

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Р.Г. ХУЗЯШЕВ, О.В. НАУМОВ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Казань 2018

УДК 621.311

ББК 31.2

X98

Рецензенты:

кандидат технических наук, генеральный директор
ООО «Научно-производственное объединение «Энергия» *А.В. Кузнецов*;
доктор технических наук, профессор Казанского государственного
энергетического университета *Е.И. Грачёва*

X98 **Хузяшев Р.Г., Наумов О.В.**

Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие / Р.Г. Хузяшев, О.В. Наумов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – 90 с.

В учебном пособии изложены общие сведения об электромеханических переходных процессах; виды электроэнергетических систем; физические явления, обусловленные электромеханическими переходными процессами; практические методы расчета статической динамической устойчивости; основы метода малых колебаний, а также описаны мероприятия по повышению устойчивости электроэнергетических систем.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения по образовательным программам направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.311

ББК 31.2

Введение

Переход из одного исходного режима электрической системы (ЭС) в другой сопровождается **переходным процессом**. В силу физических свойств ЭС этот переходный процесс является единым по своей природе и должен рассчитываться, строго говоря, на основе общего математического описания. Однако в большинстве практических задач принимают, что он состоит из ряда процессов, сменяющих друг друга и характеризующих изменение определенной группы параметров режима.

Переходный процесс в ЭС характеризуется совокупностью электромагнитных и механических изменений в системе. Благодаря довольно большой механической инерции вращающихся электрических машин начальная стадия этого процесса характеризуется преимущественно электромагнитными изменениями. Этот вид переходного процесса носит название **электромагнитного**. Впоследствии электромагнитный переходный процесс дополняется механическим. Этот вид переходного процесса носит название **электромеханического**.

В настоящем пособии изложена теория **электромеханических переходных процессов**. Они протекают в системе при малых и больших возмущениях. Основным уравнением, связывающим электрические и механические параметры, является уравнение движения ротора генератора.

При неучете фактора времени, считая отклонения параметров режима независимыми от времени протекания переходного процесса, получают статические характеристики генераторов, по которым исследуется статическая устойчивость системы. Статическая устойчивость – это способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения или режим, весьма близкий к исходному (если возмущающее воздействие не снято).

Динамические характеристики, зависимости параметров режима с учетом их изменения во времени на практике не используются ввиду их сложности. Для исследования динамической устойчивости энергосистем применяются статические характеристики, а протекание переходного процесса во времени моделируется изменением одного из параметров режима, зависимость которого от данного режима может быть впоследствии определена. Строго говоря, эта зависимость и будет являться динамической характеристикой. Динамическая устойчивость – это способность системы восстанавливать после большого возмущения исходное состояние или практически близкое к исходному (допустимому по условиям эксплуатации системы).

Фигурирующие здесь понятия малых и больших возмущений условны. Малым возмущением принято считать результат возмущающего воздействия, влияние которого на характер поведения системы проявляется практически независимо от места появления возмущающего воздействия и его значения (например, возмущения от колебаний нагрузки). Тогда как большое возмущение – это возмущение, влияние которого на характер поведения системы существенно зависит от времени существования, значения и места появления возмущающего воздействия (например, возмущения от оперативных переключений в сети, от коротких замыканий).

В данном пособии рассмотрены электромеханические переходные процессы, происходящие в электрической системе и узлах нагрузки, после различных нормальных и аварийных возмущений. Изложены методы расчетов для простейших электроэнергетических систем (ЭЭС), приведены методики выбора мероприятий по обеспечению устойчивой работы узлов нагрузки и электрической системы.

Целью издания данного учебного пособия является формирование знаний, умений по электромеханическим переходным процессам в электроэнергетических системах, изучение физических явлений, обусловленных такими переходными процессами, практических методик расчета статической и динамической устойчивости.

Задачей пособия является изучение студентами переходных процессов для представления причин их возникновения, физической сущности, предвидения их протекания процессов и управления ими, приобретение навыков исследования электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах с учетом наличия вращающихся машин, ознакомление с принципами расчетов электроэнергетических систем при трехфазных и несимметричных коротких замыканиях.

Дисциплина «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах» базируется на предшествующих дисциплинах, таких как «Теоретические основы электротехники», «Электромагнитные переходные процессы» и др.; тесно связана с параллельно изучаемыми дисциплинами: «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность», «Переходные процессы электроэнергетических систем» – и, в свою очередь, является базой для изучения последующих дисциплин направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Материал, представленный в учебном пособии направлен на формирование у студентов способности оценивать техническое состояние и остаточный ресурс оборудования.

1. Общие сведения об электромеханических переходных процессах в электроэнергетических системах и причинах, их порождающих

Электроэнергетической системой является совокупность источников электроэнергии (генераторы и турбины), электросетей для ее преобразования и передачи и ее потребителей (резистивные потребители и двигательная нагрузка).

В дисциплине «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах» вместе с изменением электрических величин рассматривается также механическое (вращательное) движение роторов электрических машин. Основное внимание уделяется вопросам устойчивости совместного движения роторов этих машин, объединенных в параллельную работу электрическими связями в электроэнергетических системах.

При изложении дисциплины, а также в практических задачах проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем используется ряд терминов, основное содержание которых наиболее полно раскрыто в книгах [6], [7], [12].

Энергетической системой в широком смысле называется совокупность всех звеньев общей цепочки преобразования, распределения и применения всех видов энергии.

Из этого определения следует, что энергетическую систему составляют не только элементы электротехнического и теплотехнического оборудования, но также и источники энергоресурсов, такие как угольные шахты, торфопредприятия, нефтепромыслы, газовые промыслы, водохранилища и прочие.

Электроэнергетической системой или, сокращенно, энергосистемой называют часть энергетической системы, в которой производится, преобразуется, передается и потребляется исключительно или преимущественно электрическая энергия.

Электроэнергетические системы делятся на автономные (там, где имеется один источник энергии) и объединенные (там, где имеется несколько источников энергии).

Электрической системой называется электрическая часть электроэнергетической системы.

В электрической системе различают две группы элементов:

- силовые элементы – вырабатывающие, преобразующие, передающие и распределяющие электрическую энергию;
- элементы управления – регулирующие и изменяющие состояние системы.

Совокупность процессов, существующих в системе и определяющих её состояние в любой момент времени или на некотором его интервале, называется режимом системы.

Показатели режима, отражающие условия работы системы, называются его параметрами. К ним относятся значения мощностей, напряжений, токов, частоты и т.п.

Параметрами системы называются показатели, с помощью которых характеризуются физические свойства и состояния элементов системы. К ним, например, относятся значения сопротивлений, проводимостей, постоянных перемен, коэффициентов трансформации.

Из множества режимов электроэнергетической системы можно выделить три основных.

Нормальный установившийся режим характеризуется длительным сохранением значений режимных параметров безаварийно работающих элементов системы. Применительно к таким режимам проектируется электроэнергетическая система и определяются её технико-экономические параметры.

Послеаварийный установившийся режим наступает после аварийного отключения какого-либо элемента или ряда элементов системы.

Переходные процессы, нормальные или аварийные, составляющие переходной режим, – это закономерные последовательные изменения параметров системы от момента возмущения до начала нового установившегося состояния.

Нормальные переходные процессы сопровождают текущую эксплуатацию системы. Эти процессы возникают при обычных эксплуатационных операциях: при отключениях и включениях элементов системы, при изменениях мощности нагрузок и генераторов, при действии автоматических регулирующих устройств.

Аварийные переходные процессы протекают при переходе элементов системы в аварийное состояние, их отключении и повторном включении.

Переходные процессы и, соответственно, переходные режимы начинаются с возмущений – начальных отклонений параметров режима, т.е. начальных изменений значений токов, напряжений, мощностей и других параметров.

Причины, по которым появляются возмущения, называются возмущающими воздействиями. В качестве возмущающих воздействий выступают, например, короткие замыкания, обрывы проводов, коммутационные переключения в электрических сетях. В свою очередь, коммутации подразделяют на два вида, а именно: включение любого потребителя электрической

энергии является коммутацией нормального режима, при том как аварийная коммутация происходит по причине аварии типа короткого замыкания (КЗ) или обрыва.

При любых коммутациях в электрической системе возникает переходной процесс, т.е. изменение режима работы энергосистемы (параметрами режима являются величины).

Различают малые и большие возмущения в системе.

Малые возмущения в действующей энергосистеме присутствуют непрерывно. Существование этих возмущений связано с непрерывным изменением нагрузки, действием регулирующих устройств, температурными колебаниями активных сопротивлений элементов системы и с другими причинами. Поэтому строго неизменного режима системы не существует и, говоря об установившемся режиме, в сущности имеют в виду режим малых возмущений. При этом предполагают, что малые возмущения и связанные с ними непрерывные процессы происходят около некоторого равновесного состояния системы.

Большими возмущениями считают начальные отклонения параметров режима, вызванные какими-либо резкими изменениями в электроэнергетической системе, т.е. интенсивными возмущающими воздействиями: короткими замыканиями, коммутационными переключениями в электрической сети и другими причинами.

Устойчивость параллельной работы электрических машин должна сохраняться при малых и больших возмущениях в электроэнергетической системе. В зависимости от типа возмущений различают два основных вида устойчивости системы.

Статической устойчивостью называется способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения или режим, весьма близкий к исходному (если возмущающее воздействие не снято).

Динамическая устойчивость – это способность системы восстанавливать исходное состояние (или близкое к исходному) после действия больших возмущений.

Восстановление близкого к исходному состояния имеет место в тех случаях, когда возмущающее воздействие, например, отключение какого-либо элемента системы, не снимается в течение переходного режима, вследствие чего она не возвращается в такое состояние.

Специфической разновидностью является результирующая устойчивость – способность электроэнергетической системы возвращаться в исходное состояние (или близкое к нему) после кратковременного

асинхронного хода синхронных машин. При этом асинхронный ход (режим) может быть результатом нарушения статической или динамической устойчивости системы.

Подчёркивая разницу между результирующей и динамической устойчивостями, последнюю часто называют синхронной динамической устойчивостью энергосистемы.

Итак, рассмотрим вышеописанные определения на конкретном примере. Для вычисления параметров нормального и аварийного режимов необходимо знать:

1) схему;

2) параметры системы (активное и реактивное сопротивления линий электропередачи, поперечную емкость линий электропередачи, сопротивления нагрузок, а также источника электроэнергии, его ЭДС);

3) уравнения (уравнения Кирхгофа), которые связывают параметры системы и режима.

У процессов, связанных с синусоидальными изменениями параметров режима основной рабочей частоты (50 Гц), обычно рассматриваются не мгновенные значения, а их огибающие (метод комплексных амплитуд).

Например, на рис. 1.1 изображен график зависимости функции напряжения U , который является параметром режима, от времени t , амплитудного значения напряжения U_m и угловой частоты ω .

График представляет собой синусоиду, часть которой показана на рис. 1.1 в течение периода $T = 0,02$ с при циклической частоте $f = 50$ Гц или при угловой частоте $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Гц} = 314 \text{ с}^{-1}$. При этом период $T = 0,02$ с напрямую зависит от частоты по формуле $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02$ с.

Как отмечено на графике, максимальное значение напряжения находится в точке 310 В, но полезным (действующим) значением напряжения является отметка в 220 В.

Под статическими характеристиками понимаются графически или аналитически представленные связи каких-либо параметров режима с другими его параметрами и характеристиками системы. Эти связи выявляются в условиях установившегося или переходного режима системы, но при допущениях, позволяющих считать их не зависящими от времени.

Под динамическими характеристиками понимаются взаимосвязи параметров, полученные в условиях, когда указанные критерии или часть их зависят от времени.

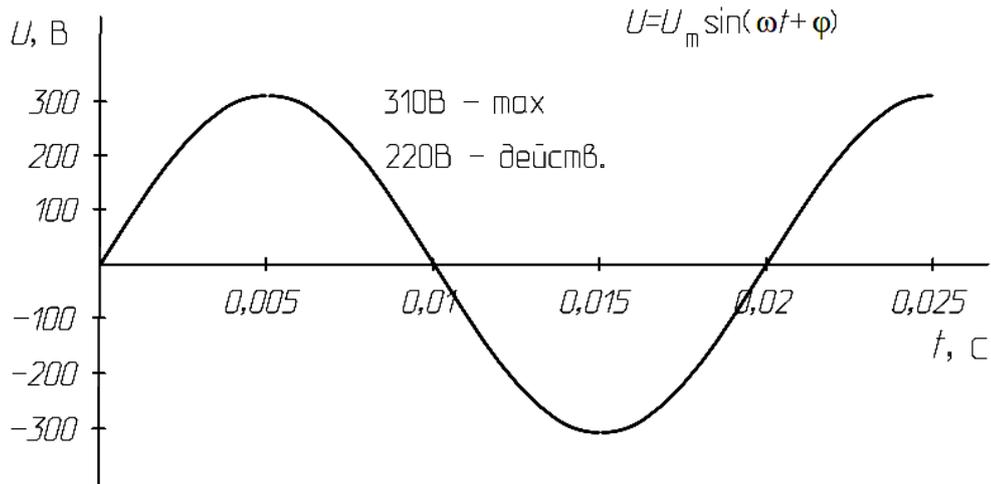


Рис. 1.1. График зависимости напряжения от времени

Таким образом, статическая характеристика представлена зависимостью $x = \varphi(y_1, y_2, \dots, y_n)$, а динамическая – $x = \varphi(y_1, y_2, \dots, y_n, t, \frac{dy_1}{dt}, \frac{dy_2}{dt}, \frac{dy_n}{dt})$.

Во время переходного режима система колеблется от одного установившегося режима к другому или после возмущения возвращается в исходное установившееся состояние. Режимы электрических систем, как установившиеся, так и переходные, должны отвечать определенным требованиям, которые надо иметь в виду при проведении расчетов. Так, в исходном состоянии, являющемся, как правило, нормальным рабочим режимом системы, должны быть обеспечены:

- качество – снабжение потребителей энергией, отвечающей по своим показателям установленным нормативам;
- надежность – снабжение потребителей энергией без перерыва и без снижения ее качества длительнее, чем для данной системы и данного вида потребителей это предусмотрено соответствующими нормативами, устойчивое сохранение заданного режима (устойчивость);
- экономичность – надежное снабжение потребителей энергией удовлетворительного качества при как можно меньших затратах средств на ее производство и передачу.

Контрольные вопросы

1. Что является электроэнергетической системой?
2. На какие группы делится электрическая система?
3. На какие группы делятся электроэнергетические системы?
4. Вследствие чего происходят переходные процессы в электроэнергетических системах?

5. Что понимается под статическими характеристиками?
6. Что понимается под динамическими характеристиками?
7. Какими понятиями оценивается нормальный режим работы системы?
8. Что является функцией сопротивления электропотребителей при рассмотрении автономной электроэнергетической системы?

2. Автономная электроэнергетическая система. Простейшая модель автономной электроэнергетической системы

При анализе аварийных режимов важно уметь оценивать изменения их параметров, чтобы избежать большого ущерба для электрооборудования.

Следствием аварийных коммутаций является изменение нормальных режимов работы энергопотребителей и энергооборудования: напряжения, тока и частоты.

Нормальным режимом по напряжению считаются отклонения от -5% до $+10\%$ от номинального напряжения $U_{\text{ном}}$ [2].

Нормальный режим частоты считаются отклонения не более $\pm 0,1$ Гц от номинальной частоты $f_{\text{ном}}$ [2].

При рассмотрении автономной электроэнергетической системы напряжение на шинах электропотребителей является функцией их сопротивления.

Рассмотрим простейшую модель автономной электроэнергетической системы, изображенную на рис. 2.1, где изображен генератор переменного тока Γ , сопротивления генератора R_{Γ} , линий электропередачи $R_{\text{Л}}$ и нагрузки $R_{\text{Н}}$. Выведем зависимость тока, проходящего через нагрузку, от величины ее сопротивления, а также покажем зависимость напряжения на зажимах нагрузки от величины ее сопротивления. Выразим эти зависимости, воспользовавшись вторым законом Кирхгофа.

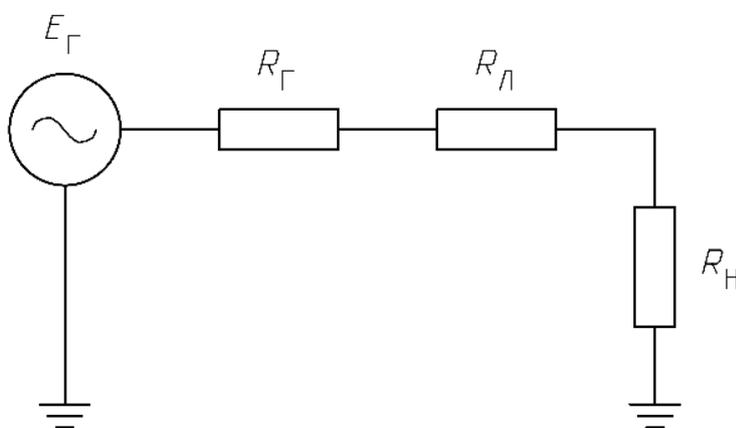


Рис. 2.1. Автономная электроэнергетическая система

По второму закону Кирхгофа, запишем выражение:

$$IR_{\Gamma} + IR_{\text{H}} + IR_{\text{Л}} = E.$$

Зависимость параметров через искомый ток I :

$$I = \frac{E}{R_{\Gamma} + R_{\text{H}} + R_{\text{Л}}}.$$

Если рассмотреть полученное выражение аналитическим способом и произвести замены неизменяющихся параметров на некоторые константы, например a и b , а переменные задать аргументами y и x , то получаем простейшую зависимость, которую легко задать на графике:

$$y = \frac{a}{b + x}.$$

Зависимость тока, проходящего через нагрузку, от величины ее сопротивления можно представить в виде графика функции $y = \frac{a}{b + x}$, где по оси абсцисс отображается сопротивление нагрузки R_{H} , а по оси ординат – ток I . Зависимость тока, проходящего через нагрузку, от ее сопротивления представлена на рис. 2.2.

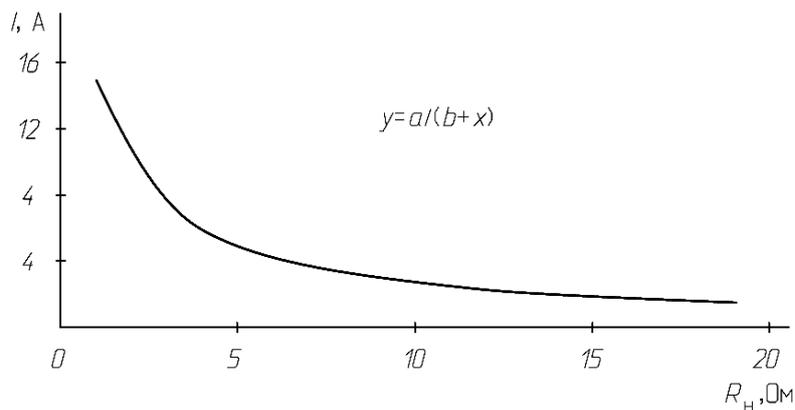


Рис. 2.2. Зависимость тока нагрузки от величины его сопротивления

Предыдущую зависимость, учитывая, что $a, b = \text{const}$, можно привести к следующему виду:

$$y = \frac{1}{x}.$$

Отсюда:

$$y = ax + b;$$

$$y = a + bx.$$

Конечное выражение для построения графика зависимости напряжения на зажимах нагрузки от величины ее сопротивления имеет следующий вид:

$$y = \frac{ax}{b+x}.$$

Произведем переход от условных обозначений к реальным искомым параметрам:

$$U_H = IR_H = \frac{ER_H}{R_\Gamma + R_H + R_\Lambda}.$$

Как следует из произведенных преобразований, зависимость напряжения на зажимах нагрузки от величины ее сопротивления можно представить в виде графика функции $y = \frac{ax}{b+x}$, где по оси абсцисс отображается сопротивление нагрузки R_H , а по оси ординат – напряжение U . Для его построения примем следующие значения переменных (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Таблица значений переменных

y	0	$a = E$
x	0	∞

Для определения характера изменения функции (монотонная или экстремальная) необходимо проанализировать знак первой производной от функции по ее аргументу.

Производная функции – это отношение изменения функции к вызвавшему ее изменению аргумента.

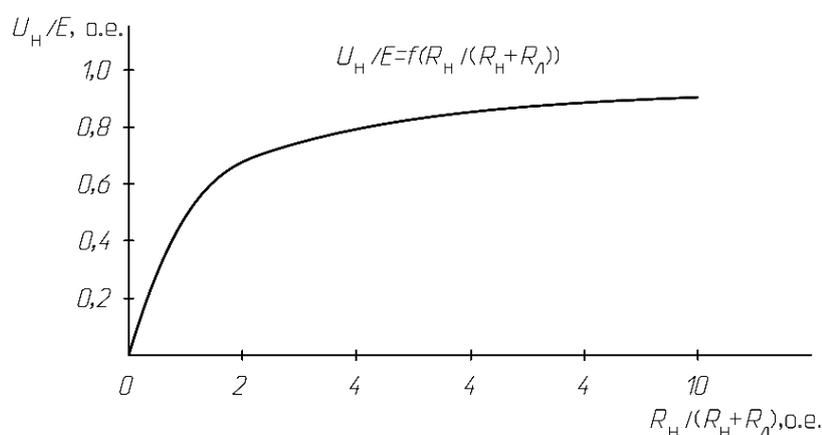


Рис. 2.3. Зависимость напряжения на зажимах нагрузки от величины сопротивления нагрузки

Возьмём производную от отношения числителя к знаменателю:

$$y = \frac{v(x)}{u(x)},$$

$$y' = \frac{u'v - uv'}{u^2},$$

$$u = b + x,$$

$$v = a.$$

При этом получаем выражение следующего вида:

$$y' = \frac{a(b+x) - ax}{(b+x)^2} = \frac{ab + ax - ax}{b^2 + 2bx + x^2} = \frac{ab}{b^2 + 2bx + x^2}.$$

Таким образом, знак производной во всем диапазоне изменения величины сопротивления нагрузки положителен, а функциональная зависимость величины напряжения на нагрузке от ее значения – монотонна.

На следующем этапе рассмотрим зависимость мощности на зажимах нагрузки от величины ее сопротивления. Для этого домножим буквенную зависимость напряжения от сопротивления нагрузки на зависимость тока I от ее сопротивления:

$$P = UI = \frac{E}{R_{\Gamma} + R_{\text{Л}} + R_{\text{Н}}} \cdot \frac{ER_{\text{Н}}}{R_{\Gamma} + R_{\text{Л}} + R_{\text{Н}}} = \frac{E^2 R_{\text{Н}}}{(R_{\text{Н}} + R_{\text{Л}} + R_{\Gamma})^2}.$$

В конечном результате получаем:

$$P = \frac{E^2 R_{\text{Н}}}{(R_{\text{Н}} + R_{\text{Л}} + R_{\Gamma})^2}.$$

Для упрощения примем $E_2 = a$; $R_{\text{Н}} = x$; $R_{\text{Л}} + R_{\Gamma} = b$:

$$y' = \frac{ax}{(b+x)^2}.$$

Кроме того, проверим функцию на монотонность:

$$y = \frac{v(x)}{u(x)},$$

$$y' = \frac{u'v - uv'}{u^2}.$$

Для значения v , u берем производную от переменной x :

$$v = ax,$$

$$v' = a,$$

$$u = (b + x)^2,$$

$$u' = 2(b + x).$$

Полученные результаты подставляем в исходное выражение:

$$y' = \frac{2(b+x)ax - a(b+x)^2}{(b+x)^2} = \frac{2abx + 2ax^2 - ab^2 - 2abx - ax^2}{(b+x)^2} = \frac{ax^2 - ab^2}{(b+x)^2}.$$

Приравниваем числитель к нулю, чтобы определить экстремум полученной функции:

$$ax^2 - ab^2 = 0,$$

$$x^2 = b^2,$$

$$x = b,$$

$$x = -b.$$

Производная от мощности преобразует знак в области изменения сопротивлений нагрузки, т.е. её функция экстремальна. Поэтому при составлении таблицы значений для построения графика учтем максимальное значение мощности P_{\max} (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Таблица значений

R_H	0	∞	$R_L + R_\Gamma$
P	0	0	P_{\max}

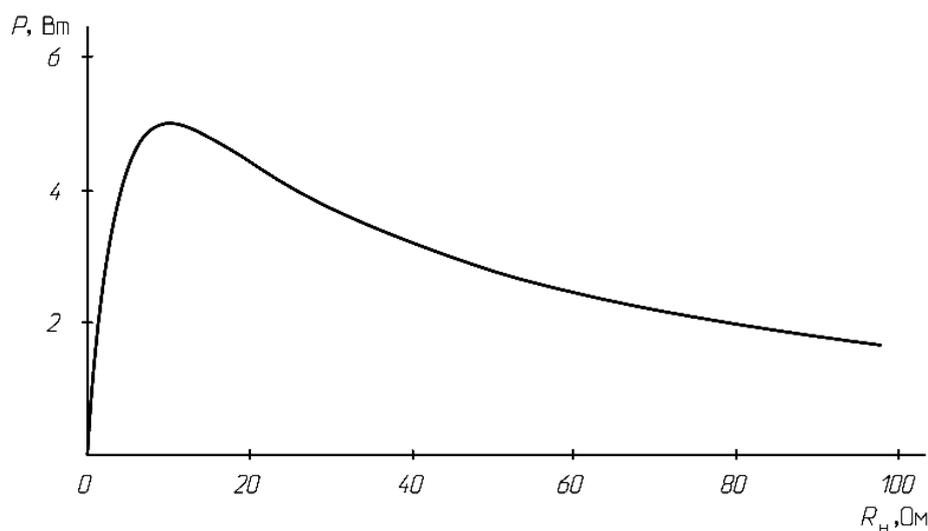


Рис. 2.4. Зависимость мощности на зажимах нагрузки от сопротивления

Полученный график зависимости мощности от сопротивления нагрузки указывает, что максимальная мощность P_{\max} выделяется в согласованной нагрузке, сопротивление которой равняется суммарному сопротивлению источника. Это свойство широко используется при передаче высокочастотных сигналов из антенны в приемник или из приемника в антенну, когда недопустимы потери мощности сигнала. При этом напряжение на согласованной нагрузке равно:

$$U_H = \frac{ER_H}{R_H + R_L + R_G} = \frac{E(R_L + R_G)}{R_L + R_G + R_L + R_G} = \frac{E(R_L + R_G)}{2R_L + 2R_G} = \frac{E(R_L + R_G)}{2(R_L + R_G)} = \frac{E}{2},$$

где $R_H = R_L + R_G$.

