frac{U}{R}$  до конца рабочего полупериода. При  $\omega t = \pi$  изменяется полярность питающего напряжения, диод запирает цепь нагрузки и наступает очередной управляющий полупериод, в течение которого индукция под действием сигнала изменяется от  $B_S$  до своего исходного значения  $B_Y$ . Затем снова наступает рабочий полупериод и т. д. При отсутствии сигнала на входе усилителя индукция сердечника может только увеличиваться и, в конечном счете, за несколько рабочих полупериодов достигает значения индукции насыщения, и ток на выходе усилителя достигает своего максимального значения.

Для уменьшения тока на выходе усилителя необходимо подать «отрицательный» размагничивающий сигнал  $I_Y$  на его вход. Зависимость между током управления и средним значением тока на выходе усилителя имеет вид, показанный на рис. 2.26.

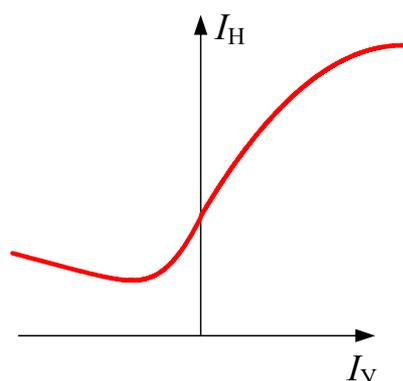


Рис. 2.26. Зависимость между током управления и средним значением тока на выходе усилителя

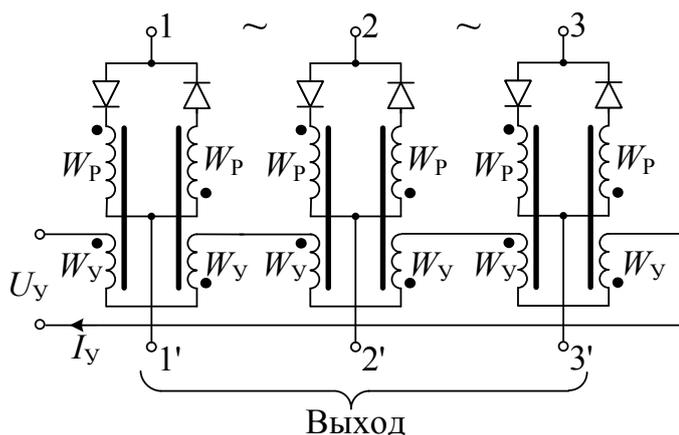


Рис. 2.27. Схема трёхфазного магнитного усилителя с внутренней обратной связью

В технических устройствах и в частности в устройствах АРВ часто используется трёхфазные магнитные усилители. Схема трёхфазного магнитного усилителя с внутренней обратной связью показана на рис. 2.27.

#### 2.4.2. Устройства АРВ для высокочастотной системы возбуждения

**Выполнение измерительного органа напряжения в электромагнитных АРВ.** Практически во всех электромагнитных АРВ измерительный орган напряжения выполняется на базе совмещения характери-

стик линейных и нелинейных элементов с помощью двух обмоток управления магнитного усилителя (рис. 2.28).

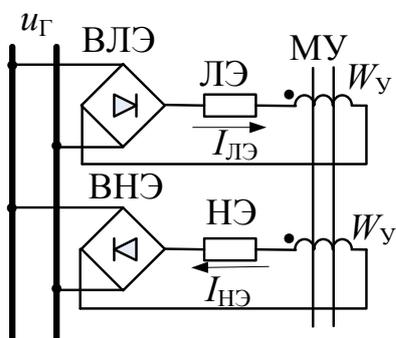


Рис. 2.28. Упрощенная принципиальная схема измерительного органа

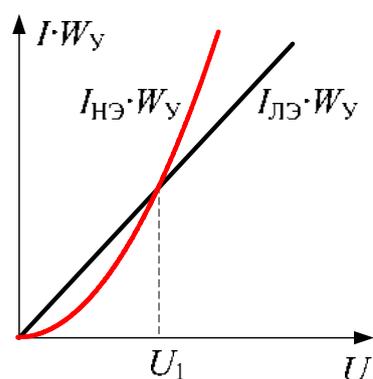


Рис. 2.29. Зависимость намагничивающих сил, создаваемых токами в цепи линейного ЛЭ и нелинейного НЭ элементов

Две одинаковые обмотки управления с числом витков  $W_y$  включены в цепи, содержащие выпрямители и элементы с линейной (ЛЭ) и нелинейной (НЭ) вольтамперной характеристикой. В свою очередь они питаются от вторичных цепей трансформатора напряжения генератора. Токи в обмотках управления имеют противоположные направления. Зависимость намагничивающих сил, создаваемых токами в цепи линейного ЛЭ и нелинейного НЭ элементов приведены на рис. 2.29.

Результирующая намагничивающая сила обмоток управления равна

$$(I \cdot W)_{\text{рез}} = I_{\text{ЛЭ}} W_y - I_{\text{НЭ}} W_y$$

и удовлетворяет условиям:

- при  $U_{\sim} < U_1 (I \cdot W)_{\text{рез}} > 0$ ;
- при  $U_{\sim} > U_1 (I \cdot W)_{\text{рез}} < 0$ ;
- при  $U_{\sim} = U_1 (I \cdot W)_{\text{рез}} = 0$ .

Таким образом, данная схема позволяет зафиксировать отклонение напряжения от некоторого заданного значения и определить знак этого отклонения.

Практически реализованная в панели АРВ типа ЭПА-325Б схема измерительного органа, в которой используется принцип совмещения характеристик линейного и нелинейного элементов, приведена на рис. 2.30.

Роль нелинейного элемента в этой схеме играет ветвь намагничивания трансформатора ТИ, параметры которого выбраны так, что его магнитопровод насыщается при напряжении, близком к номинальному. Выпрямитель нелинейного элемента (ВНЭ) включен последовательно



В составе измерительного органа также имеется установочный автотрансформатор (УАТ) для изменения заданного значения напряжения (уставки АРВ), а также элементы для установки статизма (резисторы  $R$  и трансформатор ТП1). Трансформатор ТП2 с выпрямителем ВОН образует источник опорного напряжения, который служит для того, чтобы при глубоких снижениях напряжения, например, при близких КЗ, токи управления магнитных усилителей обеспечивали режим форсировки возбуждения. При напряжениях, близких к номинальному, напряжение на выходе выпрямителя ВЛЭ выше опорного и поэтому выпрямитель ВОН заперт. При глубоких снижениях напряжения запирается выпрямитель ВЛЭ, и ток управления определяется источником опорного напряжения.

Силовые органы рабочего и форсировочного каналов (рис. 2.5) выполнены на базе трехфазных магнитных усилителей с внутренней обратной связью. Ток выхода магнитного усилителя рабочего канала, протекающий по обмотке возбуждения  $LGE_2$ , создает намагничивающую силу, противоположную намагничивающей силе обмотки самовозбуждения  $LGE$ , которая в отсутствии регулирования превышает значение, необходимое для поддержания напряжения генератора в рабочих режимах.

Направление тока в обмотке управления магнитного усилителя рабочего канала принимается таким, что он работает в зоне положительной обратной связи, когда ток нелинейного элемента измерительного органа превышает ток линейного элемента.

Выходной ток магнитного усилителя форсировочного канала, протекающий по обмотке возбуждения  $LGE_1$ , наоборот создает намагничивающую силу, совпадающую с намагничивающей силой обмотки самовозбуждения и работает в зоне положительной обратной связи, когда ток линейного элемента измерительного органа превышает ток нелинейного элемента.

Ток управления от линейного элемента в магнитных усилителях рабочего и форсировочного каналов может регулироваться независимо, что дает возможность установить диапазоны напряжений, при которых они выполняют необходимые функции. Это иллюстрируется на рис. 2.31.

Положение характеристик токов от линейного элемента устанавливается таким, что рабочий канал обеспечивает регулирование в диапазоне небольших отклонений напряжения от заданного значения. При выходе за пределы этого диапазона в сторону снижения ток от рабочего канала снижается, а ток от форсировочного канала резко увеличивается до своего максимального значения. Результирующая намагничивающая сила обмоток возбуждения при этом также увеличивается, что обеспечивает эффективную форсировку возбуждения генератора, в том числе и за счет роста тока в обмотке самовозбуждения, которая создает эффект положительной обратной связи.

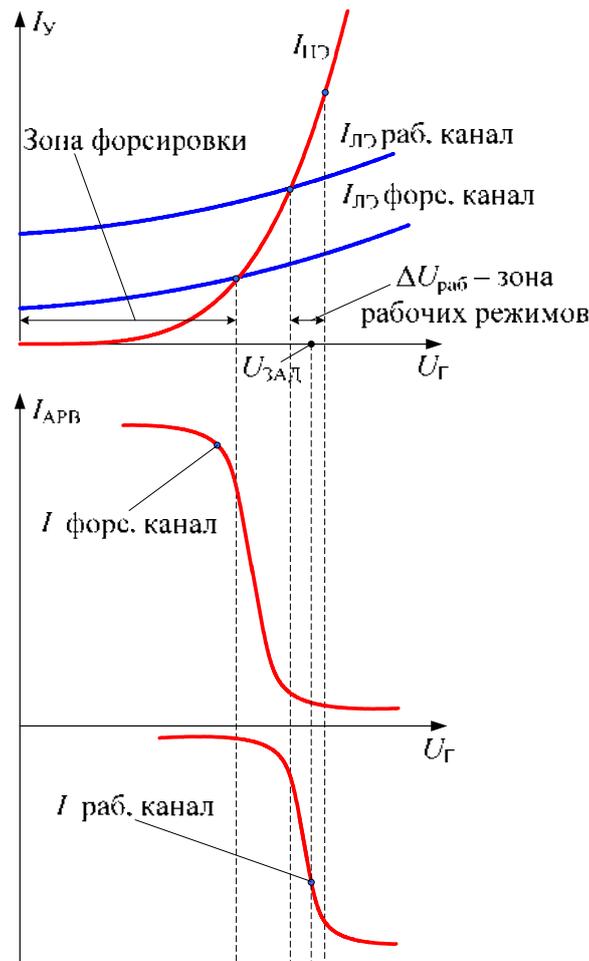


Рис. 2.31. Изменение тока управления и тока АРВ

Для обеспечения устойчивости и улучшения качественных показателей переходного процесса регулирования в устройстве АРВ применены местная гибкая обратная связь от напряжения ротора на вход магнитных усилителей рабочего и форсировочного канала и жесткая обратная связь, охватывающая магнитный усилитель рабочего канала.

Имеются также элементы для выполнения защитных и технологических функций, ограничение тока ротора при форсировке, ограничение минимального возбуждения, защита от перегрузки основных силовых выпрямителей.

На основе применения современной элементной базы в последние годы выполнена радикальная реконструкция высокочастотной системы возбуждения, которая позволила повысить ее надежность и довести характеристики практически до уровня современных тиристорных систем возбуждения с регуляторами сильного действия. Упрощенная принципиальная схема реконструированной высокочастотной системы возбуждения приведена на рис. 2.32.



нию и регулятор по отклонению регулируемой величины (напряжения). В данном конкретном применении регулятор по возмущению принято называть устройством компаундирования.

Основную нагрузку по поддержанию напряжения при изменении тока генератора несет устройство компаундирования, а регулятор по отклонению напряжения обеспечивает устранение остаточных отклонений, поэтому последний в данном случае называют корректором напряжения.

В зависимости от используемых возмущающих воздействий различают два вида устройств компаундирования:

- компаундирование полным током, когда для создания регулирующего воздействия используется только абсолютная величина тока генератора,
- фазовое компаундирование, когда для формирования регулирующего воздействия используется абсолютная величина тока генератора с учетом изменения коэффициента мощности нагрузки генератора.

Упрощенная схема устройства компаундирования полным током приведена на рис. 2.33.

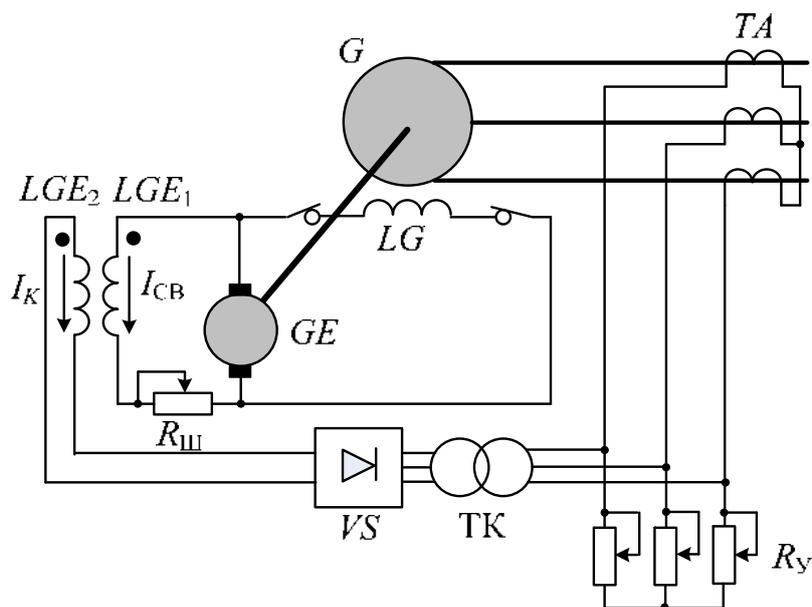


Рис. 2.33. Упрощенная схема устройства компаундирования полным током

Напряжение на установочных резисторах  $R_y$ , пропорциональное току генератора, подается через согласующий трансформатор ТК и выпрямитель VS на одну из обмоток возбуждения генератора постоянного тока. Выпрямленный ток от устройства компаундирования  $I_k$  создает намагничивающую силу того же направления, что и ток  $I_{св}$  в обмотке самовозбуждения.

Рассмотрим приближенно внешние характеристики генератора с устройством компаундирования, приняв допущение о том, что все элементы схемы имеют линейные характеристики. При таком допущении за счет устройства компаундирования создается дополнительная составляющая ЭДС генератора, пропорциональная току генератора  $E_{qK} = K_K I_G$ , а полная ЭДС будет равна  $E_{qXX} + E_{qK}$ , где  $E_{qXX}$  – ЭДС генератора при  $I_G = 0$ .