Таким образом, напряжение на согласованной нагрузке составляет половину напряжения холостого хода источника. При холостом ходе $R_H = \infty$.

Применим эти рассуждения к нагрузке силового трансформатора. Напряжение короткого замыкания трансформатора измеряется в % от его номинального напряжения $U_{\text{ном}}$.

Под напряжением короткого замыкания трансформатора понимается такое, которое будучи приложенным к первичной его обмотке производит во вторичной короткозамкнутой обмотке номинальный ток $I_{\text{ном}}$.

Коэффициент трансформации силового трансформатора соответственно равен:

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1},$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2.$$

Мощность в первичной обмотке трансформатора равна мощности во вторичной обмотке:

$$P_1 = P_2.$$

По закону Ома $U_{кз} = I_{ном} \cdot r$.

Если обе части равенства домножить на номинальное напряжение $U_{ном}$, то выражение примет вид:

$$U_{ном} \cdot U_{кз} = r I_{ном} \cdot U_{ном},$$

и так как $U_{кз\%} = \frac{U_{кз}}{U_{ном}}$, то следовательно:

$$U_{ном}^2 \cdot U_{кз\%} = r P_{ном}.$$

Из этого следует, что выражение для номинальной мощности примет вид:

$$P_{ном} = \frac{U_{ном}^2 \cdot U_{кз\%} \cdot 100\%}{r} = \frac{U_{ном}^2 \cdot 100\%}{r \cdot 100\%} = \frac{0,1 U_{ном}^2}{r},$$

где r – сопротивление трансформатора.

Приведенное выражение позволяет определить сопротивление r в схеме замещения трансформатора.

Так как номинальная мощность и мощность, выделяемая в нагрузке, равны,

$$\frac{(ER_{ном})^2 \cdot 0,1}{(r + R_{ном})^2 \cdot r} = \frac{E^2 \cdot R_{ном}}{(r + R_{ном})^2}.$$

Отсюда:

$$R_{ном} = \frac{r}{0,1} = 10r,$$

$$U_{ном} = \frac{E \cdot 10r}{R_{\Gamma} + R_{Л} + 10r} = \frac{E \cdot 10r}{11r} = 0,9E.$$

Таким образом, мы получили, что номинальное сопротивление нагрузки трансформатора $R_{ном}$ в 10 раз больше сопротивления трансформатора r .

Подставим $R_{ном} = 10r$ в формулу:

$$P_{\text{НОМ}} = \frac{E^2 \cdot R_{\text{НОМ}}}{(R_{\text{НОМ}} + r)^2}$$

и получим, что:

$$P_{\text{НОМ}} = \frac{E^2 \cdot 10r}{(11r)^2} = \frac{E^2 \cdot 10r}{121r^2} = \frac{0,08E^2}{r}.$$

Максимально возможная мощность вырабатывается при согласованной нагрузке $R_{\text{Н}} = r$:

$$P_{\text{Н max}} = \frac{E^2 \cdot r}{(2r)^2} = \frac{E^2}{4r}.$$

Отношение двух мощностей составляет:

$$\frac{P_{\text{Н}}}{P_{\text{Н max}}} = \frac{\frac{0,08E^2}{r}}{\frac{E^2}{4r}} = 0,08 \cdot 4 = 0,32.$$

Таким образом, предельная мощность, выделяемая в нагрузке трансформатора и удовлетворяющая качеству электроэнергии, составляет примерно третью часть от максимальной мощности, выделяемой на согласованной нагрузке трансформатора.

Соответственно, напряжение на предельно максимальной нагрузке трансформатора меньше на 10 % номинального напряжения холостого хода.

Контрольные вопросы и задания

1. Чему равно напряжение на согласованной нагрузке?
2. В чем измеряется напряжение КЗ трансформатора?
3. Какое значение сопротивления нагрузки используется при передаче сигналов по каналам связи?
4. Что подразумевается под напряжением КЗ трансформатора?
5. Что такое КЗ трансформатора при определении понятия «напряжение короткого замыкания трансформатора»?
6. Чему равно значение сопротивления согласованной нагрузки?

7. Запишите формулу максимальной и предельно допустимой мощности трансформатора.

8. Какие значения частоты и напряжения соответствуют нормальному режиму по ПУЭ?

9. Аналитически исследуйте зависимость тока на зажимах нагрузки от величины сопротивления самой нагрузки. Качественно подтвердите полученную зависимость, построив кривую изменения тока. Сопротивление источника $R_{ист}$ и нагрузки $R_{нагр}$ примите:

- $R_{ист}$ – активное, $R_{нагр}$ – комплексное;
- $R_{ист}$ – индуктивное, $R_{нагр}$ – активное;
- $R_{ист}$ – индуктивное, $R_{нагр}$ – комплексное.

3. Простейшая модель объединенной электроэнергетической системы

Простейшая модель объединенной электроэнергетической системы состоит из генератора с ЭДС E , канала передачи электроэнергии с реактивными сопротивлениями x и шин ЭЭС бесконечной мощности, напряжением $U = \text{const}$ и неизменной частотой $\omega_0 = \text{const}$ этого напряжения.

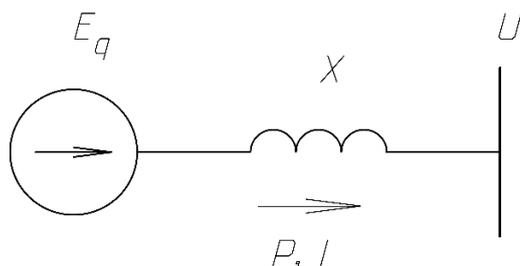


Рис. 3.1. Схема простейшей модели ОЭЭС

Рассмотрим процессы в объединенной электроэнергетической системе (ОЭЭС), в которой от удаленного нерегулируемого источника с ЭДС E в линию электропередачи сопротивлением x передается активная мощность P при токе I в энергосистему. Мощность поступает на приемные шины энергосистемы, принимаемые за шины бесконечной мощности. Определим основные соотношения между параметрами режима энергосистемы, необходимые для анализа процессов.

Падение напряжения на сопротивлении x представлено через ток I , протекающий в систему по линии, ЭДС генератора E и напряжение системы

U с соответствующим углом δ между ними. Отсюда, согласно II закону Кирхгофа, запишем уравнение, описывающее исследуемую модель системы:

$$Ijx = Ee^{j\delta} - U.$$

С помощью простейших математических преобразований с комплексными числами и формулы Эйлера приведем предыдущее выражение к виду:

$$\begin{aligned} I &= \frac{E - U}{jx} = \frac{(E - U)(-jx)}{jx(-jx)} = \frac{(E(\cos\delta + j\sin\delta) - U)(-jx)}{jx(-jx)} = \\ &= \frac{-E\cos\delta j + E\sin\delta + jE}{x} = \frac{E\sin\delta + j(U - E\cos\delta)}{x}. \end{aligned}$$

Таким образом, в конечном виде выражение отображает зависимость тока, протекающего в систему, от основных параметров рассматриваемой ОЭЭС.

Полная мощность, соответствующая условным параметрам, заданным ранее, вычисляется как произведение комплексного тока с напряжением приемной системы, которое является неизменным. При этом учитывается угол δ между ЭДС E и напряжением U :

$$S = UI = U \frac{E\sin\delta + j(U - E\cos\delta)}{x}.$$

Так как в полученной зависимости имеются явные действительные и мнимые части, то представляется возможным найти активные и реактивные мощности соответственно. Для этого запишем зависимость как:

$$S = P + jQ = \frac{U\sin\delta - j(U - E\cos\delta)}{x}.$$

Из последнего комплексного выражения выделим действительную часть, соответствующую активной мощности, протекающей в линии электропередач:

$$P = U \frac{E\sin\delta}{x}.$$

Реактивная мощность, уходящая в систему, будет соответственно равна мнимой части выражения полной мощности:

$$Q = U \frac{-U + E \cos \delta}{x}.$$

При $E_q = \text{const}$, $U = \text{const}$ зависимость активной мощности генератора от угла представляет собой синусоидальную функцию. Графическое изображение этой функции называется *передаточной или угловой характеристикой активной мощности генератора*. Это название сохраняется для графических изображений зависимостей и в более сложных случаях, например, при изменяющихся параметрах E_q , U или при работе генератора в составе сложной энергосистемы.

Угловая характеристика является геометрическим местом точек, соответствующих всем возможным значениям мощности, передаваемой от генератора.

В установившемся режиме от генератора передаётся только одна конкретная величина мощности, которой соответствует конкретное значение угла. Эта мощность P_0 равна мощности турбины, вследствие чего турбина, вал и ротор генератора сохраняют равномерное вращательное движение.

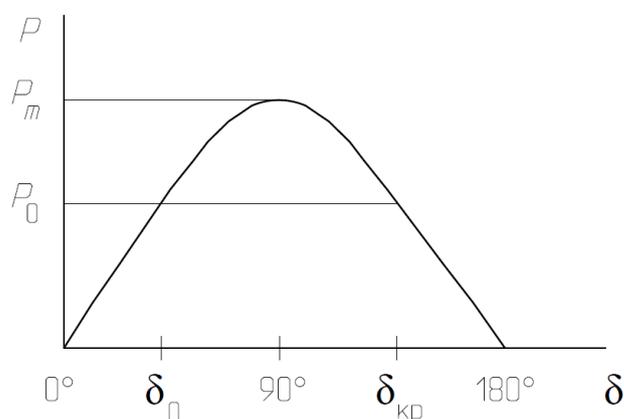


Рис. 3.2. Передаточная характеристика простейшей модели ОЭЭС

Контрольные вопросы и задания

1. Из каких основных элементов состоит простейшая модель объединенной электроэнергетической системы?
2. Что такое передаточная характеристика?

3. Постройте зависимость активной мощности от угла системы δ .
4. Постройте зависимость реактивной мощности от угла системы δ .
5. Каковы особенности передаточной характеристики в установившемся режиме?
6. Постройте передаточную характеристику простейшей модели ОЭЭС при различных параметрах соединяющего канала:
 - сопротивление канала активное;
 - сопротивление канала индуктивное;
 - сопротивление канала емкостное.

4. Расчет параметров режима электроэнергетической системы, содержащей любое число линейных элементов

Во многих случаях удалённая электростанция связана с приёмной системой более сложной сетью, чем одна линия и два трансформатора. При проведении расчетов такая сеть считается пассивной частью схемы замещения, если сопротивления и проводимости её элементов рассматриваются как независимые от параметров режима и других факторов. К пассивной части относят элементы, замещающие трансформаторы, линии электропередачи, реакторы, батареи статических конденсаторов и нагрузку, если она учитывается постоянными сопротивлениями. В силу неизменности параметров системы пассивная часть схемы замещения является линейной, и поэтому для её расчёта и преобразований применимы методы, разработанные для линейных электрических цепей.

Одним из широко распространённых способов математического описания пассивных частей схем замещения является их представление в форме обобщённых параметров, используемых при расчётах режимов простых и сложных энергосистем. Рассмотрим основные принципы определения этих параметров на примере преобразования схемы замещения ОЭЭС, в которой источники ЭДС E_q и U включены в схему произвольной сложности, состоящую из пассивных элементов.

Насколько бы ни была сложна пассивная часть схемы замещения, её всегда можно преобразовать к Т- или П-образному виду. Предположим, что такое преобразование проведено и получена Т-образная эквивалентная схема с источниками ЭДС E_q и U (рис. 4.1).

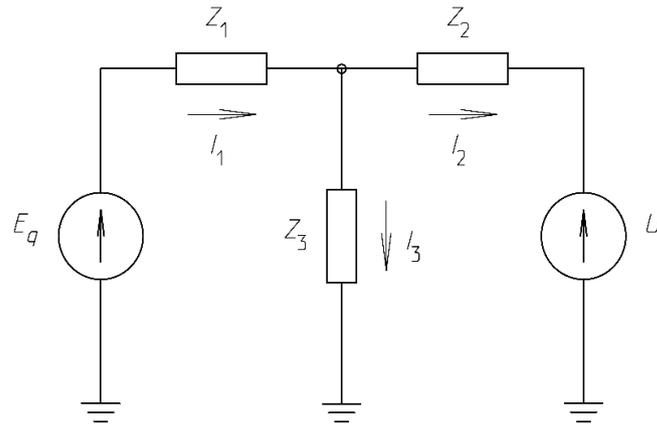


Рис. 4.1. Т-образная эквивалентная схема ОЭЭС

Определим обобщённые параметры, т.е. собственные и взаимные сопротивления (или проводимости) этой схемы.

Распределение токов в ветвях Т-схемы представим как результат наложения токов от двух источников ЭДС, действующих раздельно (рис. 4.2).

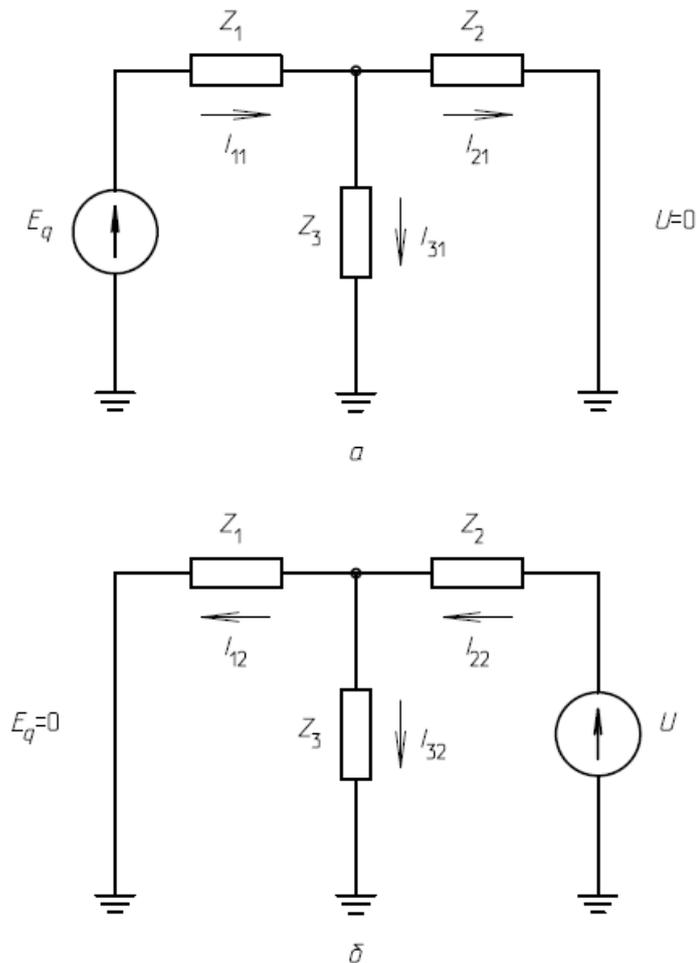


Рис. 4.2. Расчет токов методом наложения

В соответствии с принятыми положительными направлениями искомые токи I_1 и I_2 в трёхфазной схеме будут определены как

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_{11} - \underline{I}_{12} \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}_{22} + \underline{I}_{21} \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \underline{I}_{11} &= \underline{E}_\phi / Z_{11} = \underline{E}_\phi Y_{11} \\ \underline{I}_{22} &= \underline{E}_\phi / Z_{22} = \underline{E}_\phi Y_{22} \\ \underline{I}_{12} &= \underline{E}_\phi / Z_{12} = \underline{E}_\phi Y_{12} \\ \underline{I}_{21} &= \underline{E}_\phi / Z_{21} = \underline{E}_\phi Y_{21} \end{aligned}$$

В последних выражениях обобщённые параметры обозначены как: Z_{11} , Z_{22} и $Y_{11}=1/Z_{11}$, $Y_{22}=1/Z_{22}$ – соответственно собственные сопротивления и собственные проводимости ветвей с источниками ЭДС; Z_{12} , Z_{21} и $Y_{12}=1/Z_{12}$, $Y_{21}=1/Z_{21}$ – соответственно взаимные сопротивления и взаимные проводимости ветвей между узлами подключения источников ЭДС.

Из схем замещения и предыдущих выражений следует, что собственное сопротивление каждой ветви с источником ЭДС определяет величину тока в этой ветви при нулевом значении ЭДС другого источника.

Собственные сопротивления вычисляются как эквивалентные сопротивления пассивной части относительно зажимов источников ЭДС по правилам параллельного и последовательного сложения:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}, \\ Z_{22} &= Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3}. \end{aligned}$$

Взаимное сопротивление определяет величину тока в ветви с источником ЭДС при ее нулевом значении под действием ЭДС другого источника.

Взаимные сопротивления Z_{12} и Z_{21} одинаковы. Они вычисляются по формуле преобразования «звезды» в эквивалентный «треугольник»:

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}.$$

Обобщённые параметры схемы замещения (как комплексные величины) могут быть представлены в декартовой и полярной системах координат:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= r_{11} + jx_{11} = z_{11}e^{j\psi_{11}}, \\ Z_{22} &= r_{22} + jx_{22} = z_{22}e^{j\psi_{22}}, \\ Z_{12} &= r_{12} + jx_{12} = z_{12}e^{j\psi_{12}}, \\ Y_{11} &= g_{11} + jb_{11} = y_{11}e^{-j\psi_{11}}, \\ Y_{22} &= g_{22} + jb_{22} = y_{22}e^{-j\psi_{22}}, \\ Y_{12} &= g_{12} + jb_{12} = y_{12}e^{-j\psi_{12}}. \end{aligned}$$

Проведём анализ аналитических выражений для определения составляющих P_{Γ} , Q_{Γ} , P_{H} , Q_{H} мощностей S_{Γ} и S_{H} , показанных на рис. 4.2. В соответствии с формулами токов, определенных через проводимости, выразим токи I_1 , I_2 через фазные ЭДС источников и обобщённые параметры схемы замещения:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_{11} - \underline{I}_{12} = \underline{E}_{\phi} Y_{11} - \underline{U}_{\phi} Y_{12}, \\ \underline{I}_2 &= -\underline{I}_{22} + \underline{I}_{21} = -\underline{U}_{\phi} Y_{22} + \underline{E}_{\phi} Y_{12}. \end{aligned}$$

Соответственно для трехфазных мощностей:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\Gamma} &= P_{\Gamma} + jQ_{\Gamma} = 3\underline{E}_{\phi} \dot{I}_1 = 3\underline{E}_{\phi} (\dot{E}_{\phi} Y_{11} - \dot{U}_{\phi} Y_{12}), \\ \underline{S}_{\text{H}} &= P_{\text{H}} + jQ_{\text{H}} = 3\underline{E}_{\phi} \dot{I}_2 = 3\underline{U}_{\phi} (-\dot{U}_{\phi} Y_{22} + \dot{E}_{\phi} Y_{12}). \end{aligned}$$

где точкой обозначены комплексно-сопряжённые величины.

Обозначим угол между векторами \underline{E}_{ϕ} , \underline{U}_{ϕ} буквой δ и совместимость отсчёта углов с вектором $-\underline{U}_{\phi}$. Тогда для векторов \underline{E}_{ϕ} , \underline{U}_{ϕ} , \dot{E}_{ϕ} , \dot{U}_{ϕ} будут справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\phi} &= \dot{U}_{\phi} = U_{\phi} e^{j0} = U_{\phi}, \\ \underline{E}_{\phi} &= \dot{E}_{\phi} e^{j\delta}, \\ \dot{E}_{\phi} &= \underline{E}_{\phi} e^{-j\delta}. \end{aligned}$$

С учётом этих соотношений и при записи проводимостей в полярной системе координат выражения для мощностей S_{Γ} и S_{H} преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\Gamma} &= P_{\Gamma} + jQ_{\Gamma} = 3E_{\phi}^2 y_{11} e^{j\psi_{11}} - 3E_{\phi} U_{\phi} y_{12} e^{j(\delta + \psi_{12})} = \\ &= E^2 y_{11} e^{j\psi_{11}} - EU y_{12} e^{j(\delta + \psi_{12})}, \\ \underline{S}_{\text{H}} &= P_{\text{H}} + jQ_{\text{H}} = -3U_{\phi}^2 y_{22} e^{j\psi_{22}} + 3E_{\phi} U_{\phi} y_{12} e^{j(-\delta + \psi_{12})} = \\ &= -U_{11}^2 e^{j\psi_{22}} - EU y_{12} e^{j(\delta + \psi_{12})}, \end{aligned}$$

где E и U – линейные значения ЭДС генератора и напряжения приемной системы.

При выделении вещественных и мнимых составляющих комплексных слагаемых из последних выражений следует:

$$\begin{aligned} P_{\Gamma} &= E^2 y_{11} \cos \psi_{11} - EU y_{12} \cos(\delta + \psi_{12}), \\ P_{\text{H}} &= -U^2 y_{22} \cos \psi_{22} + EU y_{12} \cos(-\delta + \psi_{12}), \\ Q_{\Gamma} &= E^2 y_{11} \sin \psi_{11} - EU y_{12} \sin(\delta + \psi_{12}), \\ Q_{\text{H}} &= -U^2 y_{22} \sin \psi_{22} + EU y_{12} \sin(-\delta + \psi_{12}). \end{aligned}$$

В практике расчётов эти выражения приводятся к виду, более удобному для анализа. Для этого вместо аргументов ψ_{11} , ψ_{22} , ψ_{12} используются углы, α_{11} , α_{22} , α_{12} , дополняющие эти аргументы до 90° . Дополняющие углы вводят на основе равенств:

$$\begin{aligned} \psi_{11} &= 90^\circ - \alpha_{11}, \\ \psi_{22} &= 90^\circ - \alpha_{22}, \\ \psi_{12} &= 90^\circ - \alpha_{12}. \end{aligned}$$

После несложных преобразований получают:

$$\begin{aligned} P_{\Gamma} &= E^2 y_{11} \sin \alpha_{11} - EU y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}), \\ P_{\text{H}} &= -U^2 y_{22} \sin \alpha_{22} + EU y_{12} \sin(\delta + \alpha_{12}), \\ Q_{\Gamma} &= E^2 y_{11} \cos \alpha_{11} - EU y_{12} \cos(\delta - \alpha_{12}), \\ Q_{\text{H}} &= -U^2 y_{22} \cos \alpha_{22} + EU y_{12} \cos(\delta + \alpha_{12}). \end{aligned}$$

Дополняющие углы будут отличны от нуля только в тех случаях, когда хотя бы один элемент пассивной части схемы замещения будет содержать активное сопротивление. При преобразованиях идеализированных схем замещения, не содержащих активных сопротивлений, все дополняющие углы приобретают нулевое значение.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение методу наложения.
2. Что такое собственный ток?
3. Что такое взаимный ток?
4. Расскажите о собственной проводимости ветви.
5. Что такое взаимная проводимость ветви?
6. Запишите формулу активной мощности простейшей ОЭЭС.
7. Запишите выражение для реактивной мощности простейшей ОЭЭС.
8. Запишите комплекс полной мощности \dot{S} , протекающей через любую точку схемы, содержащей k линейных элементов, и дайте ее определение. Используйте метод наложения и зарисуйте схему замещения.

5. Статическая устойчивость электрических систем

Электрическая система, обеспечивающая своим нормальным функционированием работу промышленности, транспорта, быта населения – всю жизненную деятельность городов, районов и всей страны, должна работать надежно. Основным условием надежной деятельности является ее *устойчивость*, под которой понимают *способность системы восстанавливать свое исходное состояние* – нормальный рабочий режим или режим, практически близкий к нему, *после какого-либо* (большого или малого) *нарушения*, иначе называемого возмущением. Различают два вида устойчивости:

- *статическую устойчивость*, рассматриваемую в двух аспектах:
 - как свойство заданного установившегося режима самовосстанавливаться при ничтожно малых отклонениях параметров его режима от исходных значений, а не «сползать» от них;
 - как свойство *постепенно ухудшающегося установившегося режима* противостоять малым отклонениям и малым колебаниям вплоть до некоторого *предельного режима*;

- *динамическую устойчивость*, рассматриваемую при больших (обычно нелинейных) отклонениях параметров, часто сопровождающихся изменениями конфигурации, и критериев электрической системы (числа работающих элементов) и значений их показателей. Различают два вида динамической устойчивости:

- *синхронную устойчивость* – сохранение режима при больших колебаниях, но без проворота ($180\text{--}360^\circ$) ротора генератора;

- *результатирующую устойчивость* – восстановление режима после относительно короткого периода нарушения за счет внутренних свойств системы либо под действием специальных устройств системной противоаварийной автоматики.