Если пренебречь также падением напряжения от активной составляющей тока генератора на соотношение абсолютных значений ЭДС и напряжения генератора (см. (2.1)), то получим

$$U_G = E_{qXX} - I_G(X_d \sin \varphi - K_K). \quad (2.28)$$

Как видно, составляющая, вызывающая изменение напряжения, при прочих равных условиях уменьшается. При некотором постоянном значении угла  $\varphi$ , например, при  $\varphi = \varphi_{ном}$ , можно так подобрать параметры устройства компаундирования, что при принятых допущениях напряжение генератора не будет зависеть от тока генератора. В действительности угол  $\varphi$  не остается постоянным, и поэтому напряжение при одном и то же значении тока зависит от коэффициента мощности нагрузки. На рис. 2.34 приведен вид внешних характеристик генератора при таких условиях.

Вид внешних характеристик, полученных при учете влияния нелинейности характеристики холостого хода активной составляющей тока и выборе коэффициента  $K_K$  таким образом, чтобы при  $I_G = I_{Гном}$ ,  $U_G = U_{Гном}$ , представлены на рис. 2.35.

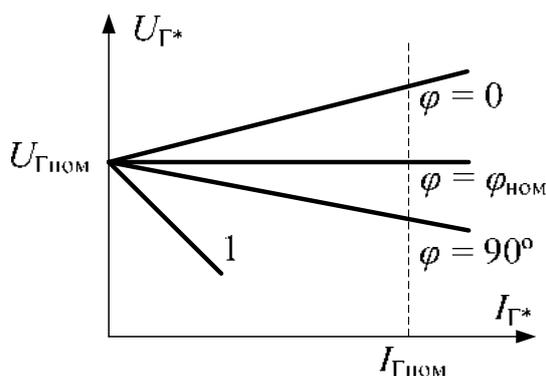


Рис. 2.34. Внешние характеристики генератора

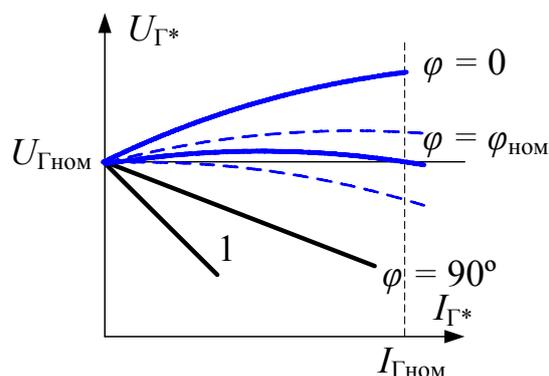


Рис. 2.35. Внешние характеристики генератора, полученные при учете влияния активной составляющей тока

На рис. 2.34 и 2.35 цифрой 1 обозначена характеристика без учета устройства компаундирования при  $\varphi = \varphi_{ном}$ . Как видно при использова-

нии компаундирования полным током остается существенная зависимость напряжения от коэффициента мощности нагрузки генератора. Этот недостаток устройства компаундирования полным током в значительной степени устраняется при применении устройства фазового компаундирования. Упрощенная схема одного из вариантов выполнения устройства фазового компаундирования приведена на рис. 2.36.

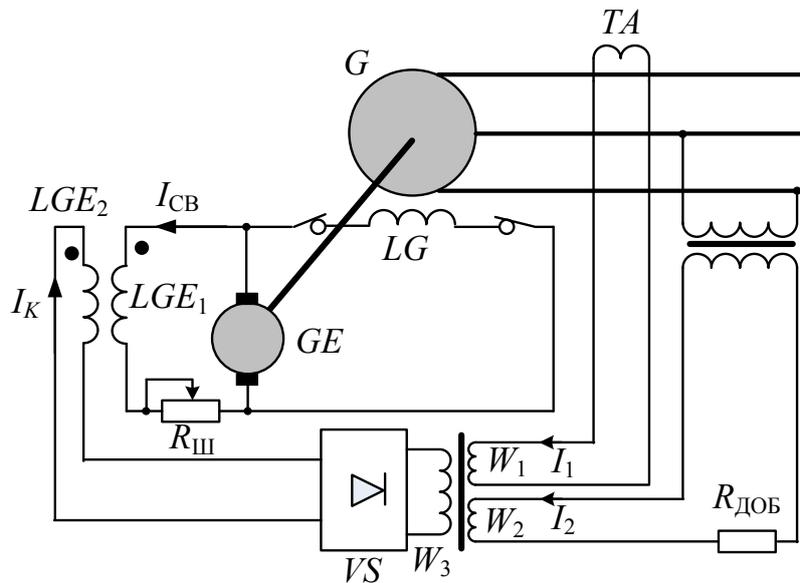


Рис. 2.36. Упрощенная схема одного из вариантов выполнения устройства фазового компаундирования

Основным элементом этой схемы является трехобмоточный трансформатор компаундирования ТК. По первичным обмоткам  $W_1$ ,  $W_2$  этого трансформатора протекают токи  $I_1$  и  $I_2$ , пропорциональные соответственно току генератора и напряжению генератора.

В данном варианте выполнения устройства требуется вполне определенное сочетание подводимых к устройству фаз токов и напряжения – по отношению к используемому фазному току используется линейное напряжение двух других фаз. Для пояснения принципа действия примем сочетание: ток  $I_A$ , напряжение  $U_{BC}$ . При этом  $I_1 = I_A/n_{TA}$ ,  $I_2 = U_{BC}/(n_{TV}R_{доб})$ .

Уравнение намагничивающих сил трансформатора ТК без учета тока намагничивания

$$I_1 W_1 + I_2 W_2 = I_3 W_3,$$

откуда

$$I_3 = \left| \frac{W_1 I_1 + W_2 I_2}{W_3} \right|. \quad (2.29)$$

Выходной выпрямленный ток устройства компаундирования  $I_K = \beta I_3$ , где  $\beta$  – коэффициент, связывающий среднее значение выпрямленного тока с действующим значением переменного тока.

На основании (2.29) получим

$$W_3 I_3 = \sqrt{\left( (W_2 I_2 + W_1 I_1) \sin \varphi \right)^2 + \left( W_1 I_1 \cos \varphi \right)^2}.$$

С учетом принятого сочетания фаз тока и напряжения подводимого к устройству поясняющие векторные диаграммы приведены на рис. 2.37.

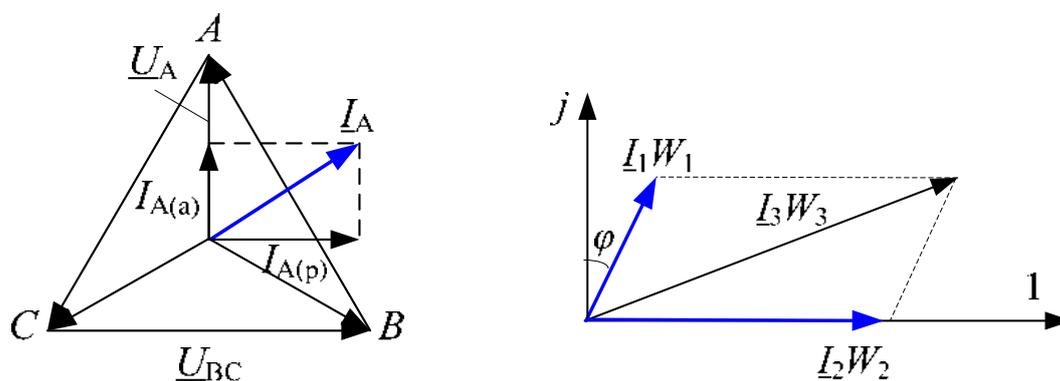


Рис. 2.37. Векторная диаграмма намагничивающих сил обмоток трансформатора

При изменении угла  $\varphi$  изменяется и  $I_3 W_3$ , а следовательно и ток  $I_K$  в таком направлении, что внешние характеристики сближаются. При  $I_T = \text{const}$  величина  $I_3 W_3$ , а следовательно и ток  $I_K$  имеет максимальное значение при  $\varphi = 90^\circ$  и минимальное при  $\varphi = 0$ . Это приводит к тому, что внешние характеристики при изменении угла  $\varphi$  сближаются (пунктирные характеристики на рис. 2.35).

В рассмотренных схемах устройство компаундирования подключается к отдельной обмотке возбуждения возбудителя ( $LGE_2$ ). При отсутствии свободной обмотки возбуждения устройство компаундирования может подключаться к обмотке самовозбуждения ( $LGE_1$ ). В этом случае ток компаундирования начинает протекать только начиная с некоторого значения тока генератора  $I_{\text{ПОР}}$ , при котором амплитуда переменного напряжения, приложенного к выпрямителю  $VS$  станет больше постоянного напряжения на обмотке самовозбуждения. В результате этого на внешних характеристиках появляется порог компаундирования, что иллюстрируется на рис. 2.38.

Как отмечалось выше, устройство компаундирования дополняется регулятором по отклонению напряжения (корректором напряжения).

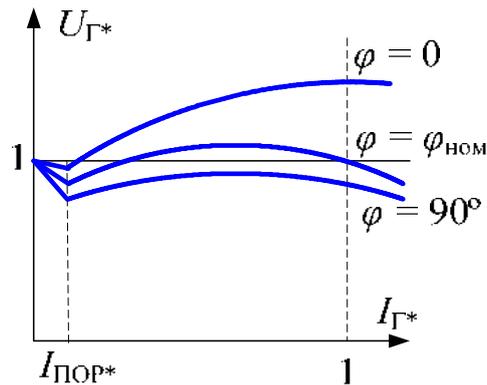


Рис. 2.38. Внешние характеристики генератора с порогом компаундирования

Системы возбуждения на базе генератора постоянного тока, находящиеся в настоящее время в эксплуатации, как правило, снабжены корректорами напряжения, выполненными на базе магнитных усилителей. Измерительный орган напряжения корректоров выполняется, также как и в электромагнитных регуляторах высокочастотных систем, а именно, на базе совмещения характеристик линейного и нелинейного элементов. В электромагнитных корректорах напряжения используются магнитные усилители с внешней обратной связью (рис. 2.39).

В зависимости от способа подключения корректора к обмоткам возбуждения возбудителя и в зависимости от соединений обмоток магнитных усилителей различают три вида электромагнитных корректоров:

- 1) корректор согласованного включения,
- 2) противовключенный корректор,
- 3) двухсистемный корректор.

На рис. 2.39 приведена схема регулятора согласованного включения, для которого характерно следующее:

- намагничивающая сила обмотки возбуждения  $LGE_2$  совпадает по направлению с намагничивающей силой обмотки самовозбуждения  $LGE_1$  и поэтому результирующая намагничивающая сила возбуждения возбудителя равна

$$(I \cdot W)_{\text{рез.возб.}} = I_{\text{СВ}} W_{LGE1} + I_{\text{АПВ}} W_{LGE2},$$

- намагничивающая сила обмотки управления магнитного усилителя в цепи линейного элемента совпадает по направлению с намагничивающей силой обмотки обратной связи. Поэтому результирующая намагничивающая сила всех обмоток магнитного усилителя, по которым протекает постоянный ток, равна

$$(I \cdot W)_{\text{рез.}} = I_{\text{ЛЭ}} W_{\text{У}} + I_{\text{АПВ}} W_{\text{ОС}}.$$

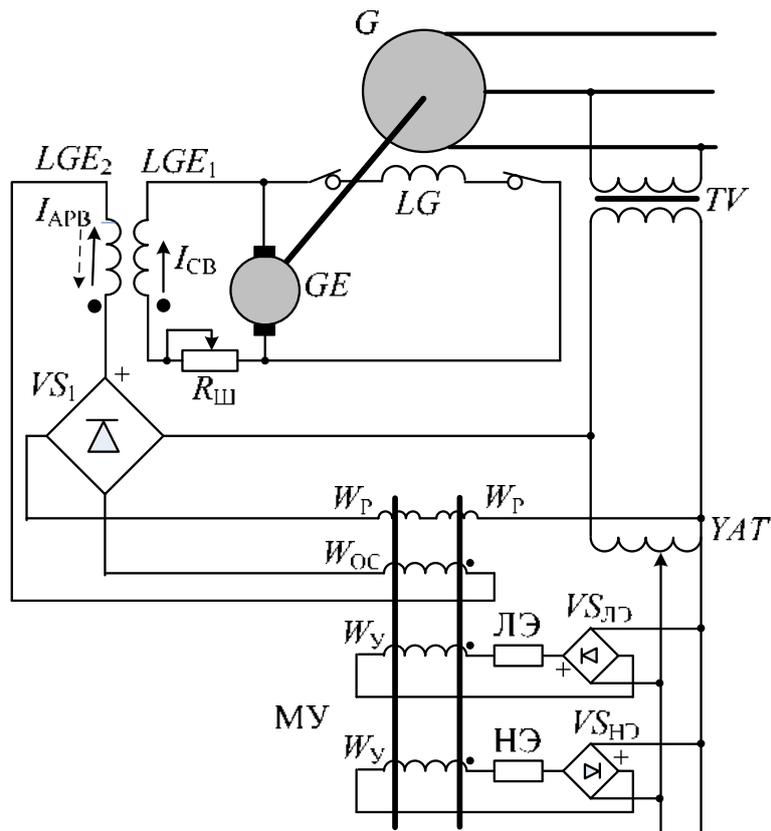


Рис. 2.39. Схема регулятора согласованного включения

На рис. 2.40 построены токи выхода согласованного корректора от напряжения генератора совместно с характеристиками токов линейного и нелинейного элементов измерительного органа.

При принятых в согласованном корректоре направлениях токов в обмотках в зоне значений напряжений, где  $I_{ЛЭ} > I_{НЭ}$  в магнитном усилителе имеет место положительная обратная связь и ток  $I_{АРВ}$  изменяется с большой крутизной.