Для обеспечения устойчивости система должна функционировать с некоторым запасом, характеризуемым коэффициентом запаса K_3 , т.е. при таких параметрах режима, которые отличаются в $K_3 > 1$ раз от критических – тех, при которых может произойти нарушение устойчивости. Для определения запаса устойчивости в данной (работающей или прогнозируемой) системе, параметры которой известны, и для выбора мероприятий, улучшающих устойчивость, необходим ее анализ (расчеты) с вычислением критических параметров. В ряде случаев целесообразен переход к задачам синтеза, например, к нахождению изменений параметров режима во времени: $P_p = f(t)$, т.е. установлению вида переходного процесса с выявлением вносимых с помощью устройств системной автоматики воздействий, которые придадут переходному процессу желательный по тем или иным соображениям характер. Выбор устройств и мероприятий, действующих во время протекания процесса, например, таких, которые способствуют восстановлению синхронизма после его нарушения и обеспечивают этим результирующую устойчивость, относится к задаче управления переходным процессом.

Многие принципиальные вопросы электромеханических переходных процессов рассматриваются с использованием простых схем электроэнергетических систем. Эти схемы называются моделями энергосистем, причём слово «модель» часто опускается, но обязательно подразумевается, поскольку любая схема энергосистемы по существу является моделью этой энергосистемы.

Наиболее распространены одно-, двух- и трёхмашинная модели энергосистем. Простейшей из них является одномашинная модель энергосистемы, которая имеет ещё название модель «машина – шины».

Простейшая (одномашинная) модель энергосистемы представляется одной удалённой электростанцией (эквивалентным генератором), работающей через трансформаторные связи и линию электропередачи параллельно с генераторами мощной концентрированной энергосистемы,

настолько мощной, что её приемные шины обозначают как шины бесконечной мощности (ШБМ). Отличительными признаками ШБМ являются неизменное по модулю напряжение ($U = \text{const}$) и неизменная частота $\omega_0 = \text{const}$ этого напряжения. При использовании ШБМ соответствующие им энергосистемы в электрических схемах, как правило, не изображаются. В схемах замещения шины бесконечной мощности используются как элемент, изображающий мощную систему.

Рассмотрим процессы в одномашинной энергосистеме, в которой от удалённого нерегулируемого генератора Γ через трансформаторы T_1 и T_2 и одноцепную линию электропередачи L передаётся активная мощность P при токе I в энергосистему C . Мощность поступает на приёмные шины энергосистемы, принимаемые за ШБМ. Определим основные соотношения между параметрами режима одномашинной энергосистемы, необходимые для анализа процессов.

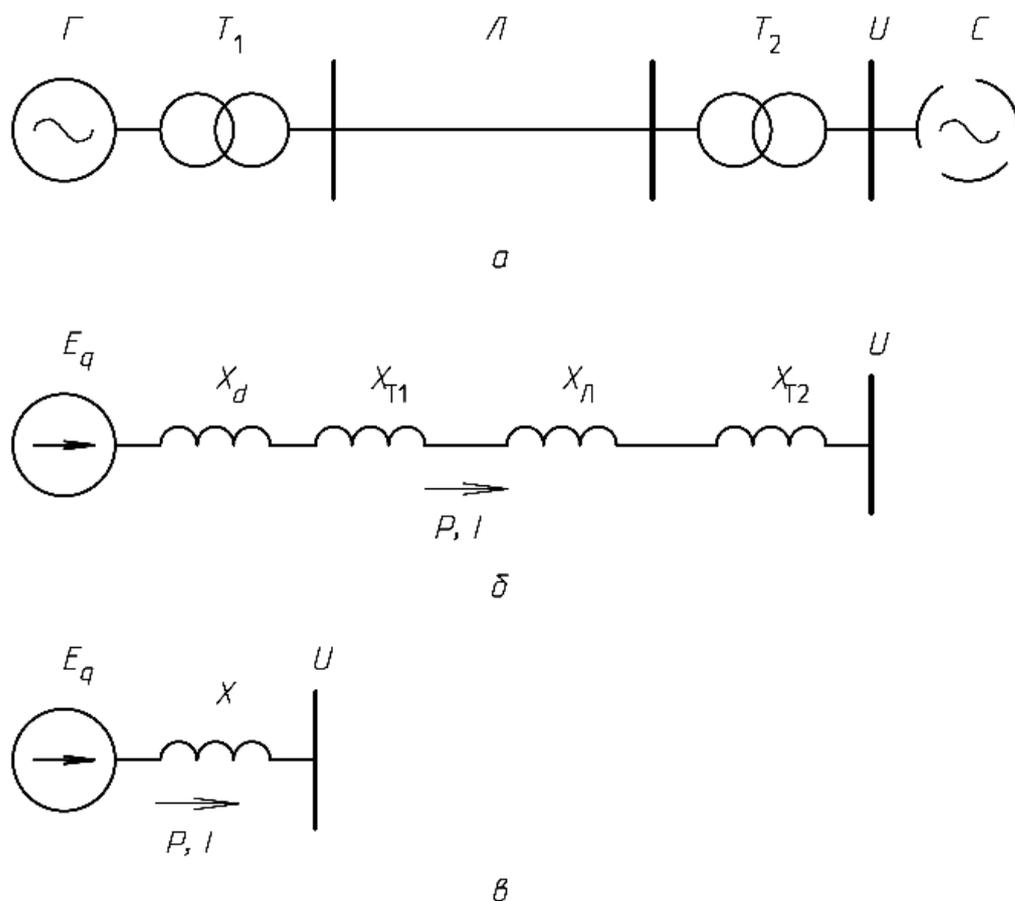


Рис. 5.1. Одномашинная модель энергосистемы

Примем (в порядке упрощения), что активные сопротивления и полные проводимости всех элементов системы равны нулю ($r = 0$, $g = 0$, $b = 0$) и составим схему замещения. При этих допущениях данная схема имеет вид

цепочки из индуктивных сопротивлений, включённой между двумя источниками ЭДС. Источником E_q моделируется синхронная ЭДС генератора, источником U – напряжение на ШБМ.

Эквивалентное индуктивное сопротивление x в эквивалентной схеме замещения определено как сумма индуктивных сопротивлений:

$$x = x_d + x_{T1} + x_{Л} + x_{T2} = x_d + x_{Гс}.$$

Взаимосвязь между мощностью P , модулями E_q , U векторов E_q , U и углом δ между ними определим с помощью векторной диаграммы напряжений, ЭДС и токов, действующих в эквивалентной схеме замещения.

На диаграмме выделены активная I_a и реактивная составляющие I_p тока I и, соответственно, показаны продольная $I_a jx$ и поперечная $I_p jx$ составляющие падения напряжения $I jx$ на эквивалентном сопротивлении x . ЭДС E_q и напряжение U представлены фазными величинами.

Из диаграммы следует равенство

$$I_{ax} = E_{q\phi} \sin \delta.$$

Умножив обе части этого равенства на $3U_{\phi}/x$, получим

$$3U_{\phi} I_a = \frac{3E_{q\phi} U_{\phi}}{x} \sin \delta = \frac{E_q U}{x} \sin \delta,$$

где E_q , U – линейные величины.

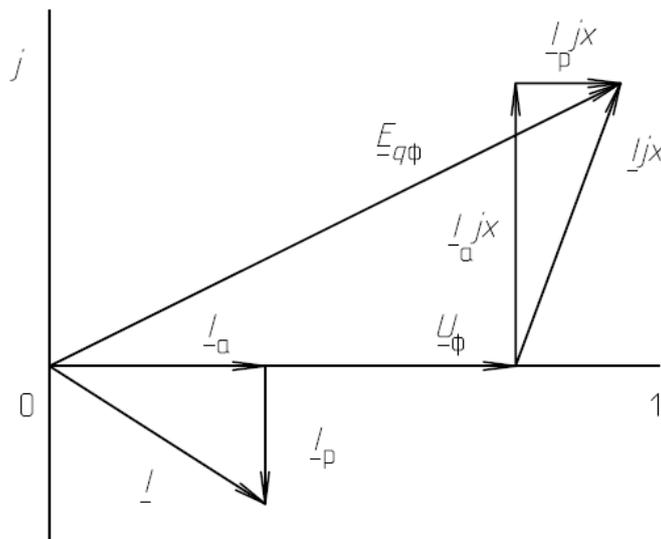


Рис. 5.2. Векторная диаграмма параметров режима одномашинной энергосистемы

Учитывая, что трёхфазная мощность $P = 3U_{\phi}I_{\phi}$, представим последнее равенство в виде зависимости

$$P = \frac{E_q U}{x} \sin \delta.$$

Для рассмотрения понятия о статической устойчивости требуется графическое представление отрезка функции $P(\delta)$ в пределах положительного полупериода синусоиды.

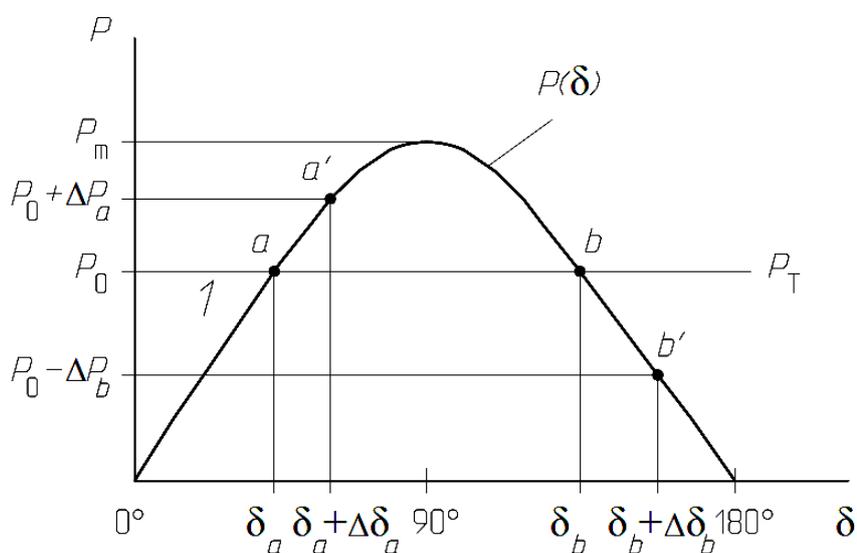


Рис. 5.3. Угловая характеристика генератора

Таким образом, в установившемся режиме на вал энергоагрегата действуют два одинаковых по абсолютной величине, но противоположных по направлению вращающих момента: ускоряющий механический момент турбины и тормозящий электромагнитный момент генератора. Аналогами этих моментов, используемыми в электроэнергетике, являются механическая мощность турбины P_T и электрическая мощность генератора P_0 . Отклонение любой из этих мощностей (моментов) от установившегося значения отражается в виде появления небаланса мощностей (моментов) $\Delta P = P_T - P$ на валу, под действием которого ротор генератора будет ускорять либо замедлять своё вращательное движение. Соответственно, величина угла δ будет увеличиваться или уменьшаться.

Как видно на рис. 5.3, есть две точки пересечения (a и b) характеристики турбины P_T и угловой характеристики $P(\delta)$ генератора. Возникает вопрос о возможности устойчивой работы в каждой из этих точек.

Допустим, что установившийся режим генератора характеризуется точкой a . При случайном повышении мощности генератора на величину ΔP_a и соответствующем увеличении угла на величину $\Delta \delta_a$ нарушится равенство моментов, действующих на вал, причём тормозящий электромагнитный момент генератора окажется больше ускоряющего момента турбины. Под действием избыточного тормозящего момента начнётся замедление движения ротора, сопровождаемое уменьшением угла и отдаваемой в сеть активной мощности генератора. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока не восстановится равенство ускоряющего и тормозящего моментов, т.е. пока система не возвратится к исходному режиму, характеризуемому точкой a .

Таким образом, при работе в точке a режим энергосистемы статически устойчив, так как система способна возвращаться в исходное состояние при действии малых возмущений.

При работе в точке b незначительное увеличение угла сопровождается уменьшением отдаваемой в сеть активной мощности. При случайном переходе в точку b' мощность турбины окажется больше мощности генератора на величину ΔP_b . Соответственно, ускоряющий механический момент турбины окажется больше тормозящего электромагнитного момента генератора, вследствие чего ротор последнего будет ускоряться. Это приведёт к увеличению угла δ и, как следствие, к повышению небаланса мощностей (моментов) на величину ΔP . Дальнейшее развитие процесса имеет лавинообразный характер и завершается выпадением удалённого генератора из синхронизма с генераторами приёмной энергосистемы.

Таким образом, состояние энергосистемы, соответствующее точке b , является неустойчивым, хотя в этой точке, как и в точке a , имеет место равенство тормозящего и ускоряющего моментов, действующих на вал ротора генератора.

При практических расчётах широко используются критерии (условия), при выполнении которых сохраняется статическая устойчивость энергосистемы. Один из таких критериев легко устанавливается при более глубоком анализе устойчивых и неустойчивых режимов. Продолжая рассуждения, замечаем, что устойчивым режимам рассматриваемой энергосистемы соответствуют все точки угловой характеристики, расположенные на её восходящей ветви. Экстремальная точка разграничивает восходящую и нисходящую ветви характеристики и, следовательно, является граничной. Общепринято относить эту точку к области устойчивых режимов.

В любой точке восходящей ветви угловой характеристики случайно возникающий небаланс мощности величины ΔP и соответствующее ему приращение угла $\Delta \delta$ имеют одинаковые знаки, их отношение положительно и может рассматриваться как формальный признак устойчивости.

В кратковременных послеаварийных режимах должен обеспечиваться запас $K_{ст} > 8\%$. При этом под кратковременными понимаются послеаварийные режимы длительностью до 40 минут, в течение которых диспетчер должен восстановить нормальный запас по статической устойчивости.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое установившийся режим?
2. Дайте определение трех видов устойчивости ЭЭС.
3. Что такое статическая устойчивость?
4. Что такое динамическая устойчивость?
5. Раскройте понятие результирующей устойчивости.
6. Как рассчитать статическую устойчивость?
7. На чем основывается метод исследования характера колебаний?
8. Сколько существует видов взаимодействия магнитных полей?
9. Дайте понятие устойчивому взаимодействию.
10. Каковы условия возникновения неустойчивого взаимодействия?
11. Выберите на рисунке кривую, на которой статическая устойчивость выше.

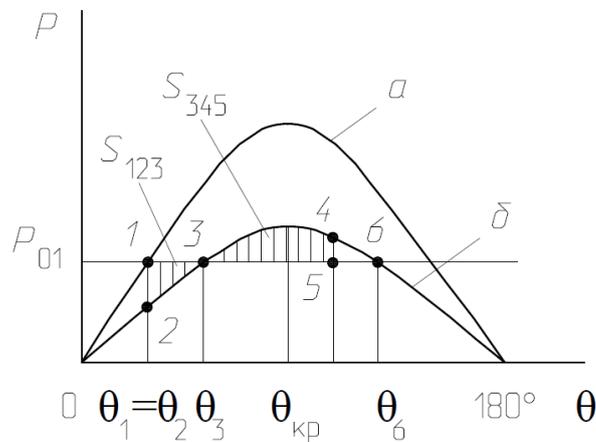


Рис. 5.4. Угловая характеристика

12. Определите угловую характеристику неявнополюсного генератора, если $U_c = 1$ (о.е.), ЭДС переходная = 1,38 (о.е.), а сопротивление системы = 0,64 (о.е.).

13. Вычислите коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению, если длительно-поддерживаемое напряжение в рассматриваемой узловой точке ЭЭС = 110 кВ, а критическое напряжение в этой же точке равно 96,5 кВ.

14. Определите запас статистической устойчивости, если максимальная мощность, выдаваемая в систему, равна 500 МВт, а мощность, вырабатываемая турбиной, – 482 МВт.

15. Составьте схему замещения электропередачи, представленной на рис. 5.5.

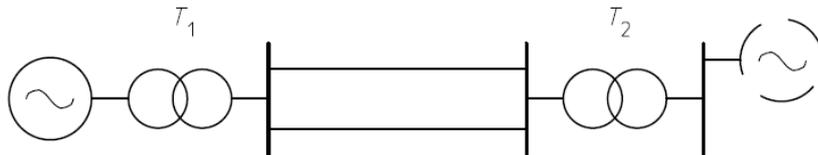


Рис. 5.5. Схема электропередачи

6. Динамическая устойчивость электрической системы

Статическая устойчивость является необходимым условием существования нормального режима электрической системы, но не предопределяет ее способность продолжить работу при резких нарушениях режима. Эта сторона проблемы, как отмечалось выше, затрагивает круг вопросов, относящихся к динамической устойчивости.

В качестве причины, приводящей к резкому нарушению режима электрической системы, рассмотрим отключение одной цепи линии. Схема замещения электрической системы для этого случая приведена на рис. 6.1.

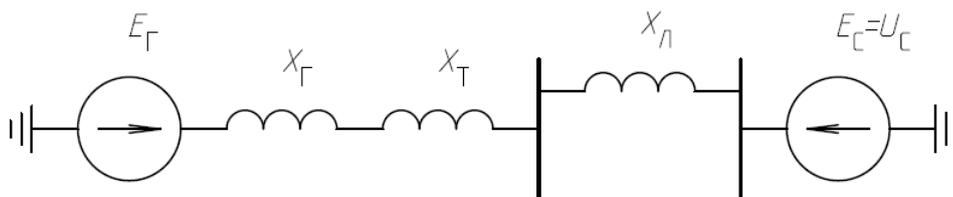


Рис. 6.1. Схема замещения ЭС при обрыве одной цепи линии

Отключение одной цепи линии означает увеличение результирующего сопротивления X в схеме замещения. Это уменьшает возможные значения тока I_C , определяемой им индукции B_C магнитного поля и зависящий от последнего электромагнитный момент генератора. Такое снижение возможностей генератора по созданию электромагнитного момента отражается характеристикой момента M_{II} , располагающейся ниже характеристики момента M_I исходного режима.

Предположим, что в исходном режиме (точка a) турбина создает момент M_{01} . При отключении цепи линии Л угол δ из-за инерционности ротора генератора сразу не изменится, а вот электромагнитный момент мгновенно снизится до значения M_b , которое определяется точкой b на характеристике момента M_{II} и меньше неизменного и вращающего момента турбины $M_T = M_{01}$. Это вызовет ускорение ротора генератора, увеличение его скорости, и как следствие прогрессирующий рост угла δ . Процесс увеличения скорости ротора закончится в момент достижения углом δ значения $\delta_{уст}$, при котором восстанавливается баланс вращающего момента турбины и тормозящего электромагнитного момента генератора (точка c). Но увеличение угла δ после достижения им значения $\delta_{уст}$ будет продолжаться, так как скорость ротора генератора ω_f больше синхронной ω_c , однако происходить оно будет менее интенсивно вследствие превышения тормозящего электромагнитного момента генератора M_{II} над вращающим моментом турбины M_T . Если скорость ω_f ротора генератора снизится до синхронной ω_c , то угол δ , достигнув значения δ_m (точка d), начнет уменьшаться, и дальнейшее его изменение будет происходить, как правило, в форме затухающих колебаний вокруг значения $\delta_{уст}$. Колебательность процесса объясняется как механической инерцией ротора генератора, так и возникновением при неравенстве $\delta \neq \delta_{уст}$ результирующего момента на валу генератора, стремящегося приблизить угол δ к значению $\delta_{уст}$. В результате установится новый нормальный режим работы генератора и системы в целом. В этом случае можно говорить об обладании генератором и системой динамической устойчивости при отключении цепи линии.

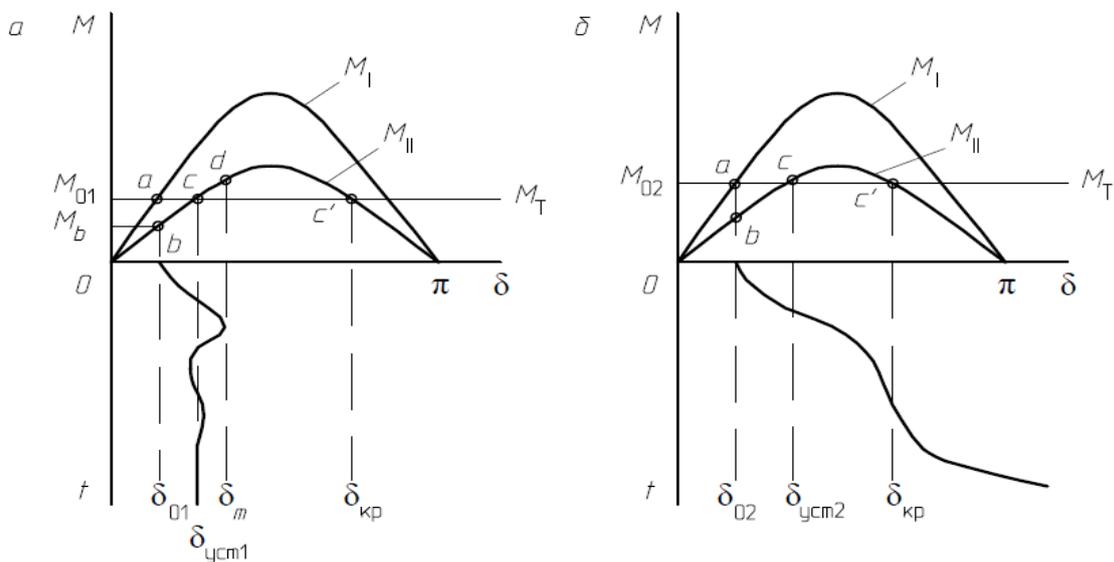


Рис. 6.2. Характеристики моментов генератора

Если же скорость ω_f ротора генератора при торможении не успеет сравняться с синхронной ω_c , т.е. угол δ достигнет критического значения $\delta_{кр}$, соответствующего точке c' пересечения характеристик момента турбины и генератора, то с этого времени режим уменьшения скорости генератора сменится режимом ее увеличения из-за преобладания при $\delta > \delta_{кр}$ вращающего момента турбины M_T над тормозящим электромагнитным моментом M_{II} генератора. Это вызовет прогрессирующий рост угла δ и последующее его непрерывное увеличение, проворачивание ротора генератора Γ относительно ротора генератора Γ_c приемной системы, означающее нарушение устойчивости. Такое развитие процесса возможно, например, если в момент отключения линии L генератор развивал большую активную мощность, т.е. его турбина создавала момент $M_{02} > M_{01}$, и на этапе торможения ротора генератора (между точками c и c' пересечения характеристик моментов) действующий на него результирующий момент был недостаточен для снижения его скорости до синхронной. В этом случае можно говорить об отсутствии динамической устойчивости у генератора и системы в целом при отключении цепи линии L .

Рассчитать динамическую устойчивость – это значит определить условия, при которых она обеспечивается, в частности, в рассмотренном случае для генератора Γ , а также, например, ту предельную мощность, развивая которую генератор сохранит устойчивость при отключении одной цепи линии L .

Оценка устойчивости перехода от одного режима к другому

Ранее были рассмотрены условия устойчивости системы, подвергающиеся в установившемся режиме случайным малым возмущениям. При больших возмущениях (резких изменениях режима, таких как: короткое замыкание, отключение или включение каких-либо элементов системы: генератор, трансформатор, нагрузка, ЛЭП и т.д.) рассматривают задачу динамической устойчивости. Резкое изменение режима системы (переход из I в II) ведет к преобразованию электромагнитного момента на валу генератора системы.

Эффективный электромагнитный момент действует либо со стороны ротора, либо со стороны статора.

Появившийся небаланс между ускоряющимся моментом турбины и тормозящим электромагнитным моментом генератора $\Delta M = M_T - M_{II}^{\Pi}$ приводит к тому, что генератор начинает менять свою скорость. Если $M_{II}^{\Pi} < M_T$,

то скорость будет увеличиваться сверх синхронной на величину $\Delta\omega$. Избыточный момент ΔM при этом будет уравниваться не только электромагнитным моментом отдаваемой в сеть электроэнергии (тормозящий момент), но и моментом, отвечающим за накапливание ротором кинетической энергии. Тогда уравнение генератора записывается в следующем виде:

$$\Delta M = M_T - M^{\text{II}} = T_j - \frac{d\omega}{dt},$$

где T_j – постоянная инерции якоря, момент M_T является функцией скорости и изменяется при изменении режима системы.

Интегрируя полученное уравнение можно определить изменение скорости $\Delta\omega = f(t)$. Учитывая, что $\frac{d\delta}{dt} = \omega$, можно найти $\delta = \varphi(t)$ как функцию от времени.

Изменение скорости $\Delta\omega$ и угла δ позволяет судить о том, сохранит ли система синхронную работу (будет ли динамически устойчива) после резкого возмущения и последующем переходе от одного режима к другому. Интегрирование уравнения движения или аналогичного ему представляет значительные трудности. В большинстве случаев его удастся провести, только применяя приближенные методы. Иногда динамическую устойчивость системы можно проверить (грубо) без выявления характера движения во времени по соотношению возможных изменений энергии в разных фазах движения. *Этот способ называется способом площадей.*

При изменении параметров системы, на которую работает генератор, вследствие аварии (например, отключение одной из цепей ЛЭП, рис. 6.3) преобразуются электромагнитный момент и электрическая мощность, отдаваемая генератором.