В зоне значений напряжений  $U_{Г} > U_1$  ток  $I_{АРВ}$  увеличивается, но со значительно меньшей крутизной, так как при этом обратная связь в магнитном усилителе становится отрицательной. Рабочий диапазон напряжений, в пределах которого корректор согласованного включения работает правильно, то есть при снижении напряжения  $(I \cdot W)_{рез.возб.}$  увеличивается, соответствует участку а-б.

Согласованный регулятор имеет тот недостаток, что при повышении напряжения более  $U_1$  он вместо снижения возбуждения в некоторой степени его повышает. Поэтому согласованный регулятор не рекомендуется применять на гидрогенераторах, у которых при сбросе нагрузки

возможно значительное увеличение частоты вращения и вследствие этого значительное повышение напряжения.

Противовключенный корректор имеет такую же схему как и согласованный за исключением изменения полярности включения выпрямителя  $VS_1$ . При этом имеют место следующие условия.

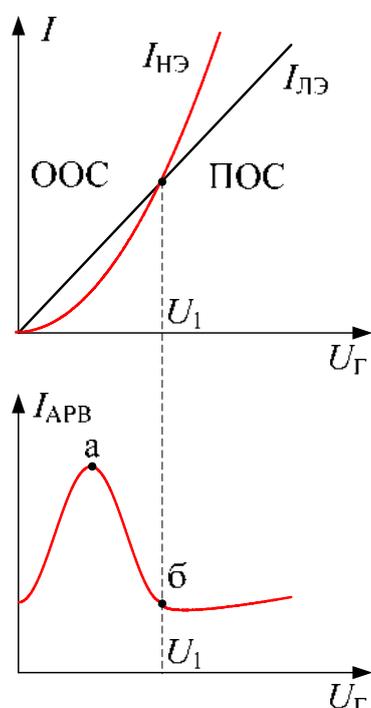


Рис. 2.40. Токи линейного и нелинейного элементов измерительного органа и выходной ток согласованного корректора

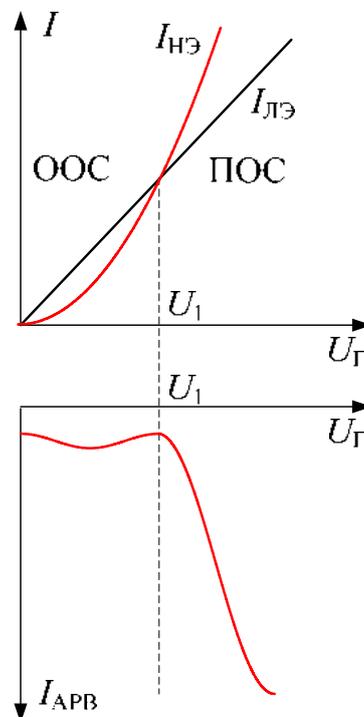


Рис. 2.41. Зависимость тока  $I_{АРВ}$  от напряжения генератора для противовключенного корректора

1. Намагничивающая сила в обмотке возбуждателя  $LGE_2$  противоположна намагничивающей силе в обмотке самовозбуждения

$$(I \cdot W)_{рез.возб.} = I_{СВ} W_{LGE1} - I_{АРВ} W_{LGE2}.$$

2. Намагничивающая сила, создаваемая током нелинейного элемента, совпадает по направлению с намагничивающей силой обмотки обратной связи

$$(I \cdot W)_{рез.} = I_{ЛЭ} W_{У} - I_{НЭ} W_{У} - I_{АРВ} W_{ОС}.$$

В этом случае в зоне значений напряжения, когда  $I_{НЭ} > I_{ЛЭ}$  в магнитном усилителе имеет место положительная обратная связь, а при  $I_{НЭ} < I_{ЛЭ}$  – отрицательная. Зависимость тока  $I_{АРВ}$  от напряжения генератора для противовключенного корректора приведена на рис. 2.41.

Рабочий диапазон правильной работы противовключенного корректора соответствует значениям напряжения  $U_{\Gamma} > U_1$ .

Двухсистемный корректор получается простым сочетанием согласованного и противовключенного корректоров, каждый из которых действует на свою обмотку возбуждения генератора постоянного тока, как показано на рис. 2.42. Зависимость суммарной намагничивающей силы, создаваемой токами двух корректоров, приведена на рис. 2.43.

Известно несколько вариантов технического исполнения устройств компаундирования с электромагнитными корректорами напряжения. В одном из них, называемым управляемым фазовым компаундированием, в качестве согласующего и суммирующего трансформатора устройства компаундирования применен трансформатор с подмагничиванием постоянным током. Этот трансформатор также выполняет функции основного управляемого элемента корректора напряжения.

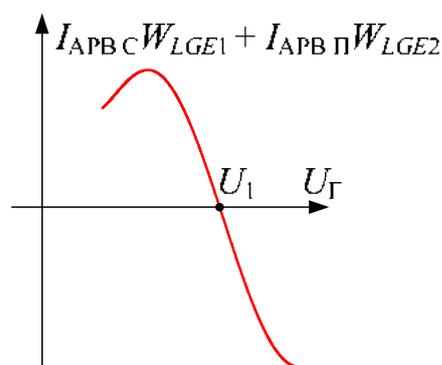
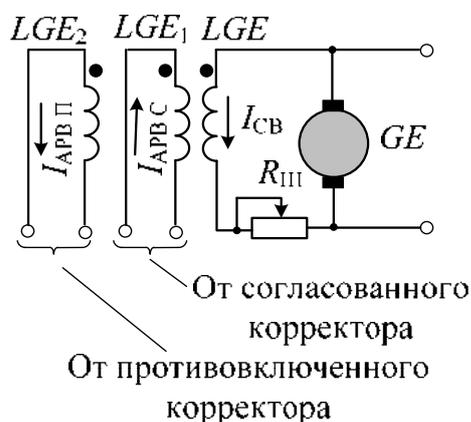


Рис. 2.42. Управление обмотками возбуждения генератора от двухсистемного корректора

Рис. 2.43. Зависимость суммарной намагничивающей силы, создаваемой токами двух корректоров

Для улучшения качества переходного процесса и обеспечения устойчивости корректоров, как систем регулирования с обратной связью, практически во всех вариантах этих устройств применена гибкая местная обратная связь от напряжения возбуждения генератора на вход магнитного усилителя.

Устройства компаундирования с электромагнитным корректором обеспечивают форсировку возбуждения при близких КЗ, когда ток значительно превышает номинальный. Однако при удалении места КЗ форсировочный эффект компаундирования быстро снижается. Также следует иметь в виду, что корректор напряжения получает питание не от независимого источника, а от трансформатора напряжения генерато-

ра. Поэтому при использовании корректора согласованного включения при снижении напряжения из-за КЗ снижается и его выходной ток.

Лучшими свойствами в этом отношении обладает противовключенный корректор, так как при снижении его выходного тока результирующая намагничивающая сила обмоток возбуждения возбудителя увеличивается.

Для устранения недостатков устройства компаундирования с электромагнитным корректором в части недостаточной эффективности форсировки последней осуществляется шунтирование резистора  $R_{III}$  контактом контактора форсировки  $K_{\Phi}$  в цепи обмотки самовозбуждения (рис. 2.44). Такое устройство называют релейной форсировкой возбуждения.

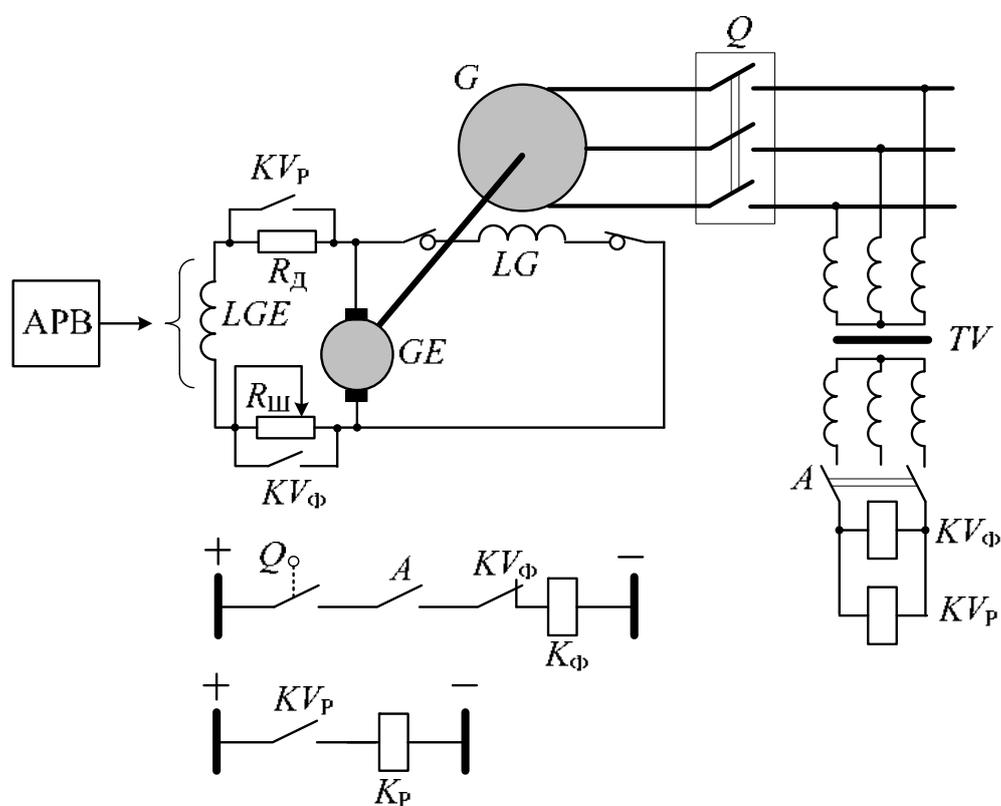


Рис. 2.44. Схема устройства релейной форсировки возбуждения

Контактор  $K_{\Phi}$  управляется контактом реле минимального напряжения  $KV_{\Phi}$ , подключенного к вторичным цепям трансформатора напряжения  $TV$ . Напряжение срабатывания реле  $KV_{\Phi}$  выбирается таким образом, чтобы его контакт замыкался при снижении напряжения на 8–15 % от номинального.

Форсировка должна иметь место при любых видах КЗ. Для обеспечения этого требования возможно два способа выполнения измерительного органа напряжения:

- использование трех реле, подключенных к разным фазам, с соединением их контактов по логической схеме «ИЛИ»;
- использование одного реле, включенного через фильтр прямой последовательности.

Для того, чтобы исключить ложный пуск форсировки при срабатывании автомата  $A$  во вторичных цепях или отключении генератора выключателем  $Q$ , в цепь обмотки  $K_{\Phi}$  вводятся соответствующие контакты повторители положения автомата  $A$  и выключателя генератора  $Q$ .

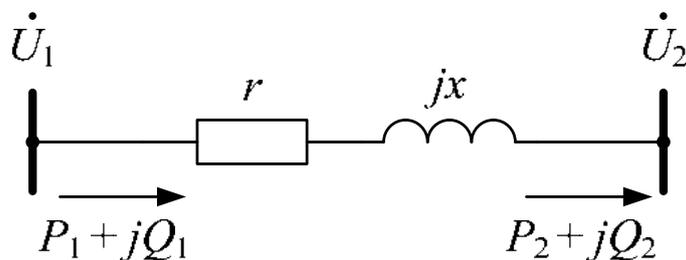
На гидрогенераторах, у которых возможно опасное повышение напряжения при сбросе нагрузки применяется также расфорсировка возбуждения, выполняемая путем расшунтирования резистора  $R_{\text{Д}}$  размыканием контакта контактора  $K_{\text{Р}}$ , который управляется максимальным реле напряжения  $KV_{\text{Р}}$ . Напряжение срабатывания этого реле принимается в пределах  $1,1-1,2 U_{\text{ном}}$ .

### 3. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Задача регулирования напряжения в электрических сетях связана с тем, что напряжение на шинах электростанций и у потребителей электрической энергии должно укладываться в некоторые достаточно жесткие пределы. Уровни напряжения в узловых точках электрической сети связаны с потоками реактивной мощности по участкам сети, и эти потоки по ряду причин тоже не могут быть произвольными. Поэтому задачи регулирования уровней напряжения и задача регулирования потоков реактивной мощности должны рассматриваться совместно.

#### 3.1. Основные соотношения, необходимые для рассмотрения вопросов регулирования напряжения

Рассмотрим связь между напряжениями по концам участка электрической сети с сопротивлением  $\underline{Z} = r + jx$  (рис. 3.1).



*Рис. 3.1. Участок электрической сети*

Если считать известным напряжение  $\dot{U}_1$  и принять направление этого вектора за ось отсчета углов, то может быть получена векторная диаграмма, приведенная на рис. 3.2. Также будем считать известными потоки мощности  $P_1$  и  $Q_1$  в начале участка.

На рис. 3.2  $\Delta \dot{U} = \Delta U_{\text{прод}} + j\Delta U_{\text{поп}}$  – вектор падения напряжения, представленный в виде геометрической суммы двух составляющих: продольной

$$\Delta U_{\text{прод}} = I_a r + I_p x$$

и поперечной

$$\Delta U_{\text{поп}} = I_a x - I_p r.$$

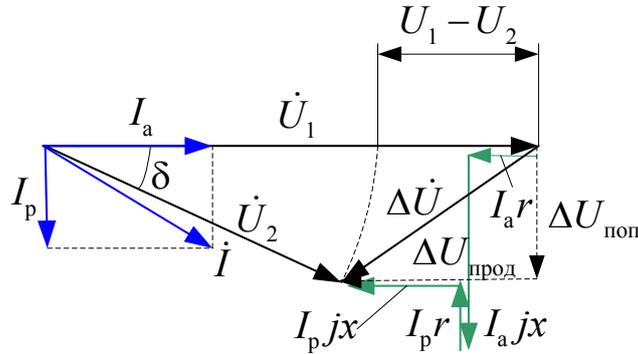


Рис. 3.2. Векторная диаграмма для участка электрической сети

Из диаграммы легко получить связь между модулями напряжений (в масштабе фазных величин)

$$U_{2\phi} = \sqrt{(U_{1\phi} - I_a r - I_p x)^2 + (I_a x - I_p r)^2}. \quad (3.1)$$

Угол между векторами  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$

$$\delta = \arctg \frac{I_a x - I_p r}{U_{1\phi} - I_a r - I_p x} \quad (3.2)$$

Выразим токи через трехфазные мощности  $P_1$  и  $Q_1$  со стороны узла с напряжением  $\dot{U}_1$  и перейдем к масштабу линейных напряжений. Подставив в (3.1) и в выражение для  $\Delta U_{\text{поп}}$

$$I_a = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1} \text{ и } I_p = \frac{Q_1}{\sqrt{3}U_1},$$

после преобразования получим

$$\Delta U_{\text{прод}} = \frac{P_1 r + Q_1 x}{U_1}, \quad \Delta U_{\text{поп}} = \frac{P_1 x - Q_1 r}{U_1}.$$

$$U_2 = \sqrt{\frac{(U_1^2 - P_1 r - Q_1 x)^2}{U_1^2} + \frac{(P_1 x - Q_1 r)^2}{U_1^2}}, \quad (3.3)$$

$$\delta = \arctg \frac{P_1 x - Q_1 r}{U_1^2 - P_1 r - Q_1 x}, \quad (3.4)$$

Разность модулей напряжений  $U_1$  и  $U_2$  называется потерей напряжения.