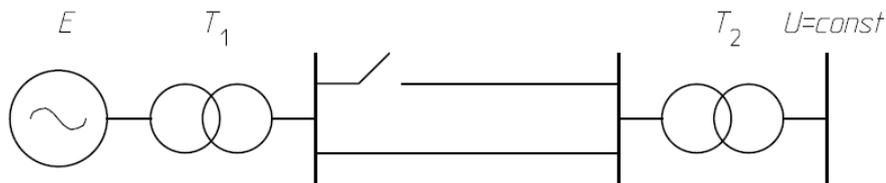


Рис. 6.3. Схема аварийной системы

Изменение передаваемой мощности $P = f(\delta)$ с кривой I на кривую II приводит к появлению небаланса мощности ΔP . Под действием этого небаланса происходит ускорение ротора генератора.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое динамическая устойчивость?
2. Что способствует увеличению результирующего сопротивления X в схеме замещения?
3. В чем состоит расчет динамической устойчивости?
4. К чему приводит появившийся небаланс между ускоряющим моментом турбины и тормозящим электромагнитным моментом?
5. В чем заключается смысл метода площадей при расчете динамической устойчивости.
6. Какая устойчивость является необходимым условием существования нормального режима электрической системы?
7. Какие параметры генератора изменяются вследствие аварии?
8. К чему ведет резкое изменение режима системы?
9. Что такое установившийся режим?
10. Когда возникает неустойчивое взаимодействие?
11. Нарисуйте схему замещения простейшей электрической системы, представленной на рис. 6.4.

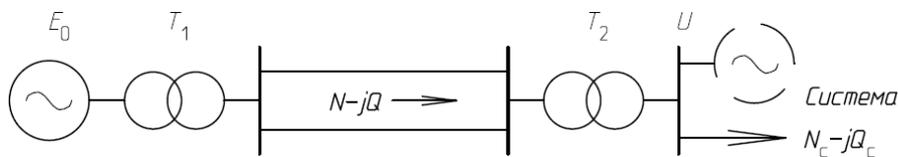


Рис. 6.4. Однолинейная схема простейшей электрической системы электропередачи

12. Нарисуйте схему, связывающую электростанцию с энергетической системой в аварийном режиме, когда одна линия отключена.
13. При изменении параметров системы, на которую работает генератор, вследствие аварии (например, отключение одной из цепей ЛЭП) преобразуется электромагнитный момент и электрическая мощность, отдаваемая генератором. Нарисуйте график изменения параметров системы, где I – характеристика исходного (нормального) режима, а II – характеристика после отключения одной цепи.
14. Нарисуйте характеристику момента снижения возможности генератора после отключения одной линии электропередачи.
15. Опишите процесс динамической устойчивости вследствие большого возмущения системы на примере генератора (переход из режима I в режим II), которое ведет к изменению электромагнитного момента на валу генератора системы.

7. Энергетические соотношения, характеризующие движения ротора генератора. Способ площадей и критерий устойчивости

Ранее были рассмотрены условия устойчивости системы, подвергающиеся в установившемся режиме случайным малым возмущениям. При больших возмущениях (резких изменениях режима, таких как: короткое замыкание, отключение или включение каких-либо элементов системы: генератор, трансформатор, нагрузка, ЛЭП и т.д.) рассматривают задачу динамической устойчивости. Резкое изменение режима системы (переход из I во II режим) ведет к преобразованию электромагнитного момента на валу генератора системы.

Характеристика мощности простейшей энергетической системы определяется предаварийным, аварийным и послеаварийным режимами.

Рассмотрим предаварийный и послеаварийный режимы.

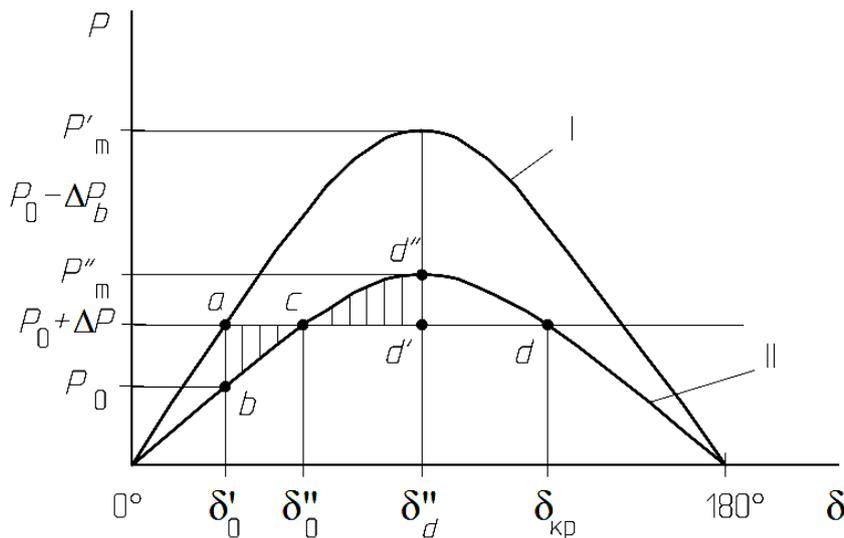


Рис. 7.1. Характеристики мощности простейшей энергетической системы

Изменение характеристики электрической мощности $P = f(\delta)$ с кривой I на кривую II приводит к появлению небаланса мощности. Под действием этого небаланса, т.е. расхождения механической и электрической мощностей, происходит относительное перемещение ротора генератора. Ускорение, которое испытывает ротор, вычисляется по формуле: $\alpha = \frac{d\Delta\omega}{dt}$,

где $\Delta\omega = \omega - \omega_0 = \frac{d\delta}{dt}$.

Небаланс механической и электрической мощностей переходит в кинетическую энергию вращательного движения ротора, которая

вычисляется по формуле: $A = \int_{\delta_0}^{\delta_1} \Delta P d\delta = \frac{T_j \Delta \omega^2}{2}$, где T_j – постоянная инерция

ротора (в секундах), $\Delta \omega$ – относительная (по сравнению с синхронной скоростью) скорость вращения ротора.

Изменение кинетической энергии ротора при его перемещении от угла $\angle \delta_0$ до $\angle \delta_1$ равно:

$$A = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_0 - P_m'') d\delta = P_0(\delta_1 - \delta_0) + P''(\cos \delta_1 - \cos \delta_0).$$

При перемещении ротора в точку δ_0'' электрическая и механическая мощности оказываются равными. Однако наличие кинетической энергии, запасенной ротором в процессе его ускорения, и пропорциональной площади фигуры abc приводит к тому, что ротор движется далее, проходя через точку c и увеличивая угол $\angle \delta$.

При движении от точки d к точке d'' ротор испытывает торможение под действием электрической мощности, которая больше механической, при этом кинетическая энергия ротора переходит в потенциальную. В точке d'' кинетическая энергия ротора равна 0, т.е. $\Delta \omega = 0$.

Однако относительное движение ротора не прекращается, так как на ротор действует избыточная электрическая мощность ΔP_2 . Под действием этой мощности ротор снова возвращается к точке c , имея скорость ω_s и обладая кинетической энергией $A_{\text{торм}}$ (полученное при торможении на участке $d''c$). Величина этой энергии пропорциональна площади фигуры $cd''dc$. В точке b относительная скорость вращения ротора $\Delta \omega$ и кинетическая энергия равны 0, и процесс повторяется заново.

Рассмотренный переходный процесс построен без учета потери энергии, так как учет приводит к затуханию процесса во времени. Для увеличения рассеяния энергии используют демпферную обмотку в роторе.

Энергия, запасенная ротором в процессе ускорения, математически

выражается как интеграл $\int_{\delta_{00}^I}^{\delta_0^{\text{II}}} \Delta P d\delta$ и представляется графически в виде

площади $abca$. Энергия торможения математически выражается как интеграл

$\int_{\delta_{00}^{\text{II}}}^{\delta_{d''}} \Delta P d\delta$ и представляется графически в виде площадки $cd''d's$.

Эти площадки, соответствующие энергии, запасенной при торможении и ускорении, будем в дальнейшем называть соответственно площадками ускорения и торможения.

Правило площадей в общем виде формулируется так: $A_{\text{уск}} = A_{\text{торм}}$ или $\int \Delta P d\delta = 0$.

При всех относительных перемещениях ротора сумма кинетической A и потенциальной Π энергий остается неизменной: $A + \Pi = \text{const}$.

Рассмотрим случай, когда энергия, израсходованная при торможении, точно уравнивается энергией, полученной при ускорении, в точке d . Эту точку можно назвать критической, так как при малейшем увеличении угла δ сверх $\delta_d = \delta_{\text{кр}}$ на ротор будут действовать ускоряющие силы. Площадки ускорения и торможения уравнились тогда, когда ротор дошел до точки d . В точке d кинетическая энергия и скорость $\Delta\omega$ стали равны нулю; силы, действующие на ротор (ускорение α), также равны нулю. Теоретически – это положение равновесия. Однако оно неустойчивое, так как малейшее отклонение ротора приводит к появлению тормозящего или ускоряющего момента. Начинается либо торможение ротора с последующим возвращением его к устойчивой точке равновесия c , либо прогрессирующее нарастание угла и выпадение из синхронизма. Выпадение из синхронизма при достижении критической точки d характеризуется постепенным нарастанием угла. Такой вид нарушения устойчивости называют иногда аperiodическим в отличие от колебательного или самораскачивания. Как указывалось выше, случай, когда система находится на границе устойчивости, будет критическим, в котором равновероятно как сохранение устойчивости при переходе от режима I к режиму II, так и ее нарушение. Уверенность в устойчивости перехода будет только в тех случаях, когда при колебаниях ротор не достигает критического положения (точки d), в котором может начаться прогрессирующее увеличение угла. Такой заведомо устойчивый переход был показан на рис. 7.1; вся энергия, полученная при ускорении ротора (площадка $A_{\text{торм}} = cdca$), уравновешивалась энергией торможения (площадка $A_{\text{торм}} = cd'd'c$) до подхода к критической точке.

Контрольные вопросы и задания

1. На какие виды делятся режимы электроэнергетических систем?
2. Нарисуйте график изменений параметров предаварийного и послеаварийного режимов.
3. Запишите формулу ускорения, с которой вращается ротор генератора.
4. Охарактеризуйте кинетическую энергию вращательного движения ротора буквенной зависимостью.

5. Чему равна работа изменяющейся кинетической энергии ротора при его перемещении от угла σ_0 до σ_1 ?

6. Охарактеризуйте метод площадей.

7. Чем характеризуется запасенная энергия ротора в процессе ускорения?

8. Какой точки должен достигнуть ротор, чтобы кинетическая энергия и скорость $\Delta\omega$ стали равны нулю?

9. Охарактеризуйте вид нарушения устойчивости, сопровождающегося апериодическим нарушением.

10. Явнополюсный синхронный генератор имеет следующие данные в относительных единицах: номинальное напряжение $U = 1$, номинальный ток $I = 1$, номинальная ЭДС $E = 1,87$; синхронное сопротивление по продольной оси $x_d = 1,1$; синхронное сопротивление по поперечной оси $x_q = 0,75$; индуктивное сопротивление обратного следования фаз $x_2 = 0,25$; индуктивное сопротивление нулевого следования фаз $x_0 = 0,045$.

Вычислите относительное значение активной мощности в номинальном режиме, если угол нагрузки $\theta = 20^\circ$.

Определите и распишите формулу для вычисления токов КЗ.

Определите при номинальном возбуждении в относительных единицах установившиеся токи короткого замыкания трех фаз.

Определите при номинальном возбуждении в относительных единицах установившиеся токи короткого замыкания двух фаз.

Определите при номинальном возбуждении в относительных единицах установившиеся токи короткого замыкания одной фазы.

8. Предельный угол отключения короткого замыкания

Определение размаха колебаний и проверка устойчивости при внезапном изменении электрической нагрузки генератора

Изменение режима генератора (отраженное в изменении взаимной проводимости y_{12} – связи генератора и шин нагрузки, или изменении напряжения на шинах нагрузки, или изменении его ЭДС E) приводит к перемещению точки, определяющей режим системы, с характеристики I на характеристику II при $\delta = \delta_0$. Возникающий небаланс ΔP_0 между электрической и механической мощностями (моментами) приводит к появлению ускорения $\alpha = \frac{\Delta P}{T_j}$ и относительному перемещению ротора со скоростью $\Delta\omega$, где

$$\Delta\omega = \sqrt{\frac{2}{T_j} \int \Delta P d\delta}.$$

При значении $\delta = \delta_0^{\text{II}}$ электрическая и механическая мощности оказываются равными. Однако наличие кинетической энергии $A_{\text{уск}}$, запасенной ротором в процессе его ускорения, пропорциональной площади $abca$, приводит к тому, что ротор движется далее, проходя точку c и увеличивая угол δ . При движении от точки c к точке d'' ротор испытывает торможение под действием *электрической мощности, которая при этом становится больше механической*. Кинетическая энергия, запасенная при ускорении, $A_{\text{уск}}$, «расходуется» (переходит в потенциальную) во время движения ротора от точки c к точке d'' . В точке d'' вся кинетическая энергия, полученная при ускорении, оказывается «израсходованной», при этом скорость $\Delta\omega$ становится равной нулю. Однако движение не может прекратиться, так как потенциальная энергия достигла максимума и на ротор действует избыточный электрический момент (мощность), пропорциональный ΔP_0 . Под действием этого момента ротор снова подходит к точке c обладая кинетической энергией $A_{\text{торм}}$ (полученной при торможении на участке $d''c$). Величина этой энергии пропорциональна площади $cd''d''c$. В точке b скорость ω и кинетическая энергия равны нулю, и процесс начинается сначала (под действием ΔP_0).

Представление процесса на фазовой плоскости

Изображение скорости $\Delta\omega$ в зависимости от угла δ оказывается весьма полезно для качественного, а иногда и количественного анализа. В рассматриваемом случае характеристика скорости $\Delta\omega = f(\delta)$ имеет вид замкнутой кривой. Особенность процесса во времени выглядит так, как это показано на рис. 8.1. Характеристики построены без учета рассеяния энергии. Наличие рассеяния энергии (потерь, зависящих от скорости) приводит к тому, что качания с каждым циклом становятся все меньше по амплитуде, и характеристика скорости $\Delta\omega = f(\delta)$ представляется в виде спирали, показанной пунктиром; колебания угла $\delta = f(t)$ также постепенно затухают, и угол стремится к установившемуся значению δ_0^{II} . Следует обратить внимание на то обстоятельство, что учет активных сопротивлений ($P_{11} \neq 0$) не меняет характера движения $\delta = f(t)$: оно остается незатухающим. Затухание вызывают только потери, зависящие от скорости.

Энергия, запасенная ротором в процессе ускорения, математически выражается как интеграл $\int_{\delta_0^I}^{\delta_0^II} \Delta P d\delta$ и представляется графически в виде площади

abca. Энергия торможения математически выражается как интеграл $\int_{\delta_0^I}^{\delta_d^II} \Delta P d\delta$

и представляется графически в виде площадки *cd'd's*. Эти площадки, соответствующие энергии, запасенной при ускорении и торможении, в дальнейшем будем называть соответственно *площадками ускорения и торможения*.

Правило площадей в общем виде имеет вид:

$$A_{\text{уск}} = A_{\text{торм}} \text{ или } \int \Delta P d\delta = 0.$$

При всех относительных перемещениях ротора сумма кинетической А и потенциальной П энергии остается неизменной:

$$A + П = \text{const.}$$

Способ площадей, следовательно, основан на предположении, что рассеяние энергии не происходит, т.е. *рассматриваемая* система консервативна.

Для *качественного анализа* метод площадей может применяться и в тех случаях, когда система не консервативна, т.е. когда при относительном движении системы происходят изменения ее полной энергии. В рассмотренном выше случае, когда в точке *d'* кинетическая энергия $A = 0$ и скорость $\Delta\omega = 0$, на ротор действовал некоторый тормозящий момент ΔP_2 .

Можно себе представить случай, когда энергия, израсходованная при торможении, точно уравнивается энергией, полученной при ускорении, в точке *d*. Эту точку можно назвать критической, так как при малейшем увеличении угла δ сверх $\delta_d = \delta_{\text{кр}}$ на ротор будут действовать ускоряющие силы. На рис. 8.1 представлен такой случай: площадки ускорения и торможения уравнились как раз тогда, когда ротор дошел до точки *d*. В точке *d* кинетическая энергия и скорость $\Delta\omega$ стали равны нулю; силы, действующие на ротор (ускорение α), также равны нулю. Теоретически – это положение равновесия. Однако оно неустойчиво, так как малейшее отклонение ротора приводит к появлению тормозящего или ускоряющего

момента. Начинается либо торможение ротора с последующим возвращением его к устойчивой точке равновесия c , либо прогрессирующее нарастание угла и выпадение из синхронизма. Выпадение из синхронизма при достижении критической точки d характеризуется постепенным нарастанием угла.

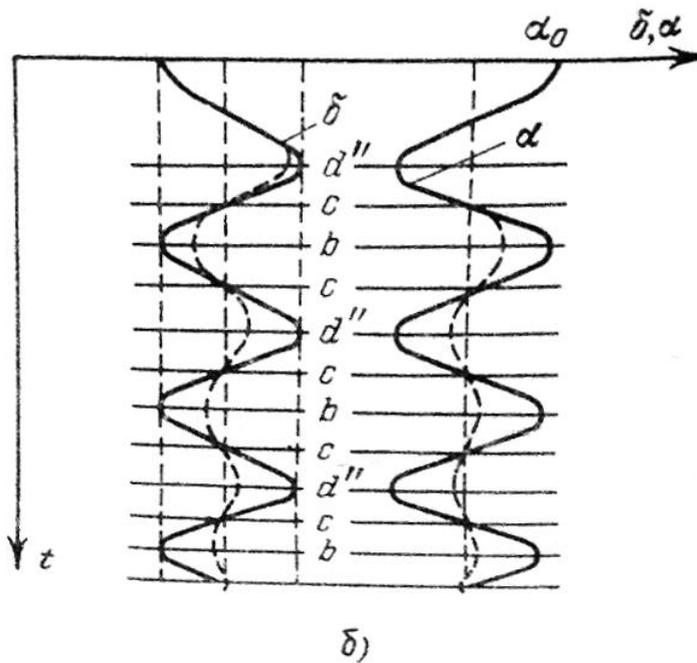
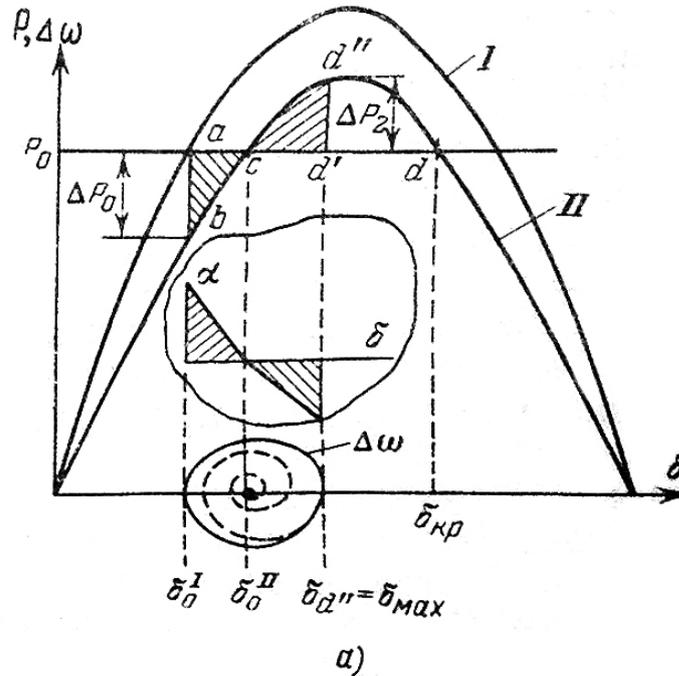


Рис. 8.1. Изменение режима при толчке:
 a – угловые характеристики системы, $\Delta\omega = \varphi(\delta)$, $\alpha = f(\delta)$;
 b – изменения угла и ускорения во времени в процессе качаний

Такой вид нарушения устойчивости иногда называют *апериодическим*, в отличие от колебательного нарушения устойчивости, или самораскачивания, которые будут рассмотрены далее. Как указывалось, выше показан случай, когда система находится на границе устойчивости при переходе от режима I к режиму II, а также ее нарушение.

Уверенность в устойчивости перехода будет, очевидно, в случаях, когда при колебаниях ротор не достигнет критического положения (точка d), в котором может начаться прогрессирующее увеличение угла. Вся энергия, полученная при ускорении ротора (площадка $A_{\text{уск}} = abca$), уравнивалась энергией торможения (площадка $A_{\text{торм}} = cd'dc$) до подхода к критической точке. Площадка возможного торможения $A_{\text{возм торм}}$ здесь больше, чем площадка ускорения, на $\Delta A = A_{\text{возм торм}} - A_{\text{уск}}$. По знаку ΔA можно определить, устойчив или нет данный переход.

Величина ΔA служит количественным показателем запаса устойчивости:

$$K = \frac{A_{\text{возм торм}}}{A_{\text{уск}}} = 1 + \frac{\Delta A}{A_{\text{уск}}}.$$

Таким образом, при $K > 1$ переход устойчив; при $K = 1$ имеет место критический случай; при $K < 1$ переход неустойчив.

Установленные соотношения нетрудно выразить математически. Имеем

$$\Delta A = A_{\text{возм торм}} - A_{\text{уск}}.$$

$$\text{Здесь } \delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \delta_0^{\text{II}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_m^{\text{II}}}.$$

Очевидно, что

$$\frac{P_m^{\text{II}}}{P_m^{\text{I}}} = \frac{P_0 - \Delta P_0}{P_0} = 1 - \beta_0,$$

где $\beta_0 = \frac{\Delta P_0}{P_0}$ показывает величину изменения мощности в долях нагрузки, имевшейся в исходном режиме.

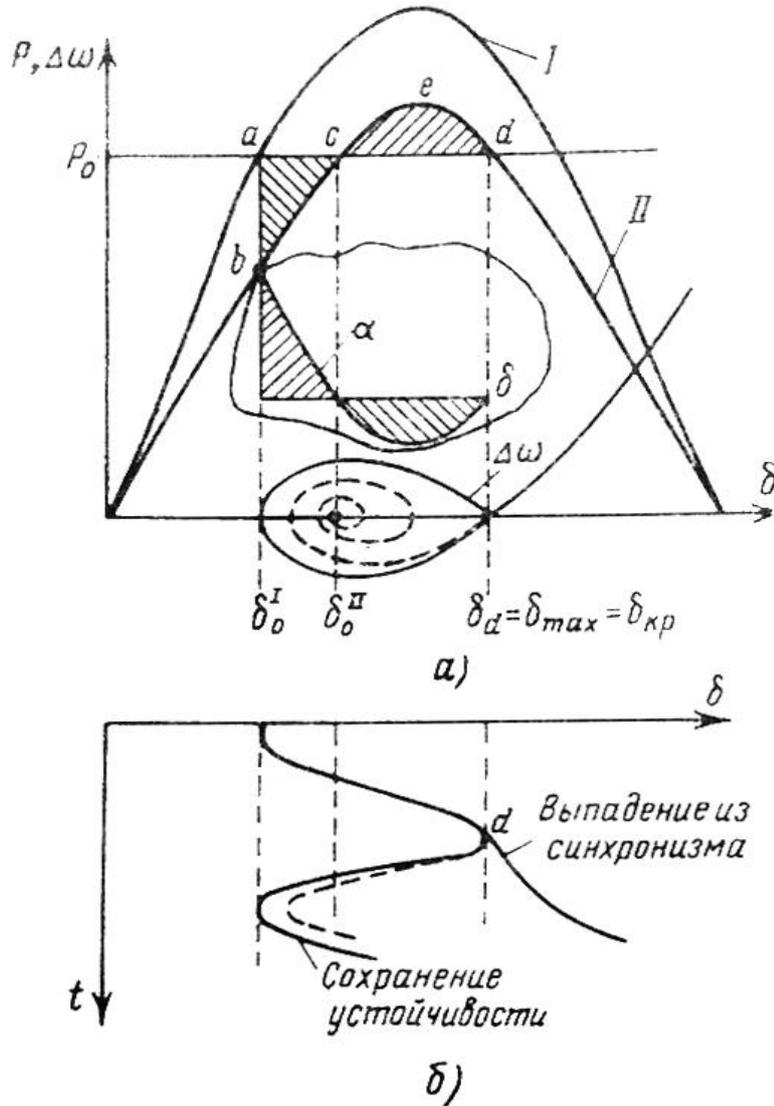


Рис. 8.2. Предельный случай при нарушении режима системы:
a – угловые характеристики $P = f(\delta)$; характеристики $\Delta\omega = \varphi(\delta)$; $\alpha = f(\delta)$
b – возможное изменение угла δ во времени

С учетом этого соотношения запишется так

$$\delta_{кр} = 180^\circ - \arcsin \frac{\sin \delta_0^I}{1 - \beta_0}.$$

На рис. 8.3 представлено изменение электрических характеристик системы, приводящее к выпадению из синхронизма, т.е. к нарушению динамической устойчивости. Площадка торможения *cedc* слишком мала, и, хотя рост скорости на участке *c–d* приостанавливается, угол продолжает увеличиваться. Если бы амплитуда характеристики II была меньше, чем P_0

(кривая Π'), то рост скорости происходил бы непрерывно, как это показано на рис. 8.3, a пунктирной линией. Изменение угла в этом случае показано также пунктирной линией.