Относительное влияние на потерю напряжения продольной и поперечной составляющей падения напряжения зависит от соотношения активного и реактивного сопротивлений участка сети и от электрического режима этого участка.

Из соотношений (3.3) и (3.4), и векторных диаграмм следует, что соотношение между абсолютными значениями напряжений по концам участка в основном определяется продольной составляющей падения напряжения, то есть можно принять, что  $U_1 - U_2 \approx \Delta U_{\text{прод}}$ .

Поэтому, например, из (3.3)

$$U_2 \approx U_1 - \frac{P_1 r + Q_1 x}{U_1}. \quad (3.5)$$

В высоковольтных сетях активное сопротивление всегда меньше реактивного. Отношение активного сопротивления к реактивному для линий электропередачи, выполненных сталеалюминевыми проводами, иллюстрируется в табл. 3.1.

Таблица 3.1

*Соотношения активных и реактивных сопротивлений для различных линий, выполненных сталеалюминевыми проводами*

Номинальное напряжение	Площадь поперечного сечения провода	$\frac{r}{x}$
500 кВ	3 провода в фазе 400 ÷ 500 мм <sup>2</sup>	0,09 ÷ 0,075
220 кВ	240 ÷ 500 мм <sup>2</sup>	0,278 ÷ 0,036
110 кВ	70 ÷ 240 мм <sup>2</sup>	0,9 ÷ 0,3
35 кВ	70 ÷ 150 мм <sup>2</sup>	1 ÷ 0,5

У силовых трансформаторов даже сравнительно небольшой мощности активное сопротивление намного меньше реактивного. Таким образом, в сетях 500 кВ и 220 кВ, а при больших сечениях проводов и в сетях 110 кВ для выявления основных, принципиальных особенностей задачи регулирования напряжения можно не учитывать активное сопротивление.

В этом случае из (3.5)

$$U_2 \approx U_1 - \frac{Q_1 x}{U_1}. \quad (3.6)$$

Таким образом (в рамках сделанных допущений) соотношение между напряжениями по концам участка электрической сети определяется в основном потоком реактивной мощности. Естественно справедливо и обратное, что поток реактивной мощности определяется, в основном, различием уровней напряжений по концам участка

$$Q_1 \approx \frac{U_1(U_1 - U_2)}{x}. \quad (3.7)$$

Уместно также при этих же допущениях рассмотреть соотношение, полученное на основании (3.4)

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_1 x}{U_1^2 - Q_1 x}$$

Так как в реальных режимах падение напряжения на участке сети должно быть намного меньше абсолютного значения напряжения, то величиной  $Q_1 x$  в знаменателе можно пренебречь, тогда

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_1 x}{U_1^2}.$$

То есть переток активной мощности определяется в основном фазовым сдвигом напряжений по концам участка. Это обстоятельство при  $r \approx 0$ , когда  $P_1 = P_2 = P$ , наглядно также иллюстрируется известной формулой

$$P = \frac{U_1 U_2}{x} \sin \delta.$$

Вернемся к соотношению (3.5) и (3.6), из которых следует, что изменение напряжения  $U_2$  может осуществляться либо за счет изменения напряжения  $U_1$ , либо за счет изменения перетока реактивной мощности, например с помощью каких-либо источников реактивной мощности, включенных в конце участка. Возможно также воздействие на реактивное сопротивление участка применением продольной емкостной компенсации.

Таким образом, задача регулирования напряжения связана с потреблением и выработкой реактивной мощности.

### 3.2. Естественные потребители и источники реактивной мощности в энергосистемах

Свойства реальных элементов электрической части электроэнергетической системы таковы, что при их функционировании создаются магнитные и электрические поля, что проявляется как потребление или выработка реактивной мощности.

Потребление реактивной мощности или иными словами реактивная нагрузка энергосистемы состоит из следующих составляющих:

- токи намагничивания асинхронных двигателей,
- потери реактивной мощности в сопротивлениях рассеивания асинхронных двигателей,
- токи намагничивания силовых трансформаторов,
- потери реактивной мощности в сопротивлениях рассеивания силовых трансформаторов,
- потери реактивной мощности в продольных индуктивных сопротивлениях линий.

Кроме этого в энергосистеме есть естественные источники реактивной мощности. Это – емкости между фазами линий электропередачи (зарядная мощность линии).

Реактивная мощность, потребляемая или вырабатываемая перечисленными элементами электрической системы, в определенной степени зависят от частоты, но главным образом режим по реактивной мощности связан с уровнями напряжений в узловых точках, как показано выше.

В установившемся режиме работы электрической сети энергосистемы должно иметь место равенство вырабатываемой  $\sum Q_{\Gamma}$  и потребляемой реактивной мощности  $\sum Q_{\text{потр}}$ , складывающейся из мощностей нагрузок  $Q_{\text{н}}$  и потерь  $\Delta Q_{\text{пот}}$ .

Это условие записывается в виде баланса реактивной мощности

$$\sum Q_{\Gamma} = \sum Q_{\text{потр}} = \sum Q_{\text{н}} + \sum \Delta Q_{\text{пот}}.$$

В силу определенной зависимости вырабатываемой и потребляемой реактивной мощности от напряжения баланс реактивной мощности устанавливается при некотором среднем уровне напряжения в электрической сети.

### 3.3. Технические средства для управления режимом работы энергосистемы по напряжению и реактивной мощности

Для целей управления режимом работы энергосистемы по напряжению и реактивной мощности в настоящее время в отечественной

электроэнергетике используются разнообразные технические средства. Рассмотрим некоторые из них.

### 3.3.1. Компенсирующие устройства, осуществляющие скалярное управление

#### Синхронные компенсаторы

Синхронный компенсатор – это синхронный двигатель, работающий в режиме холостого хода, т. е. без механической нагрузки на валу. При перевозбуждении синхронный компенсатор генерирует реактивную мощность, при недовозбуждении потребляет реактивную мощность, то есть является реверсивным источником реактивной мощности.

Преимуществом синхронных компенсаторов является возможность плавного регулирования реактивной мощности в достаточно большом диапазоне. Недостатками синхронных компенсаторов являются:

- относительно высокая стоимость, а, следовательно, и высокие удельные капитальные затраты на компенсацию;
- необходимость пуска от источников питания большой мощности.

Свойства синхронного компенсатора (СК) как управляемого источника реактивной мощности характеризуются максимальными значениями выдаваемой и потребляемой реактивной мощности. Оценим возможный диапазон изменения реактивной мощности синхронного компенсатора по схеме, приведенной на рис. 3.3.

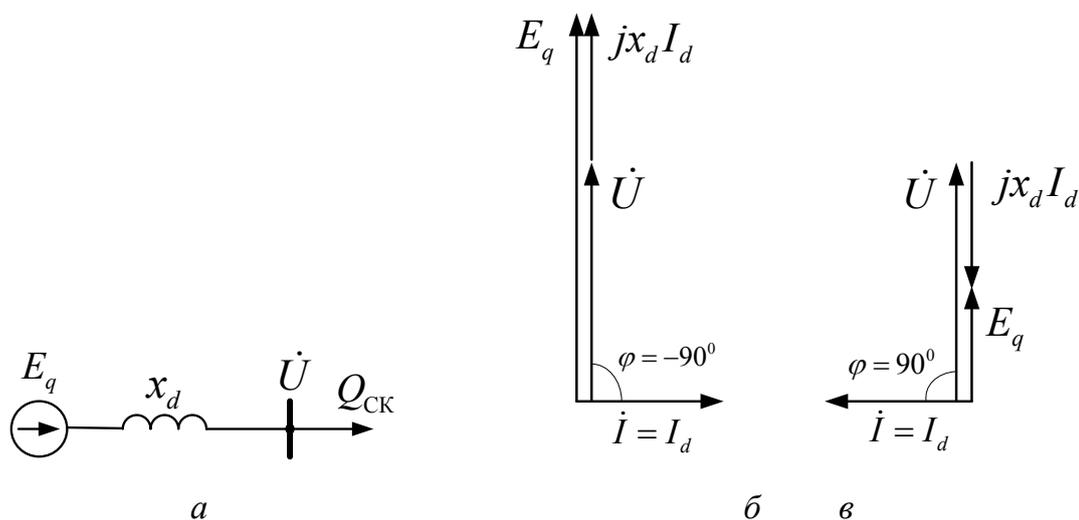


Рис. 3.3. Синхронный компенсатор:  
 а – схема замещения синхронного компенсатора,  
 б – векторная диаграмма для СК в режиме перевозбуждения,  
 в – векторная диаграмма для СК в режиме недовозбуждения

В схему замещения синхронный компенсатор вводится синхронным реактивным сопротивлением по продольной оси  $x_d$ , так как активная составляющая тока практически отсутствует, что иллюстрируется на векторной диаграмме (рис. 3.3, б, в).

Реактивная мощность синхронного компенсатора определяется следующим образом

$$Q_{СК} = \frac{E_q - U}{x_d} U_q = \frac{E_q U}{x_d} - \frac{U^2}{x_d}. \quad (3.8)$$

Из (3.8) очевидно, что в зависимости от ЭДС  $E_q$ , которая пропорциональна току возбуждения, реактивная мощность может быть положительной  $Q_{СК(+)}$  (выдача) или отрицательной  $Q_{СК(-)}$  (потребление).

Для оценки возможного диапазона изменения реактивной мощности синхронного компенсатора примем систему относительных единиц при базисных значениях:  $U_b = U_{ном}$ ,  $I_b = I_{ном}$ ,  $Q_b = Q_{ном}$ ,  $x_{d*} = 2$ . Номинальная выдаваемая реактивная мощность, очевидно, при принятой системе равна  $Q_{СК(+)} = 1$ . Максимальная потребляемая реактивная мощность имеет место при  $E_q = 0$  и равна  $Q_{СК(-)} = 0,5$ . Таким образом, возможность СК на потребление реактивной мощности значительно ниже, чем на выдачу.

Большими возможностями для потребления реактивной мощности обладает СК с двумя обмотками возбуждения и специальной системой регулирования возбуждения. В настоящее время СК заменяют современными статическими устройствами для компенсации реактивной мощности, поэтому такие сложные в управлении СК практически не применяются.

В режиме потребления реактивной мощности при малых значениях  $E_q$ , в том числе при  $E_q = 0$ , СК удерживается в синхронизме за счет момента явнополюсности. Именно поэтому СК всегда выполняются с явновыраженными полюсами.

### Шунтирующие реакторы

Шунтирующие реакторы применяются в основном для компенсации избыточной реактивной мощности, генерируемой высоковольтными линиями электропередачи в режиме малых нагрузок. Шунтирующие реакторы (ШР) могут быть неуправляемыми (наиболее распространенные) и управляемыми (УШР).

К настоящему времени в России разработан принципиально новый тип управляемых реакторов мощностью до 180 МВА напряжением до 500 кВ. Мощность реактора может изменяться от номинальной до нескольких процентов от номинальной. Время изменения от максималь-

ной до минимальной мощности в зависимости от типа системы управления может составлять от 0,4 до 0,02 с.

УШР может применяться совместно с конденсаторными батареями (КБ) (рис. 3.4), в этом случае при соответствующем подборе соотношений мощностей реактора и батарей конденсаторов можно реализовать реверсивный источник реактивной мощности.

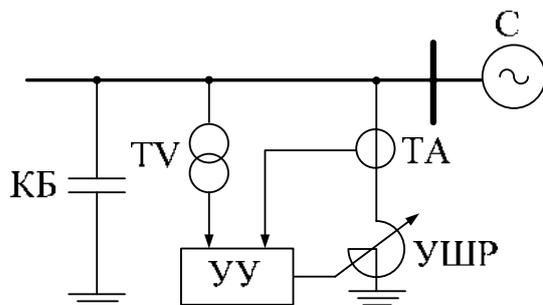


Рис. 3.4. Работа УШР в комплексе с конденсаторными батареями (КБ):  
УУ – управляющее устройство

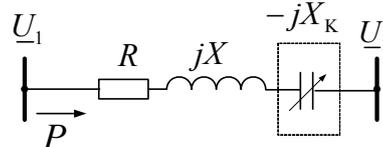


Рис. 3.5. Схема замещения линии с продольной компенсацией

### Устройство продольной компенсации

Продольная компенсация заключается в том, что в рассечку линии включаются конденсаторные батареи (рис. 3.5). Сопротивление конденсаторной батареи ( $X_k$ ) подбирается таким образом, чтобы оно частично компенсировало индуктивное сопротивление линии.

Продольная компенсация, кроме повышения пропускной способности линии, позволяет перераспределять потоки мощности между параллельными линиями электропередачи.

### Изменение коэффициента трансформации силовых трансформаторов

Регулирование коэффициента трансформации трансформаторов изменением числа витков обмоток может производиться либо при отключенном трансформаторе (переключение без возбуждения ПБВ), либо под нагрузкой с помощью специального регулировочного устройства (регулирование под нагрузкой РПН).