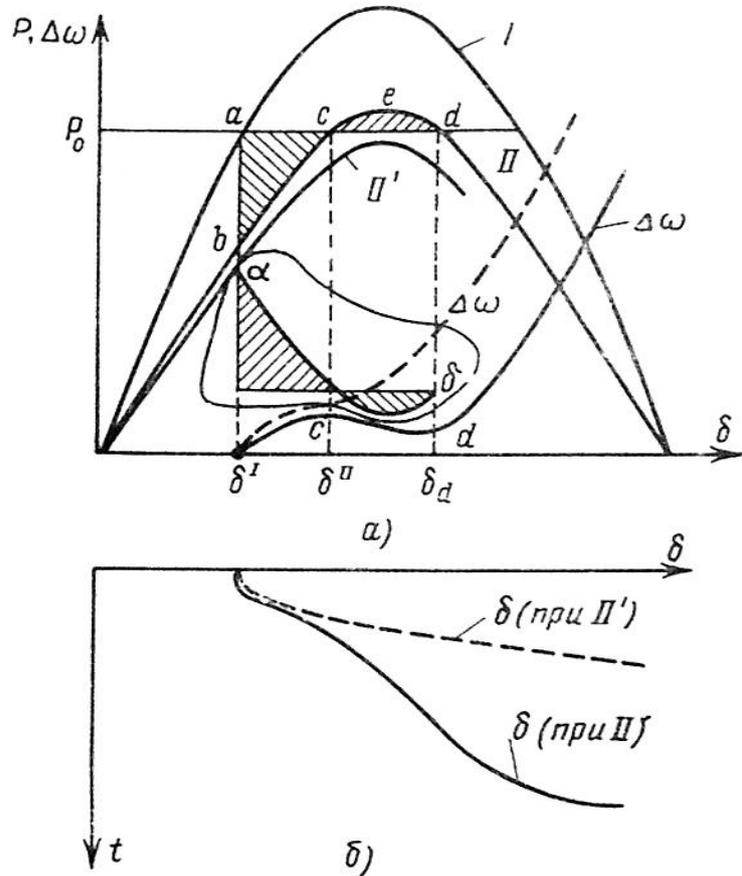


Рис. 8.3. Характеристики системы при изменении режима, приводящем к устойчивости: a – угловые характеристики $P = f(\delta)$; характеристики $\Delta\omega = \varphi(\delta)$; $\alpha = f(\delta)$ (пунктиром показан характер изменения $\Delta\omega$ при $P_m^{III} < P_0$; b – изменение угла во времени (пунктиром показан характер изменения угла в случае характеристики Π)

Определение предельного угла отключения короткого замыкания

Для этого случая на рис. 8.4 представлены три характеристики режимов: нормального I , аварийного Π , в котором сопротивление связи x изменено с учетом условий аварии, послеаварийного Π' , т.е. режима, в котором участок системы, потерпевший аварию, отключен.

Приравниваем площадку ускорения площадке возможного торможения. Тогда, выражая угол в радианах, а мощность в относительных единицах, можем записать

$$\int_{\delta_0^I}^{\delta_{откл. пр}} (P_0 - P_m^{III} \sin \delta) d\delta = - \int_{\delta_{откл. пр}}^{\delta_{пр}} (P_0 - P_m^{III} \sin \delta) d\delta.$$

Полученное выражение после преобразования

$$P_0(\delta_{откл. пр} - \delta_0^I) + P_m^{III}(\cos \delta_{откл. пр} - \cos \delta_0^I) + P_0(\delta_{кр} - \delta_{откл. пр}) + P_m^{II}(\cos \delta_{кр} - \cos \delta_{откл. пр}) = 0.$$

Откуда

$$\cos \delta_{откл. пр} = \frac{P_0(\delta_{кр} - \delta_0^I) + P_m^{II} \cos \delta_{кр} - P_m^{III} \cos \delta_0^I}{P_m^{II} - P_m^{III}}.$$

При трехфазном коротком замыкании или полном разрыве передачи характеристики примут вид, показанный на рис. 8.4. В формуле при определении предельного угла в этих случаях следует принять $P_m^{III} = 0$.

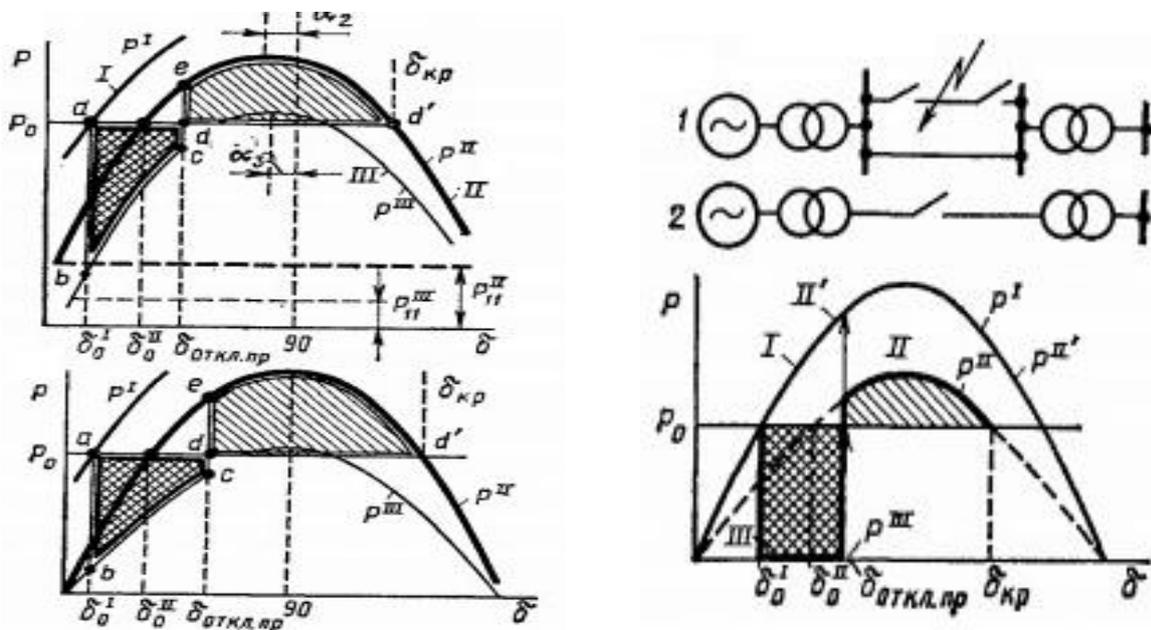


Рис. 8.4. Характеристики системы при изменении режима, приводящем к неустойчивости

Контрольные вопросы и задания

1. К чему приводит возникающий небаланс ΔP_0 между электрической и механической мощностями (моментами)?
2. Какие воздействия на ротор возникают при движении от точки c к точке d ?
3. Как математически описывается энергия, запасенная ротором в процессе ускорения?
4. Запишите правило площадей в общем виде.
5. На чем основан метод площадей?
6. Чему равна сумма кинетической A и потенциальной Π энергии всех относительных перемещений ротора?
7. Для чего служит величина ΔA ?
8. Нарисуйте характеристику мощности генератора.
9. Напишите формулу кинетической энергии вращательного движения ротора.
10. Нарисуйте график характеристики мощности простейшей энергетической системы предаварийного и послеаварийного режимов.
11. Под действием небаланса мощности, т.е. расхождения механической и электрической мощностей, происходит относительное перемещение ротора генератора, при этом он испытывает ускорение. Напишите формулу, по которой вычисляется ускорение ротора.
12. Запишите математическое выражение энергии, запасенной ротором в процессе ускорения, и энергии торможения через интеграл.

9. Численное решение уравнения относительного движения (с учетом реакции якоря). Метод последовательных интервалов.

Общее положение метода

Общим методом решения любых задач, требующих выявления характера относительного движения ротора одного или нескольких генераторов, является метод численного интегрирования дифференциальных уравнений системы. В математике методы численного интегрирования дифференциальных уравнений хорошо разработаны. При применении цифровых вычислительных машин эти методы позволяют вести решения с большой точностью. В практике инженерных расчетов часто пользуются упрощенными их модификациями, например, *методом последовательных интервалов*, изложенным ниже. Этот метод вполне удовлетворителен при

обычных инженерных задачах, в которых можно ограничиться общей характеристикой процесса. Овладев данным простым методом, инженер может легко освоить более сложные и совершенные, основанные на методах Рунге-Кутта, Штермера и ряде других.

Уравнение относительного движения синхронной машины при небалансе момента турбины и электромагнитного момента может быть записано в следующем виде:

$$\alpha = \frac{360 f_0 \Delta M}{T_j},$$

где $\Delta M = M_{\text{мех}} - M$.

При этом не делается каких-либо ограничений в отношении выражения моментов $M_{\text{мех}}$ и M , которые могут зависеть не только от изменений угла δ . Таким образом, имеется возможность распространения получаемых расчетных формул на любые сколько угодно сложные системы. Решение записанного выше дифференциального уравнения означает определение зависимости $\delta = f(t)$.

При расчетах относительного движения, происходящего со скоростью, много меньшей синхронной, упрощенно принимаем, что мощность численно равна моменту, тогда уравнение движения ротора генератора записывается

$$\alpha = \frac{360 f_0 \Delta P}{T_j}.$$

Обычно такое допущение вызывает лишь незначительную погрешность. Однако, если

$$\Delta\omega = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} 100 \geq 1,5 \div 2,0\%,$$

то в некоторых случаях (при исследовании систем вблизи границы устойчивости, при малых инерциях машин и т.д.), когда погрешность может оказаться существенной, надо решать уравнение

$$\alpha = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{360 f_0 \frac{\Delta P}{1 + \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{\omega_0}}}{T_j}.$$

Рассматривая метод последовательных интервалов, предполагаем, что поставленная задача уже решена и подлежащие нахождению зависимости построены так, как это указано на рис. 9.1.

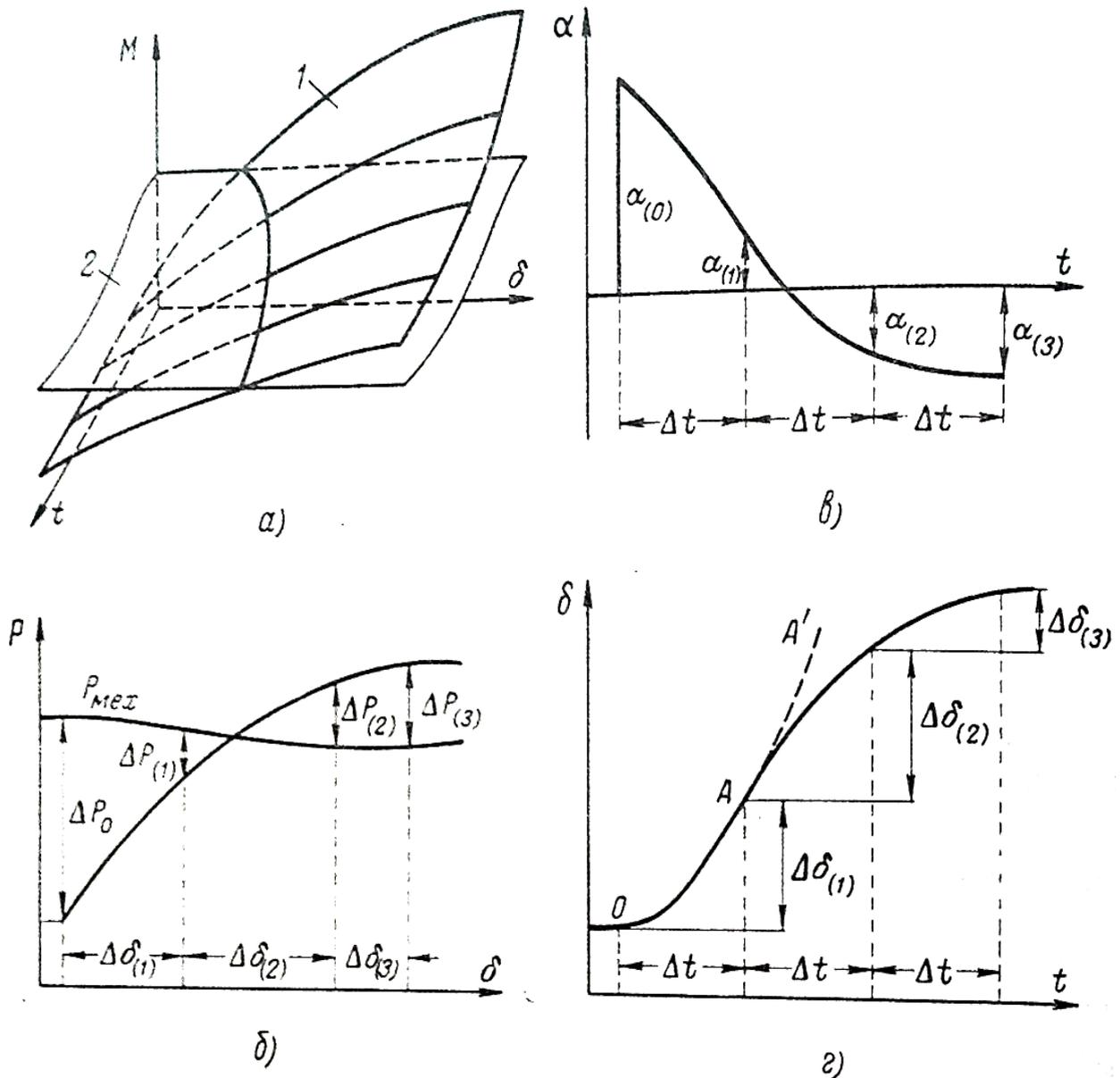


Рис. 9.1. Изменение параметров режима генератора после возмущения в системе (короткого замыкания):

a – зависимость моментов от угла и времени; 1 – характеристика электромагнитного момента генератора, полученная при изменяющейся во времени ЭДС и выраженная поверхностью $M = \varphi(\delta, t)$; 2 – характеристика механического момента

$M_{\text{мех}} = \varphi(t)$; δ – приращение мощности при изменении угла; α – изменение ускорения $\alpha = f(t)$; $\alpha(0)$ – ускорение в начале первого интервала; $\alpha(1)$ – то же, в конце первого и начале второго интервала; $\alpha(2)$ – то же, в конце второго и начале третьего интервалов; $г$ – изменение угла $\delta = f(t)$; OAA' – изменение угла при $\alpha = \alpha(0) = \text{const}$

Разобьем весь процесс на малые интервалы времени Δt и рассмотрим его последовательно от интервала к интервалу. Выбирая одинаковые интервалы по времени, очевидно, будем иметь неодинаковые интервалы по углу. Каждый интервал может характеризоваться некоторыми значениями начальных и конечных величин угла, скорости, ускорения и их средними значениями, действующими в данном интервале. Начальные значения этих величин в последующих интервалах будут равны конечным в предыдущих. Выберем интервал настолько малым, чтобы на протяжении его можно было ускорение считать неизменным. Практически при расчетах современных мощных систем интервал Δt составляет 0,02–0,1 с. Наиболее точные результаты получаются при меньшем интервале. При меньшей величине интервала погрешность расчета на каждом интервале будет мала, но поскольку количество интервалов, необходимое для решения, возрастет, увеличится также и длительность расчета. Поэтому при расчетах вручную обычно выбирают величину интервала $\Delta t = 0,05$ с. Расчет ведется до достижения предельного угла отключения КЗ, определенного методом площадей.

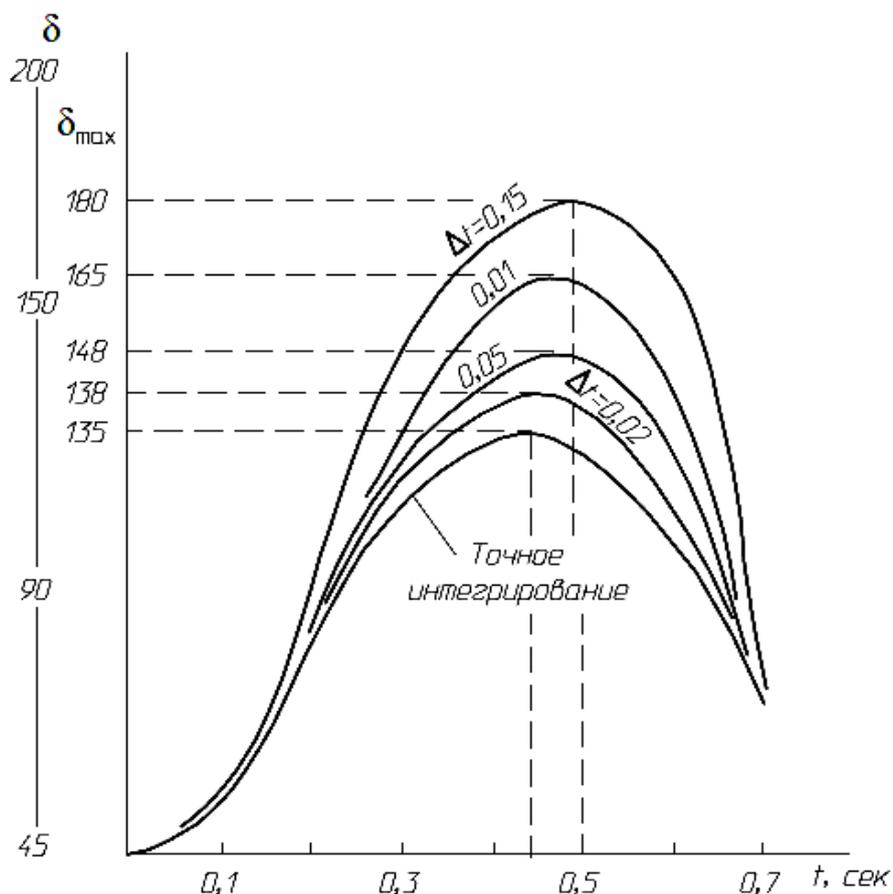


Рис. 9.2. Влияние величины расчетного интервала на максимальное значение угла δ в первом качании

В первом интервале начальная скорость равна нулю, и при постоянном ускорении, равном α_0 , изменение угла будет происходить по закону равномерно ускоренного движения. Приращение угла к концу интервала составит

$$\Delta\delta_{(1)} = 0,5\alpha_{(0)}\Delta t^2 = 0,5 \cdot 360 f_0 \frac{\Delta P_{(0)}}{T_j} \Delta t^2.$$

Мощность и ее приращение ΔP варьируются при изменениях угла и времени. Зная, что время изменилось на Δt , а угол на $\Delta\delta_{(1)}$, можно определить $\Delta P_{(1)}$, т.е. небаланс мощности в конце первого интервала или, что одно и то же, в начале второго. По приращению мощности легко определить и ускорение:

$$\alpha_{(1)} = \frac{360 f_0 \Delta P_{(1)}}{T_j}.$$

Во втором интервале изменение угла зависит от скорости $\Delta\omega_{(1)}$, которую получил ротор в первом интервале, и ускорения $\alpha_{(1)}$, действующего в начале второго интервала, обусловленного избыточной мощностью $\Delta P_{(1)}$. Можно записать следующее выражение для определения приращения угла во втором интервале:

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\omega_{(1)}\Delta t + 0,5\alpha_{(1)}\Delta t^2.$$

Значение скорости на протяжении первого интервала непостоянно. Определим ее приращение по среднему ускорению:

$$\omega_{(1)} = 0,5(\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)})\Delta t.$$

Подставив это значение, будем иметь

$$\Delta\delta_{(2)} = 0,5\alpha_{(0)}\Delta t^2 + \alpha_{(1)}\Delta t^2,$$

или

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + \alpha_{(1)}\Delta t^2.$$

Аналогично можно получить выражение для приращения угла в третьем, четвертом и любом последующем интервалах.

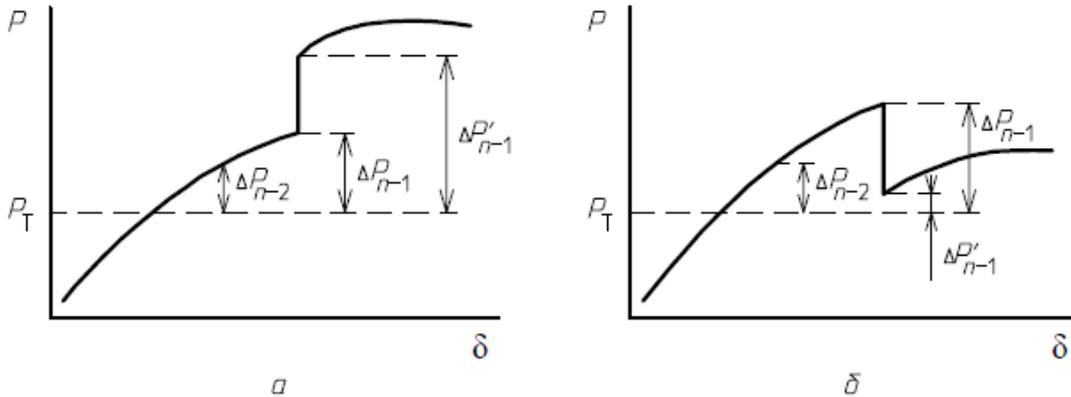


Рис. 9.3. Изменение режима системы скачком:
a – увеличение мощности; *б* – уменьшение мощности

Выражая ускорения через мощности и переходя к выражению времени (и постоянной инерции) в секундах, а угла – в электрических градусах, будем иметь

$$\begin{cases} \Delta\delta_{(1)} = K \cdot 0,5\Delta P_{(0)} \\ \Delta\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + K\Delta P_{(1)} \\ \Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + K\Delta P_{(n-1)} \end{cases},$$

где

$$K = \frac{360 f_0 \Delta t^2}{T_j}.$$

Расчет продолжается до достижения предельного угла отключения.

Контрольные вопросы и задания

1. Для чего нужен метод численного интегрирования дифференциальных уравнений электроэнергетической системы?
2. Назовите основные преимущества метода последовательных интервалов при применении цифровых вычислительных машин.
3. Что не предусматривает метод последовательных интервалов?
4. Чем характеризуется каждый интервал в методе последовательных интервалов?
5. Какой параметр используется при разбиении интервалов?
6. На что влияет количество интервалов в методе последовательных интервалов?

7. Чему равна начальная скорость на первом интервале?
8. Во втором интервале изменение угла зависит от скорости, которую он получил. Что влияет на скорость?
9. Назовите недостатки метода последовательных интервалов.
10. Определите небаланс моментов на вращающемся роторе генератора, если $M_T = 155$ о.е., $M_{\Sigma M} = 135$ о.е.
11. Определите скорость вращения ротора генератора при ускорении $\alpha = 4 \text{ м/с}^2$ в конце времени $t = 3$ с, если начальная скорость вращения ротора генератора была равна $V_0 = 0 \text{ м/с}$.
12. Определите скорость вращения ротора генератора при ускорении $\alpha = 16 \text{ м/с}^2$ в конце времени $t = 13$ с, если начальная скорость вращения ротора генератора была равна $V_0 = 63 \text{ м/с}$.
13. Определите среднюю скорость вращения ротора генератора на интервале времени $\Delta t = 4$ с при ускорении в начале времени $\alpha_1 = 3 \text{ м/с}^2$ и в конце времени $\alpha_2 = 5 \text{ м/с}^2$, если начальная скорость вращения ротора генератора равна $V_0 = 0 \text{ м/с}$.
14. Определите среднюю скорость вращения ротора генератора на интервале времени $\Delta t = 11$ с при ускорении в начале времени $\alpha_1 = 9 \text{ м/с}^2$ и в конце времени $\alpha_2 = 15 \text{ м/с}^2$, если начальная скорость вращения ротора генератора равна $V_0 = 7 \text{ м/с}$.

10. Задача регулирования возбуждения

Автоматическое регулирование возбуждения в настоящее время, как правило, применяется на всех электростанциях (генераторах), присоединенных к электрическим системам. Перечислим основные задачи, решаемые с помощью регулирования возбуждения:

- повышение предела передаваемой мощности за счет управления величиной ЭДС генератора и устранения факторов, способных вызвать самораскачивание системы вблизи предела устойчивости;
- улучшение качества режима системы за счет поддержания напряжения в начале передачи и обеспечения возможно более быстрого затухания малых колебаний, которые возникают в нормальном режиме и неблагоприятно отражаются на качестве работы системы;
- улучшение параметров системы, в частности, изменение собственной частоты колебаний и устранение возможности их резонанса колебаний.

Кроме решения этих трех задач, относящихся к статическим свойствам системы и рассматриваемых в настоящей главе с помощью метода малых колебаний, регулирование возбуждения обеспечивает также определенное улучшение динамических свойств систем, к числу которых относятся:

- повышение предела динамической устойчивости за счет быстрого увеличения тока возбуждения до его предельно допустимых (потолочных) значений, т.е. за счет форсировки возбуждения;

- улучшение так называемой результирующей устойчивости: стимулирования снижения скольжения выпавшей из синхронизма машины, облегчения ее вхождения в синхронизм, уменьшение колебаний напряжения и углов у машин (или частей системы), оставшихся в синхронизме;

- более быстрое полное гашение больших колебаний, возникающих при ликвидации асинхронного хода части системы или после каких-либо резких изменений режима.

Задачи и методы исследования регулируемых систем

Чтобы регуляторы возбуждения могли удовлетворительно решать перечисленные выше задачи, необходимо определенным образом подобрать параметры всей системы возбуждения, включая параметры самих регуляторов.