При выполнении устройств автоматического регулирования на трансформаторах с РПН главная особенность заключается в том, что регулирование может осуществляться только определенными ступенями, поэтому измерительный орган регулятора должен иметь зону нечувствительности  $\Delta U_{\text{нечув.}}$  (рис. 3.6), согласованную с изменением напряжения при переключении на одну ступень  $\Delta U_{\text{ст}}$

$$\Delta U_{\text{ст}} < \Delta U_{\text{нечув.}}$$

В точке  $t_1$  фиксируется выход за зону нечувствительности. Из рис. 3.6 видно, что при снижении зоны нечувствительности возможны многократные излишние действия регулятора.

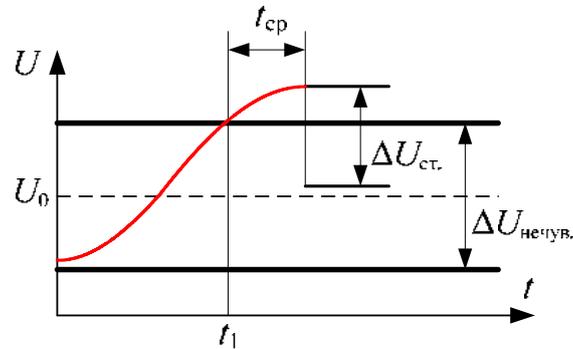


Рис. 3.6. Зона нечувствительности измерительного органа автоматического регулятора на трансформаторах с РПН

Как и в любой системе регулирования необходимо выбрать определенный закон регулирования в функции от режима элемента электрической сети. Если в систему регулирования вводить напряжение на выводах трансформатора, тогда с точностью до зоны нечувствительности будет поддерживаться напряжение на выводах трансформатора. Однако во многих случаях требуется поддержание напряжения не на выводах трансформатора, а в некоторой точке, приближенной к потребителям. Для решения этой задачи используется введение в закон регулирования величины, пропорциональной падению напряжения на участке сети от трансформатора до выбранной точки.

Рассмотрим такую задачу на примере схемы, представленной на рис. 3.7.

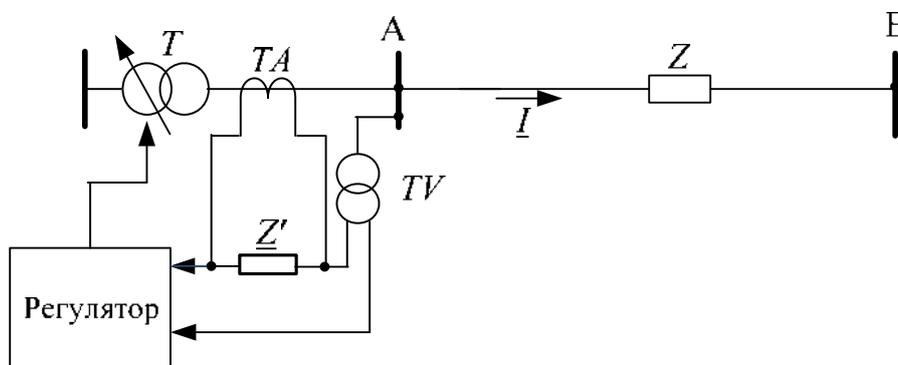


Рис. 3.7. Регулирование напряжения с компенсацией падения напряжения на участке сети АБ

Если система регулирования поддерживает постоянное напряжение в точке А, то напряжение в точке Б равно

$$\underline{U}_B = \underline{U}_A - \underline{I} \cdot \underline{Z}.$$

Чтобы поддерживать постоянным напряжение в точке Б, необходимо выполнить систему регулирования так, чтобы выполнялись условия

$$\underline{U}_A = \underline{U}_0 + \underline{I} \underline{Z}, \underline{U}_B = \underline{U}_0.$$

Такая задача решается с помощью измерительного органа регулятора, схема которого представлена на рис. 3.7.

Полярность зажимов трансформатора тока  $TA$  выбирается так, чтобы напряжение, которое подводится к регулятору, было равно

$$\underline{U}_{\text{рег}} = \underline{U}_A - \underline{I} \cdot \underline{Z}'.$$

Сопротивление  $\underline{Z}'$  во вторичной цепи выбирается так, чтобы падение напряжения на нем было масштабировано к уровню вторичного напряжения с учетом коэффициента трансформации трансформатора тока и трансформатора напряжения.

Переключения числа витков трансформаторов выполняется на стороне высокого напряжения, так как на этой стороне токи имеют меньшее значение.

Автотрансформаторы имеют несколько вариантов регулирования коэффициентов трансформации, когда система регулирования расположена:

- в нейтрали обмоток ВН и СН,
- на выводах обмотки СН.

Основные недостатки трансформаторов с РПН заключаются в их повышенной стоимости (на 20 – 25 % дороже трансформаторов без РПН), и в дополнительных трудностях в обеспечении электродинамической стойкости трансформаторов к сквозным токам КЗ.

### Специальные регулировочные трансформаторы

Существует несколько схем включения регулировочных трансформаторов (линейных и последовательных). На рис. 3.8. показаны два возможных варианта.

В зависимости от группы соединений силового и регулировочного трансформаторов можно получить продольное или поперечное регулирование напряжения. При продольном регулировании напряжения изменяются по модулю, что ведет к изменению перетоков реактивных мощностей. Поперечное регулирование позволяет изменять напряжение по фазе, благодаря этому возможно воздействие на перетоки активных мощностей.

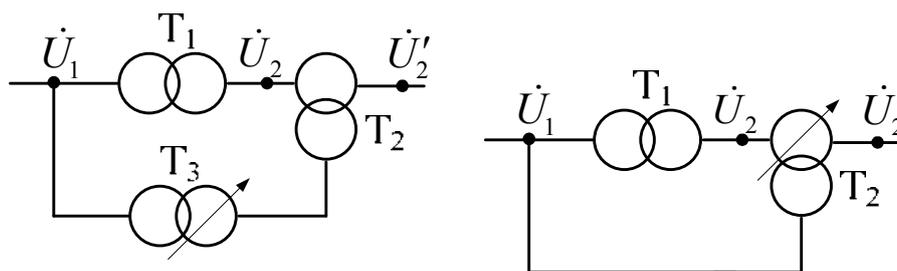


Рис. 3.8. Схемы включения регулировочных трансформаторов:  
 $T_1$  – силовой трансформатор,  $T_2$  – линейный регулировочный трансформатор,  
 $T_3$  – питающий трансформатор

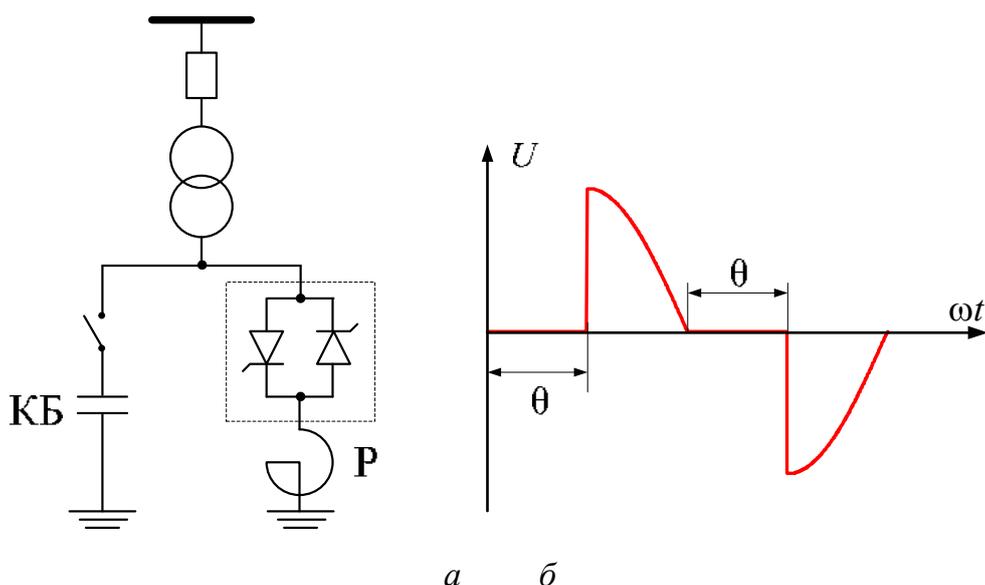


Рис. 3.9. Статический тиристорный компенсатор:  
 $a$  – схема СТК,  $б$  – изменение напряжения на зажимах реактора

### Статические тиристорные компенсаторы

Статические тиристорные компенсаторы (СТК) – компенсатор реактивной мощности, представляет собой управляемую тиристорами реактивную проводимость.

Это комплексные устройства, предназначенные как для выдачи, так и для потребления реактивной мощности. Основу СТК могут составлять (рис. 3.9,  $a$ ) неизменная по мощности конденсаторная батарея КБ, реактор Р и включенная последовательно с реактором встречно-параллельные управляемые вентили – силовые полупроводниковые устройства (тиристоры).

Тиристоры снабжены устройством управления, с помощью которого регулируется момент открытия и закрытия тиристоров (рис. 3.7,  $б$ ). Такое регулирование позволяет изменять время включения реактора в сеть в течение каждого полупериода промышленной частоты. Вслед-

ствии этого изменяется действующее значение напряжения  $U$  на зажимах реактора и развиваемая им мощность

$$Q_{\text{КБ}} = \frac{U^2}{X_{\text{КБ}}}, \quad Q_{\text{Р}} = \frac{U^2}{X_{\text{Р}}}.$$

Мощность СТК  $Q_{\text{СТК}} = Q_{\text{Р}} - Q_{\text{КБ}}$  может изменяться от максимального потребления до максимальной выработки за 1–2 периода промышленной частоты.

### **3.3.2. Современные технические средства для управления режимом работы электрических сетей**

Современные технические средства построены на базе полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей. Основой этих технических средств является преобразователь напряжения, принцип действия которого основан на формировании с помощью силовых полупроводниковых ключей переменного трехфазного напряжения необходимой амплитуды и фазы из выпрямленного напряжения. Другими словами, он представляет собой электронный генератор электродвижущей силы промышленной частоты, регулируемой по амплитуде и обеспечивающий как выдачу, так и потребление реактивной мощности.

Преобразователь напряжения, который используется для регулирования модуля напряжений в каких-либо точках сети, называется СТАТКОМ (статический компенсатор). Установки СТАТКОМ характеризуются более высокой скоростью управления, нежели СТК (время перехода от максимальной выдачи реактивной мощности к максимальному потреблению составляет всего полпериода основной частоты – 0,01 с). Принципиальной особенностью СТАТКОМ является то, что путем организации определенного управления силовыми полупроводниковыми ключами происходит обмен реактивной мощностью между различными фазами. Благодаря этому батарея конденсаторов, которая входит в состав СТАТКОМ, имеет реактивную мощность равную 15–20 % от полной реактивной мощности, вырабатываемой данным устройством.

**Асинхронизированные турбо- и гидрогенераторы (АСТГ, АСГГ)** – это генераторы продольно-поперечного возбуждения. Они имеют на роторе две обмотки возбуждения, сдвинутые на  $90^\circ$ .

У обычного генератора (рис. 3.8) угол  $\delta$ , определяющий механическое положение ротора, и угол  $\beta$ , характеризующий расхождения ЭДС генератора  $E_q$  и напряжения на шинах системы  $U$ , – это один и тот же угол.

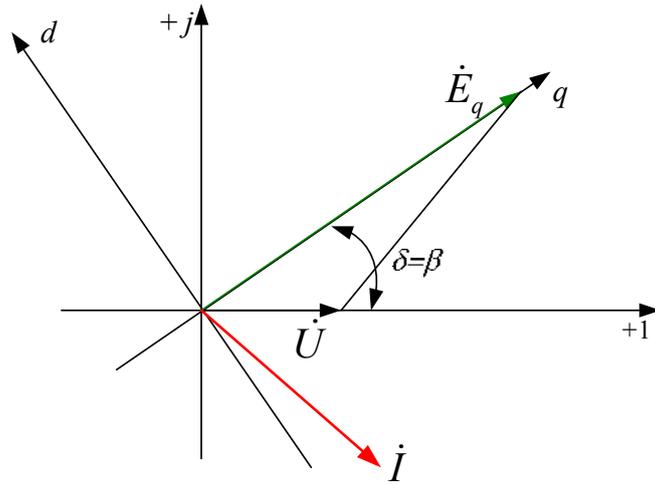


Рис. 3.10. Векторная диаграмма генератора обычного исполнения

Изменения режима по активной и реактивной мощности для обычного генератора взаимосвязаны

$$P = \frac{E_q U}{x} \sin \beta, \quad Q = \frac{E_q U}{x} \cos \beta - \frac{U^2}{x}.$$

Это, в частности, накладывает ограничение на значение потребляемой реактивной мощности (режим недовозбуждения) по условию статической устойчивости. Вторая обмотка возбуждения, сдвинутая на 90 градусов, создает ЭДС  $E_d$ , направленную по оси  $d$ . Специальная система возбуждения АСГ позволяет независимо изменять ЭДС  $E_d$  и  $E_q$  и таким образом формировать вектор результирующей ЭДС, фаза которого не связана с угловым положением ротора.

Для выявления основных принципиальных особенностей режима работы АСГ примем для упрощения  $x_d = x_q = x$ . Векторная диаграмма для АСГ приведена на рис. 3.11.

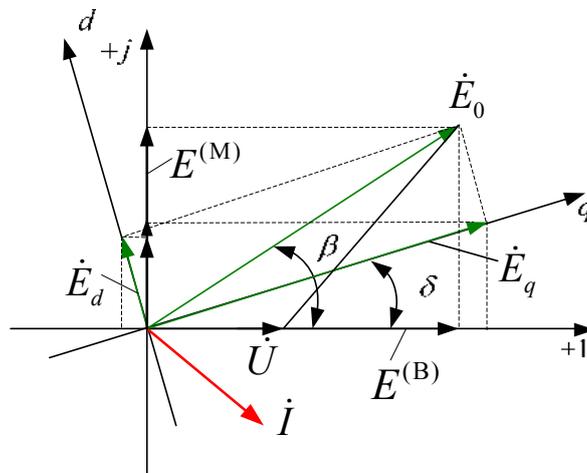


Рис. 3.11. Векторная диаграмма АСГ

Электрический режим, как для обычного генератора, так и для АСГ определяется углом  $\beta$  между вектором результирующей ЭДС и вектором напряжения системы  $U$ . Электродвижущие силы  $\dot{E}_q$  и  $\dot{E}_d$  пропорциональны соответственно токам возбуждения в продольной ( $i_{fd}$ ) и поперечной ( $i_{fq}$ ) обмотках возбуждения, которые могут регулироваться независимо друг от друга.