Решение каждой задачи накладывает на выбор параметров системы регулирования свои требования, варьирующиеся при изменении схемы и параметров регулируемой системы, а также и при смене ее режима. Исследование регулируемой системы может, вообще говоря, проводиться в аспектах решения двух задач:

- задач анализа – проверка устойчивости системы, выявление вида переходного процесса и определение его качества при заданных параметрах регулятора системы;

- задач синтеза – исходя из определенных требований к устойчивости и качеству переходного процесса регулируемой системы, определение вида регулятора (структурной схемы системы регулирования) и его параметров.

При анализе регулируемой системы, равно как и при синтезе, надо математически описать происходящие в ней процессы для того, чтобы из решения соответствующих дифференциальных уравнений найти все необходимые коэффициенты, характеризующие устойчивую работу системы при заданном U_0 , или чтобы при заданных параметрах проверить, будет ли система устойчива.

Составление такого уравнения и анализ его свойств для двух наиболее распространенных в настоящее время систем регулирования возбуждения – *пропорционального типа и сильного действия* – будет основной задачей настоящей главы.

Характеристика мощности регулируемых систем и их особенности. Система с пропорциональным регулированием возбуждения

Если бы генераторы электрической системы не имели регулирования возбуждения, работая при $E_q = \text{const}$, то предел мощности в реальной системе заметно снижался бы при уменьшении напряжения в приемной системе. Схема исследуемой системы приведена на рис. 10.1, векторная диаграмма при изменении нагрузки – рис. 10.2.

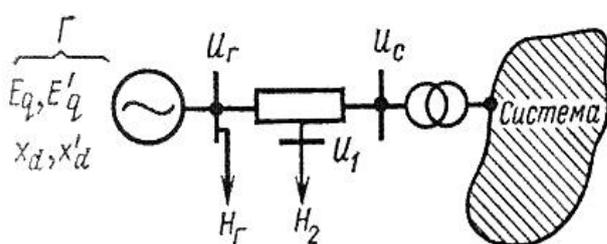


Рис. 10.1. Схема исследуемой простейшей системы

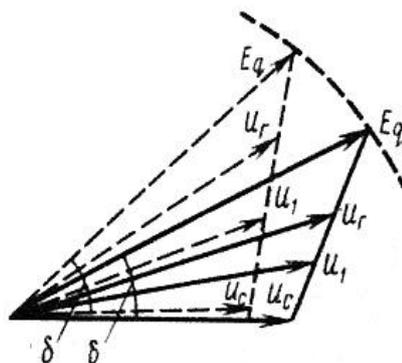


Рис. 10.2. Векторная диаграмма при изменении нагрузки

Соответственно, снижалось бы напряжение и на генераторе U_r , и в промежуточных точках системы, что нежелательно или даже недопустимо с точки зрения энергии у потребителей. Характеристика мощности при уменьшении напряжения в приемной системе показана на рис. 10.3. Это построенная по точкам зависимость P от изменения напряжения U_c при изменении нагрузки линии (угла δ). Очевидно, что в этих условиях максимальная передаваемая мощность (точка 7) значительно меньше, чем (точка 7'). Если бы напряжение U_c поддерживалось строго неизменным, то предельная мощность отвечала бы некоторой точке 7'.

Обычное пропорциональное автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) при больших коэффициентах усиления ($K_0 U = 50-100$) позволяет поддерживать напряжение на шинах генератора почти постоянным (рис. 10.3, б). Обычный регулятор возбуждения пропорционального типа в этих условиях дает предельную мощность, лишь немного большую, чем нерегулируемый генератор ($E_q = \text{const}$). Мощность ограничена потому, что при $U_r \approx \text{const}$ система при некотором значении $P = P_3$ (точка 3) начинает самораскачиваться и ее синхронная работа нарушается. Поэтому регуляторами пропорционального действия (электронными АРВ, устройствами компаундирования) в системах, содержащих дальние передачи, не стремятся поддерживать $U_r = \text{const}$, при этом допускается некоторое его

снижение ΔU с ростом нагрузки, т.е. работа со статизмом $K_{ст} = \frac{\Delta U}{\Delta U_{\Gamma 0}} 100\%$.

Характеристика $P = \varphi(\delta)$ при статизме порядка 2–5 % имеет примерно такой же максимум, что и характеристика при $E'_q = E'_{q0} = \text{const}$.

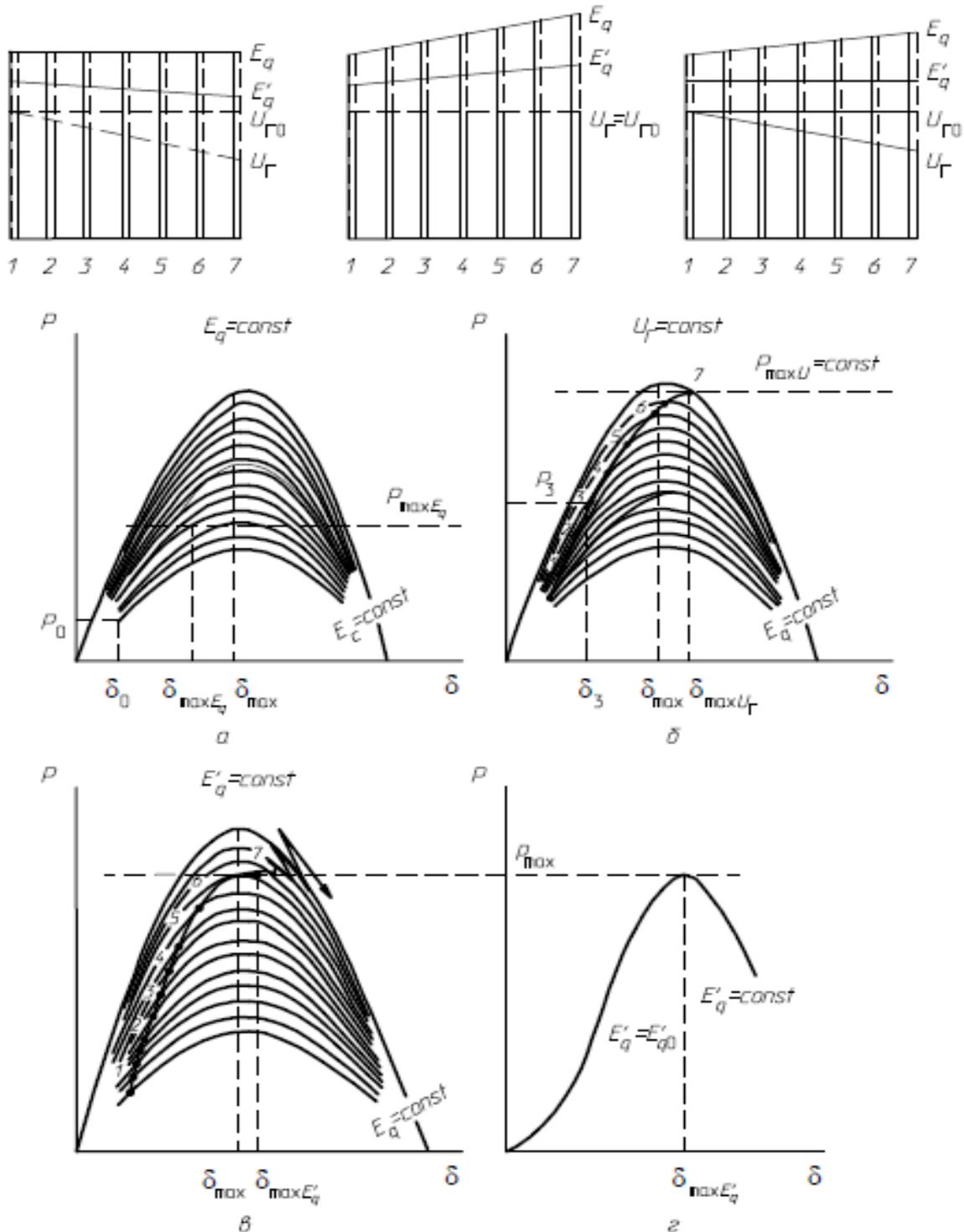


Рис. 10.3. Диаграмма и характеристики системы:
 а – без регулирования возбуждения; б – при регулировании $U_{\Gamma} = \text{const}$; в, г – то же, при $E'_q = \text{const}$

Система регулирования возбуждения сильного действия. Она позволяет выдержать постоянство напряжения во всем рабочем диапазоне изменения мощности вплоть до $PU_T = \text{const}$. В этом случае установка больших коэффициентов по напряжению ($K_0U \approx 100$ и более) не влечет за собой самораскачивания, так как в регуляторе приняты специальные меры стабилизации (регулирование по ряду дополнительных параметров, включающих первую и вторую производные от регулируемой величины). Следовательно, в схеме замещения системы генератор с регулятором сильного действия должен быть замещен $U_T = \text{const}$.

Система регулирования с зоной нечувствительности. В действительности наличие той или иной нечувствительности или инерционности в АРВ любого типа неизбежно. Рассмотрим работу простейшей системы при регулировании с зоной нечувствительности.

Пусть при изменении нагрузки от P_0 и P_1 напряжение постепенно падает от U_0 и U_1 . Ток возбуждения при этом не изменяется. Регулятор не работает, находясь в зоне нечувствительности, которая определяется как $\Delta U = U_0 - U_1$. Как только напряжение снижается до U_1 , система регулирования мгновенно поднимает ток возбуждения и увеличивает ЭДС E_q . Точка, характеризующая режим, сместится с кривой 0–1, построенной при $E_{q1} = \text{const}$, на кривую $E_{q2} = \text{const}$ и т.д. В результате получим ломаную линию 0, 1, 2, 3, 4.

Очевидно, что при инерционном регулировании устойчивость следует определять, исходя из условия $E_q = \text{const}$, т.е. по критерию $C_1 = \frac{dP_{E_q}}{d\delta} > 0\%$.

Следовательно, предел мощности в такой системе совпадает с пределом устойчивости. Для системы, показанной на рис. 10.4, предельным будет угол в 90° , за которым начинается выпадение из синхронизма, несколько задерживаемое действием регулятора, поднимающего ток в обмотке возбуждения.

При достаточно интенсивном действии регулятора возбуждения генератор может не выпасть из синхронизма. За значением, превышающим предельный угол, может наступить квазиустановившийся режим, проявляющийся в больших установившихся колебаниях. Эти автоколебания могут быть устойчивыми (иметь постоянную амплитуду) или неустойчивыми.

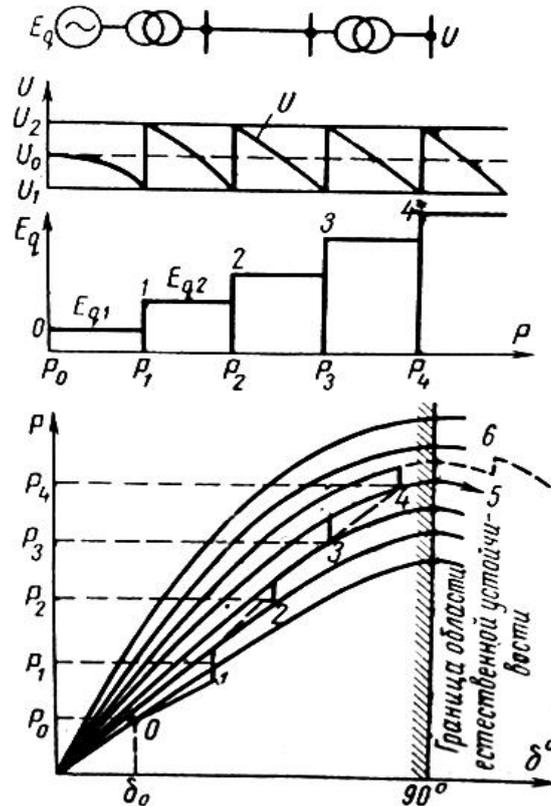


Рис. 10.4. Предел мощности при регулировании с зоной нечувствительности

Пояснить (очень грубо) протекание этих колебаний можно, пользуясь способом площадей. Пусть режим системы характеризуется точкой 5, лежащей за пределом устойчивости. Рассмотрим протекание процесса, представив часть характеристик в увеличенном масштабе, как это сделано на рис. 10.5. Предположим, что в неустойчивом режиме, которому соответствует точка 5, напряжение генератора равно номинальному; ротор перемещается из положения 5 в сторону увеличения угла. Напряжение при этом падает, ток возбуждения не изменяется до тех пор, пока зона нечувствительности не будет пройдена (точка 5'). После этого начинается увеличение тока возбуждения, что на характеристике $P = f(\delta)$ отражено перемещением рабочей точки в 6, 7 и т.д.

При достаточной интенсивности роста тока возбуждения процесс выпадения из синхронизма замедлится, и в точке 7 электрическая мощность станет равной механической. Однако движение ротора не прекратится, так как при нем от точки 5 до точки 7 под действием избытка

мощности $\Delta P = P_T - P_G$ запасена кинетическая энергия ускорения $\int_{\delta_7}^{\delta_5} \Delta P d\delta$

(площадь 5, 5', 6, 7, 5), наличие которой заставит ротор перемещаться дальше

до точки 8', в которой кинетическая энергия, соответствующая площадке 5, 5', 6, 7, 5, будет уравновешена энергией торможения $\int_{\delta_7}^{\delta_8} \Delta P d\delta$ (площадка 7 8, 8', 2). При движении ротора точки 7 к точке 8' значение $U < U_1$, и ток возбуждения продолжает увеличиваться, поэтому рабочая точка перемещается от 7 к 8', переходя на характеристики с большими значениями ЭДС. В точке 8' процесс роста угла прекращается, так как энергия, накопленная в процессе ускорения, будет скомпенсирована энергией, израсходованной в процессе торможения ротора. Но режим в точке 8' не может установиться, так как электрическая мощность больше механической. Под действием этого небаланса мощностей начинается торможение генератора, которое до точки 9 будет проходить при росте возбуждения ($U < U_1$), на участке 9–10 – при постоянном возбуждении (зона нечувствительности) и от точки 10 до точек 11–12–13 при уменьшающемся возбуждении, что на характеристиках $P = f(\delta)$ отражено переходом рабочей точки.

Контрольные вопросы и задания

1. Как называется процесс повышения предела динамической устойчивости за счет быстрого увеличения тока возбуждения до его предельно допустимых значений?
2. Что будет с пределом мощности в реальной системе при снижении напряжения в приемной системе?
3. Что позволяет поддерживать напряжение на шинах генератора постоянным?
4. Какие виды системы регулирования возбуждения существуют на сегодняшний день?
5. Как называется задача, исходящая из определенных требований к устойчивости и качеству переходного процесса регулируемой системы, определяющегося видом регулятора и его параметрами?
6. Как называется задача, проверяющая устойчивость системы, выявляющая вид переходного процесса и определяющая его качество при заданных параметрах регулятора системы?
7. Чем в схеме замещения системы может быть заменен генератор, имеющий регулятор возбуждения пропорционального действия?
8. Какая система регулирования возбуждения позволяет выдержать постоянство напряжения во всем рабочем диапазоне изменения мощности?

9. Нарисуйте схему регулятора пропорционального действия (корректора напряжения).

10. Рассчитайте форсировку возбуждения генератора, если значение вынужденной ЭДС составляет 4 о.е., а в номинальном режиме значение ЭДС равно 1,9 о.е.

11. Найдите время, отвечающее предельному значению δ отключения, если постоянная инерции равна 8 о.е., угол предельного отключения 67° , $\delta = 60^\circ$, а мощность $P = 4$ о.е.

12. Нарисуйте схему простейшей системы, связывающую электростанцию с энергетической системой и векторную диаграмму при изменении нагрузки.

11. Метод малых колебаний

Трудно найти области в физике и технике, в которых колебания не играли бы той или иной роли. Некоторые разделы науки, такие как акустика, оптика и радиотехника, целиком базируются на колебательных явлениях.

Колебаниями называются процессы, обладающие определенной повторяемостью. Типичным примером являются периодические колебания, описываемые периодическими функциями времени:

$$f(t + T) = f(t),$$

где T – период колебаний. Важным частным случаем периодических колебаний являются гармонические колебания, происходящие по закону

$$f(t) = A \sin(\omega t + \alpha),$$

где A – амплитуда колебаний, $\omega = 2\pi/T$ – частота колебаний, α – начальная фаза.

Колебания с небольшой амплитудой называются малыми и описываются системами линейных дифференциальных уравнений. Уравнения малых колебаний систем с конечным числом степеней свободы представляют собой линейные обыкновенные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами. Для систем с распределенными параметрами (струны, стержни, мембраны, пластины, оболочки), имеющих бесконечное число степеней свободы, уравнения малых колебаний являются линейными дифференциальными уравнениями в частных производных.

Между задачами о малых колебаниях систем с конечным и бесконечным числом степеней свободы существует тесная связь. Метод малых колебаний применяется для анализа статической устойчивости простейшей системы «генератор – ШБМ», схема которой показана на рис. 11.1.

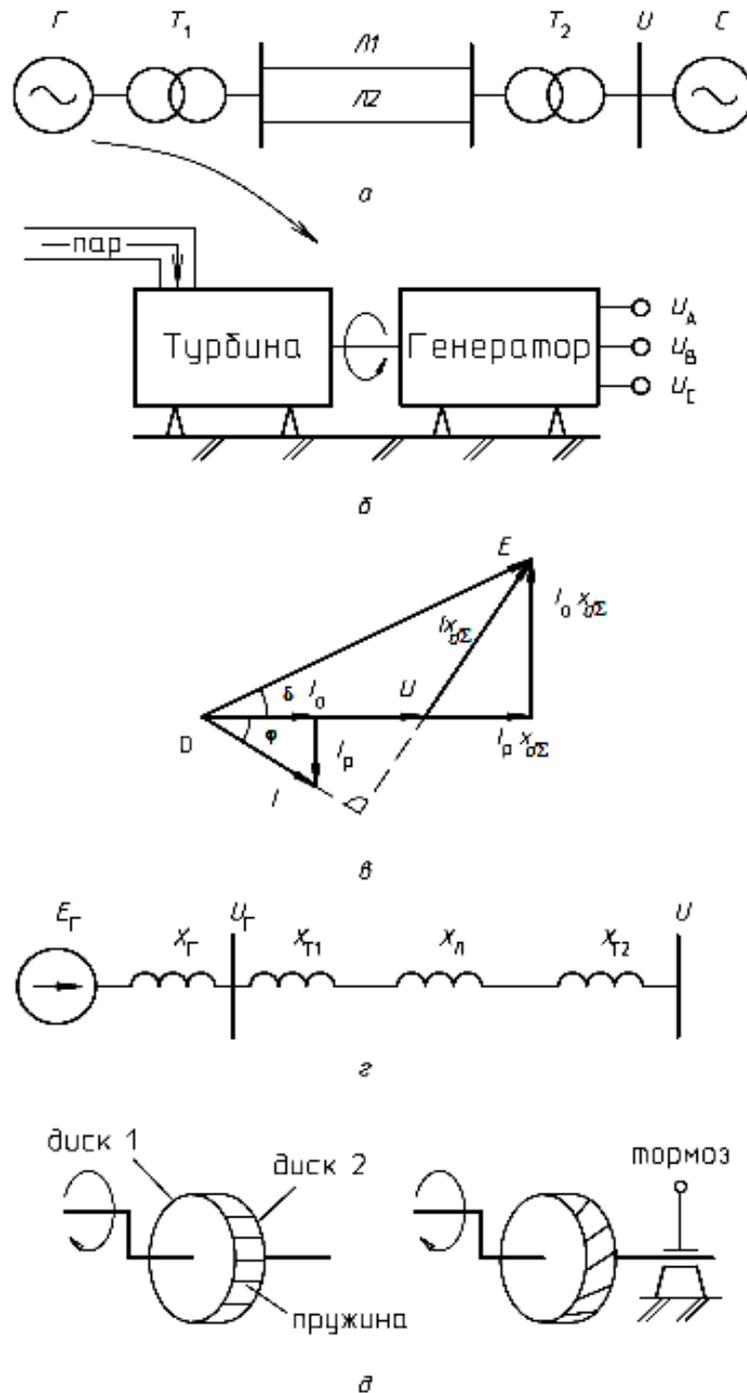


Рис. 11.1. Оценка статической устойчивости простейшей системы:
a – принципиальная схема системы; *б* – блок «турбина – генератор»;
в – векторная диаграмма генератора; *г* – схема замещения системы;
д – механический аналог блока «турбина – генератор»

При небольших возмущениях движение ротора генератора описывается уравнением

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \Delta P - P_{\max} \sin \delta.$$

Правая часть этого уравнения нелинейна, поэтому оно не имеет аналитического решения. Но при малых отклонениях от положения равновесия ($\Delta \delta$) оказывается возможным его линеаризовать, приведя к виду дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами. Разлагая функцию $\Delta P = P_0 - P_{\max} \sin \delta$ в ряд Тейлора в области δ_0 , получаем

$$\Delta P = P_0 - P_{\max} \sin \delta = P_0 - P_{\max} \sin \delta_0 - \Delta P = \left(\frac{dP}{d\delta} \right)_{\delta=\delta_0} \Delta \delta - \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2 P}{d\delta^2} \right)_{\delta=\delta_0} \Delta \delta^2 - \dots,$$

где $\Delta \delta = \delta - \delta_0$ – малое отклонение угла от его исходного значения.

При малых значениях Δd его степенями выше первой можно пренебречь. Учитывая также, что $P_0 = P_{\max} \sin \delta_0$, получаем

$$\Delta P = \left(\frac{dP}{d\delta} \right)_{\delta=\delta_0} \Delta \delta.$$

Поскольку $\delta = \delta_0 + \Delta \delta$ и δ_0 – постоянная величина, то

$$\frac{d^2 P}{dt^2} = \frac{d^2 (\delta_0 + \Delta \delta)}{dt^2} = \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2}.$$

Подставив в уравнение $\alpha = \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\Delta P}{T_j}$, получаем простое

линейное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{1}{T_j} \frac{d\Delta \delta}{dt} \Delta \delta = 0.$$

Решением этого уравнения является изменение $\Delta\delta$ во времени в соответствии с выражением

$$\Delta\delta = K_1^{P_1^t} + K_2^{P_2^t},$$

где P_1 и P_2 – корни характеристического уравнения, которые находятся так:

$$P_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{1}{T_j} \frac{dP}{d\delta}} = \pm j \sqrt{-\frac{1}{T_j} \frac{dP}{d\delta}}.$$

Корни получаются чисто мнимыми при $\frac{dP}{d\delta} > 0$ либо чисто вещественными при $\frac{dP}{d\delta} < 0$. В случае мнимых корней $P_{1,2} = \pm j\omega$, где $\omega = \sqrt{-\frac{1}{T_j} \frac{dP}{d\delta}}$, решение характеристического уравнения будет иметь вид

$$\Delta\delta = K_1^{j\omega t} + K_2^{-j\omega t}.$$

Изменение угла в соответствии с этим выражением происходит по закону незатухающих колебаний в окрестности δ .

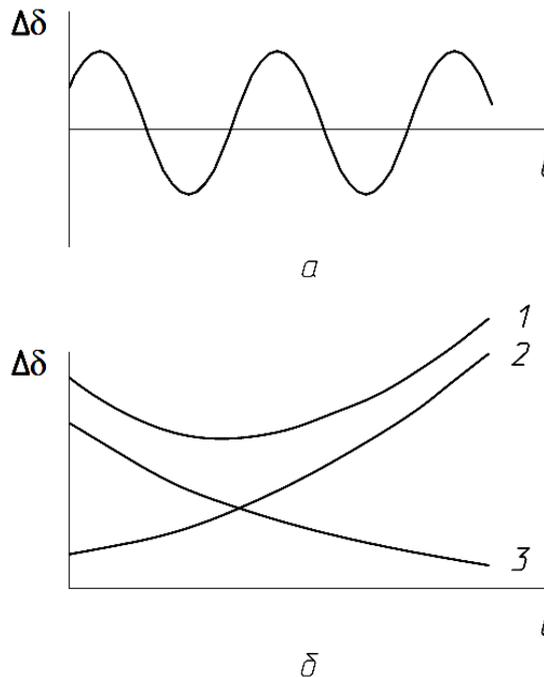


Рис. 11.2. Изменение угла при малом возмущении:

a – мнимые корни ($K_1^{j\omega t} + K_2^{-j\omega t}$); b – действительные корни $\Delta\delta$ – кривая 1

Учет демпферного момента. Если при анализе учесть демпферный момент, то получим

$$T_j \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + P_d \frac{d \Delta \delta}{dt} + C_1 \Delta \delta = 0.$$

При учете потерь характер колебаний становится затухающим. Через некоторое время после нарушения исходного состояния установится первоначальный режим. Система в этом случае устойчива.

Если корни характеристического уравнения вещественные ($P_{1,2} = \pm P$), то изменение угла имеет апериодический характер. Наличие положительного вещественного корня приводит к нарастанию Δd , угол непрерывно увеличивается, и система оказывается неустойчивой. Следовательно, необходимым и достаточным условием устойчивости является $\frac{dP}{d\delta} > 0$, что было установлено ранее. Таким образом, метод малых колебаний предполагает линеаризацию ротора, получение характеристического уравнения и анализ корней этого уравнения.