Вектор  $\dot{E}_0$  выразим через составляющие:

$$E_0 \sin \beta = E^{(M)} - \text{проекция ЭДС на мнимую ось,}$$

$$E_0 \cos \beta = E^{(B)} - \text{проекция ЭДС на вещественную ось.}$$

Векторы  $E^{(M)}$  и  $E^{(B)}$  можно выразить через составляющие  $E_d$  и  $E_q$

$$E^{(M)} = E_q \sin \delta + E_d \cos \delta, \quad E^{(B)} = E_q \cos \delta - E_d \sin \delta.$$

Изменяя определенным образом  $E_d$  и  $E_q$  с учетом фактического угла  $\delta$  можно независимо изменять  $E^{(M)}$ ,  $E^{(B)}$  и таким образом независимо друг от друга изменять активную мощность  $P$  и реактивную мощность  $Q$  асинхронизированного генератора.

Характеристики активной и реактивной мощности АСГ определяются следующими соотношениями

$$P = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta + \frac{E_d U}{x_q} \cos \delta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{x_d - x_q}{x_q \cdot x_d} \right) \sin 2\delta,$$

$$Q = \frac{E_q U}{x_d} \cos \delta - \frac{E_d U}{x_q} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \left( \frac{x_d + x_q}{x_d \cdot x_q} \right) + \frac{U^2}{2} \left( \frac{x_d - x_q}{x_d \cdot x_q} \right) \cos 2\delta.$$

На рис. 3.12 представлена векторная диаграмма, характеризующая изменение режима генератора обычного исполнения.

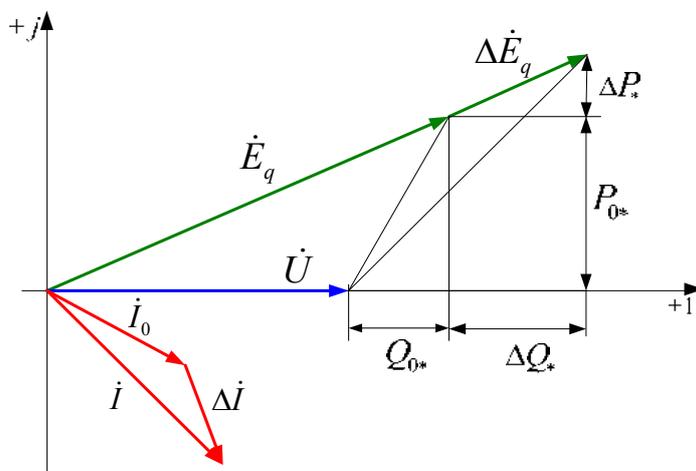


Рис. 3.12. Изменение режима работы генератора обычного исполнения

Как видно, изменение, например, реактивной мощности на  $\Delta Q_*$ , приводит к изменению также и активной мощности на  $\Delta P_*$ .

АСГ дает возможность изменять активную мощность, сохраняя неизменной реактивную мощность (рис. 3.13), а также изменять реактивную мощность, сохраняя неизменной активную (рис. 3.14).

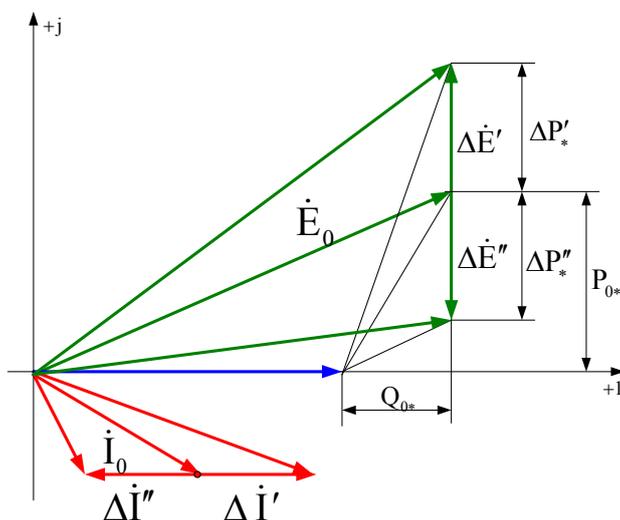


Рис. 3.13. Регулирование активной мощности АСГ

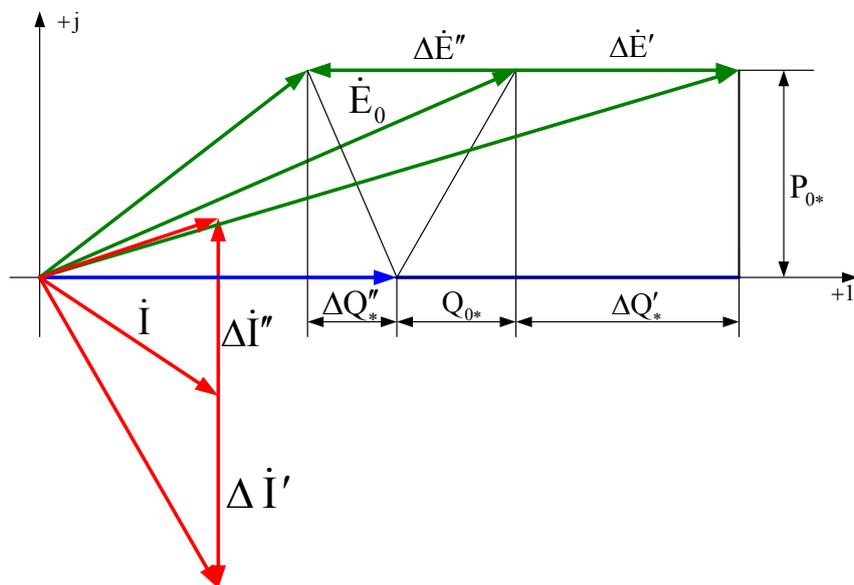


Рис. 3.14. Регулирование реактивной мощности АСГ

АСГ имеют большие возможности по потреблению реактивной мощности по сравнению с обычным синхронным генератором. Применение АСГ на электростанциях позволяет обеспечить как нормализацию уровней напряжения на шинах электростанции и вблизи неё без применения дополнительных устройств регулирования реактивной мощности,

так и повышение устойчивой и надежной работы электростанции. АСГ пока не получил широкого распространения.

### 3.4. Автоматическое регулирование уровней напряжения и потоков реактивной мощности на электростанциях

#### Распределение реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами на электростанциях.

Рассмотрим два предельных режима работы синхронного генератора (рис. 3.15).

Режим первый – работа синхронного генератора на автономную нагрузку, потребляющую определенную реактивную мощность. В этом случае напряжение на выводах генератора равно

$$U_{\Gamma} = E_{\Gamma} - I_{\text{P}}X_{\text{d}},$$

где  $I_{\text{P}}$  – реактивный ток генератора.

Если считать, что  $I_{\text{P}} \approx \text{const}$ , то очевидно, что при изменении тока возбуждения будет изменяться ЭДС генератора  $E_{\Gamma}$  и соответствующим образом напряжение генератора  $U_{\Gamma}$ .

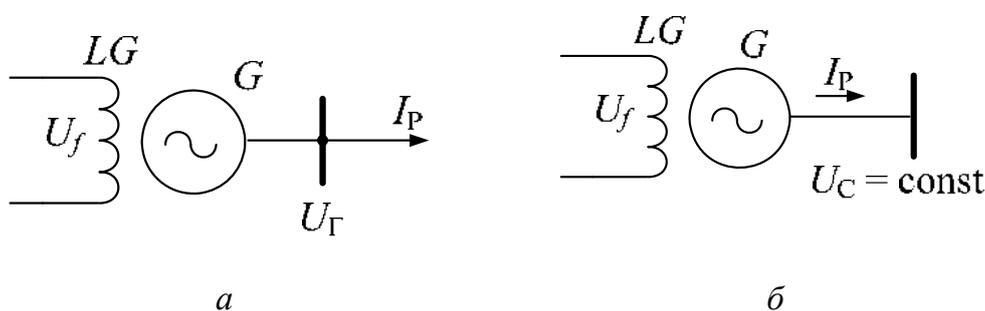


Рис. 3.15. Работа синхронного генератора:

*a* – на автономную нагрузку; *б* – параллельно с мощной энергосистемой

Режим второй – генератор работает параллельно с мощной энергосистемой, поэтому напряжение в точке присоединения генератора можно считать неизменным

$$U_{\Gamma} = E_{\Gamma} - I_{\text{P}}X_{\text{d}}, U_{\Gamma} = U_{\text{C}} = \text{const}.$$

В данном случае, если изменять ток возбуждения генератора, то также будет изменяться ЭДС, при этом будет изменяться реактивный ток генератора.

В реальных энергосистемах генератор может находиться в некотором промежуточном режиме, и тогда изменение возбуждения будет ока-

зывать влияние как на реактивный ток, так и на напряжение на выводах генератора.

Далее рассмотрим принципы, обеспечивающие определенное распределение реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами на электростанциях.

### Генераторы, работающие непосредственно на сборные шины.

Характерно для этой схемы то, что точка соединения генераторов и точка, к которой подключены измерительные органы напряжения всех АРВ – это одна и та же точка (рис. 3.16).

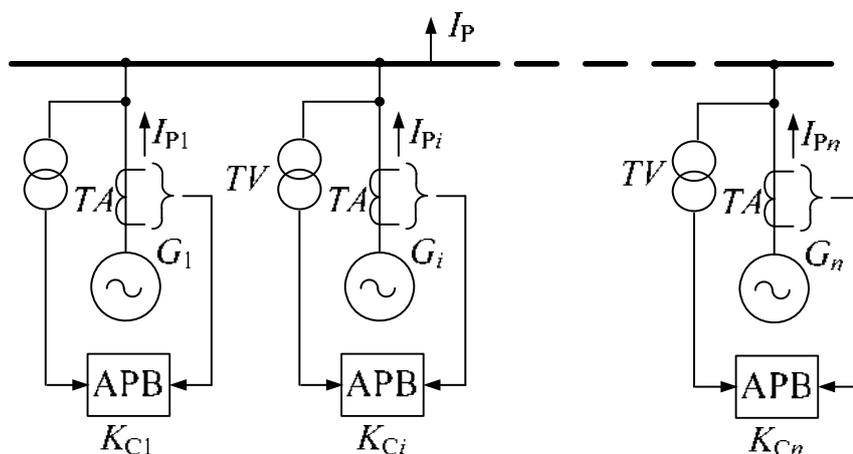


Рис. 3.16. Распределение реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами

Все генераторы оборудованы устройством АРВ и эти АРВ в общем случае обеспечивают определенные коэффициенты статизма  $K_C$ . АРВ каждого генератора обеспечивает регулирование по следующему закону

$$U_{Gi} = U_{Гизад} - K_{Ci} I_{Pi}$$

Уравнения для напряжения на выводах генератора представим относительно конечных приращений тока и напряжения. Для этого запишем уравнения  $i$ -го генератора для двух режимов

$$\begin{aligned} U'_{Gi} &= U_{Гизад} - K_{Ci} I'_{Pi}, \\ U''_{Gi} &= U_{Гизад} - K_{Ci} I''_{Pi}. \end{aligned}$$

причем

$$I''_{Pi} > I'_{Pi}.$$

Вычтем из второго уравнения первое и получим следующее выражение

$$\Delta U_{Gi} + K_{Ci} \Delta I_{Pi} = 0.$$

Далее требуется определить, как будут изменяться приращения реактивных токов генераторов при изменении суммарного реактивного тока  $I_p$ . Просуммировав уравнения всех  $n$ -генераторов, получим

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta U_{\Gamma i}}{K_{Ci}} + \sum_{i=1}^n \Delta I_{Pi} = 0.$$

Так как изменение напряжения у всех генераторов одинаково и  $\sum_{i=1}^n \Delta I_{Pi} = \Delta I_p$ , то последнее уравнение можно записать следующим образом

$$\Delta U_{\Gamma i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{Ci}} = -\Delta I_p.$$

Отсюда

$$\Delta U_{\Gamma i} = -\frac{\Delta I_p}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{Ci}}}.$$

В этой формуле величина  $\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{Ci}}$  определяет изменение напряжения в точке соединения генераторов при изменении реактивного тока. Эта величина определяет некоторый эквивалентный коэффициент статизма  $K_{CЭ}$ , который зависит от коэффициентов статизма всех генераторов

$$\Delta U_{\Gamma i} = -K_{CЭ} \Delta I_p.$$

Изменение напряжения на шинах электростанции, выраженное через эквивалентный коэффициент статизма, подставим в выражение изменения тока для каждого генератора, которое, очевидно, имеет вид

$$\Delta I_{Pi} = -\frac{\Delta U_{\Gamma i}}{K_{Ci}} = \frac{K_{CЭ}}{K_{Ci}} \Delta I_p.$$

Как видно, изменение реактивного тока каждого генератора обратно пропорционально собственному коэффициенту статизма.

С практической точки зрения важно не только распределение приращений реактивной нагрузки, но и абсолютное значение реактивной нагрузки. На абсолютное значение реактивной нагрузки при параллельной работе генераторов оказывает влияние не только коэффициент статизма, но и заданное значение напряжения, которое задано в регуляторе.

Покажем это на примере параллельной работы двух генераторов. Построим для этих генераторов характеристики регулирования (рис. 3.17).