Контрольные вопросы и задания

1. На что указывает наличие нулевого корня в расчете методом малых колебаний?
2. Дайте определение критическому случаю.
3. В чем отражено перераспределение электромагнитной энергии?
4. Дайте определение самораскачиванию.
5. К чему приводит демпфирование?
6. Дайте определение методу малых колебаний.
7. В каких случаях возникает самораскачивание?
8. В результате каких процессов развивается самораскачивание?
9. Что может вызвать нарушение статической устойчивости?
10. Чем может быть обусловлен дополнительный, ускоряющий, вращающий момент ротора?
11. Опишите одним уравнением движение ротора генератора при произвольных возмущениях.
12. Опишите одним уравнением движение ротора генератора при малых возмущениях.
13. Нарисуйте график экспоненциально-нарастающего гармонического колебания.

12. Переходные процессы в узлах нагрузки. Устойчивость асинхронного двигателя

Часть электроэнергетической системы, непосредственно осуществляющая обеспечение электрической энергией потребителей, называется системой электроснабжения. Она содержит питающие и распределительные сети, трансформаторы, компенсирующие устройства (конденсаторы, синхронные компенсаторы) и приемники (потребители), в которых электрическая энергия используется в производственных или бытовых целях. Места подключения отдельных систем электроснабжения к высоковольтным сетям электрических систем называются узлами нагрузок.

При обычной работе систем электроснабжения и во время различных пусков и остановок оборудования происходят обычные переходные процессы. Отключения отдельных элементов, короткие замыкания в них приводят к аварийным переходным процессам. Установившиеся режимы и переходные процессы в системах электроснабжения должны удовлетворять тем общим требованиям, которые сформулированы применительно к электрической сети в целом.

Переходные процессы в системах электроснабжения можно различать по виду возмущений (малое, большое, длительное и т.д.) так же, как это делалось для системы в целом.

В нормальном режиме системы при малых его возмущениях возникает необходимость проверки статической устойчивости синхронных двигателей, синхронных компенсаторов и больших групп асинхронных двигателей, которые, имея мощность, соизмеримую с мощностью питающих их генераторов, могут оказаться неустойчивыми, причем эта неустойчивость проявляется в виде специфического явления, называемого лавиной напряжения. Пуски двигателей, резкие колебания момента на их валу и т.д. приводят к изменениям значения и фазы напряжения в узлах нагрузки. Отклонения величин не должны превышать допустимых пределов. Влияние резких изменений режима двигателей обычно заметно проявляется в распределительных сетях в виде колебаний напряжения. Более медленные изменения режима двигателей, связанные с технологическими процессами, в которых они участвуют, преимущественно отражаются на уровнях напряжения в питающих сетях (на отклонении напряжения). Такие нарушения режима, как короткие замыкания в элементах питательных сетей, отключения и повторные включения синхронных двигателей, самозапуска синхронных двигателей после перерывов питания, самовозбуждение и самораскачивание двигателей при работе на емкостное

сопротивление и т.д., могут существенно сказываться на режиме всей системы электроснабжения, поэтому переходные процессы в ее элементах рассматриваются не только с точки зрения обеспечения их надежности и устойчивости, но и с точки зрения обеспечения надежности всей системы электроснабжения.

Виды и особенности переходных процессов в узлах нагрузки при малых возмущениях

При малых возмущениях в системах электроснабжения возникает необходимость проверки устойчивости синхронных генераторов и двигателей. При рассмотрении устойчивости узлов нагрузки приходится учитывать те существенные особенности неустойчивости групп асинхронных двигателей, которые приводят к явлению, называемому лавиной напряжения.

Лавина напряжения (статическая устойчивость нагрузки, опрокидывание двигателей)

Асинхронные двигатели имеют большие запасы устойчивости, и поэтому обеспечение статической устойчивости отдельных двигателей, входящих в нагрузку, не вызывает затруднений. Если запас устойчивости характеризовать отношением максимального вращающего момента к рабочему, то коэффициент запаса составит 1,5–1,7. Следовательно, даже значительные снижения напряжения на шинах двигателей не могут привести к нарушению их устойчивости. Однако это относится к единичному или группе двигателей, питаемых от шин напряжения, значение которого не зависит от его режима. Если двигатель или группа двигателей питается от генератора или группы генераторов, замененных эквивалентным генератором соизмеримой мощности, то напряжение на шинах двигателя зависит от его режима (скольжения). Условия нарушения устойчивости (опрокидывания) двигателя получаются при этом существенно иными. Рассмотрим схему системы (рис. 12.1, *a*), где сопротивление генератора x_G , сети x_C и двигателя x_D соизмеримы по величине. Представим схему замещения так, как показано на рис. 12.1. Затем приближенно упростим ее переносом x_D к точке приложения ЭДС E . Очевидно, что напряжение на шинах двигателя будет падать с ростом скольжения i , соответственно, тока.

Вычислять вращающий момент удобнее не по измеряющемуся напряжению $U = \varphi(s)$, а по неизменному значению ЭДС E . Максимальный вращающий момент в этом случае будет

$$M_{mE} = \frac{E^2}{2(x_T + x_c + x_s)}.$$

Величина M_m , определенная при $E = \text{const}$, будет значительно меньше, чем определенная при $U = \text{const}$:

$$M_{mU} = \frac{U^2}{2x_s} > M_{mE}.$$

Записанное выше выражение для M_{mE} получено как приближенное, соответствующее грубому преобразованию из одной схемы в другую. Однако это обстоятельство не меняет общих качественных закономерностей.

Величина $S_{кр} = \frac{R}{x_T + x_c + x_b}$ при $E_q = \text{const}$ оказывается много меньше, чем критическое скольжение двигателя, определявшееся раньше как $S_{кр} = \frac{R}{x_T}$. Из этих соображений, подтвержденных характеристиками, следует, что опрокидывание двигателя (или группы двигателя), питающегося от генератора соизмеримой мощности, может произойти при сравнительно небольших изменениях скольжения и небольших снижениях ЭДС, питающей эквивалентный двигатель, и тем более при небольших колебаниях напряжения U (зависящего от режима двигателя).

Подчеркнем, что определение критических условий следует в этом случае проводить, исходя не из напряжения на зажимах двигателя, которое не является независимой переменной, а исходя из этой ЭДС генератора E , которую в данных условиях можно считать не зависящей от изменений режима. Эта ЭДС при различных способах регулирования генератора будет различной. В случае нерегулируемого генератора это будет ЭДС E_q ; при обычных (пропорционального типа) регуляторах возбуждения – $E_q = E'$; при регуляторах сильного действия – U_T . Соответствующие характеристики $U = f(E)$ и $Q = f(E)$ показаны на рис. 12.1, *e*. Из характеристик видно, что снижение ЭДС E , особенно в зоне, где $\frac{dQ}{dE}$ отрицательно, приводит к росту реактивной мощности, соответственному увеличению токов, потребляемых двигателями нагрузки, и повышению потерь напряжения в питающей сети, способствуя дальнейшему снижению напряжения.

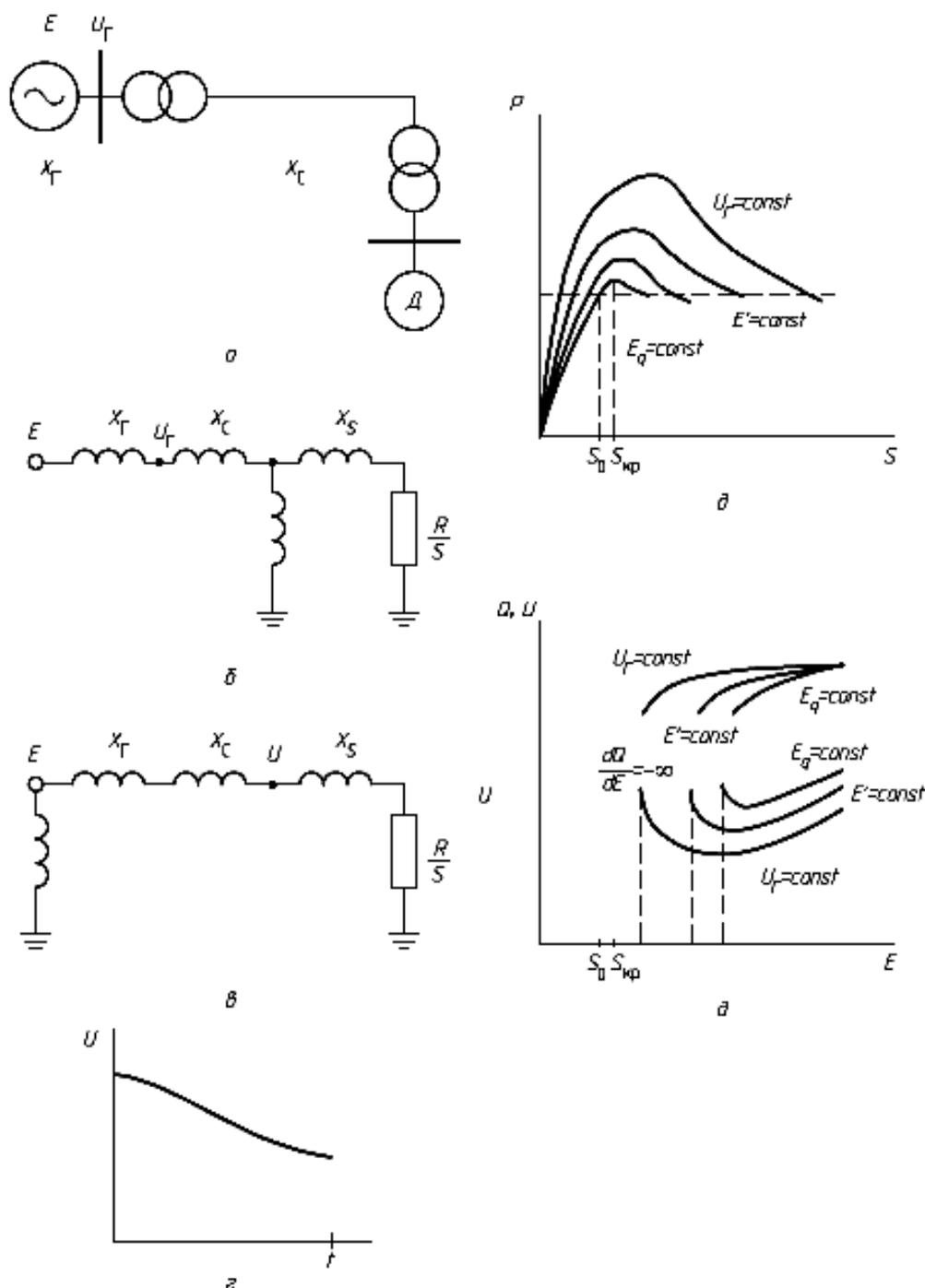


Рис. 12.1. Характеристики группы двигателей, соизмеримых по мощности с питающим их генератором

Таким образом, вблизи режима опрокидывания двигателей процесс прогрессирующего снижения напряжения оказывается очень заметным. Персонал станции и системы не может судить непосредственно о росте токов роторов, статоров и скольжений двигателей, входящих в состав комплексной нагрузки в то время, когда они приближаются к опрокидыванию, но наблюдает резкое, лавинообразное снижение напряжения. Процесс этот поэтому получил название лавины напряжения. Появлению лавины

напряжения обычно предшествуют режимы при недостаточно высоком возбуждении генераторов или при увеличении реактивных сопротивлений связи. Получающееся при этом снижение реактивной мощности, приходящей к потребителю, заставляет персонал систем считать причиной лавины напряжения так называемый «дефицит реактивной мощности».

Количественное определение условий, в которых может возникнуть лавина напряжения, и определение запаса устойчивости двигателей могло бы производиться, исходя из схемы замещения, приведенной на рис. 12.1, в, точно так же, как это вычислялось для единичного двигателя, только здесь вместо U будет фигурировать E и вместо x_b – значение $x_{ta} = x_r + x_e + x_t$.

Схема, изображенная на рис. 12.1, а, могла бы соответствовать и более сложной системе с несколькими генераторами и нагрузками, если в ней все генераторы заменить одним эквивалентным с постоянной ЭДС и объединить все нагрузки в один эквивалентный двигатель. Однако, поскольку нагрузка электрических систем обычно состоит из различного рода потребителей электрической энергии и асинхронные двигатели составляют в ней только некоторую (хотя и значительную) долю, определить параметры эквивалентного двигателя было бы затруднительно.

Оказывается, более удобно вместо критерия устойчивости $\frac{dP}{dU} = 0$ или эквивалентного ему критерия $\frac{dQ}{dU} = -\infty$ для одиночного двигателя, воспользоваться так называемым вторичным критерием устойчивости $\frac{dE}{dU} = 0$. Смысл этого критерия пояснен на рис. 12.2, где показано, что при снижении напряжения на шинах двигателя до значения $U_{кр}$, отвечающего границе устойчивого режима, производная от эквивалентной ЭДС E_a по напряжению проходит через нуль. Таким образом, для нарушения устойчивости характерны три соотношения:

$$\frac{dE}{dU} = 0; \quad \frac{dQ}{dE} = -\infty; \quad \frac{dP}{ds} = 0.$$

В справедливости этого положения легко убедиться, исходя из эквивалентной схемы, если напряжение на зажимах комплексной нагрузки рассматривать как величину, зависящую от режима двигателя, а эквивалентную ЭДС с $E = E_3$ – как независимую переменную. При этом условии между напряжением на зажимах и эквивалентной ЭДС существует очевидное соотношение

$$U = \sqrt{\left(E - \frac{Q_3 x_3}{E_3}\right)^2 + \left(\frac{P x_3}{E_3}\right)^2} \approx E_3 - \frac{Q_3 x_3}{E_3}.$$

Здесь значения Q_3 являются значениями внутренней реактивной мощности генератора.

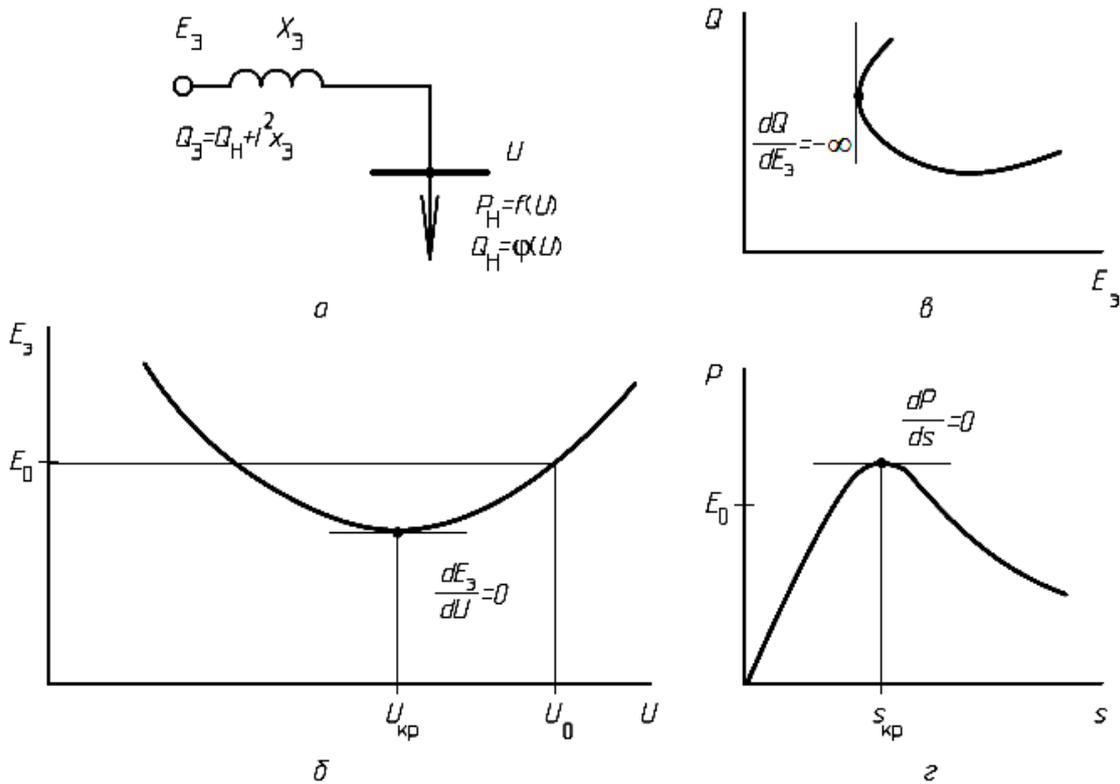


Рис. 12.2. Критерии устойчивости нагрузки

Проверка устойчивости нагрузки по критерию dE/dU

Проверка начинается с построения зависимости $E_3 = f(U)$. Предварительно задаются рядом значений напряжения U , для каждого из которых по характеристикам нагрузки находят соответствующие значения P_H , Q_H , а затем строят зависимость $E_3 = f(U)$.

Запас устойчивости нагрузки определяется как отношение $[(U_0 - U_{кр})/U_0] \cdot 100\%$, где U_0 – рабочее напряжение, а $U_{кр}$ – значение критического напряжения, при котором $dE/dU = 0$.

Генераторы без АРВ замещаются ЭДС E_q , а генераторы при АРВ – ЭДС E_x , приложенной за сопротивлением A_x , причем при АРВ сильного действия $A_x = 0$ и ЭДС $E_x = U_\Gamma$.

Проверка устойчивости нагрузки по критерию $d\Delta Q/dU > 0$

При расчетах устойчивости нагрузки в системе, имеющей нагрузку, сосредоточенную в узловой точке $\Delta Q = \Sigma Q_H - \Sigma Q_G$, удобно воспользоваться практическим критерием $\frac{d\Delta Q}{dU} > 0$, тогда задаваясь напряжением на шинах U , можно построить характеристику мощности $\Sigma Q_G = f(U)$, притекающей в узловую точку, и характеристику суммарной мощности нагрузки $\Sigma Q_H = f(U)$.

Разумеется, для схемы, представленной на рис. 12.2, а, также можно применить критерий $\frac{d\Delta Q}{dU} > 0$, рассматривая любую точку схемы как узловую и строя зависимость подходящего к ней потока мощности ΣQ_G и потока мощности, отходящего от нее в нагрузку. Именно построением характеристик $\Delta Q = f(U)$ можно наиболее просто и наглядно выявить факторы, благоприятно или отрицательно влияющие на устойчивость нагрузки.

Влияние регуляторов возбуждения, установленных на генераторах

Представляя группу генераторов станции одним эквивалентным, отражаем эффект регулирования в характеристике

$$\Sigma Q_p = f(U) = \frac{EU}{x_\Sigma} \cos \delta - \frac{U^2}{x_\Sigma}$$

уменьшением x_Σ и ЭДС E .

Эта характеристика при АРВ идет таким образом, что коэффициент запаса устойчивости k_2 оказывается больше, чем коэффициент запаса в нерегулируемой системе:

$$k_2 = \frac{|U_{кр2} - U_0|}{U_0} > k_1 = \frac{|U_{кр1} - U_0|}{U_0},$$

где $U_{кр1}$, $U_{кр2}$ определены согласно характеристикам критического режима.

Влияние включения в нагрузку конденсаторов. Конденсаторы улучшают $\cos \varphi$ и обеспечивают поддержание напряжения при изменении режима, что может резко ухудшать устойчивость. В этом случае в составе мощности нагрузки появляется отрицательная составляющая $\sum \frac{U_G^2}{x_c}$ и суммарная кривая

оказывается пологой. В $\Sigma Q_H = f(U)$, в свою очередь, ЭДС эквивалентного генератора при включении конденсаторов уменьшается, что приводит к деформации характеристики ΣQ_H . В результате запас устойчивости нагрузки при включении конденсаторов уменьшается от значений

$$k_1, \dots, k_3, \text{ где } k_1 = \frac{|U_{\text{кр}1} - U_0|}{U_0} \text{ до } k_4 = \frac{|U_{\text{кр}4} - U_0|}{U_0},$$

или нагрузка становится неустойчивой.

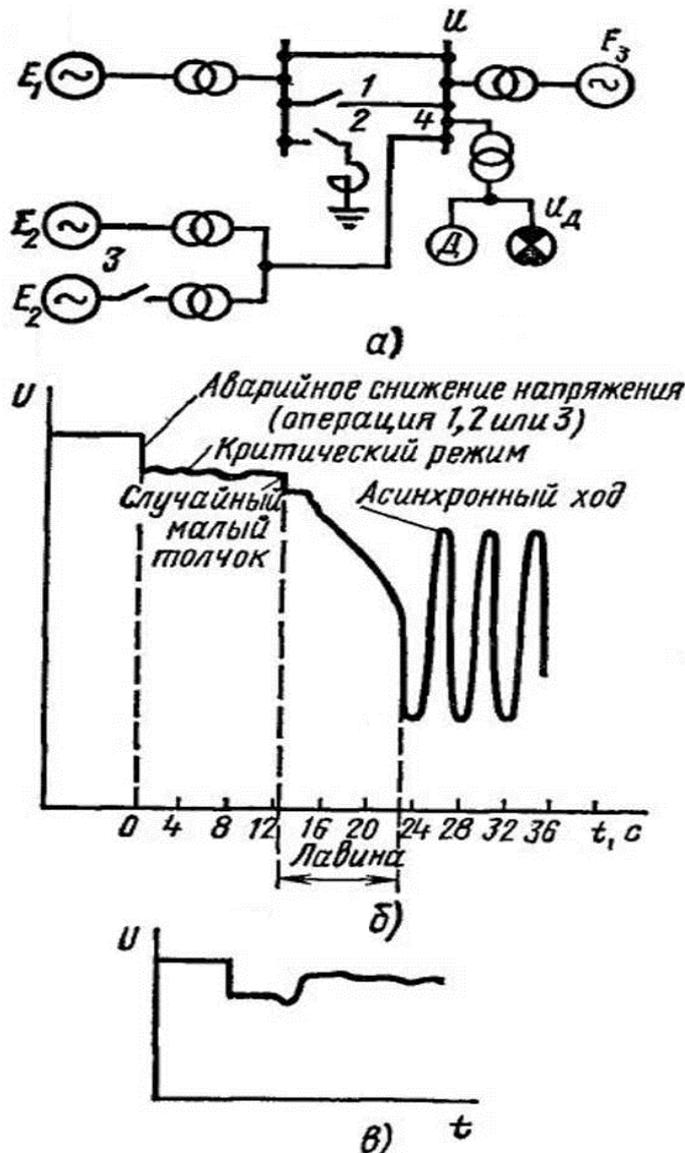


Рис. 12.3. Пример протекания процесса нарушения устойчивости нагрузки, подключенной в точке 4 схемы (лавина напряжения):
 а – схема системы и изменения, вызывающие лавину напряжения; отключение цепи 1, включение значительной реактивной нагрузки 2, отключение части генераторов 3;
 б – возникновение и характер протекания процесса при отсутствии АРВ; в – то же, но при форсировании возбуждения регуляторами

Исправить это положение можно, применяя одновременно с улучшением $\cos \varphi$ регулирование возбуждения на генераторах и увеличивая в составе нагрузки число синхронных двигателей с регулированием возбуждения.

Контрольные вопросы и задания

1. Как называется часть электроэнергетической системы, которая осуществляет непосредственное снабжение потребителей электрической энергией. Какие устройства она содержит?

2. Как называются места подключения отдельных систем электро-снабжения к высоковольтным сетям электрических систем?

3. Какие переходные процессы происходят в системах электро-снабжения при нормальной работе оборудования и при коротком замыкании?

4. На какие основные три вида могут быть разделены переходные процессы?

5. В каком режиме при малых возмущениях возникает необходимость проверки статической устойчивости синхронных двигателей?

6. В каких случаях напряжение зависит от режима работы двигателя?

7. Каким процессам предшествуют режимы при недостаточно высоком возбуждении генераторов или при увеличении реактивных сопротивлений связи?

8. К чему приводит включение конденсаторов в нагрузку?

9. Что подразумевается под возмущениями энергосистемы?

10. Пять однотипных асинхронных двигателей насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением 6 кВ подключены к трансформатору главной понизительной подстанции. Параметры элементов системы электроснабжения:

– двигатель АД: $P_H = 0,8$ МВт, $P_0 = 0,7$ МВт, $\cos \varphi_0 = 0,9$, кратность максимального момента $b_M = 2$;

– линия: $x_0 = 0,38$ Ом/км, $l = 5$ км;

– трансформатор Т: $S_{HT} = 25$ МВА, $U_K = 11$ %;

– напряжение на шинах двигателей: $U = 6$ кВ.

Определите критическое напряжение на шинах питающей системы.

11. Пять однотипных асинхронных двигателей насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением 8 кВ подключены к трансформатору главной понизительной подстанции. Параметры элементов системы электроснабжения:

– двигатель АД: $P_H = 0,6$ МВт, $P_0 = 0,9$ МВт, $\cos \varphi_0 = 0,5$, кратность максимального момента $b_M = 2$;

– линия: $x_0 = 0,58$ Ом/км, $l = 5$ км;

– трансформатор Т: $S_{HT} = 35$ МВА, $U_K = 13$ %;

– напряжение на шинах двигателей: $U = 8$ кВ.

Определите критическое напряжение на шинах питающей системы.

12. Пять однотипных асинхронных двигателей насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением 9 кВ подключены к трансформатору главной понизительной подстанции. Параметры элементов системы электроснабжения:

– двигатель АД: $P_H = 0,4$ МВт, $P_0 = 0,8$ МВт, $\cos \varphi_0 = 0,6$, кратность максимального момента $b_M = 3$;

– линия: $x_0 = 0,58$ Ом/км, $l = 10$ км;

– трансформатор Т: $S_{HT} = 20$ МВА, $U_K = 20$ %;

– напряжение на шинах двигателей: $U = 6$ кВ.

Определите критическое напряжение на шинах питающей системы.