Из графиков следует

$$\frac{\Delta I_{P1}}{\Delta I_{P2}} = \frac{K_{C2}}{K_{C1}}.$$

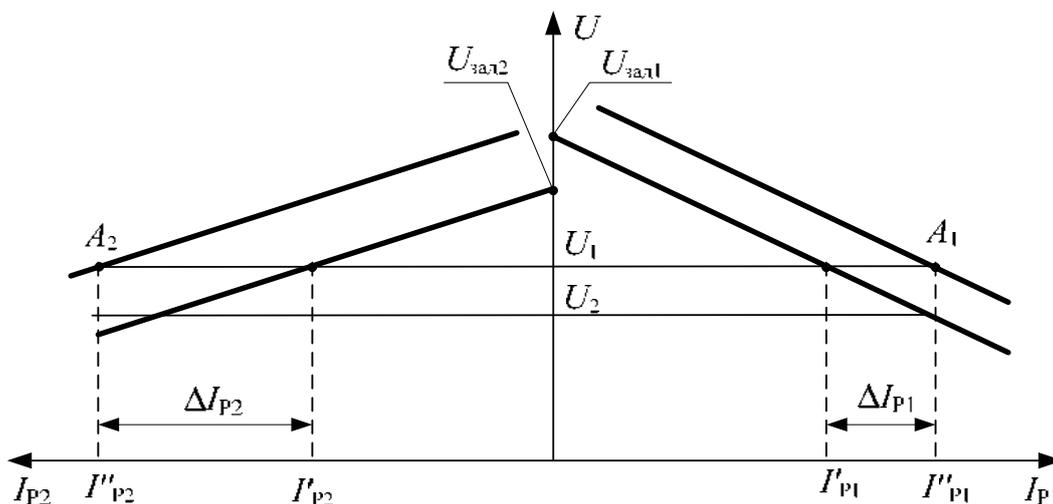


Рис. 3.17. Характеристики регулирования параллельно работающих генераторов

Абсолютные значения реактивных токов могут быть изменены путем изменения заданного напряжения  $U_{зад}$ , что приводит к перемещению характеристики, параллельно самой себе. Воздействуя на  $U_{зад}$ , можно любым желаемым образом перераспределять реактивную нагрузку между генераторами при выполнении каких-либо ограничений по изменению напряжения. Воздействие на положение характеристик принято называть вторичным регулированием напряжения.

В качестве примера решим для рассматриваемых двух генераторов следующую задачу. При переходе к режиму, при котором суммарная реактивная нагрузка увеличилась, обеспечить сохранение напряжения, равным  $U_1$ .

Очевидно, нужно изменить  $U_{зад1}$  и  $U_{зад2}$  так, чтобы характеристики проходили через точки  $A_1$  и  $A_2$ . Подобное воздействие на регулятор позволяет осуществить автоматическое регулирование уровня напряжения на сборных шинах и обеспечить определенное автоматическое распределение реактивной нагрузки в соответствии с заданными для каждого генератора значениями. Для решения этой задачи, необходимо, чтобы система автоматического регулирования возбуждения каждого генератора работала в соответствии с уравнением

$$\Delta U_i + K_i(Q_{\text{зад}i} - Q_i) = 0, \quad (3.9)$$

где  $K_i$  – коэффициент пропорциональности;  
 $\Delta U_i = U_{\text{зад}i} - U_i$  – отклонение напряжения от заданного;  
 $Q_i$  – фактическая реактивная мощность генератора;  
 $Q_{\text{зад}i}$  – заданная реактивная мощность.

**Распределение реактивной нагрузки между генераторами, включенными параллельно через повышающие трансформаторы.**

В данном случае существенным является то, что точка подключения измерительного органа напряжения АРВ и точка, где генераторы соединяются параллельно, отделены друг от друга сопротивлением трансформатора (рис. 3.18).

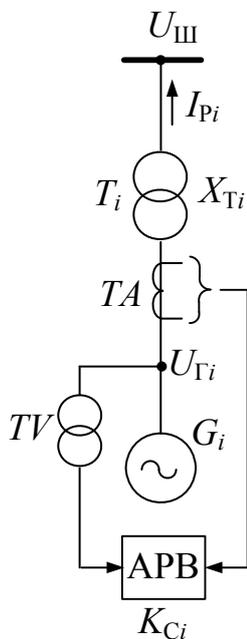


Рис. 3.18. Распределение реактивной нагрузки между генераторами, работающими в блоке с трансформаторами

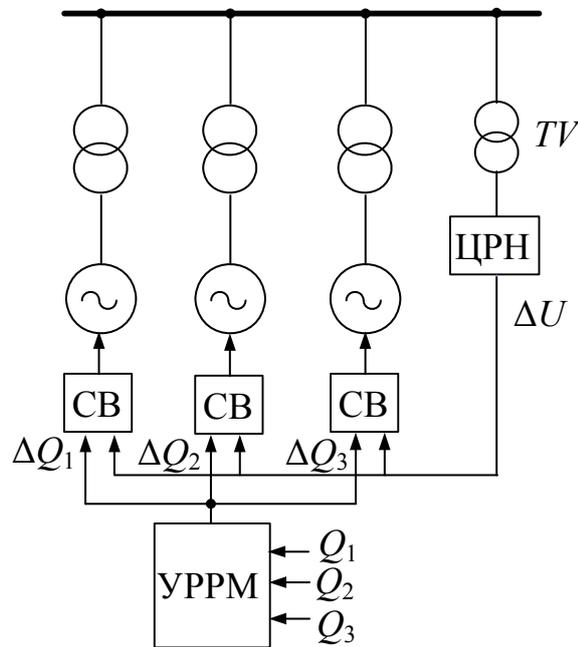


Рис. 3.19. Функциональная схема ГУВ первого вида

У каждого генератора регулятор поддерживает напряжение на выводах в соответствии со следующей характеристикой регулирования

$$U_{Gi} = U_{Gi\text{зад}} \pm K_{Ci} I_{Pi}$$

Связь между напряжением на шинах и напряжением генератора определяется следующим образом

$$U_{\text{ш}} = U_{\text{Гi}} - X_{\text{Гi}}I_{\text{Pi}},$$

$$U_{\text{ш}} = U_{\text{Гзад}} - (X_{\text{Гi}} \pm K_{\text{Ci}})I_{\text{Pi}}.$$

Последнее выражение представляет собой как бы эквивалентную характеристику регулирования с учетом сопротивления трансформатора. В этой характеристике роль коэффициента статизма играет величина  $(X_{\text{Гi}} \pm K_{\text{Ci}})$ . Поэтому закономерности распределения реактивной нагрузки будут такими же, как и в схеме с непосредственным соединением генераторов.

### **Групповое управление возбуждением на электростанциях**

Групповое управление возбуждением (ГУВ) применяется на многоагрегатных электростанциях. При ГУВ часть задач технически и функционально выполняется с помощью элементов, общих для всех генераторов. В зависимости от объема общих задач или объема централизации управления различают два вида ГУВ:

1. ГУВ с центральным регулятором напряжения и общестанционным устройством распределения реактивной нагрузки между генераторами.
2. ГУВ с индивидуальными регуляторами напряжения, но с централизованным управлением уставками этих регуляторов (уставка – заданное напряжение  $U_{\text{зад}}$ ). ГУВ данного вида содержит также общестанционное устройство распределения реактивной нагрузки.

В устройстве ГУВ первого типа на системы возбуждения каждого генератора подается (рис. 3.19) отклонение напряжения на шинах электростанции ( $\Delta U$ ) от заданного значения, которое вырабатывается центральным регулятором напряжения (ЦРН). При наличии ЦРН необходимо применение устройства принудительного распределения реактивной мощности генераторов. Это объясняется тем, что даже при одинаковых генераторах из-за разброса характеристик систем возбуждения и обмоток возбуждения генераторов распределение реактивной нагрузки будет случайным. На распределение реактивной нагрузки может также оказывать температура обмотки ротора, так как от этого зависит ее сопротивление.

Для обеспечения распределения реактивной нагрузки служит специальное устройство распределения реактивной мощности (УРРМ). Это устройство формирует контур обратной связи по отклонению реактивной мощности от заданного значения для каждого генератора.

На рис. 3.19  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  – величины, пропорциональные фактическим реактивным мощностям, которые формируются с помощью специальных измерительных органов. В устройстве УРРМ формируется закон распределения реактивной мощности в соответствии с заданными долями от суммарной реактивной мощности.

В устройстве ГУВ второго типа (рис. 3.20) генераторы имеют индивидуальные АРВ, в которых формируется сигнал  $\Delta U$  в каждом генераторе отдельно. Централизация управления здесь обеспечивается за счет синхронного изменения заданного значения напряжения у всех генераторов с помощью центрального установочного устройства (ЦУУ). Распределение реактивной нагрузки также осуществляется устройством УРРМ.

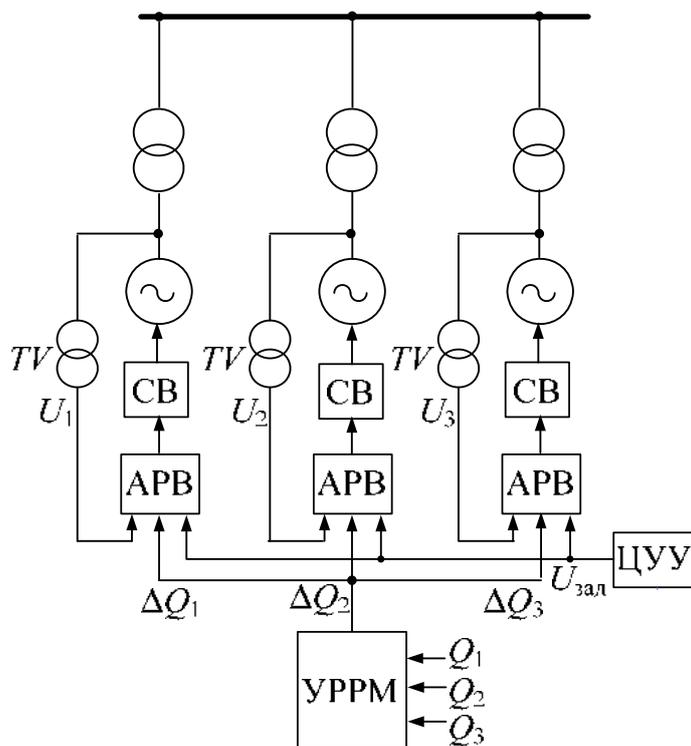


Рис. 3.20. Функциональная схема ГУВ второго вида

Для технической реализации ГУВ как первого, так и второго видов, необходимы какие-либо датчики, которые непрерывно выдают электрический сигнал, пропорциональный фактической реактивной мощности каждого генератора. В качестве таких датчиков могут использоваться специальные измерительные преобразователи реактивной мощности, которые работают в соответствии с выражением  $Q_{\Gamma} = U_{\Gamma} I_{\Gamma} \sin \varphi_{\Gamma}$ , а также устройства, которые измеряют электрические параметры, пропорциональные реактивной нагрузке генератора. Такими величинами могут быть ток возбуждения или напряжение возбуждения.

### 3.5. Регулирование уровней напряжения и потоков реактивной мощности в электрических сетях

Одна из основных задач, которая решается комплексом автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности является

обеспечение качества электрической энергии у потребителей в соответствии с нормированными требованиями.

На практике потребители электрической энергии имеют значительное электрическое удаление от генераторов, особенно в тех случаях, когда электрическая энергия передается на большое расстояние. При этом на пути передачи электрической энергии имеется ряд элементов, которые являются либо источниками, либо потребителями реактивной мощности. В связи с большой электрической удаленностью потребителей и генераторов решить задачу поддержания напряжения у потребителей путем только регулирования возбуждения генераторов практически невозможно. Следует иметь в виду, что допустимые отклонения напряжения на выводах генератора от номинального значения невелики.

В связи с этим с точки зрения регулирования напряжения и реактивной мощности элементы электрической системы принято подразделять на две группы:

- системообразующие сети;
- распределительные сети.

*Системообразующие сети* включают в себя элементы для передачи электроэнергии в центры нагрузок, а *распределительные сети* – элементы, примыкающие к потребителю.

С точки зрения рассматриваемой задачи в *системообразующих сетях* режим должен быть подчинен задачам эффективной передачи электроэнергии: устойчивость параллельной работы, снижение потерь электроэнергии, ограничение напряжений значениями допустимыми для изоляции электрооборудования.

В *распределительных сетях* главная задача – это обеспечение требуемых уровней напряжения у потребителя.

Для решения этих задачи используется целый арсенал технических средств. Таким образом, требования к уровням напряжения в системообразующих высоковольтных сетях и распределительных сетях подчинены различным задачам. Поэтому вопросы регулирования напряжения в них решаются отдельно.

### **3.5.1. Регулирование напряжения в системообразующих сетях**

Важной является задача регулирования напряжения в системообразующих сетях при наличии сравнительно протяженных линий, связывающих отдельные части энергосистемы.

В режимах максимальных нагрузок приемной части энергосистемы переток активной мощности по линии связи может быть равным или

большим натуральной мощности. Если передаваемая мощность равна натуральной, то линия нейтральна в отношении участия в балансе реактивной мощности. При передаче мощности большей натуральной линия является потребителем реактивной мощности, а в режиме малых нагрузок – источником реактивной мощности.

В режимах максимальных нагрузок для обеспечения потребности приемной системы в реактивной мощности в принципе могут быть использованы (при наличии) резервы реактивной мощности передающей системы. В этом случае необходимо обеспечить перепад напряжений по концам линии в пределах допустимого повышения напряжения на передающем конце.

При передаче реактивной мощности возрастают потери активной мощности. Поэтому обеспечение баланса реактивной мощности приемной системы, только за счет передачи из передающей системы может быть нецелесообразным. Поэтому по возможности должны использоваться местные источники реактивной мощности приемной системы. Если при этом резервы реактивной мощности генераторов приемной системы недостаточны, то устанавливаются дополнительные источники, которыми могут быть синхронные компенсаторы, статические конденсаторы, статические управляемые источники реактивной мощности.

В режимах минимальных нагрузок, когда по линии передается мощность значительно меньше натуральной ( $0,2 - 0,4P_{\text{нат}}$ ) избыточная реактивная мощность линии близка к максимальной, которая для линий 330 кВ составляет  $(0,35 - 0,4)$  Вар/км, а для линий 500кВ – около 1 МВар/км. В таких режимах возможно повышения напряжения выше максимально допустимых.