13. Пять однотипных асинхронных двигателей насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением 10 кВ подключены к трансформатору главной понизительной подстанции. Параметры элементов системы электроснабжения:

– двигатель АД: $P_H = 0,75$ МВт, $P_0 = 0,85$ МВт, $\cos \varphi_0 = 0,65$, кратность максимального момента $b_M = 3$;

– линия: $x_0 = 0,48$ Ом/км, $l = 10$ км;

– трансформатор Т: $S_{HT} = 35$ МВА, $U_K = 12$ %;

– напряжение на шинах двигателей: $U = 8$ кВ.

Определите критическое напряжение на шинах питающей системы.

14. Три однотипных асинхронных двигателя насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением 10 кВ подключены к трансформатору главной понизительной подстанции. Параметры элементов системы электроснабжения:

– двигатель АД: $P_H = 0,95$ МВт, $P_0 = 0,9$ МВт, $\cos \varphi_0 = 0,25$, кратность максимального момента $b_M = 4$;

– линия: $x_0 = 0,68$ Ом/км, $l = 10$ км;

– трансформатор Т: $S_{HT} = 40$ МВА, $U_K = 20$ %;

– напряжение на шинах двигателей: $U = 9$ кВ.

Определите критическое напряжение на шинах питающей системы.

13. Мероприятия по повышению устойчивости электроэнергетической системы

Ряд элементов, предназначенных для повышения надежности, увеличения пропускной способности, улучшения условий эксплуатации и работы основных элементов и всей системы в целом, можно назвать дополнительными устройствами. Аналогичное условное деление можно провести и в отношении мероприятий по улучшению устойчивости и качества переходных процессов. Их можно разделить на *основные*, изменяющие параметры основных элементов, и *дополнительные*, заключающиеся в установке дополнительных устройств. В табл. 13.1 приведены основные мероприятия по улучшению устойчивости электроэнергетической системы.

Дополнительные мероприятия и их эффективность должны учитываться при проектировании электропередачи.

Особой группой являются эксплуатационные операции или режимные мероприятия, которыми может быть улучшена устойчивость, повышена надежность работы или сокращено время ненормального режима. Эти операции могут производиться персоналом вручную или автоматически.

Таблица 13.1. – Мероприятия по улучшению устойчивости
электроэнергетической системы

Наименование мероприятий	Улучшает устойчивость			
	Статическая		Динамическая	
Основные мероприятия, изменяющие параметры оборудования	Нормальный режим	Послеаварийный режим	Синхронная	Результирующая
1	2	3	4	5
Генераторы				
Уменьшение реактивных сопротивлений	да	да	да	нет
Увеличение механической постоянной инерции	косвенно	да	да	косвенно
Применение быстродействующей системы управления	да	да	да	да
Применение регуляторов возбуждения сильного действия	да	да	да	да

Продолжение табл. 13.1

1	2	3	4	5
Электропередачи				
Повышение напряжения электропередачи	да	да	да	нет
Расщепление проводов на каждой фазе на несколько параллельно идущих	да	да	да	нет
Применение защиты и выключателей с увеличенной скоростью отключения короткого замыкания	нет	нет	да	да
Дополнительные мероприятия				
Сооружение переключательных пунктов на электропередачах	нет	да	да	косвенно
Заземление нейтралей трансформаторов через активное и реактивное сопротивление	нет	нет	да	да
а) синхронных компенсаторов на промежуточных подстанциях	да	да	да, но значительно меньше, чем статическую.	
б) шунтовых компенсаторных батарей	повышает, но значительно меньше, чем синхронные компенсаторы			
в) управляемых конденсаторов и подмагничиваемых реакторов	да	да	да	да
Автоматическая аварийная разгрузка генераторов	нет	нет	да	да
Автоматическое электрическое торможение	нет	нет	да	да
Мероприятия режимного характера				
Отключение части генераторов в послеаварийном режиме	нет	да	да	да
Трехфазное и пофазное АПВ	нет	да	да	да
Давление системы на несинхронно работающие части и ресинхронизация	нет	да	да	да

1	2	3	4	5
Распределение нагрузки между станциями с учетом требований улучшения устойчивости и качества переходных процессов	частично влияет на все виды			
Автоматическое отключение части потребителей, автоматическая разгрузка при снижении частоты и напряжения	нет	да	да	нет
Выбор схемы электрической системы с учетом требований улучшения устойчивости и качества переходных процессов	частично влияет на все виды			

При рассмотрении описанных ниже мероприятий не следует упускать то обстоятельство, что их влияние на режимы системы в целом и ее отдельные переходные процессы в ряде случаев может быть противоречивым. При выборе улучшающих мероприятий весьма ярко проявляется то несомненное, но часто упускаемое из вида, обстоятельство, что инженер не должен и не может ориентироваться на готовые формулы и универсальные решения, что здесь совершенно необходим творческий подход к анализу, одновременное рассмотрение комплекса явлений и обязательна технико-экономическая оценка.

Улучшение характеристик основных элементов электрических систем

Реактивное сопротивление генераторов. Этот параметр является важным фактором, влияющим на устойчивость систем и пропускную способность электропередачи.

При отсутствии автоматического регулирования возбуждения или при применении регулирования с зоной нечувствительности на статическую устойчивость влияет синхронное сопротивление X_d , на динамическую – переходное сопротивление X_d' и постоянная инерции T_J .

На рис. 13.1 приведены характеристики изменения передаваемой мощности. Влияние времени отключения короткого замыкания и переходного сопротивления на предельную передаваемую мощность показано на рис. 13.2.

Протекание процессов ресинхронизации и самосинхронизации, а также условия работы в асинхронном режиме определяются наличием и конструкцией демпферных обмоток и эквивалентных им цепей, которые находят отражение в параметрах X_d'' , X_q'' .

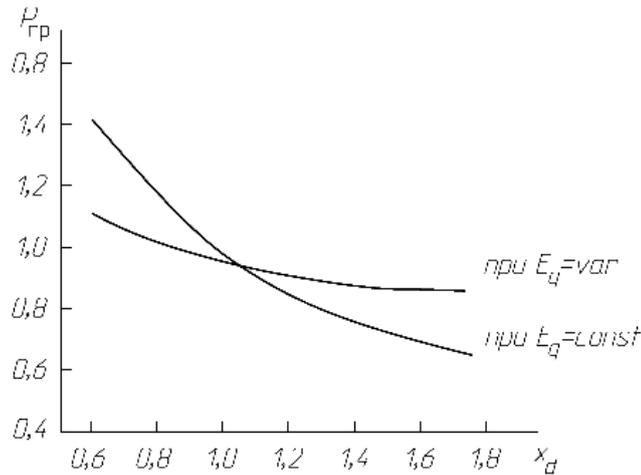


Рис. 13.1. Характер изменения передаваемой мощности

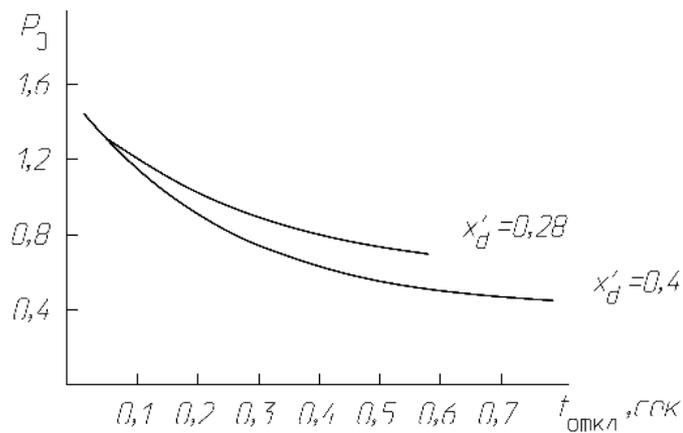


Рис. 13.2. Влияние на предельную передаваемую мощность времени отключения короткого замыкания и переходного сопротивления

Рассматривая влияние изменения параметров на статическую и динамическую устойчивости электропередачи, необходимо различать два случая: 1) генераторы без регулирования возбуждения или с обычным регулированием; 2) генераторы с сильным регулированием. В последнем случае эффективность улучшения параметров значительно снижается.

В случае работы нерегулируемых генераторов (наличие автоматического регулирования возбуждения) на длинную линию оказывает влияние уменьшение сопротивления на статическую устойчивость электропередачи, что очевидно из простейшего соотношения:

$$P_{\text{пр}} = \frac{E_q U}{x_d + x_c} = \frac{E_q U}{x_d \left(1 + \frac{x_c}{x_d}\right)},$$

где X_c – сопротивление системы; $P_{\text{пр}}$ – предельно передаваемая мощность, характер изменения которой определяется при преобразовании X_d .

В случае применения регуляторов возбуждения пропорционального типа, поддерживающих постоянство ЭДС $E_q = E'$, зависимость $P_{\text{пр}} = f(X_d)$

$$P_{\text{пр}} = \frac{E_q U}{x_d \left(1 + \frac{x_c}{x_d}\right)}.$$

Влияние изменения сопротивления X_d на динамическую устойчивость электропередачи сводится к повышению амплитуды динамической характеристики. Эффект уменьшения реактивности генератора очень сильно зависит от скорости отключения короткого замыкания: чем медленнее оно отключается, тем больший эффект дает уменьшение реактивностей генератора. Весьма сильно сказываются на характере переходных процессов параметры систем возбуждения: потолочное напряжение и постоянная времени T_e .

Весьма существенно понижение постоянной времени возбудителя, т.е. переход с $T_e = 0,5$ к $T_e = 0,1$ при времени отключения короткого замыкания около 0,1 с позволяет увеличить передаваемую мощность примерно на 10 %.

Повышение предельно передаваемой по условиям динамической устойчивости мощности с ростом потолка возбуждения тем заметнее, чем меньше постоянная времени обмотки возбуждения возбудителя. Для более эффективного улучшения динамической устойчивости система регулирования должна обеспечивать высокую скорость подъема возбуждения.

Высокий потолок и большая скорость подъема напряжения необходимы для обеспечения динамической устойчивости; при этом для улучшения устойчивости в первом цикле колебаний не имеет существенного значения наличие зоны нечувствительности.

Для улучшения статической устойчивости и обеспечения работы при углах $> 90^\circ$ необходимы отсутствие зоны нечувствительности и непрерывное действие регулятора возбуждения.

Для обеспечения устойчивой работы до предела по линии необходимо осуществить регулирование не только по отклонению регулируемой величины, но и по ее производным; первой, второй, а иногда и третьей.

Для лучшего успокоения возникающих больших колебаний необходимо иметь возможность не только форсировать возбуждение, но и достаточно быстро уменьшать его. Для облегчения процесса ресинхронизации важно, чтобы в системе возбуждения при появлении асинхронного хода уменьшался (снимался) ток возбуждения, т.е. происходило гашение поля. При подходе скорости к синхронной система возбуждения, напротив, должна обеспечивать включение тока возбуждения и его быстрый подъем, стимулирующий переход в синхронный режим.

Составляя единое целое с генератором, система возбуждения должна удовлетворять всем требованиям, вытекающим из упомянутых выше трех режимов.

Постоянная инерция. Влияние постоянной инерции на динамическую устойчивость необходимо рассмотреть с точки зрения воздействия на время отключения при заданном угле и на запас динамической устойчивости.

Синхронные компенсаторы. Параметры синхронных компенсаторов, устанавливаемых в конце дальней электропередачи у потребителя, не оказывают особо существенного влияния на устойчивость системы. Желательно, чтобы реактивность этих синхронных компенсаторов была как можно меньшей для того, чтобы более высоким был их регулирующий эффект.

Вопрос о создании специальных компенсаторов с улучшенными параметрами в основном касается только синхронных устройств компенсации, устанавливаемых на промежуточных подстанциях.

Трансформаторы. Параметры, характеризующие трансформаторы (реактивные сопротивления, намагничивающий ток, активное сопротивление и т.д.) с точки зрения переходных электромеханических процессов и предельно передаваемой мощности, не являются существенными.

Выключатели. Быстрое отключение коротких замыканий на линиях высокого напряжения имеет первоочередное, решающее значение для улучшения динамической устойчивости. Уменьшение времени отключения короткого замыкания является благоприятным и с точки зрения локализации аварии, снижения тех опасных явлений, которые могут вызвать токи короткого замыкания с их тепловыми и механическими эффектами.

Линии электропередачи

Влияние напряжения электропередачи. Напряжение электропередачи существенным образом оказывает воздействие на ее пропускную способность, в значительной мере определяя возможности передачи.

Выявим влияние напряжения линии электропередачи на ее предельную мощность, считая, что в состав электропередачи включены генераторы, представленные реактивным сопротивлением $x_{\Gamma} = x_d$ или $x_{\Gamma} = x_a$, трансформаторы и линия.

Выразим реактивные сопротивления генераторов, трансформаторов и линии в относительных единицах:

$$x_{\Gamma} = \frac{x_{\Gamma\%}}{100} \frac{U_{\Gamma\text{НОМ}}^2 S_{\delta}}{S_{\Gamma\text{НОМ}} U_{\delta}^2 \left(\frac{1}{K_{\Gamma}}\right)^2},$$

$$x_{\Gamma} = \frac{e_{\text{к}\%}}{100} \frac{U_{\Gamma\text{НОМ}}^2 S_{\delta}}{S_{\Gamma\text{НОМ}} U_{\delta}^2},$$

$$x_{\text{Л}} = x_{\text{Л}} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2}.$$

Примем для упрощения, что базисное напряжение U_{δ} равно номинальному напряжению линии $U_{\text{ЛНОМ}}$. Допустим, что трансформаторы работают со средними равными коэффициентами трансформации. Тогда записанные выше выражения упрощаются

$$x_{\Gamma} = \frac{x_{\Gamma\%}}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma\text{НОМ}}},$$

$$x_{\Gamma} = \frac{e_{\text{к}\%}}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma\text{НОМ}}},$$

$$x_{\text{Л}} = x_{\text{Л}} \frac{S_{\delta}}{U_{\text{ЛНОМ}}^2}.$$

Выражение для предела мощности можно записать следующим образом:

$$P_{\text{пр}} = \frac{E_q U}{(x_d^* + x_{\text{T1}} + x_{\text{T2}}) + x_{\text{Л}} \frac{S_{\delta}}{U_{\text{ЛНОМ}}^2}} = \frac{E_q U}{a + \frac{b}{U_{\text{ЛНОМ}}^2}},$$

где $a = x_d^* + x_{\text{T1}}^* + x_{\text{T2}}^*$; $b = x_{\text{Л}} S_{\delta}$.

Рассмотрим, как изменяется зависимость $P_{\text{пр}}$ при изменении U от 0 до ∞ :

при $U_{\text{л. ном}} \rightarrow 0$ $P_{\text{пр}} \rightarrow 0$

при $U_{\text{л. ном}} \rightarrow \infty$ $P_{\text{пр}} \rightarrow \frac{E_q U}{a}$.

Характеристика $P_{\text{пр}}=f(U_{\text{л. ном}})$ при конечных значениях $U_{\text{л. ном}}$ лежит в области, ограниченной этими предельными значениями, и имеет вид (рис. 13.3).

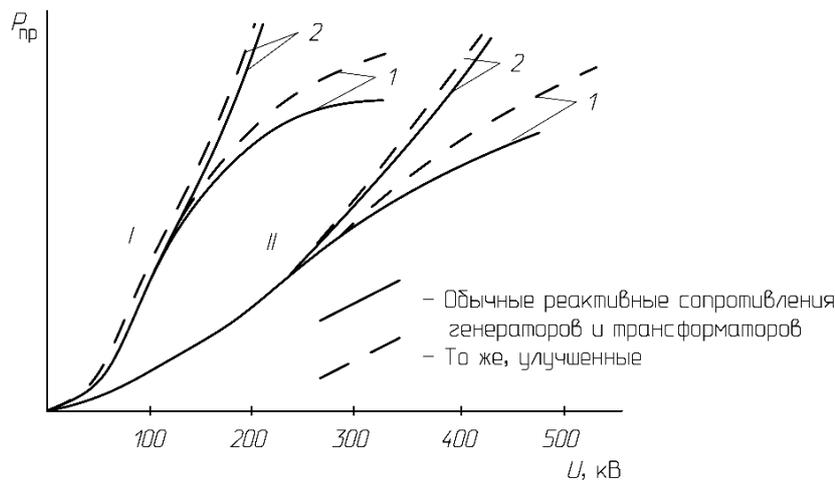


Рис. 13.3. Влияние уменьшения величины номинального напряжения электропередачи при обычных параметрах генераторов и трансформаторов:
I – длина линии 300–400 км, II – длина линии 600–800 км

Улучшение параметров генераторов и трансформаторов и особенно сильное регулирование возбуждения, позволяющее поддерживать напряжение на выводах генераторов или в начале линии неизменным, несколько меняет полученные зависимости, увеличивая эффективность повышения напряжения.

Конструктивные изменения линии электропередачи, снижающие реактивное сопротивление. В настоящее время принят только один путь такого уменьшения – применение расщепленных проводов.

Уменьшение индуктивного сопротивления линии путем расщепления особенно эффективно при дальних электропередачах, где даже при применении весьма высоких напряжений пропускная способность электропередачи была бы недостаточной. Такие линии в настоящее время осуществлены.

Переключательные пункты на линиях электропередачи. Статическая устойчивость послеаварийного режима, равно как и динамическая, существенным образом зависит от выполнения электропередачи (ее схемы) и, в частности, от количества переключательных пунктов на ней.

Последовательная (продольная) компенсация реактивного сопротивления линий электропередачи. Значительное уменьшение реактивного сопротивления электропередачи можно получить, включая последовательно в линию статические конденсаторы.

В простейшем случае, без учета потерь и распределительных параметров линии передачи, имеем эффективность компенсации

$$x_{\text{э}} = x_0 l - x_{\text{с}}$$

или

$$\frac{x_{\text{э}}}{x_0 l} = 1 - \frac{x_{\text{с}}}{x_0 l} = 1 - k_{\text{эк}},$$

где

$$k_{\text{эк}} = 1 - \frac{x_{\text{с}}}{x_0 l}.$$

При учете распределенности параметров линии эффективность компенсации зависит от расположения компенсирующих устройств вдоль нее и от величины включенных в линию реакторов, осуществляющих параллельную компенсацию.

Промежуточные синхронные компенсаторы, устанавливаемые на подстанциях, должны обеспечивать поддержание напряжения на линии при изменениях режима электропередачи и тем самым повышать ее устойчивость. Промежуточные синхронные компенсаторы могут быть особенно эффективны при установке на них автоматических регуляторов возбуждения без зоны нечувствительности. В этом отношении продольная компенсация имеет определенные преимущества перед обычными синхронными компенсаторами, даже снабженными регуляторами возбуждения сильного действия, поскольку ее эффективность проявляется мгновенно, влияя на повышение как статической, так и динамической устойчивости.

Дополнительные устройства для улучшения устойчивости

Сопротивление, заземляющее нейтраль трансформатора, как средство улучшения устойчивости. Если нейтраль трансформаторов заземлить через небольшое сопротивление, не повышающее заметно напряжения на нейтрали, то условия работы изоляции не изменяются, а устойчивость систем при несимметричных коротких замыканиях улучшается.

Увеличение сопротивления аварийного шунта, вводимого в комплексную схему, приводит к уменьшению сброса мощности во время короткого замыкания и улучшению динамической устойчивости.

Следует иметь в виду, что при замыканиях в конце линии потери мощности в заземляющем сопротивлении накладываются на местные генераторные станции приемной системы, что при небольшой постоянной инерции этих станций может привести иногда не к улучшению, а к ухудшению устойчивости системы в целом.

Заземление нейтрали через активные сопротивления приводит к повышению устойчивости и при двухфазных замыканиях на землю, хотя и значительно меньшему, чем при однофазных. Оптимальная величина активных сопротивлений в случае двухфазных замыканий на землю значительно выше, чем при однофазных. Заземление нейтралей всех трансформаторов через реактивные сопротивления, как правило, менее эффективно, чем заземление через активные сопротивления.

Установка для электрического торможения генераторов во время аварии. Для повышения устойчивости при симметричных КЗ наиболее эффективно включение активных сопротивлений параллельно генераторам или трансформаторам передающей станции. В этом случае действие нагрузочного сопротивления продолжается и после отключения короткого замыкания, а в ряде случаев может только начинаться после отключения короткого замыкания.

Специальные устройства регулирования турбин. Небаланс мощности ΔP может быть скомпенсирован уменьшением мощности первичного двигателя.

Несмотря на трудности воздействия на первичный двигатель, уже созданы экспериментальные устройства, позволяющие осуществить надлежащее воздействие и привести мощность первичного двигателя в соответствие с изменяющейся электрической мощностью.

Мероприятия режимного характера

Влияние схемы системы. При оценке схемы системы часто оперируют понятием «жесткости» схемы как одним из важнейших ее свойств. Жесткость в какой-либо узловой точке характеризуется изменением нагрузки, при которой смена значения и фазы напряжения будет происходить на некоторую определенную величину, принимаемую за единицу.

Жесткость зависит от относительных сопротивлений, связывающих узловые точки системы. Жесткая схема имеет преимущества с точки зрения улучшения статической устойчивости и облегчения работы системы в послеаварийном режиме.

К недостаткам жесткой схемы относится увеличение тока короткого замыкания, в связи с чем мощность системы может стать больше разрывной мощности выключателей, что недопустимо.

Электрические системы, в которых мощность короткого замыкания начинает превышать разрывную мощность выключателей, приходится секционировать или применять выключатели с большей отключающей способностью.

Таким образом, выбор исходного режима работы системы и схемы ее соединений может существенно влиять на устойчивость.

Схемы работы электрических систем. Схема соединений электрических систем и их отдельных элементов заметно влияет на переходные процессы и устойчивость систем.

Схемы дальних электропередач. Эти схемы оказывают сильное воздействие на характер переходных процессов и устойчивость. Их можно разделить на два вида:

- транзитные мощные электропередачи, передающие электрическую энергию от какой-либо удаленной станции к потребляющей системе;
- межсистемные связи, в которых потоки мощности могут идти как в одном, так и другом направлении, а значения их намного меньше мощности объединяемых систем.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены основные и дополнительные части элементов электрической системы?
2. Перечислите основные мероприятия, изменяющие параметры оборудования.
3. Назовите мероприятия по улучшению устойчивости и качества переходных процессов.
4. Перечислите дополнительные мероприятия, изменяющие параметры оборудования.
5. Запишите формулу соотношения влияния уменьшения сопротивления на статическую устойчивость электропередачи в случае работы нерегулируемых генераторов на длинную линию.
6. Что необходимо для облегчения процесса ресинхронизации электрической системы?
7. Что применяют для полного использования синхронных компенсаторов при работе с отстающим током (при поглощении реактивной мощности)?
8. В каком случае промежуточные синхронные компенсаторы могут быть особенно эффективны?
9. Какие существуют мероприятия режимного характера?
10. Назовите дополнительные устройства для улучшения устойчивости.

Библиографический список

1. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) / В.А. Веников. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
2. Правила устройства электроустановок. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2009.
3. Веников, В.А. Электрические системы. Математические задачи энергетики / В.А. Веников, Э.Н. Зуев, И.В. Литкеис и др.; под ред. В.А. Веникова. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1981. – 288 с.
4. Бермант, А.Ф. Краткий курс математического анализа / А.Ф. Бермант, И.Г. Арамович. 7-е изд., стер. – М.: Наука, 1971. – 736 с.
5. Иванов, В.А. Математические основы теории автоматического регулирования / В.А. Иванов, В.С. Медведев, Б.К. Чемоданов и др.; под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Высшая школа, 1971. – 808 с.
6. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1978. – 536 с.
7. Жданов, И.С. Вопросы устойчивости электрических систем / И.С. Жданов. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
8. Гуревич, Ю.Е. Расчёты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, А.А. Окин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
9. Портной, М.Г. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости / М.Г. Портной. – М.: Энергия, 1978. – 352 с.
10. Калентионок, Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем: учеб. пособие / Е.В. Калентионок. – Мн.: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
11. Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах / Ю.А. Куликов. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 283 с.

Содержание

Введение	3
1. Общие сведения об электромеханических переходных процессах в электроэнергетических системах и причинах, их порождающих	5
2. Автономная электроэнергетическая система. Простейшая модель автономной электроэнергетической системы	10
3. Простейшая модель объединенной электроэнергетической системы	18
4. Расчет параметров режима электроэнергетической системы, содержащей любое число линейных элементов	21
5. Статическая устойчивость электрических систем	26
6. Динамическая устойчивость электрической системы	33
7. Энергетические соотношения, характеризующие движения ротора генератора. Способ площадей и критерий устойчивости	38
8. Предельный угол отключения короткого замыкания	41
9. Численное решение уравнения относительного движения (с учетом реакции якоря). Метод последовательных интервалов. Общее положение метода	49
10. Задача регулирования возбуждения	55
11. Метод малых колебаний	62
12. Переходные процессы в узлах нагрузки. Устойчивость асинхронного двигателя	67
13. Мероприятия по повышению устойчивости электроэнергетической системы	77
Библиографический список	88

Учебное издание

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Учебное пособие

**Хузяшев Рустэм Газизович,
Наумов Олег Витальевич**

Кафедра электроэнергетических систем и сетей КГЭУ

Редактор *М.С. Беркутова*
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Подписано в печать 08.11.2018.
Формат 60×84/16. Бумага ВХИ. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 500 экз. Заказ № 217/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, Казань, Красносельская, 51