Длительно допустимое напряжение составляет:

- при  $U_{\text{ном}} = 220$  кВ,  $U_{\text{под}} = 1,15 \cdot 220 = 252$  кВ,
- при  $U_{\text{ном}} = 330$  кВ,  $U_{\text{под}} = 1,1 \cdot 330 = 363$  кВ,
- при  $U_{\text{ном}} = 500$  кВ,  $U_{\text{под}} = 1,05 \cdot 500 = 525$  кВ.

Возможности поглощения избыточной реактивной мощности генераторами и синхронными компенсаторами передающей и приемной системы могут быть ограничены. У генераторов ограничение по принимаемой реактивной мощности, как известно, связаны с нагревом торцевых зон обмотки статора и внутренней устойчивостью.

Дальнейшая компенсация избыточной реактивной мощности осуществляется шунтирующими реакторами, которые стремятся разместить по возможности равномерно вдоль линии.

Безусловно, между двумя крайними режимами максимальных и минимальных нагрузок возможны промежуточные режимы. Поэтому весьма желательно, чтобы источники или потребители реактивной

мощности были плавнорегулируемыми. Это создает возможность реализации автоматического управления.

### **3.5.2. Регулирование напряжения в распределительных электрических сетях**

Регулирование напряжения в распределительных сетях осуществляется с целью поддержания у потребителей уровней напряжения в допустимых пределах, определяемых нормативными документами.

В зависимости от конфигурации сети, графиков нагрузок потребителей и других факторов в распределительных сетях могут использоваться различные методы и технические средства для регулирования напряжения.

#### **Регулирование напряжения в центре питания**

Регулирование напряжения осуществляется на узловой подстанции. Поддержание в допустимых пределах напряжения у потребителей регулированием напряжения в центре питания возможно только в том случае, если требования к изменению напряжения для какой-то одной группы потребителей не оказываются противоречивыми для других групп потребителей.

Очевидно, это будет иметь место в том случае, если графики нагрузки потребителей, питающихся от узловой подстанции, мало отличаются друг от друга, а именно – периоды максимальных и минимальных нагрузок у них совпадают.

В зависимости от степени неравномерности графика нагрузки возможны следующие виды регулирования в центре питания:

- **поддержание постоянного напряжения в центре питания (стабилизация напряжений).** Такой вариант регулирования возможен в том случае, если неравномерность суточных графиков нагрузки всех видов потребителей невелика.
- **встречное регулирование напряжения.** При встречном регулировании напряжение в центре питания регулируется в зависимости от тока нагрузки – в режиме максимальных нагрузок повышается, а в режиме минимальных нагрузок снижается. В качестве средства регулирования в этом случае чаще всего используется изменение коэффициента трансформации трансформаторов узловой подстанции (рис. 3.21).

#### **Индивидуальное (местное) регулирование напряжения.**

При несовпадающих графиках нагрузки и различной удаленности потребителей от центра питания централизованное регулирование не может обеспечить напряжение в допустимых пределах у всех потребителей.

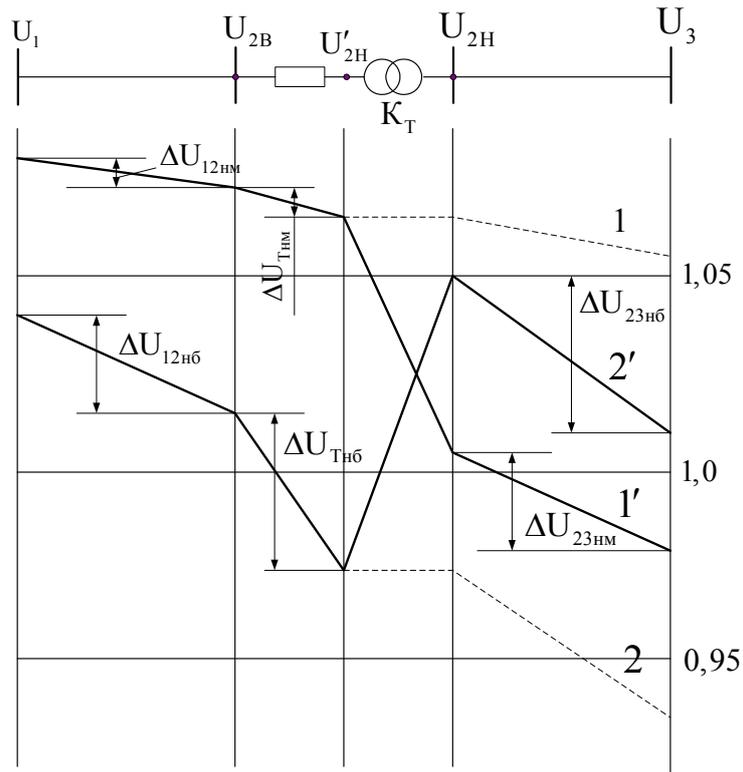


Рис. 3.21. Встречное регулирование напряжения:

$1$  и  $1'$  – напряжение у потребителя в режиме минимальных нагрузок соответственно без регулирования и при встречном регулировании,  
 $2$  и  $2'$  – то же в режиме максимальных нагрузок

В таком случае дополнительное регулирование напряжения у отдельных потребителей может осуществляться с помощью следующих технических средств.

**Изменение коэффициента трансформации на понизительных подстанциях потребителей.** Если при изменении суммарной нагрузки напряжение на шинах центральной подстанции изменяется незначительно, то есть в питающей сети имеется достаточный резерв реактивной мощности, то регулирование напряжения у отдельных потребителей изменением коэффициента трансформации является практически независимым.

В условиях дефицита реактивной мощности изменение коэффициента трансформации для увеличения напряжения, например, на подстанции Б (рис. 3.22) приводит к увеличению потребления реактивной мощности нагрузкой Н1 в соответствии с ее статической характеристикой. Из-за этого снижается напряжение в центре питания и напряжение на других нагрузках.

**Изменение потока реактивной мощности в отдельных участках сети.** Установка у потребителей компенсирующих устройств, например,

батареи конденсаторов (БК), позволяет изменять поток реактивной мощности на соответствующем участке сети. При подключении батареи конденсаторов параллельно нагрузке Н1 (рис. 3.23) потеря напряжения на участке АБ будет равна (без учета поперечной составляющей падения напряжения)

$$\Delta U = \frac{Pr + (Q_H - Q_{БК})x}{U_1}.$$

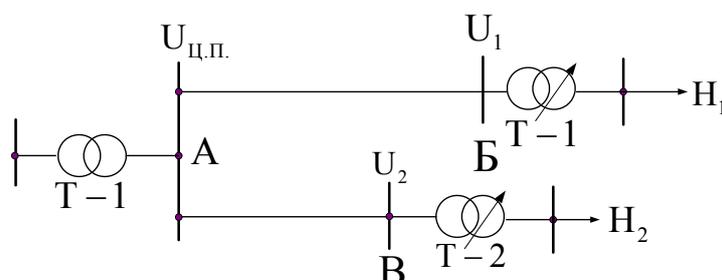


Рис. 3.22. Изменение коэффициента трансформации на понизительных подстанциях потребителей

Очевидно, что, изменяя  $Q_{БК}$ , можно поддерживать напряжение в необходимых пределах.

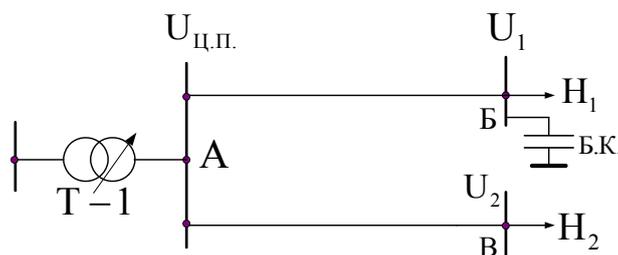


Рис. 3.23. Подключение батареи конденсаторов параллельно нагрузке

В качестве источников реактивной мощности могут использоваться и другие технические средства. Принципиальное отличие регулирования за счет применения источников реактивной мощности от регулирования изменением коэффициентов трансформации заключается в том, что при этом участки сети частично или полностью разгружаются от потоков реактивной мощности. Одновременно это приводит к снижению потерь активной и реактивной мощности.

При использовании в качестве источников реактивной мощности батареи конденсаторов следует иметь в виду, что реактивная мощность батареи пропорциональна квадрату напряжения. Поэтому эффект компенсации реактивной мощности сильно снижается при снижении напряжения.

При использовании в качестве источника реактивной мощности синхронных компенсаторов или синхронных двигателей в режиме пере-

возбуждения и подчинении работы АРВ задаче поддержания напряжения вырабатываемая реактивная мощность, напротив, увеличивается при снижении напряжения в соответствии с характеристикой регулирования.

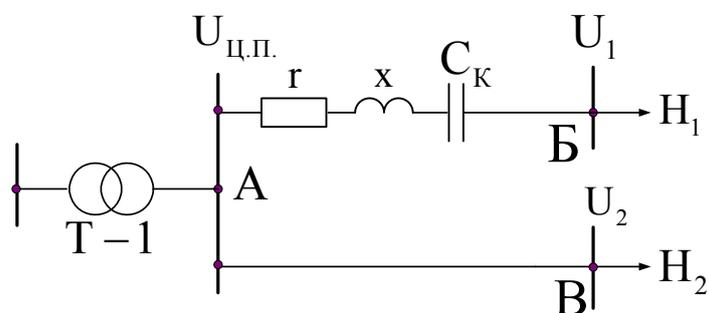


Рис. 3.24. Участок сети с продольной компенсацией

**Компенсация реактивного сопротивления участков сети (продольная компенсация).** Влияние продольной емкостной компенсации на уровни напряжения очевидно, так как потеря напряжения на участке сети с продольной компенсацией (рис. 3.24) уменьшается и становится равной

$$\Delta U = \frac{Pr + Q \left( x - \frac{1}{\omega C_K} \right)}{U_1}.$$

В общем случае задачи регулирования напряжения в распределительных сетях решаются совместным использованием различных методов и технических средств.

Даже в одной и той же сети решение задачи поддержания напряжения в допустимых пределах может иметь несколько вариантов. Электрические режимы в этих вариантах могут отличаться перетоками реактивной мощности в отдельных участках, и суммарными потерями активной мощности.

В сложных электрических сетях современная постановка задачи регулирования напряжения и реактивной мощности может предусматривать ведение режима, подчиненного какому-либо критерию оптимальности. Таким критерием может быть минимум потерь активной мощности от протекания потоков реактивной мощности, а уровни напряжения у потребителей при этом выступают как ограничения.

Для автоматизации процесса по такому алгоритму требуется большой объем информации о текущем режиме электрической системы. Эта информация для обработки в каком-либо центре может быть получена только с помощью средств телеизмерений.

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ .....	6
1.1. Понятие звена системы автоматического регулирования и математическое описание свойств линейных звеньев .....	7
1.1.1. Передаточная функция звена .....	9
1.1.2. Переходная характеристика (или переходная функция) .....	9
1.1.3. Импульсная переходная функции (весовая функция) .....	10
1.1.4. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФХ) ...	11
1.2. Получение передаточной функции системы автоматического регулирования по передаточным функциям звеньев .....	14
1.2.1. Эквивалентные передаточные функции типовых соединений звеньев .....	15
1.2.2. Правила переноса воздействий .....	17
1.3. Обобщенная эквивалентная схема системы автоматического регулирования .....	18
1.4. Свойства системы автоматического регулирования в установившемся режиме .....	21
1.5. Устойчивость систем автоматического регулирования .....	24
1.5.1. Критерии устойчивости систем автоматического регулирования .....	24
1.6. Оценка качества систем автоматического регулирования в переходном режиме .....	28
2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН .....	34
2.1. Тиристорные системы возбуждения прямого управления .....	35
2.2. Электромашинные системы возбуждения .....	38
2.2.1. Бесщеточная система возбуждения .....	38
2.2.2. Высокочастотная система возбуждения .....	39
2.2.3. Система возбуждения с генератором постоянного тока .....	40

2.3. Количественные характеристики систем возбуждения .....	41
2.3.1. Общие принципы выполнения устройств АРВ .....	43
2.3.2. Характеристики генераторов, оборудованных устройством АРВ, в установившихся режимах .....	44
2.3.3. Выполнение устройств АРВ для систем возбуждения различного типа .....	48
2.4. Устройства АРВ для высокочастотной системы возбуждения и систем возбуждения на основе генераторов постоянного тока .....	54
2.4.1. Краткие сведения о магнитных усилителях .....	54
2.4.2. Устройства АРВ для высокочастотной системы возбуждения .....	65
2.4.3. Выполнение АРВ для систем возбуждения с генератором постоянного тока .....	70
<b>3. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ .....</b>	<b>81</b>
3.1. Основные соотношения, необходимые для рассмотрения вопросов регулирования напряжения .....	81
3.2. Естественные потребители и источники реактивной мощности в энергосистемах .....	85
3.3. Технические средства для управления режимом работы энергосистемы по напряжению и реактивной мощности .....	85
3.3.1. Компенсирующие устройства, осуществляющие скалярное управление .....	86
3.3.2. Современные технические средства для управления режимом работы электрических сетей .....	92
3.4. Автоматическое регулирование уровней напряжения и потоков реактивной мощности на электростанциях .....	96
3.5. Регулирование уровней напряжения и потоков реактивной мощности в электрических сетях .....	102
3.5.1. Регулирование напряжения в системообразующих сетях .....	103
3.5.2. Регулирование напряжения в распределительных электрических сетях .....	105

Учебное издание

ВАЙНШТЕЙН Роберт Александрович  
ШЕСТАКОВА Вера Васильевна  
КАЦ Илья Маркович

# АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ В НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ

Часть 1

Учебное пособие

**Издано в авторской редакции**

Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*  
Дизайн обложки *А.И. Сидоренко*

Подписано к печати 21.06.13. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 6,46. Уч.-изд. л. 5,84.  
Заказ 695-13. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru