

ИННОВАЦИОННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА



Проект 1: инновационная среда университета в регионе и эффективное управление

Цель: развитие инноваций и инновационных образовательных программ на основе интеграции образования, науки и бизнеса для организации подготовки и переподготовки кадров по широкому спектру специальностей и направлений.

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет

Г.П. КОЛЕСНИК

ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Учебное пособие

Владимир 2008

УДК 621.311.1

ББК 31.27

К60

Рецензенты:

Кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой
информатики и информационных технологий
Владимирского государственного педагогического университета
Ю. А. Медведев

Кандидат технических наук, доцент кафедры
приборостроения и информационно-измерительных технологий
Владимирского государственного университета
В. С. Грибакин

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Колесник, Г. П.

К60 Переходные электромеханические процессы в электроэнергетических системах : учеб. пособие / Г. П. Колесник ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 116 с.
ISBN 978-5-89368-849-8

Рассмотрены переходные режимы электроэнергетических систем, имеющих автоматическое регулирование. Изложены методы расчета статической и динамической устойчивости узлов нагрузки и системы в целом.

Предназначено для студентов 3 – 4 курсов специальности 140211 – электроснабжение всех форм обучения. Материал пособия может быть использован инженерами-электриками, занимающимися эксплуатацией электрических систем, при проверочных расчетах токов короткого замыкания и выборе коммутирующих устройств.

Табл.5. Ил. 42. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.311.1

ББК 31.27

ISBN 978-5-89368-849-8

© Владимирский государственный
университет, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	6
2. ТРЕБОВАНИЯ К УСТАНОВИВШИМСЯ И ПЕРЕХОДНЫМ РЕЖИМАМ: ОСУЩЕСТВИМОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ И НАДЁЖНОСТЬ....	10
2.1. Практические критерии устойчивости.....	15
2.2. Качество переходного процесса (запасы устойчивости режимов электроэнергетической системы).....	19
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	26
3.1. Дифференциальное уравнение электрической системы и его порядок.....	27
3.2. Упрощение уравнений.....	28
4. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ.....	29
5. ОСНОВНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	36
6. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СМ.....	40
7. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ....	45
7.1. Векторная диаграмма синхронной машины.....	45
7.2. Векторные диаграммы и соотношения между параметрами в простейшей электрической системе.....	46
7.3. Характеристики режима простейшей системы при синхронной скорости вращения генератора.....	53
7.4. Характеристики режима простейшей системы при несинхронной скорости вращения генератора.....	56
8. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	62
8.1. Характеристики сложной линейной системы при одинаковой скорости всех машин ($\omega = \omega_0$).....	62
8.2. Характеристики сложной линейной системы при неодинаковой скорости машины ($\omega \neq \omega_0$).....	64
8.3. Статические характеристики нелинейной системы.....	66
8.4. Максимальные и предельные нагрузки.....	68

9. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ВИДЫ ЕЁ НАРУШЕНИЯ.....	71
9.1 Упрощенный анализ статической устойчивости нерегулируемой системы.....	71
9.2. Анализ статической устойчивости нерегулируемой системы с учетом переходных электромагнитных процессов и асинхронной мощности.....	75
9.3. Статическая устойчивость простейшей системы при АРВ пропорционального типа.....	80
9.4. Статическая устойчивость простейшей системы при сильном регулировании возбуждения.....	85
10. ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ.....	89
10.1. Характеристики элементов нагрузки.....	90
10.2. Статические и динамические характеристики осветительной нагрузки.....	91
10.3. Характеристики асинхронной нагрузки.....	92
10.4. Статические характеристики АД.....	93
10.5. Изменение активной и реактивной мощностей асинхронной машины от изменения частоты системы при неизменном напряжении.....	96
10.6. Характеристики синхронной нагрузки.....	99
10.7. Статические характеристики комплексной нагрузки узлов нагрузки электрических систем.....	100
11. УСТОЙЧИВОСТЬ НОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ.....	104
11.1. Проверка устойчивости простейшей и сложной систем при произвольном числе станций, работающих на общую нагрузку упрощенными методами.....	107
11.2. Изменение частоты и мощности в электроэнергетической системе.....	109
12. ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ БОЛЬШИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ.....	110
Заключение.....	115
Библиографический список.....	116

ВВЕДЕНИЕ

Работа электрической системы характеризуется значениями мощностей, вырабатываемых её генераторами и передаваемых потребителям. Количественный показатель работы электрической системы – это вырабатываемая мощность, но со стороны потребителя качество вырабатываемой энергии характеризуется значением напряжения и частотой.

Работа системы характеризуется также значениями напряжений в узловых точках сети и значениями токов, протекающих по её элементам. Состояние системы, определяемое указанными величинами, называется *режимом электрической системы*.

Различают следующие виды режимов:

– нормальный установившийся, применительно к которому проектируется электрическая система и определяются технико-экономические характеристики;

– послеаварийный установившийся режим – после аварийного отключения какого-либо элемента (ряда элементов) системы;

– переходный режим, во время которого система переходит от одного состояния к другому.

Изменяющиеся показатели работы системы при изменении её режима (значения мощности, напряжений, токов, частоты) называют параметрами режима электрической системы. Параметрами системы называют показатели, характеризующие свойства элементов системы (сопротивления, проводимости, коэффициенты трансформации).

Переходные режимы разделяют на **нормальные** (эксплуатационные) и **аварийные**. Нормальные переходные процессы имеют место при нормаль-

ной эксплуатации в результате действия регулирующих устройств и текущих изменений нагрузки системы (включение и отключение трансформаторов, отдельных линий электропередачи, изменение схемы коммутации системы, отключение и включение отдельных генераторов и нагрузок или изменения их мощности и т. д.). При этом отклонения параметров режима от их установленных значений невелики и систему можно условно считать линейной. Малые возмущения параметров происходят непрерывно и отклонения параметров режима происходят около некоторого равновесного устойчивого состояния. Малые возмущения в системе не должны служить причиной её неустойчивости, поэтому система должна быть устойчивой в малом (обладать **статической устойчивостью**). Под статической устойчивостью понимают способность системы самостоятельно восстанавливать исходный режим при малом его нарушении.

Аварийные переходные процессы возникают вследствие каких-либо резких аварийных изменений режима системы (изменение схемы соединения системы, отключение агрегатов и линий электропередачи, несущих значительные нагрузки, при коротких замыканиях в элементах системы и последующим их отключении).

Большие возмущающие воздействия на систему, появляющиеся при аварийных переходных процессах, приводят к значительным изменениям параметров режима – большим возмущениям. Способность системы восстанавливать после больших возмущений исходное состояние или состояние, практически близкое к исходному, называют **динамической устойчивостью**.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Процесс изменения режима системы и связанное с этим изменение количества энергии можно рассматривать как ряд процессов, каждый из которых отражает изменение определённой группы параметров режима одновременно во времени и пространстве (распространение волн напряжения вдоль длинных линий, кабелей или обмоток машин и трансформаторов).

Переходные процессы при исследовании разделяются по причинам возникновения, по частотам колебаний (от 10^{-1} до 10^8 Гц) и по другим признакам, приведённым в табл. 1. Электрические системы при электромеханиче-

ских переходных процессах нелинейные, так как все параметры системы зависят от параметров режима и от характера соотношений между параметрами режима (например, мощность связана квадратичной зависимостью с напряжением, синусоидальной с углом расхождения векторов напряжений по концам передачи). От нелинейности в ряде случаев избавляются линеаризацией. Таким образом, возможны две различные постановки задачи:

- а) исследование переходных процессов в линеаризованных системах;
- б) исследование переходных процессов с учётом нелинейности.

Электромеханические переходные процессы протекают настолько медленно (по сравнению с частотой 50 Гц), что вместо мгновенных значений параметров режима можно рассматривать изменение их огибающих. Более детально аварийные и нормальные переходные процессы можно классифицировать исходя из изменений основных параметров режима – изменений мощности и скорости. По этим признакам процессы могут быть разделены на четыре большие группы (табл. 2).

Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая система и из каких элементов она состоит?
2. Режимы и процессы. Различные виды режимов и процессов в электрических системах.
3. Что понимается под статической и динамической устойчивостью системы?
4. Нелинейность элементов в электрической системе.
5. Параметры режима и параметры системы.
6. Характерные стадии переходных режимов и их влияние на оборудование электрической системы.
7. Возмущение режима и возмущающее воздействие.
8. Основные допущения при анализе режимов электрических систем (линеаризация, учет изменения мгновенных значений, учет огибающих).
9. По каким признакам разделяются системы на простые и сложные?

Таблица 1

Основные характеристики	Вид процесса				
	Волновой (I)		Электромагнитный (II)		Электромеханический (III)
1	2		3		4
Наиболее характерные признаки и допущения	Происходит распространение волн тока и напряжения при постоянном положении роторов всех машин системы относительно друг друга		Скорость вращения роторов всех машин постоянна, положение может изменяться		Изменяются взаимные положения роторов генераторов и их скорость вращения
Примерные частоты (Гц) изменения характерных параметров режима	От 50 до 10000	$10^5 \div 10^8$	50÷150	300÷600	$10^{-1} \div 50$
Величины токов в долях номинального	До 500		1÷6		1÷2
Величины напряжений в долях номинального	5÷6		0,05÷2		До 2
Возможные последствия аварии	Работа грозозащиты	Работа разрядников. Коронирование проводов. Радиопомехи. Влияние на связь.	Отключение выключателями элементов сети под действием релейной защиты		Нарушение устойчивости и выпадения из синхронизма
	Механические повреждения элементов систем	Электрический пробой изоляции. Повреждение установок связи	Разрушение (механическое) шин, трансформаторов, машин. Перегрев – повреждение изоляции. Тепловой пробой изоляции		Разрушение (повреждение) вращающихся машин

Режимы и аварийные явления, при которых данные процессы возникают	Коммутационные операции и атмосферные явления, вызывающие перенапряжения. Явления, связанные с динамическими перенапряжениями	Синхронизация, самосинхронизация. Асинхронный ход, качания, перегрузки, нарушения устойчивости, самораскачивание, самовозбуждение. Короткие замыкания	
Работающая аппаратура	Разрядники. Грозозащита	Устройство форсировки возбуждения, регуляторы возбуждения. Автоматы гашения поля	Регуляторы возбуждения, регуляторы скорости, регуляторы частоты, устройства разгрузки, торможения и т. д.

Таблица 2

Группы	Виды изучаемых переходных процессов	Характер возмущения и изменения параметров режима в начале процесса	
		Скорости	Мощности
I	Нарушения устойчивости аperiodического типа (сползание), самораскачивание, самовозбуждение	Малые	Малые
II	Изменение частоты в системе. Устойчивое изменение. Неустойчивость частоты	Малые	Средние
III	Нарушение устойчивости типа динамических при коротком замыкании (КЗ). Качания, изменения скорости при толчках, сбросах, набросах нагрузки при автоматическом повторном включении (АПВ) с проверкой синхронизма	Малые	Большие
IV	Пуск двигателей, самозапуск, асинхронный ход, ресинхронизация, самосинхронизация, несинхронные АПВ	Большие	Большие

2. ТРЕБОВАНИЯ К УСТАНОВИВШИМСЯ И ПЕРЕХОДНЫМ РЕЖИМАМ: ОСУЩЕСТВИМОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ И НАДЁЖНОСТЬ

Переходные режимы электрических систем, содержащие электромеханические процессы, должны заканчиваться некоторым установившимся режимом, характер которого можно заранее предсказать. В нормальном рабочем режиме системы должны быть обеспечены:

- *качество* – снабжение потребителей энергией с нормативными показателями по ГОСТ- 13109-97;

- *надёжность* – снабжение потребителей энергией с устойчивым сохранением режима в соответствии с нормативной категорией;

- *экономичность* – надёжное снабжение потребителей электроэнергией удовлетворительного качества при возможно меньших затратах средств на ее производство и передачу.

При этом желательно убедиться в возможности существования режима при заданных его параметрах. Если такой режим принципиально осуществим, то будет ли он устойчивым и надёжным при длительной эксплуатации с нормальными переходными процессами? Ответ на этот вопрос можно получить, рассматривая условия существования режима (осуществимость), его устойчивость и надёжность.

Осуществимость, или условия существования, установившегося режима связаны с балансом мощности в электрической системе. Активная и реактивная мощности, вырабатываемые генераторами системы P_G и Q_G , должны быть равны соответственно суммарной мощности, поглощаемой в нагрузках P_H и Q_H и рассеиваемой во всех элементах системы ΔP и ΔQ :

$$P_G = P_H + \Delta P = P; \quad Q_G = Q_H + \Delta Q = Q; \quad S_G = \sqrt{P_G^2 + Q_G^2}. \quad (1)$$

Выражение для полной мощности S_G свидетельствует о взаимосвязи активной и реактивной мощностей, поэтому их нельзя рассматривать в отрыве друг от друга. Однако практически установлено, что изменение активной мощности, вырабатываемой генераторами, главным образом влияет на изменение частоты в системе, а изменение реактивной мощности, выдаваемой устройствами, влияет главным образом на изменение напряжения в системе. Приведенные выше утверждения хорошо иллюстрируются примером трёхцепной линии электропередачи (рис. 1), связанной с шинами станции неиз-

менного по значению напряжения при синхронной частоте. При отключении сначала одной цепи линии электропередачи, а затем двух сопротивление между точками приложения неизменных по величине ЭДС E и напряжения U выросло соответственно в m и n раз:

$$\frac{X_{\Gamma} + 2X_{\Gamma} + 2/3X}{X_{\Gamma} + 2X_{\Gamma} + 1/3X} = m; \quad \frac{X_{\Gamma} + 2X_{\Gamma} + X}{X_{\Gamma} + 2X_{\Gamma} + 1/3X} = n. \quad (2)$$

Соответственно угловая характеристика активной мощности генератора без автоматического регулирования возбуждения, определяемая выражением $P = P_{m2} \sin \delta$, стала иметь в m и n раз меньший максимум (рис. 2).

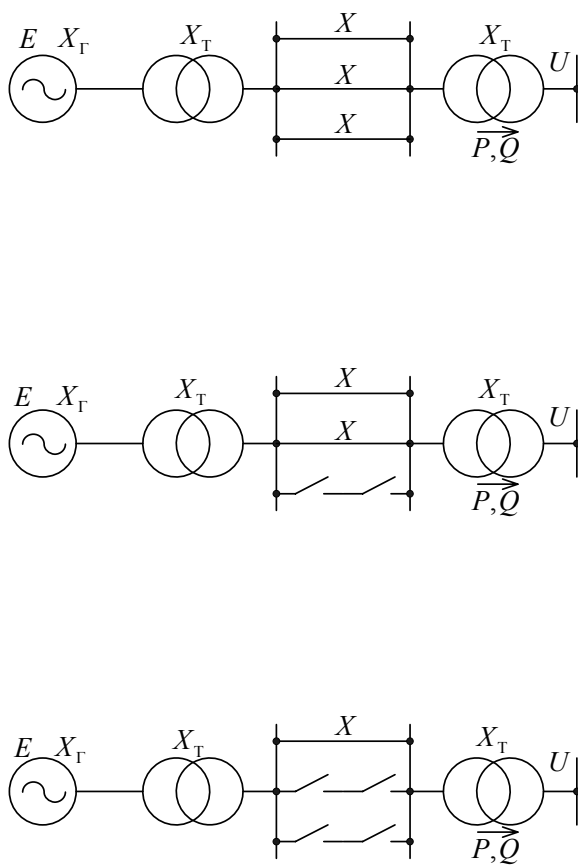


Рис. 1. Трехцепная линия электропередачи: *a* – исходная схема; *b* – отключение одной линии; *в* – отключение двух линий

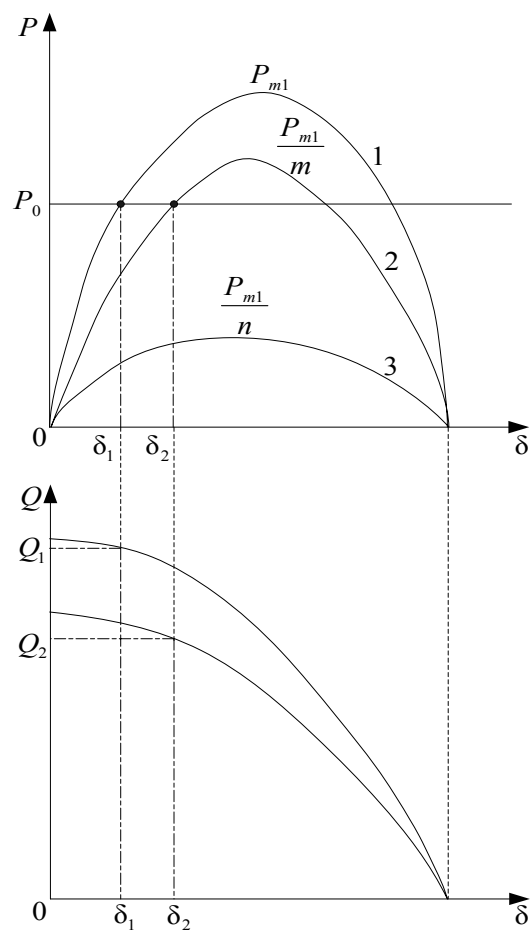


Рис. 2. Угловые характеристики мощности синхронного генератора при различных реактивностях линии: *a* – активной; *b* – реактивной

При активной постоянной мощности $P = P_0$ угол между векторами \dot{E} и \dot{U} увеличится от значения δ_1 до δ_2 . Новое значение реактивной мощности Q_2 при угле δ_2 отличается от значения Q_1 при угле δ_1 . После изменения параметров системы (изменение сопротивления в m или в n раз) режим осуществим, если имеется возможность свободного изменения реактивной мощности. Предполагается, что при отключении двух цепей электропередачи максимум угловой характеристики мощности генератора будет ниже линии $P = P_0$, не пересекаясь с ней. Вследствие этого режим при m (отключение одной цепи линии) осуществим, а при n (отключение двух линий) невозможен.

Необходимость баланса активной и реактивной мощности предполагает, что в установившемся режиме представленные графически зависимости $P_\Gamma = \varphi_1(\Pi)$ и $P = \varphi_2(\Pi)$, где Π – некоторый параметр режима, всегда имеют общую точку, пересекаясь между собой или хотя бы касаясь друг друга при $\Pi = \Pi_1$. При этом зависимости $Q_\Gamma = \psi_1(\Pi)$ и $Q = \psi_2(\Pi)$ также имеют общую точку при том же значении $\Pi = \Pi_1$.

Устойчивость установившихся режимов (статическая устойчивость) определяется *энергетикой переходного режима*. Баланс активной и реактивной мощностей генерации соответствующим мощностям нагрузки нарушается в переходных процессах. В уравнении баланса мощности появляются ещё два слагаемых, отражающие свободные изменения энергии:

$$P = P_H + \Delta P + \frac{d(\Delta W_{\text{эл.м}})}{dt} + \frac{d(\Delta W_{\text{мех}})}{dt}, \quad (3)$$

где $\Delta W_{\text{эл.м}} = W_{(\text{эл.м})\text{н}} - W_{(\text{эл.м})\Gamma} + \Delta W_{\text{эл.м.потерь}}$ – изменения электромагнитной энергии во всех элементах системы; $\Delta W_{\text{мех.}}$ – изменения механической энергии, запасённой во вращающихся массах машин системы.

С учётом изложенного выше баланс энергии в электрической системе можно записать в виде

$$W_\Gamma = W_H + \Delta W, \quad \text{где } \Delta W = \Delta W_R + \Delta W_{\text{эл.м}} + \Delta W_{\text{мех.}}; \quad (4)$$

где ΔW_R – энергия, потерянная в активных сопротивлениях элементов системы.

Возможность существования режима совсем не означает, что он будет устойчивым установившимся режимом. Природа неустойчивости всегда обусловлена энергетическими свойствами электрической системы.

В установившемся режиме энергия W_{Γ} , поступающая в систему извне, расходуется в нагрузке и идёт на покрытие потерь ($W_{\text{н}} + \Delta W$). При появлении какого-либо возмущения, проявляющегося в изменении параметра, определяющего режим $\Delta\Pi$, этот баланс нарушается. Если расход энергии $W = W_{\text{н}} + \Delta W$ будет расти быстрее, чем та дополнительная энергия, которую может дать после возмущения внешний источник $\Delta W_{\Gamma} = f(\Pi)$, то новый режим не может быть обеспечен энергией и в системе должен восстановиться прежний установившийся режим, т.е. система будет устойчива. Критерий устойчивости в этом случае

$$\frac{\Delta W}{\Delta\Pi} > \frac{\Delta W_{\Gamma}}{\Delta\Pi}, \text{ или } \frac{d(W_{\Gamma} - W)}{d\Pi} < 0. \quad (5)$$

Для обобщения можно ввести понятие избыточной энергии $\Delta W_{\Sigma\Gamma} = \Delta(W_{\Gamma} - W)$ и критерий устойчивости представить в более общем виде: $\frac{d(\Delta W_{\Sigma\Gamma})}{d\Pi} < 0$.

Следовательно, устойчивыми будут те режимы, в которых при возмущении факторы, стремящиеся нарушить режим (φ) изменяются медленнее, чем факторы, противодействующие (ψ) этому нарушению, т.е.

$$\frac{d\psi}{d\Pi} > \frac{d\varphi}{d\Pi}; \text{ или } \frac{d(\psi - \varphi)}{d\Pi} > 0; \quad (6)$$

Для преодоления трудностей, связанных с переходом энергии из одного вида в другой при электромеханических переходных процессах, в частности при инженерных расчетах, считают, что возмущения происходят в системе при постоянной скорости вращения всех машин $\omega = \omega_0$ (т.е. $\Delta W_{\text{мех}} = 0$) и что все изменения электромагнитной энергии покрываются за счёт некоей балансирующей эту энергию установки ($\Delta W_{\text{эл.м}} = \Delta W_{\text{бал}}$).

При этих допущениях выражение для критерия устойчивости принимает вид:

$$\frac{d}{d\Pi} \left(\frac{d\Delta W_{\Sigma\Gamma}}{dt} \right) = \frac{d\Delta P_{\Sigma\text{мех}}}{d\Pi} < 0; \quad (7)$$

где $\Delta P_{\text{мех}}$ – избыточная мощность механического (первичного) двигателя генератора над его электрической мощностью, создающая ускоряющий момент.

В расчётах электрических систем обычно оперируют с избытком электрической мощности генератора над его механической мощностью:

$$\Delta P_{\Sigma} = -\Delta P_{\Sigma\text{мех}}; \quad \frac{\Delta P_{\Sigma}}{\omega_0} = \Delta M_{\text{T}}; \quad (8)$$

где ΔM_{T} – тормозящий момент; ω_0 – синхронная скорость (const). В этом случае критерий устойчивости можно представить в виде

$$\frac{d\Delta P_{\Sigma}}{d\Pi} > 0, \quad \text{или} \quad \frac{d\Delta M_{\text{T}}}{d\Pi} < 0; \quad (9)$$

Для случая баланса только реактивной мощности при неизменной активной (предположительно) аналогично можно записать критерии устойчивости для реактивной мощности

$$\frac{d\Delta Q_{\Sigma}}{d\Pi} < 0, \quad \text{или} \quad \frac{d}{d\Pi}(Q_{\Sigma\text{Г}} - Q_{\Sigma\text{Н}}) < 0. \quad (10)$$

Однако критерий (7) не дает непосредственных указаний о характере протекания процесса. Поэтому на практике при оценке устойчивости оперируют не с полной энергией системы, а с некоторыми зависящими от нее величинами, выявляемыми для каждой конкретной практической задачи, называемыми *практическими критериями устойчивости*.

Таким образом, при анализе переходных процессов в электроэнергетических системах приходится решать два характерных вида задач:

1) анализ устойчивости системы, в которой все источники энергии, преобразователи и потребности управляются (регулируются) так, что система не способна к автоколебаниям (применяется критерий $\frac{d(\Delta W_{\Sigma\text{Г}})}{d\Pi} < 0$ и его упрощённые модификации – практические критерии). Если же система оказывается неустойчивой, то нарушение устойчивости происходит без колебаний;

2) анализ устойчивости системы, в которой генерирующие элементы системы (обычно их регулирующие устройства) изменяют вносимую в систему энергию в зависимости от амплитуды колебаний или их скорости. В этом случае система после возмущения может приходить в колебательное состояние и нарушение её устойчивости может происходить в виде нарастающих колебаний и практические критерии в этом случае непригодны, так как в некоторых случаях могут дать неверный результат.

Решение задач переходного процесса в электроэнергетической системе должно также дать ответ на вопрос качества переходного процесса: устойчи-

вый – неустойчивый, быстрый – медленный, аperiodический – колебательный. Кроме того, должны быть определены запасы устойчивости по какому-либо параметру системы, так как в статически неустойчивой системе даже весьма малые возмущения приводят к прогрессирующему изменению параметров ее режима. Практически это происходит самопроизвольно и медленно в виде *текучности параметров* нормального режима системы.

2.1. Практические критерии устойчивости

В нормальном режиме системы активные и реактивные мощности генерирующих и нагрузочных ветвей аналитически представляются в виде функций

$$P_{Гi} = \varphi_i(\delta_i, U, \omega); Q_{Гi} = \psi_i(\delta_i, U, \omega), P_H = \varphi(U, \omega), Q_H = \psi(U, \omega).$$

Приращения мощностей генерирующих и нагрузочных ветвей:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Г} &= \frac{\partial P}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial P}{\partial \omega} \Delta \omega; \Delta Q_{Г} = \frac{\partial Q}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial Q}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial Q}{\partial \omega} \Delta \omega; \\ \Delta P_H &= \frac{\partial P_H}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial P_H}{\partial \omega} \Delta \omega; \Delta Q_H = \frac{\partial Q_H}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial Q_H}{\partial \omega} \Delta \omega. \end{aligned} \quad (11)$$

Для первичных двигателей (например турбин) можно считать, что их мощности в относительных единицах численно равны вращающим моментам и зависят только от скорости их вращения. Тогда приращение мощности каждой турбины выражается зависимостью $\Delta P_{Гi} = \frac{\partial P_{Гi}}{\partial \omega} \Delta \omega$. Отметим, что в установившемся режиме выполняются условия баланса вращающих моментов для станций и баланс электрических мощностей в точках присоединения нагрузки.

Для *простейшей электрической системы*, состоящей из синхронного генератора с электродвижущей силой E , передачи с реактивностью X и шин неизменного напряжения U , в качестве определяющего параметра выбирается вырабатываемая генератором активная мощность. В этом случае восходящая ветвь угловой характеристики синхронного генератора $P = \frac{EU}{X} \sin \delta = P_m \sin \delta$ отвечает устойчивым режимам, а падающая – неустойчивым. Для реактивной мощности в начале и в конце передачи справедливо условие

$$Q_{Г} = \frac{E^2}{X} - \frac{EU}{X} \cos \delta; Q = - \left[\frac{U^2}{X} - \frac{EU}{X} \cos \delta \right]. \quad (12)$$

Из соотношений (12) следует, что режим системы зависит только от изменений угла δ в этот момент, независимо от того, как это было достигнуто, при неизменной мощности первичного двигателя (турбины). Критерий устойчивости простейшей электрической системы в этом случае имеет вид $\frac{dP}{d\delta} > 0$ (допущение, что рассматриваемая система *позиционная*).

При сохранении неизменной мощности генератора с изменением ЭДС или напряжения (независимые переменные) проявление текучести режима наступает при условии $\frac{d\delta}{dE} \rightarrow -\infty$ или $\frac{d\delta}{dU} \rightarrow -\infty$. Следовательно, критерий устойчивости системы имеет вид $\frac{dE}{d\delta} < 0$, а условие ее критического режима

$\frac{dE}{d\delta} = 0$. Напряжение U_K в любой точке K системы можно выразить через ЭДС в начале системы и суммарную реактивность между точками начала системы и точкой K :

$$U_K = \sqrt{\left(\frac{E^2 - Q_{\Gamma} X_K}{E}\right)^2 + \left(\frac{P X_K}{E}\right)^2}. \quad (13)$$

Из анализа последнего выражения получается, что при неизменной мощности предельный по устойчивости режим наступает при $\frac{dE}{dU_K} = 0$.

Приведенные выше практические критерии вторичны, отличаются по виду, действуют только в условиях принятых ограничений, не универсальны, но дают одинаковый конечный результат.

Устойчивость **асинхронного двигателя**, подключенного к узловой точке системы, имеющей неизменное напряжение, оценивается по скольжению и соотношению его механической $P_{\text{мех}}$ и электрической P мощностей. Для асинхронного двигателя критерий (7) принимает вид $\frac{d(P_{\text{мех}} - P)}{ds} < 0$. Однако при неизменной механической мощности $P_{\text{мех}} = P_0 = \text{const}$ критерий устойчивости имеет вид $\frac{dP}{ds} > 0$.

Оценка *устойчивости перехода от одного режима к другому* при больших возмущениях (короткие замыкания, отключения или включения каких-либо элементов системы) с необходимостью учета инерционных параметров вращающихся электрических машин, скорости изменения параметров режима и нелинейности основных характеристик системы $P = \varphi(\delta)$ и $Q = \psi(\delta)$ производится на основании **динамической устойчивости** (в отличие от рассмотренных выше случаев малых отклонений – статической устойчивости). *Критерии динамической устойчивости характеризуют способность системы сохранять синхронную работу и восстанавливать исходный режим или режим, практически близкий к исходному, при резких его изменениях.* При этом исследуется небаланс между вращающим моментом первичного двигателя и электромагнитным моментом на валу каждого генератора по **способу площадей**. Избыточный момент ΔM в этом случае уравнивается не только электромагнитным моментом, соответствующим отдаваемой генератором в сеть электроэнергии, но и моментом, обусловленным накопленной ротором кинетической энергией. Без учета демпферных контуров и действия регуляторов уравнение движения ротора синхронной машины принимает вид

$$\Delta M = M_T - M^{\text{II}} = T_j \frac{d\Delta\omega}{dt}, \quad \text{или} \quad T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P_{\max} \sin \delta, \quad (14)$$

где $M_T = \varphi(\Delta\omega)$ и P_T – соответственно ускоряющий момент и мощность турбины (первичного двигателя); $M^{\text{II}} = \varphi(\delta, \Delta\omega)$ – электромагнитный момент генератора, соответствующий новому режиму, T_j – механическая постоянная инерции ротора; $\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} = \varphi(t)$, или $\Delta\omega = \sqrt{\frac{2}{T_j} \int_{\delta} \Delta P d\delta}$ – угловая

скорость ротора; P_{\max} – амплитуда угловой характеристики электромагнитной мощности генератора, выдаваемой в систему.

Ускорение ротора генератора можно определить соотношением $\alpha = d^2\delta/dt^2$. Динамические характеристики мощности при условии $E'_q = \text{const}$ могут быть построены согласно выражению

$$P_{E'} = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X'_d}{X_{d\Sigma} X'_{d\Sigma}} \sin 2\delta. \quad (15)$$

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. Отметим, что интегрирование уравнения движения ротора представляет значительные трудности и в большинстве случаев это удается выполнить только приближенными методами (например, упомянутый выше способ площадей, методы численного интегрирования, метод Рунге – Кутты и др.).

При ручных расчетах динамического перехода можно использовать метод последовательных интервалов для построения функциональной зависимости $\delta(t)$. В этом случае весь переходный процесс разбивается на ряд небольших интервалов времени длительностью несколько десятков миллисекунд, т.е. $\Delta t = (0,02 \div 0,1)$ с и для каждого из них последовательно определяется приращение угла $\Delta\delta$. Избыток мощности в течение интервала остается постоянными и, следовательно, движение ротора на интервале равномерно-ускоренное. Тогда, учитывая, что параметры конца предыдущего $(n-1)$ -го интервала служат параметрами начала n -го, последующего, интервала, имеем

$$\begin{aligned}\Delta\delta_n &= \Delta\omega_{n-1} \cdot \Delta t + 0,5\alpha_{n-1} \cdot \Delta t^2 = \left[\Delta\omega_{n-2} + 0,5(\alpha_{n-2} + \alpha_{n-1}) \Delta t \right] \Delta t + 0,5\alpha_{n-1} \cdot \Delta t^2 = \\ &= \left[\Delta\omega_{n-2} \cdot \Delta t + 0,5\alpha_{n-2} \cdot \Delta t^2 \right] + \alpha_{n-1} \cdot \Delta t^2 = \Delta\delta_{n-1} + \alpha_{n-1} \cdot \Delta t^2.\end{aligned}\quad (16)$$

Решая полученное выражение с учетом соотношения (14) и задавая время Δt , постоянную инерции T_j в секундах и углы в электрических градусах, т.е. $T_j[\text{сек}] = \frac{T_j[\text{рад}]}{\omega_0}$;

$$\delta[\text{эл.град}] = \delta[\text{рад}] \cdot 360 f / \omega_0, \text{ получим}$$

$$\begin{aligned}\Delta\delta_n[\text{эл.град}] &= \Delta\delta_{n-1}[\text{эл.град}] + \frac{360 f_0}{\omega_0} \Delta P_{n-1} [\Delta t(\text{сек}) \cdot \omega_0]^2 = \\ &= \Delta\delta_{n-1}[\text{эл.град}] + K \Delta P_{n-1},\end{aligned}\quad (17)$$

где $K = 360 f \Delta t^2 / T_j$; $\Delta P_{n-1} = P_0 - P_{\max} \sin \delta_{n-1}$.

Для момента отключения линий в аварийном режиме (δ_{k-1}) и начала послеаварийного режима (δ_k) имеем

$$\Delta P_{k-1}^{II} = P_0 - P_{\max}^{II} \sin \delta_{k-1}; \quad \Delta P_{k-1}^{III} = P_0 - P_{\max}^{III} \sin \delta_{k-1};$$

$$\Delta\delta_k = K \frac{\Delta P_{k-1}^{II} + \Delta P_{k-1}^{III}}{2} + \Delta\delta_{k-1}. \quad (18)$$

Расчет ведут до тех пор, пока угол δ не начнет уменьшаться или пока не станет ясным, что угол δ беспредельно возрастает (нарушение устойчивости), либо до достижения предельного угла отключения $\delta_{\text{откл. пред.}}$.

2.2. Качество переходного процесса (запасы устойчивости режимов электроэнергетической системы)

Целевая задача анализа переходных процессов в электроэнергетической системе направлена на выявление оптимальных условий её эксплуатации и, следовательно, на улучшение качества переходных процессов и обеспечение необходимой устойчивости.

Рассматривая основное оборудование энергосистемы и средства автоматики как единый комплекс, необходимо определить устойчивость возможных режимов и запасов этих режимов по устойчивости, а также выбрать мероприятия, способствующие повышению устойчивости как всей системы, так и отдельных её элементов и узлов нагрузки. В простейшем случае при ориентировочных расчетах допустимы значительные упрощения при выборе напряжения, принципиальных схем электропередач и мероприятий по повышению устойчивости и повышению качества переходного процесса.

В общем случае запасы устойчивости электроэнергетической системы определяются сопоставлением показателей исходного режима и аналогичных показателей предельного по устойчивости режима (изменение параметра в сторону ухудшения режима). При этом определяется запас устойчивости как при малых отклонениях параметров режима (статическая устойчивость), так и при больших возмущениях (динамическая устойчивость) для всей системы, для узловых точек системы, для электропередачи и для межсистемных связей.

Новый режим можно также оценить по качеству энергии, отдаваемой потребителю (значения напряжения и его несимметричность и несинусоидальность, значения частоты). Другой оценкой переходного режима служит различие в протекании переходного процесса. Быстрое затухание переходного процесса, апериодичность или хотя бы его монотонность в большинстве отраслей, применяющих автоматическое регулирование, считаются показателями хорошего качества переходного процесса. Однако в общем случае надо

оценить не только поведение элемента системы, в котором происходит переходный процесс, но и влияние данного элемента на режим всей системы. При этом также важно знать не только отклонение мгновенного значения параметра, но и его продолжительность.

В нормальном режиме работы электроэнергетической системы запас статической устойчивости K_U определяется:

1) для основных узловых точек электрической системы по формуле

$$K_U = \frac{U_H - U_{KP}}{U_H} \cdot 100 \%, \quad (19)$$

где U_H – длительно поддерживаемое напряжение в узловой точке энергосистемы; U_{KP} – критическое напряжение в той же точке, при котором нарушается статическая устойчивость энергосистемы;

2) для энергосистемы в целом – по наименьшему из значений коэффициентов статической устойчивости узловых точек, но не менее 10 %;

3) для электропередачи, связывающей электростанцию с энергосистемой, по формуле

$$K_P = \frac{P_{ПР} - P}{P} \cdot 100 \%, \quad (20)$$

где $P_{ПР}$ – предельная передаваемая мощность, определенная из условий устойчивости режима с учетом действия автоматических устройств; P – передаваемая мощность.

Установлено, что значения коэффициента запаса устойчивости $K_P \geq 20\%$ – в нормальном режиме и $K_P = 8\%$ – в кратковременном послеаварийном режиме. В случае необходимости предотвращения ограничения энергоресурсов потребителя значение K_P в нормальном режиме допустимо на уровне 5 – 10 %. При этом для второстепенных электропередач допускается статическая неустойчивость в послеаварийном режиме (т.е. исключено их влияние на статическую устойчивость энергосистемы);

4) для межсистемных связей запас устойчивости K_P определяется по формуле

$$K_P = \frac{P_{ПР} - \Delta P - P}{P} \cdot 100 \%, \quad (21)$$

где $\Delta P = 0,02P_{\Sigma Г}$ (т.е. 2 % от суммарной мощности генераторов меньшей из

соединяемых систем), и учитывает увеличение передаваемой мощности за счет нерегулярных колебаний мощности по межсистемной электропередаче, обусловленных колебаниями нагрузки и частоты в каждой из соединяемых энергосистем.

При расчетах *динамической устойчивости* устанавливается характер динамического перехода от одного режима системы к другому. Переход считается благополучным, если ни одна мощная электростанция не выпадает из синхронизма и ни один мощный узел нагрузки не отключается.

Динамическая устойчивость должна обеспечиваться либо в режимах нормальной работы, определяемых наибольшими длительно передаваемыми мощностями по данной электропередаче, либо в режимах её перегрузки. В качестве расчетного принимают однофазные или двухфазные короткие замыкания (КЗ), одновременно принимая меры, снижающие вероятность нарушений устойчивости при более тяжелых авариях: двухфазных КЗ на землю и трехфазных КЗ – в первую очередь за счет действия автоматических регуляторов возбуждения (АРВ). При ориентировочных расчетах запас динамической устойчивости определяется с учетом действия регуляторов возбуждения в первом цикле качаний по правилу площадей, т.е. по отношению площади возможного торможения к площадке фактического ускорения

$$K_3 = \frac{\int_{\delta_0}^{\delta_{\text{откл}}} \Delta P^{\text{III}} d\delta}{\int_{\delta_0}^{\delta_{\text{откл}}} \Delta P^{\text{II}} d\delta} = \frac{S_{\text{торм}}}{S_{\text{уск}}} = \frac{S_{\text{def}}}{S_{\text{abcd}}}. \quad (22)$$

Предельное по условию динамической устойчивости значение угла отключения $\delta_{\text{откл}}$ поврежденной цепи определяется из условия равенства площадей ускорения S_{abcd} и торможения S_{def} по формуле

$$\delta_{\text{откл-пред}} = \arccos \frac{P_0 (\delta_{\text{кр}} - \delta_0^{\text{I}}) + P_{\text{max}}^{\text{III}} \cos \delta_{\text{кр}} - P_{\text{max}}^{\text{II}} \cos \delta_0^{\text{I}}}{P_{\text{max}}^{\text{II}} - P_{\text{max}}^{\text{III}}}, \quad (23)$$

где $P_{\text{max}}^{\text{II}}$ – амплитуда угловой характеристики в аварийном режиме (рис. 3, кривая II); $P_{\text{max}}^{\text{III}}$ – амплитуда угловой характеристики в послеаварийном режиме (рис. 3, кривая III).

В исходном режиме передаваемая мощность равна мощности турбины $P_0 = P_T$ и угол между ЭДС генератора и напряжением системы соответственно равен δ_0 . В аварийном режиме ротор генератора ускоряется под действием разности мощностей:

$$\Delta P^{II} = P_0 - P_{\max}^{II} \sin \delta. \quad (24)$$

После отключения короткого замыкания на ротор действует тормозящий момент:

$$\Delta P^{III} = P_0 - P_{\max}^{III} \sin \delta. \quad (25)$$

Площадь ускорения определится запасом кинетической энергии ротора генератора при его ускорении:

$$S_{abcd} = S_{\text{уск}} = \int_{\delta_0}^{\delta_{\text{откл}}} \Delta P^{II} d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_{\text{откл}}} (P_0 - P_{\max}^{II} \sin \delta) d\delta. \quad (26)$$

После отключения короткого замыкания, хотя на ротор действует тормозящий момент, угол δ продолжает увеличиваться до тех пор, пока расходуется кинетическая энергия, запасенная при ускорении. Устойчивость сохранится, если в послеаварийном режиме вся кинетическая энергия будет израсходована до достижения ротором критического угла $\delta_{\text{кр}}$. Энергия, отдаваемая ротором в период торможения, определяет площадь торможения:

$$S_{def} = S_{\text{торм}} = \int_{\delta_{\text{откл}}}^{\delta_{\text{кр}}} \Delta P^{III} d\delta = \int_{\delta_{\text{откл}}}^{\delta_{\text{кр}}} (P_0 - P_{\max}^{III} \sin \delta) d\delta. \quad (27)$$

Изложенное иллюстрирует правило площадей: система динамически устойчива, если возможная площадь торможения больше или равна площади ускорения: $S_{\text{торм}} \geq S_{\text{уск}}$ (считается нормальным, если площадь торможения процентов на 10 больше площади ускорения).

Критический угол по характеристике послеаварийного режима определяется по формуле

$$\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \arcsin(P_0 / P_{\max}^{III}). \quad (28)$$

Соотношение между площадями ускорения и торможения определяется значением угла (времени) отключения короткого замыкания, которое в общем случае нормировано в зависимости от вида КЗ и класса напряжения.

Способ площадей позволяет определить запас динамической устойчивости при известном времени отключения $t_{\text{откл}}$ короткого замыкания. Для этого по методу последовательных интервалов решается уравнение относительного движения ротора, строится кривая $\delta(t)$ до времени отключения и определяется угол $\delta_{\text{откл}}$ для заданного $t_{\text{откл}}$. Затем вычисляются интегралы площадей ускорения и торможения для расчета коэффициента запаса динамической устойчивости.

Все мероприятия по обеспечению устойчивости системы должны быть направлены на улучшение соотношения между площадями ускорения и торможения. Улучшение угловой характеристики послеаварийного режима в первом цикле качаний до достижения угла $\delta_{\text{кр}}$ достигается использованием быстродействующего АПВ (автоматического повторного включения) отключенной линии и устранения КЗ, что увеличивает площадку торможения и улучшает устойчивость.

При проектно-эксплуатационных расчетах запас динамической устойчивости определяется методом последовательных интервалов без учета влияния апериодической слагающей и момента, создаваемого током обратной последовательности.

В уточненных расчетах запас динамической устойчивости определяется тремя путями:

а) условно, по максимальному вылету угла $\delta_{\text{макс}}$ и начальному углу δ_0

$$K_3 = \frac{180^\circ - \delta_{\text{макс}}}{\delta_0} \cdot 100\%, \quad \text{при значении } \delta_{\text{макс}} < 180^\circ; \quad (29)$$

б) по ухудшению начального режима станции, для чего расчет повторяется при последовательно увеличивающейся нагрузке: $P = P_0; 1,05 P_0; 1,1 P_0; 1,15 P_0$ и т.д., до тех пор, пока не будет получен неустойчивый режим; тогда

$$K_3 = \frac{P_1 - P_0}{P_0} \cdot 100\%; \quad (30)$$

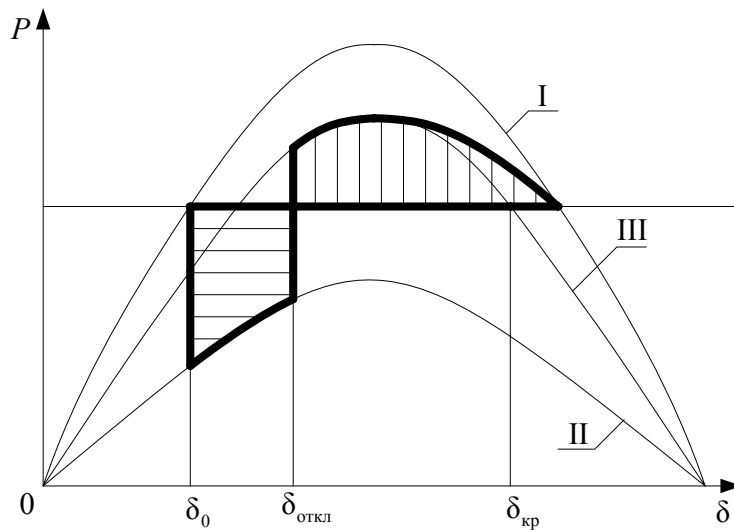


Рис. 3. К определению площадей ускорения и торможения

e

в) по ухудшению режима приемной системы, для чего расчет повторяется при постоянном снижении напряжения приемной стороны: $U_c = U_0; 0,98 U_0; 0,96 U_0; 0,94 U_0$ и т.д. до напряжения U_1 , при котором будет иметь место неустойчивый режим при передаче мощности P_0 ; тогда

d

$$K_3 = \frac{U_0 - U_1}{U_0} \cdot 100 \% . \quad (31)$$

c

Принято считать, что динамическая устойчивость должна обеспечиваться при следующих видах коротких замыканий в наиболее тяжелых точках данной электрической системы:

b

- для сетей напряжением 35 кВ – при трехфазном коротком замыкании;
- для сетей напряжением 110 – 330 кВ – при двухфазном коротком замыкании на землю;

- для сетей 500 кВ и выше – при двухфазном коротком замыкании на землю с использованием специальных средств повышения устойчивости (при слишком больших затратах можно ограничиться однофазным коротким замыканием с неуспешным АПВ).

Если по результатам расчета система находится на границе устойчивости, то эти результаты можно считать условными в той степени, в какой не были учтены малые влияющие факторы. Кроме того, при ориентировочных расчетах (перспективном проектировании) не учитывается возможность отка-

за в действии быстродействующей релейной защиты, а допустимая длительность коротких замыканий принимается в зависимости от напряжения сети, согласно табл. 3

Таблица 3

Напряжение сети, кВ	Наиболее тяжелые виды коротких замыканий	Длительность короткого замыкания, сек
35	$K^{(3)}$	0,25 – 0,30
110 – 220	$K^{(1,1)}$	0,18 – 0,20
330 - 750	$K^{(1,1)}$	0,10 – 0,12

Результирующая устойчивость электроэнергетической системы должна, как правило, обеспечиваться после любых нарушений статической и динамической устойчивости. При этом обязательна оценка влияния асинхронного хода на все элементы системы, а вопрос нарушения устойчивости нагрузки решается ценой (затратами) технического обеспечения динамической устойчивости. Предварительная оценка запасов устойчивости проводится на основе практических критериев и решения упрощенных дифференциальных уравнений с помощью приближенных методов. Если при этом значения коэффициентов запаса значительно превышают указанные выше значения, то расчеты точными методами следует проводить только для поиска путей улучшения технико-экономических показателей.

Основным математическим аппаратом при расчете динамической устойчивости является численное интегрирование нелинейных дифференциальных уравнений, характеризующих переходные процессы в автоматизированных электроэнергетических системах. Этот же математический аппарат используется при расчете результирующей устойчивости только для уравнений после нарушения синхронизма с выявлением длительности асинхронного режима и возможности ресинхронизации. Упрощенно эту же задачу можно решить по проверке выполнения критериев ресинхронизации без выявления характера переходного процесса.

Контрольные вопросы

1. Условия осуществимости режима электрической системы.
2. Энергетика переходного процесса.

3. Критерии устойчивости и избыточная энергия.
4. Критерии устойчивости и избыточная мощность.
5. Практические критерии устойчивости электрической системы.
6. Текучесть нормального режима электрической системы.
7. Критерии устойчивости простейшей электрической системы.
8. Критерии устойчивости асинхронного двигателя.
9. Критерии динамической устойчивости электрической системы.
10. Суть метода последовательных интервалов при определении времени отключения.
11. Запас устойчивости электрической системы по напряжению.
12. Запас устойчивости электропередачи.
13. Запас устойчивости межсистемной электропередачи.
14. Критерии оценки динамической устойчивости электрической системы.
15. Определение площадей торможения и ускорения.
16. Условия определения предельного угла отключения.
17. Понятия начального и критического углов характеристики мощности генератора.
18. Запас динамической устойчивости электрической системы при уточненных расчетах.
19. Виды и продолжительность КЗ при расчетах коэффициента запаса динамической устойчивости.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Особенностями исследований электрической системы являются постановка технической задачи, специфика параметров и их внутренних связей в этой системе, а также очень большое количество степеней свободы (число независимых переменных, необходимых для полного, с точки зрения поставленной технической задачи, описания процесса) и, следовательно, очень высокий порядок дифференциальных уравнений описывающих исследуемые процессы (для простых систем с двумя – тремя станциями полная система уравнений получается 20 – 35 порядка, а для сложных систем – несколько сотен). Решение этой системы уравнений крайне затруднительно, а получение наглядных и объяснимых инженерных решений просто невозможно.

3.1. Дифференциальное уравнение электрической системы и его порядок

Для некоторой электрической системы, принимая что A_1, \dots, A_m параметры рассматриваемой системы (как зависящие от режима, так и не зависящие от него), а X – параметры её режима, изменение которых характеризует её поведение, систему дифференциальных уравнений, связывающих эти переменные, можно представить в общем виде:

$$T_j \frac{dX_j}{dt} = F_j, \text{ где } F_j \text{ – некоторые функции переменных } X_j \text{ возмущающего воздействия } \Delta f \text{ и параметров системы } A_m; j = 1, 2, \dots, k, \dots, n;$$

$F_j = \Phi_j(X_1, X_2, \dots, X_n, \Delta f, e_k, A_1, A_2, \dots, A_m)$. Переменные e_k отображают действие регуляторов возбуждения и скорости, проявляющиеся после появления возмущающего воздействия и, в общем случае, являются функциями X_j и Δf .

Система дифференциальных уравнений, составленная для изучаемых процессов, может либо разрешаться относительно интересующих параметров режима как функций времени, либо исследоваться для получения тех или иных свойств изучаемой электрической системы.

При исследовании статической устойчивости (малых отклонений) целесообразно n дифференциальных уравнений первого порядка свести к одному уравнению n -го порядка относительно любой переменной:

$$\varphi(X_i; \frac{dX_i}{dt}; \dots; \frac{d^n X_i}{dt^n}) = \psi,$$

где $\psi = \Phi(A_1, \dots, A_m, \Delta f, \frac{d\Delta f}{dt}, \dots, \frac{d^{n-1}\Delta f}{dt^{n-1}}, e_\xi, \frac{de_\xi}{dt}, \dots, \frac{d^{n-1}e_\xi}{dt^{n-1}})$, $\xi = 1, \dots, k$.

Порядок дифференциального уравнения электрической системы можно определить по формуле

$$n = 2K_\Gamma + K_{Tj} + K_{H\omega} - \psi(\alpha);$$

где K_Γ – количество генераторов, синхронных двигателей (СД), асинхронных двигателей (АД), синхронных компенсаторов (СК), рассматриваемых каждый как отдельная вращающаяся машина, механическая инерция которой характеризуется механической постоянной инерции T_j ; K_{Tj} – количество электрических элементов (обмотки возбуждения (ОВ) генераторов, возбуди-

телей и подвозбудителей, элементов регуляторов и т.д.), у которых учтена электромагнитная инерция, отражённая постоянной электромагнитной инерции T_j ; $K_{H\omega}$ – количество статических нагрузок, у которых потребляемая активная мощность зависит от частоты ($f = \frac{\omega}{2\pi}$), при которой работает электрическая система:

$$\psi(\alpha) = (1 - a_\infty)(1 - a_\delta)[1 + (1 - a_D)(1 - a_\omega)], \quad (32)$$

где $a_\infty = 1$ – при наличии в схеме замещения шин бесконечной мощности;

$a_\delta = 1$ – при наличии хотя бы на одной из синхронных машин (СМ) автоматической регулировки возбуждения (АРВ) по отклонению абсолютного угла δ , характеризующего смещение ротора этой машины по отношению к синхронно вращающейся оси;

$a_D = 1$ – при учёте хотя бы на одной СМ демпфирования по абсолютной скорости или при наличии на ней АРВ по отклонению частоты;

$a_\omega = 1$ – при наличии хотя бы в одной из узловых точек энергосистемы нагрузки, для которой учитывается зависимость потребляемой ею мощности от частоты.

При нарушении любого из перечисленных условий соответствующее значение a принимается равным нулю. Поскольку исходные дифференциальные уравнения нелинейны, то для упрощения математического решения функции F_j разлагают в ряд (в котором оставлены только переменные первой степени), т.е. осуществляется линеаризация, при которой получаем для каждой переменной линейную систему уравнений с порядком равным исходному.

3.2. Упрощение уравнений

Упрощение уравнений при исследовании переходных процессов сложных систем производят на основе физических соображений с целью снижения порядка уравнения следующими путями:

а) пренебрегают малыми и несущественными для исследуемого процесса параметрами, что означает превращение исходной системы дифференциальных уравнений в упрощенную систему вида

$$T_1 \frac{dX_1}{dt} = F_1, \dots, T_n \frac{dX_n}{dt} = F_n,$$

где $T_{n+1}, T_{n+2}, \dots, T_m$ приняты равными нулю. Порядок системы при этом снижается с m до n , а переменные X_{n+1}, \dots, X_m исключаются из дифференциальных уравнений;

б) разделением системы уравнений на группы, причём явления, характерные и важные для одной группы и второстепенные для другой, в последней учитываются приближённо;

в) эквивалентной заменой нескольких агрегатов, генераторов или двигателей – одним, нескольких станций – одной. Даже целая система, содержащая генераторы и нагрузки, в ряде случаев заменяется одним агрегатом, воспроизводящим поведение системы.

Снижение порядка дифференциального уравнения электроэнергетической системы может быть достигнуто также разбиением переходного режима на этапы, в которых учитываются наиболее характерные параметры системы, оказывающие заметное влияние на протекание переходного процесса, и не учитываются второстепенные факторы.

Контрольные вопросы

1. Взаимосвязь дифференциальных уравнений движения ротора синхронной машины и электрической системы.
2. Вычисление порядка дифференциального уравнения электрической системы.
3. Пути снижения порядка дифференциального уравнения электрической системы.
4. В чем отличие дифференциальных уравнений для расчета статической устойчивости и динамической устойчивости.

4. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ

Отображение сложных процессов в электрической системе достигается при помощи схемы замещения, составленной из схем замещения отдельных её элементов (рис. 4). Схема замещения элемента системы представляется либо четырёхполюсником (активным или пассивным), либо полным сопротивлением (проводимостью), за которым может быть приложена та или иная ЭДС. Схема замещения является упрощённой (приближённой) логической или математической моделью, отражающей сложное явление в натуре (в ори-

гинале). Схема замещения может быть справедлива в любой момент времени или она может отражать связь между параметрами системы и параметрами режима только в какой-либо характерный момент времени исследуемого процесса. Отметим, что неудачный выбор схемы замещения может привести к неточным или даже ошибочным результатам. Ниже рассмотрены схемы замещения наиболее важных элементов электроэнергетической системы (в той или иной мере они были рассмотрены при изучении электромагнитных переходных процессов):

а) линии электропередачи (ЛЭП) – при упрощенном исследовании переходных процессов могут замещаться Т - или П - образными схемами замещения. При этом параметры ЛЭП представляются либо полными сопротивлениями $Z_{Л}$ либо чисто реактивными сопротивлениями $X_{Л}$. Активное сопротивление мощных электропередач не учитывается вследствие большого сечения проводов и значительного индуктивного сопротивления. Для мало-мощных систем или при наличии кабельных линий активное сопротивление учитывать обязательно.

Параметры схем замещения линий электропередачи длиной до 300 км определяют по формулам

$$Z_{Л} = R_{Л} + jX_{Л}; \quad R_{Л} = R_0 \ell; \quad X_{Л} = X_0 \ell; \quad Y_{Л} = b_0 \ell;$$

где ℓ – длина линии в км; R_0 – удельное активное сопротивление линии ($\text{Ом}/\text{км}$); X_0 – удельное индуктивное сопротивление линии $\text{Ом}/\text{км}$; b_0 – удельная ёмкостная проводимость $(\text{Ом}/\text{км})^{-1}$.

При длинах линии электропередачи от 300 до 1000 км вводятся поправочные коэффициенты для активной K_R , емкостной K_C и индуктивной K_X составляющих полного сопротивления, которые для П-образной схемы имеют вид

$$K_R = 1 - \frac{\ell^2}{3} X_0 b_0; \quad K_C = 0,5 \frac{3 + K_R}{1 + K_R}; \quad K_X = 1 - \frac{\ell^2}{6} (X_0 b_0 - R_0^2 \frac{b_0}{X_0}). \quad (33)$$

При длинах ЛЭП более 1000 км её П-образная схема замещения должна корректироваться комплексными поправочными коэффициентами для полного сопротивления K_Z и полной проводимости K_Y (для учета волновых параметров электропередачи):

$$K_Z = \frac{\text{sh}\gamma_0 \ell}{\gamma_0 \ell}; \quad K_Y = \frac{\text{th}(\gamma_0 \frac{\ell}{2})}{\gamma_0 \ell}, \quad (34)$$

где γ_0 – комплексная постоянная передачи длинной линии.
Тогда параметры ЛЭП можно представить соотношениями

$$R_{\text{Л}} = R_0 \ell K_R; \quad X_{\text{Л}} = X_0 \ell K_X; \quad Y_{\text{Л}} = b_0 \ell K_C; \quad (35)$$

б) электрические машины

В простейшем случае **синхронная машина** замещается полными комплексными сопротивлениями по продольной и поперечной осям:

$$Z_d = Z_{ad} + R_e + jX_e; \quad Z_q = Z_{aq} + R_e + jX_e; \quad (36)$$

где $Z_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{jX_{afd}} + \frac{1}{\frac{R_f}{s} + jX_{ffd}} + \frac{1}{\frac{R_{1d}}{s} + jX_{11d}} + \frac{1}{\frac{R_{ekd}}{s} + jX_{ekd}}};$

$$Z_{aq} = \frac{1}{\frac{1}{jX_{afq}} + \frac{1}{\frac{R_{1q}}{s} + jX_{11q}} + \frac{1}{\frac{R_{ekq}}{s} + jX_{ekq}}} \quad - \text{полные сопротивления}$$

взаимоиндукции между контурами статора и ротора по осям d и q ;

X_{afd}, X_{afq} – сопротивления взаимоиндукции между контурами статора и ротора по осям d и q ;

$X_{ffd}, X_{11d}, X_{11q}$ – сопротивления рассеяния обмотки возбуждения и успокоительной обмотки с учетом поверхностного эффекта;

R_e, X_e – соответственно активное сопротивление и сопротивление рассеяния обмотки статора;

X_{ekd}, X_{ekq} – реактивные сопротивления рассеяния естественного (эквивалентного) успокоительного контура по осям d и q ;

R_f, R_{1d}, R_{1q} – активные сопротивления обмотки возбуждения и успокоительной обмотки с учетом поверхностного эффекта;

R_{ekd}, R_{ekq} – активные сопротивления естественного (эквивалентного) успокоительного контура по осям d и q , обусловленные потерями в стали ротора;

S – величина скольжения ротора относительно поля статора.

Схемы рис. 4, з являются универсальными и все частные случаи получены из них.

Эквивалентные активные сопротивления ротора по осям d и q определяются из соотношений $R_{\ominus Rd} = \operatorname{Re}(Z_{ad})$; $R_{\ominus Rq} = \operatorname{Re}(Z_{aq})$.

Полное эквивалентное сопротивление ротора $R_{\ominus R} \cong \frac{1}{2}(R_{\ominus Rd} + R_{\ominus Rq})$.

Для определения параметров генератора в переходном процессе используются упрощенные Γ - образные схемы замещения, которые в переходном процессе изменяются и величины замещающей ЭДС и сопротивления, за которыми она приложена, должны являться функциями времени (рис. 4).

Схемы замещения основных элементов электрической системы (T - или Γ - образные схемы замещения асинхронных двигателей и трансформаторов с выносом ветви намагничивания на сторону высшего или низшего напряжения) приведены на рис. 4, а схемы замещения для определения параметров СМ при упрощенных расчетах – на рис. 5, из рассмотрения которого получим:

$$\begin{aligned} \text{– переходное сопротивление СМ} & \quad X_1 = \frac{X_d X_d'}{X_d - X_d'}; \\ \text{– сверхпереходное сопротивление СМ} & \quad X_2 = \frac{X_d' X_d''}{X_d' - X_d''}; \\ \text{– поперечное сверхпереходное сопротивление СМ} & \quad X_3 = \frac{X_q X_q''}{X_q - X_q''}. \end{aligned}$$

Отметим, что во время переходного процесса схема замещения генератора должна изменяться, а значения замещающей ЭДС и сопротивлений, за которыми она приложена, должны являться функциями времени. Возможные упрощения в виде неизменности ЭДС и сопротивлений выявляются и обосновываются для конкретного момента времени и вида переходного процесса.

В практических расчетах **асинхронные двигатели** обычно представляют упрощенными T - или Γ - образными схемами замещения (рис. 4, б). В первом грубом приближении с завышением вращающего момента на 10 – 15 % асинхронный двигатель представляют реактивностью короткого замыкания.

При исследовании переходных электромеханических процессов в электроэнергетических системах **трансформаторы** обычно представляют реактивностью короткого замыкания с выносом ветви намагничивания на шины неизменного напряжения или без ветви намагничивания.

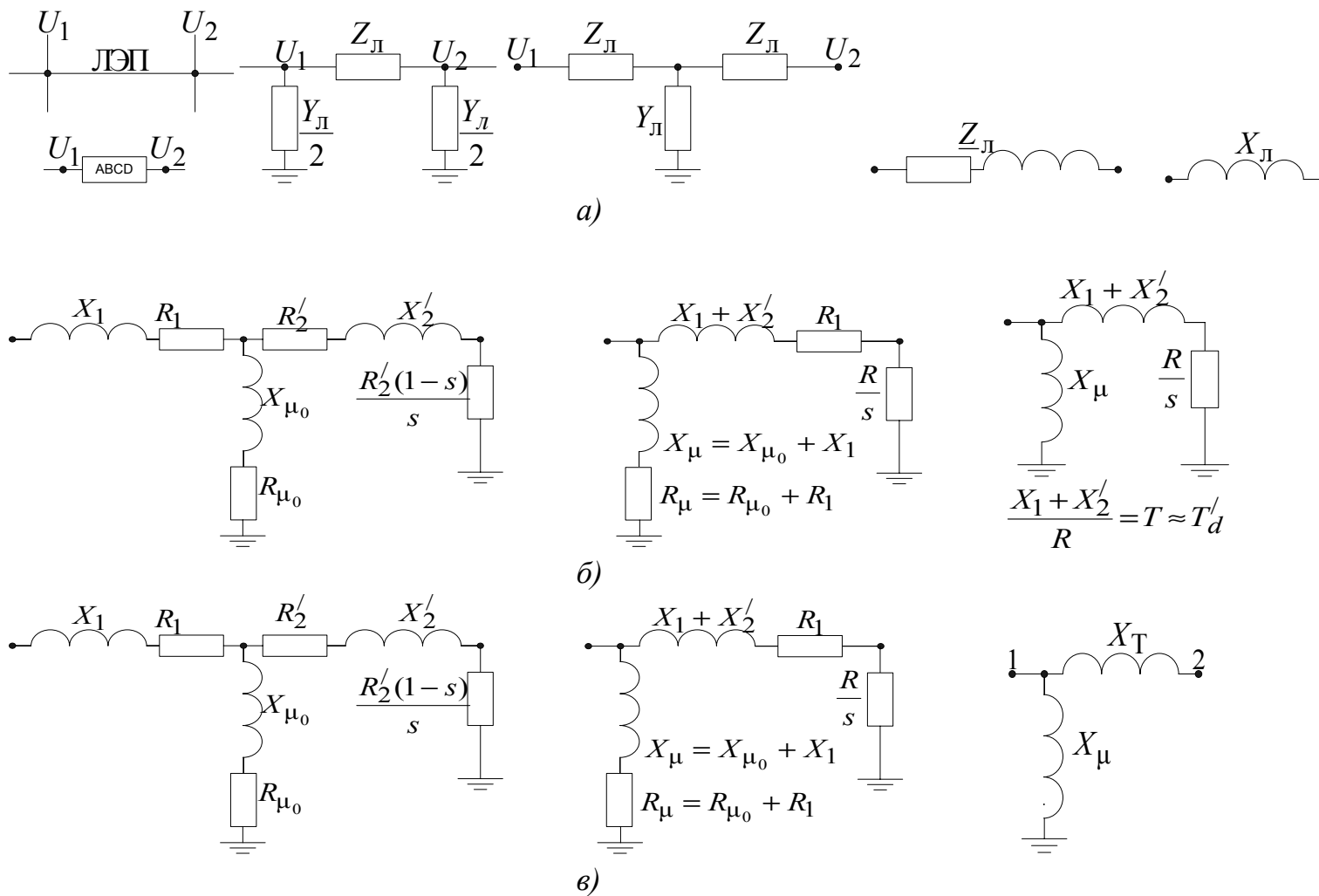


Рис. 4 (начало). Схемы замещения элементов системы: а – линии электропередачи; б – асинхронные двигатели; в – трансформаторы

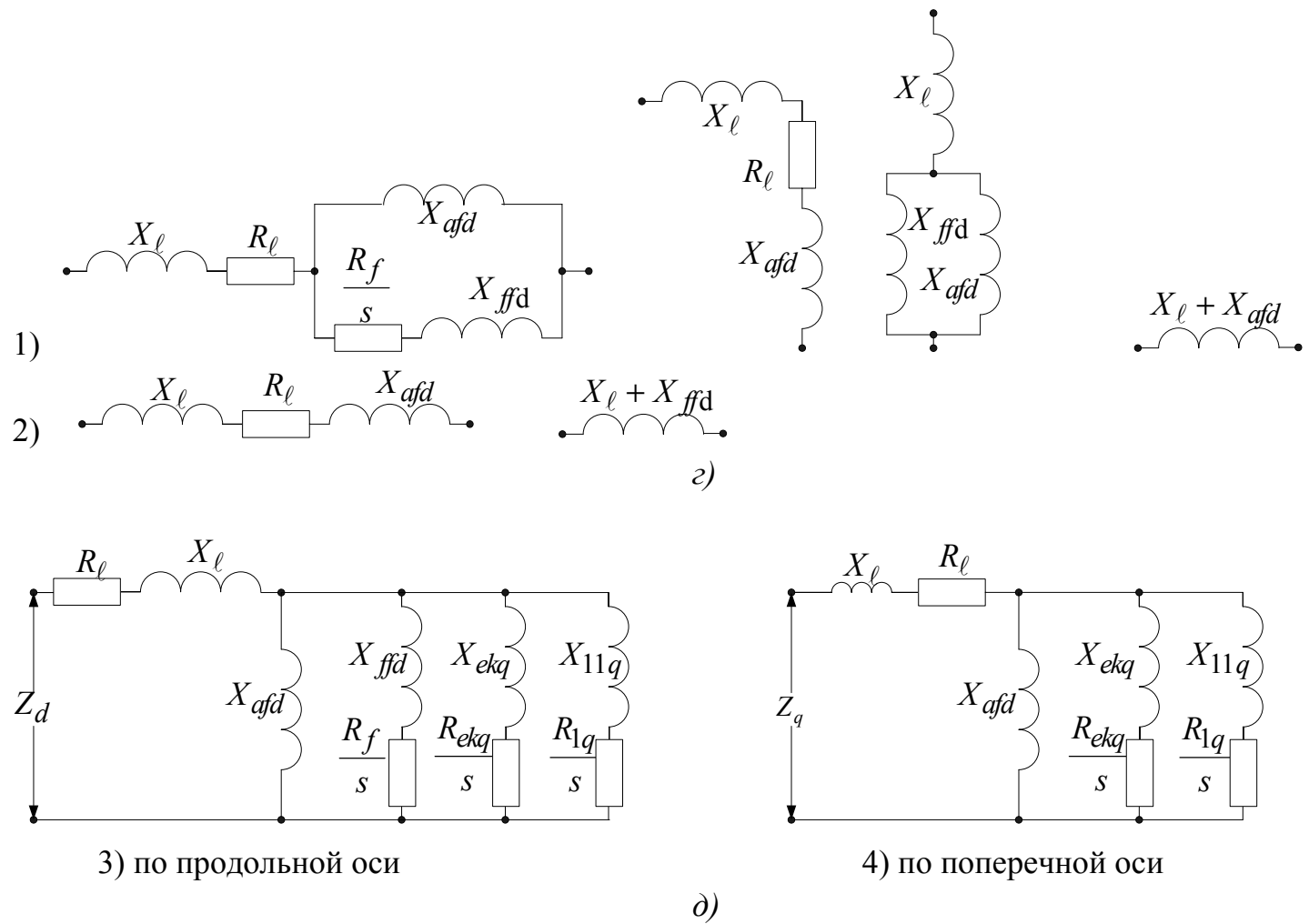


Рис. 4 (окончание). Схемы замещения элементов системы: z – синхронный генератор без демпферной обмотки: 1) при $s \neq 0$; 2) при $s = 0$; ∂ – синхронный генератор с демпферной обмоткой и естественным успокоительным контуром

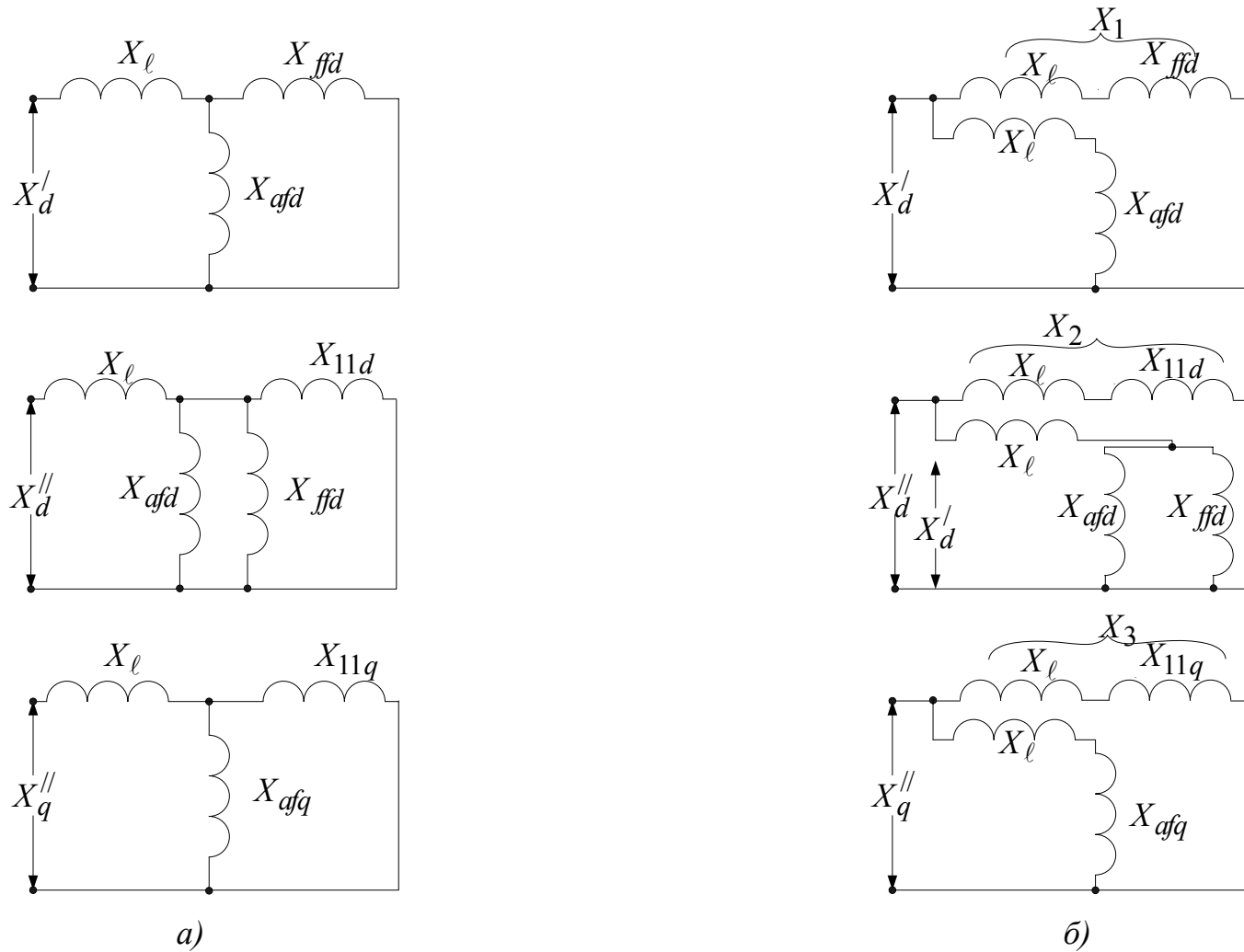


Рис.5. Схемы замещения для определения расчетных параметров СМ:
 а – исходные схемы; б – упрощенные схемы

Контрольные вопросы

1. Основные допущения при составлении схем замещения элементов электрических систем.
2. Схемы замещения линии электропередачи.
3. Схемы замещения синхронной машины.
4. Схемы замещения асинхронного двигателя для точных и приближенных расчетов.
5. Схемы замещения трансформатора для точных и приближенных расчетов.

5. ОСНОВНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Под простейшей системой понимают систему, состоящую из одной электрической станции, присоединенной через линию электропередачи к шинам напряжения, неизменного по величине и частоте. Все агрегаты станции одинаковы и одинаково загружены, поэтому они заменяются одним агрегатом. При составлении дифференциальных уравнений простейшей системы сопротивления линий и трансформаторов могут быть включены в сопротивление статора. В этом случае задача сводится к рассмотрению процессов, происходящих при изменениях режима системы в электрической части (генераторе, возбудителе, регулирующих устройствах) и механической части (турбине, турбо- или паропроводах, устройствах, регулирующих скорость). Процессы в электрической и механической частях системы связаны между собой, но в большинстве практических случаев их можно рассматривать раздельно.

При исследовании переходных процессов в генераторе, непосредственно подключенном к шинам неизменного напряжения, считают все магнитные потоки, пронизывающие обмотки машины, состоящими из двух независимых слагающих: *продольной и поперечной* (теория двух реакций подробно рассматривалась при изучении электромагнитных переходных процессов); при этом ЭДС, напряжения и токи также рассматриваются как состоящие из двух слагающих без учета влияния взаимоиндукции. Уравнения переходного процесса упрощаются, так как они не содержат периодически меняющихся коэффициентов и фактически являются диффе-

ренциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Эти уравнения носят название уравнений Парка – Горева:

$$\begin{cases}
 U_d = -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \frac{d\gamma}{dt} - ri_d; \\
 U_q = -\frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \frac{d\gamma}{dt} - ri_q; \\
 U_0 = -\frac{d\psi_0}{dt} - ri_0; \\
 U_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \text{ – уравнение цепи возбуждения.}
 \end{cases}
 \quad \left. \vphantom{\begin{cases} U_d \\ U_q \\ U_0 \\ U_f \end{cases}} \right\} \text{уравнения Парка – Горева,} \quad (37)$$

Фазовые токи при наличии тока нулевой последовательности можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 i_a &= i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0; \\
 i_b &= i_d \cos(\gamma - 120^\circ) + i_q \sin(\gamma - 120^\circ) + i_0; \\
 i_c &= i_d \cos(\gamma + 120^\circ) + i_q \sin(\gamma + 120^\circ) + i_0.
 \end{aligned}$$

Формулы перехода от фазных величин к двухфазной системе координат имеют вид:

$$\begin{aligned}
 i_d &= \frac{2}{3} [i_a \cos \gamma + i_b \cos(\gamma - 120^\circ) + i_c \cos(\gamma + 120^\circ)]; \\
 i_q &= \frac{2}{3} [i_a \sin \gamma + i_b \sin(\gamma - 120^\circ) + i_c \sin(\gamma + 120^\circ)]; \\
 i_0 &= \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c).
 \end{aligned} \quad (38)$$

Чтобы использовать уравнения Парка – Горева при рассмотрении электромеханических переходных процессов необходимо получить выражения для определения электромагнитного момента в установившихся и переходных процессах. Поскольку уравнения Парка – Горева – математическая модель машины из двух взаимно перпендикулярных обмоток, расположенных по осям d и q (рис. 6), то действующий на ротор электромагнитный момент равен сумме моментов, действующих на обмотку d и обмотку q , т.е. $M = M_d + M_q$. В обмотке q протекает ток I_q . Механические силы, полу-

чающиеся от взаимодействия этого тока и потоков Φ_d и Φ_q , определяются согласно правилу левой руки. Очевидно, что электромагнитный момент будет создан только взаимодействием I_q и Φ_d .

Следовательно (рис. 6), $M_q = -\Psi_d I_q$.

Аналогично для обмотки d имеем $M_d = I_d \Psi_q$. Тогда выражение электромагнитного момента двухобмоточной машины

$$M = I_d \Psi_d - I_q \Psi_q. \quad (39)$$

Мощность в переходном режиме, отдаваемая машиной в сеть (или подведенная из сети в случае двигателя), определяется по формуле

$$P = i_a u_a + i_b u_b + i_c u_c; \quad (40)$$

где u_a, u_b, u_c – напряжения на шинах машины.

После перехода к координатам d и q получим:

$$P = \frac{3}{2} U_d i_d + \frac{3}{2} U_q i_q + 3U_0 i_0 \quad \text{или} \quad P = U_d I_d + U_q I_q + 2U_0 I_0. \quad (41)$$

В случае симметричного режима

$$P = \operatorname{Re}(\dot{U} \dot{I}^*) = U_q I_q + U_d I_d; \quad Q = \operatorname{Im}(\dot{U} \dot{I}^*) = U_d I_q - I_d U_q.$$

Связь между мощностью, отдаваемой в сеть, и моментом будет следующей:

$$P = (\Psi_d I_q - I_d \Psi_q) \omega + \frac{dW_{\text{СТ}}}{dt} - \Delta P_{\text{СТ}} = -M \omega + \frac{dW_{\text{СТ}}}{dt} - \Delta P_{\text{СТ}}. \quad (42)$$

Здесь $\omega = \omega_0 + \frac{d\delta}{dt}$ – скорость ротора; $M \omega = M \omega_0 + M \frac{d\delta}{dt}$ – электромаг-

нитная мощность генератора, передаваемая с ротора на статор;

$\frac{dW_{\text{СТ}}}{dt} \approx I_d \frac{d\varphi_d}{dt} + I_q \frac{d\psi_q}{dt} + 2I_0 \frac{d\psi_0}{dt}$ – дополнительная мощность, появляю-

щаяся за счет изменения электромагнитной энергии, запасенной в индуктивности цепей статора; $\Delta P_{\text{СТ}} = (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) \cdot r$ – потери в активном сопротивлении обмоток статора.

Вращающий момент, приложенный к валу генератора, должен уравновешивать момент, связанный с электрической мощностью, отдаваемой в переходном процессе в сеть и расходуемой на покрытие потерь в статоре. Появление мощности $dW_{СТ}/dt$ может вызвать дополнительный вращающий момент, тормозящий или ускоряющий ротор. Так при КЗ взаимодействие аperiodической составляющей тока статора и периодической составляющей тока ротора приводит к торможению ротора, а при отключении КЗ – к ускорению.

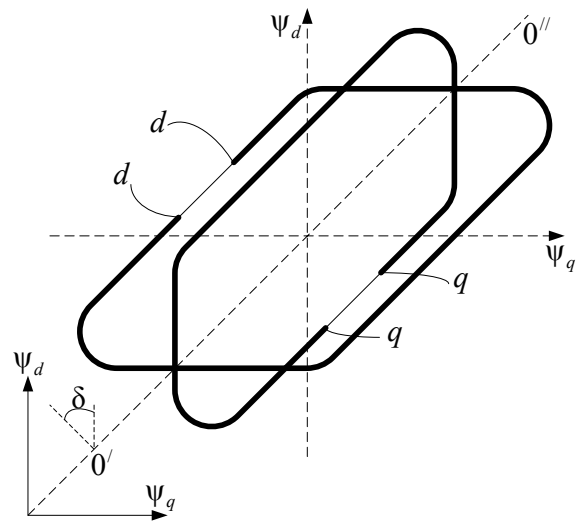


Рис.6. Модель двухобмоточной машины с указанием направлений потоков сцеплений и угла δ

С учетом изложенного выше уравнение относительного движения ротора принимает вид

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_j \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{мех}} - \frac{P + P_{\text{ст}} - \frac{dW_{\text{СТ}}}{dt}}{\omega_0 + \frac{d\delta}{dt}}, \quad (43)$$

где T_j – постоянная механической инерции машины.

Полученные соотношения справедливы в любых электромеханических переходных процессах, в том числе и при асинхронном ходе синхронного генератора (СГ), а также при рассмотрении режимов асинхронных машин. Основные уравнения упрощаются без учета дополнительной скорости вращения ротора при определении ЭДС и напряжений $(d\delta/dt)$, пренебрежении пульсациями магнитного потока $(\frac{d}{dt}\Psi_q, \frac{d}{dt}\Psi_d)$ и потерями в статоре $(\Delta P_{\text{СТ}})$:

$$(\frac{d\delta}{dt}), \dots \Delta P_{\text{СТ}} = 0.$$

Тогда $\omega = \omega_0 = 1$; $\frac{d}{dt}\gamma = 1 + \frac{d}{dt}\delta = 1$ – (значения в относительных единицах),

$$U_d = \Psi_q; \quad U_q = \Psi_d; \quad M = U_q I_q + U_d I_d = P;$$

и уравнение движения ротора принимает вид

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{\text{мех}} - P_{\text{э}}, \quad (44)$$

где $P_{\text{мех}}$ – механическая мощность на валу турбины; $P_{\text{э}}$ – электрическая мощность, отдаваемая в сеть, равная внутренней мощности генератора.

Упрощенные уравнения (*уравнения Лонглея*) применяются при обычных проектах и эксплуатационных расчетах устойчивости. Они позволяют пользоваться векторной диаграммой установившегося режима для расчетов переходных процессов.

Контрольные вопросы

1. Суть теории двух реакций.
2. Уравнения Парка – Горева.
3. Взаимосвязь фазных величин трехфазной системы с одноименными величинами двухобмоточной машины.
4. Выражение электромагнитного момента по теории двух реакций.
5. Взаимосвязь электромагнитного момента и мощности по теории двух реакций.
6. Уравнения движения ротора с позиции теории двух реакций.
7. Упрощение уравнения движения ротора.
8. Физический смысл уравнений Лонглея.

6. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СМ

Решение полных уравнений Парка – Горева обычно выполняют в операторном виде. При нулевых начальных условиях и постоянной частоте системы $\omega = \omega_0 = 1$ (в относительных единицах) и переменной скорости вращения ротора $p\gamma = 1 + p\delta$ уравнения Парка – Горева принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= -p\Psi_d - \Psi_q p\gamma - i_d r = -p\Psi_d - \Psi_q (1 + p\delta) - i_d r; \\ U_q &= \Psi_d p\gamma - p\Psi_q - i_q r = \Psi_d (1 + p\delta) - p\Psi_q - i_q r; \\ U_0 &= -p\Psi_0 - i_0 r. \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Для установления взаимосвязи потокосцеплений с токами, протекаю-

щими по обмоткам машины, представлена СМ с продольно-поперечными демпферными контурами схемой рис. 7. В системе относительных единиц потокосцепление каждой обмотки можно записать как произведение токов на соответствующие реактивные сопротивления самоиндукции и взаимоиנדукции. Тогда

$$\begin{aligned}
 \Psi_d &= i_f X_{afd} + i_{1d} X_{a1d} + i_d X_d; \\
 \Psi_q &= i_{1q} X_{a1q} + i_q X_q; \\
 \Psi_{ffd} &= i_f X_{ffd} + i_{1d} X_{f1d} + i_d X_{afd}; \\
 \Psi_{1d} &= i_{1d} X_{11d} + i_f X_{f1d} + i_d X_{a1d}; \\
 \Psi_{1q} &= i_{1q} X_{11q} + i_q X_{a1q}.
 \end{aligned} \tag{46}$$

Уравнения электрического состояния обмоток машины на рис. 7:

$$\left. \begin{aligned}
 i_f r_f + p \Psi_{ffd} &= U_f; \\
 i_{1d} r_{1d} + p \Psi_{1d} &= 0; \\
 i_{1q} r_{1q} + p \Psi_{1q} &= 0.
 \end{aligned} \right\} \tag{47}$$

Решая эту систему уравнений, найдем токи i_f , i_{1d} и i_{1q} (обмотки возбуждения, продольной и поперечной демпферных обмоток). Тогда выражения для потокосцеплений принимают вид

$$\Psi_d = G(p)U_f + X_d(p)i_d; \quad \Psi_q = X_q(p)i_q, \tag{48}$$

где
$$G(p) = \frac{p(X_{11d}X_{afd} - X_{f1d}X_{a1d}) + X_{afd}r_{1d}}{p^2(X_{11d}X_{ffd} - X_{f1d}^2) + p(X_{11d}r_f + X_{ffd}r_{1d}) + r_{1d}r_f}.$$

Смысл полученных уравнений в том, что в начальный момент переходного процесса при $t=0$ ($p=\infty$) операторное сопротивление $X_d(p)$ становится равным переходному сопротивлению X'_d (при отсутствии демпферной обмотки) и сверхпереходному X''_d при наличии демпферных обмоток, а при установившемся режиме $t=\infty$ ($p=0$) операторное сопротивление $X_d(p)$ становится равным синхронному сопротивлению X_d .

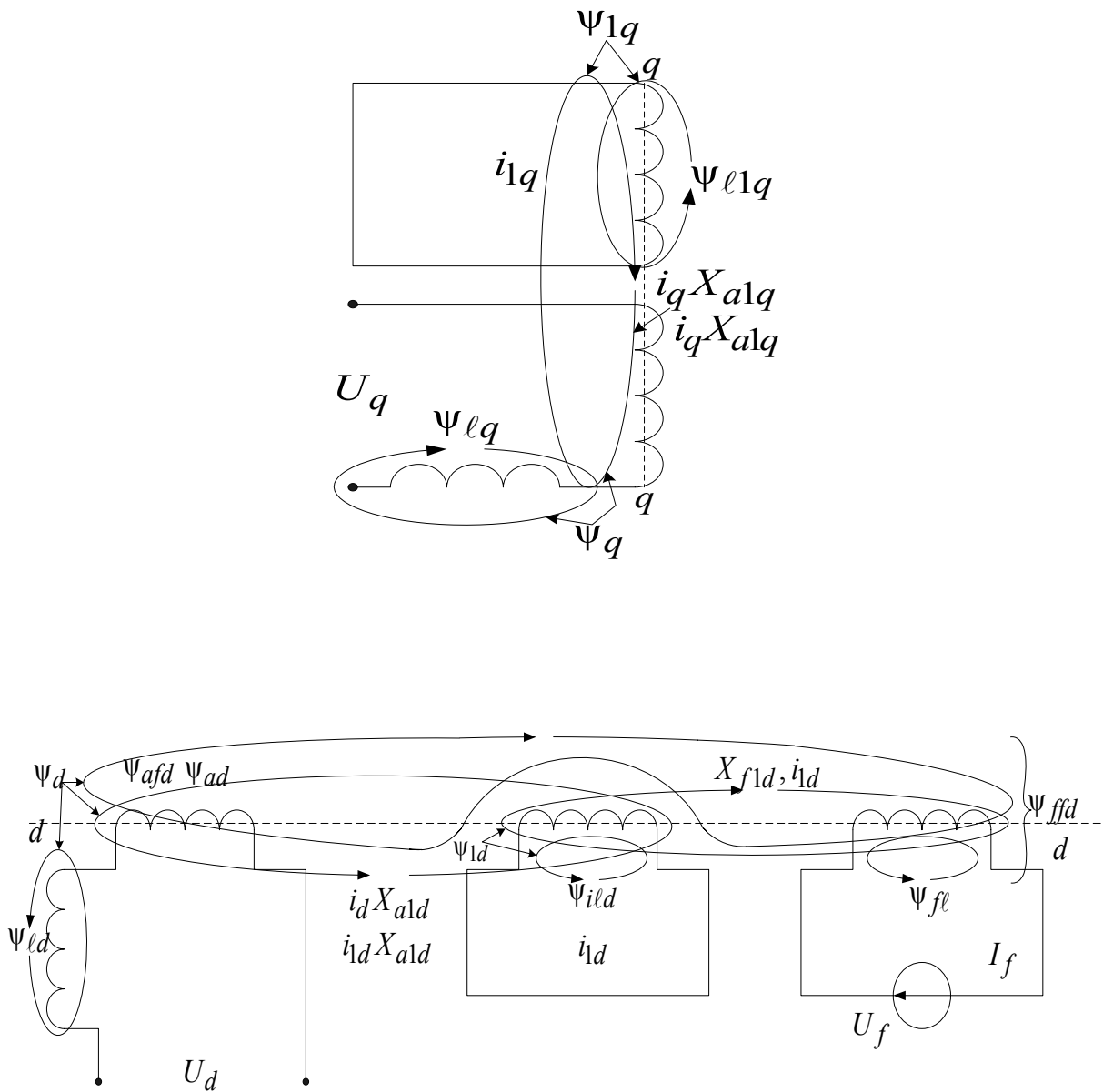


Рис.7. Иллюстрация взаимосвязи потокосцеплений с токами в СМ

$$\begin{aligned}
 X_d(p) &= \\
 &= X_d - \frac{p^2(X_{11d}X_{afd}^2 - 2X_{f1d}X_{a1d}X_{afd} + X_{ffd}X_{a1d}^2) + p(X_{afd}^2r_{1d} + X_{a1d}^2r_f)}{p^2(X_{11d}X_{ffd} - X_{f1d}^2) + p(X_{11d}r_f + X_{ffd}r_{1d}) + r_{1d}r_f}; \\
 X_q(p) &= X_q - \frac{pX_{a1q}^2}{pX_{11q} + r_{1q}}.
 \end{aligned}$$

Следовательно, реактивность машины меняется от X'_d в момент нарушения режима до X_d в установившемся режиме и все это отражено в операторном сопротивлении $X_d(p)$. В заключение сформулируем алгоритм исследования каких-либо резких изменений режима работы синхронной трехфазной машины без демпферной обмотки при заданных напряжениях на шинах нагруженной машины U_d, U_q, U_0 в момент времени $t = 0$.

Пусть при постоянной скорости вращения ротора СМ произошло симметричное нарушение режима (трехфазное КЗ; внезапное подключение нагрузки и т.п.). На первом этапе, полагая постоянную времени обмотки возбуждения бесконечной $T_{d0} = \infty$, получим $G(p) = 0$; $X_q(p) = X_q$; $X_d(p) = X'_d$.

Составляющие токов по продольной и поперечной осям определяются с учетом изложенных выше допущений из выражений

$$U_d = -p\Psi_d - \Psi_q(1 + p\delta) - i_d r; \quad U_q = \Psi_d(1 + p\delta) - p\Psi_q - i_q r;$$

$$U_0 = p\Psi_0 - i_0 r; \quad \Psi_d = G(p)U_f + X_d(p)i_d; \quad \Psi_q = X_q(p)i_q.$$

Тогда $U_d(p) = -Z_d(p)i_d - i_q X_q$; $U_q(p) = X'_d i_d - Z_q(p)i_q$,

где $Z_q(p) = pX_q + r$; $Z_d(p) = pX'_d + r$.

Решая преобразованные уравнения относительно составляющих токов при $t > 0$, т.е. после коммутации, получим:

$$i_d = -\frac{Z_q(p)}{A(p)}U_d + \frac{X_q}{A(p)}U_q; \quad (49)$$

$$i_q = -\frac{X'_d}{A(p)}U_d - \frac{Z_d(p)}{A(p)}U_q,$$

где $A(p)$ – характеристическое уравнение системы:

$$A(p) = Z_d(p)Z_q(p) + X_q X'_d = X'_d p^2 + (X'_d + X_q)rp + r^2 + X'_d X_q.$$

Корни уравнения $A(p) = 0$ будут в общем случае иметь значение:

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_k, \quad \text{где} \quad \alpha = \frac{X_q + X'_d}{2X_q X'_d} r = \frac{1}{T_\alpha}; \quad \omega_k = \sqrt{1 - \left(\frac{X'_d - X_q}{2X_q X'_d}\right)^2} r^2;$$

т.е. решение – затухающая синусоида.

Для случая $T_{d0} \neq \infty$, получим $G(p) \neq 0$ и характеристическое уравнение третьего порядка. Полагая в первом приближении, что первые два корня останутся неизменными, получим выражение для третьего корня:

$$P_3 = \alpha_3 = -\frac{(r^2 + X_d X_q)}{(r^2 + X'_d X_q) T_{d0}}.$$

Тогда выражения для продольной и поперечной составляющих токов принимают вид

$$i_d = A_0 + A_1 e^{\frac{-t}{T'_d}} + A_2 e^{\frac{-t}{T''_d}} \cos \omega_k t; \quad i_q = B e^{\frac{-t}{T''_d}} \sin \omega_k t,$$

где $T'_d = \frac{1}{\alpha_3}$; $T''_d = T_{d0} \frac{X'_d}{X_d}$.

По значениям i_d и i_q находятся фазные токи и по формуле $M = I_d \Psi_q - I_q \Psi_d$ – вращающий момент. Однако необходимо учесть, что при наличии демпферных обмоток на роторе и эквивалентных им целей токи статора будут содержать еще слагающие вида

$$C e^{\frac{-t}{T'_d}}.$$

По значению i_q , i_d , Ψ_q , Ψ_d из выражения для вращающего момента можно найти с наибольшей точностью изменение скорости ротора машины (важно при расчетах устойчивости, асинхронного хода, режимов самосинхронизации, ресинхронизации, различных повторных включений и т.д.).

Контрольные вопросы

1. Уравнения Парка – Горева в операторном виде.
2. Уравнения потокосцеплений синхронной машины.
3. Операторные синхронные и переходные реактивности СМ.
4. Алгоритм исследования резких изменений режима работы СМ.
5. Решение системы уравнений СМ в операторном виде и установление характера переходного процесса.
6. Взаимосвязь между изменением скорости ротора и вращающим моментом.

7. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

7.1. Векторная диаграмма синхронной машины

Уравнения электрического состояния синхронного генератора в установившемся режиме на основании уравнений Парка – Горева (при $p = 0$) имеют вид

$$U_d = -\psi_q - ri_d; \quad U_q = \psi_d - ri_q. \quad (50)$$

С учетом соотношений для потокосцеплений

$$\psi_q = i_q X_q \quad \text{и} \quad \psi_d = E_q + i_d X_d \quad (51)$$

выражения для напряжений можно привести к виду

$$U_d = -i_q X_q - ri_d; \quad U_q = E_q + i_d X_d - ri_q, \quad (52)$$

После ввода фиктивной ЭДС $E_Q = E_q + i_d (X_d - X_q)$, получим

$$U_d = -i_q X_q - ri_d; \quad U_q = E_Q + i_d X_q - ri_q. \quad (53)$$

Запишем полученную систему уравнений в векторной форме, учитывая, что в принятой системе координат ось q является действительной осью, а ось d – мнимой. Умножая уравнение (52) на j и суммируя его с уравнением (53), получим

$$U_q + jU_d = E_Q - (r + jX_q)(i_q + ji_d) \quad \text{или} \quad \dot{U} = E_Q - \dot{I} Z. \quad (54)$$

Поскольку последнее выражение – это обобщенный закон Ома, то синхронную машину в установившемся режиме можно рассматривать как источник напряжения E_Q за полным сопротивлением Z .

Полученные уравнения аналогичны упрощенным уравнениям Парка – Горева, поэтому изображенная ниже векторная диаграмма (рис. 8) для активно-индуктивной нагрузки (I_d и U_d – отрицательны и направлены по отрицательной полуоси d) может быть использована не только при анализе установившегося режима, но и при анализе переходных режимов в той мере, в какой справедливы указанные упрощенные уравнения.

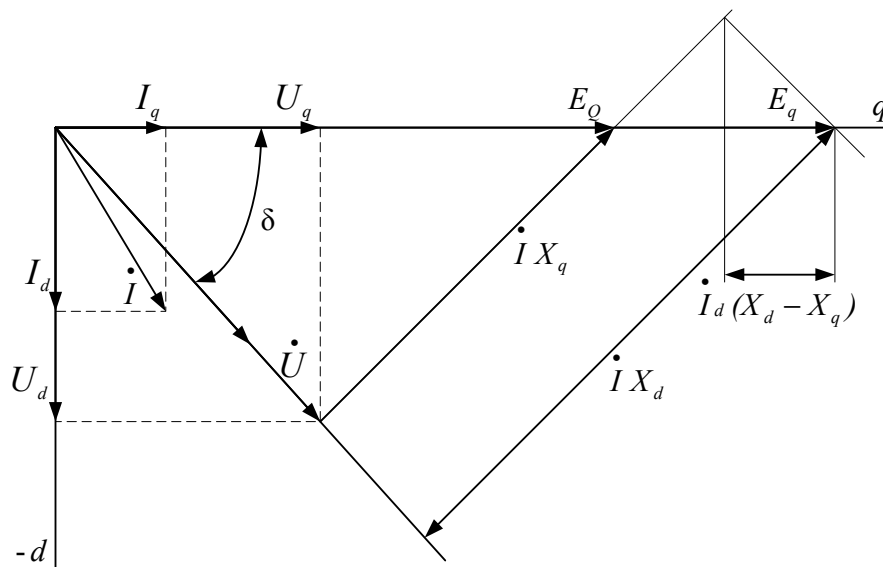


Рис. 8. Векторная диаграмма синхронной машины при активно-индуктивной нагрузке

7.2. Векторные диаграммы и соотношения между параметрами в простейшей электрической системе

В простейшей электрической системе, состоящей из генератора, работающего через сеть на шины неизменного напряжения и частоты, можно рассматривать два характерных случая:

- а) работа генератора с частотой, совпадающей с частотой сети ($\omega = \omega_0$);
- б) то же, но с частотой, отличной от частоты сети.

При синхронной работе генератора на систему через реактивность X_c или Z_c (рис. 9, а) интересующие нас характеристики могут быть получены с помощью векторных диаграмм представленных для неявнополюсной машины (турбогенератора) на рис. 9, б и явнополюсной машины (гидрогенератора) на рис. 9, в.

При приближенном анализе полагаем, что ЭДС холостого хода E_q пропорциональна току ротора и обе эти величины меняются мгновенно при мгновенном изменении режима. ЭДС E' обусловлена результирующим полным потоком сцепления обмотки возбуждения $\Psi_{рез}$, а ее поперечная составляющая E'_q остается неизменной в первый момент при любом резком изменении режима работы генератора. Не имеющая физического смысла пере-

ходная ЭДС E'_q , – чисто расчетная величина и позволяет в силу своей неизменности в момент резкого изменения режима связать состояние системы, предшествовавшее его нарушению, с новым состоянием, наступающим после нарушения. Фиктивная ЭДС E_Q позволяет искусственно ввести в схему замещения системы явнополюсную синхронную машину (гидрогенератор). В ряде случаев в качестве расчетной величины применяется поперечная составляющая напряжения генератора $U_{\Gamma q}$.

Отметим, что при выводе расчетных соотношений используется система относительных единиц, в которой в качестве базисных единиц приняты линейное напряжение и увеличенный в $\sqrt{3}$ раз линейный ток:

$$U_{\bar{6}} = U_{\text{л}}; \quad I_{\bar{6}} = \sqrt{3}I_{\text{л}}, \quad (55)$$

а выражения для закона Ома и мощности имеют вид $U = IZ$; $S = UI$.

Базисные значения мощности и сопротивления с учетом (55) определяются по формулам

$$P_{\bar{6}} = U_{\bar{6}}I_{\bar{6}} = U_{\text{л}}I_{\text{л}}\sqrt{3}; \quad Z_{\bar{6}} = \frac{U_{\bar{6}}}{I_{\bar{6}}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}I_{\text{л}}}. \quad (56)$$

Для получения расчетных соотношений косоугольный треугольник векторной диаграммы рис. 9 дополняется до прямоугольного, для которого справедливы соотношения

$$\begin{aligned} E_q \sin \delta &= I_a X_{d\Sigma}, \\ E' \sin \delta' &= I_a X'_{d\Sigma}, \\ U_{\Gamma} \sin \delta_c &= I_a X_c, \end{aligned} \quad (57)$$

где I_a – активная составляющая тока генератора (тогда $I_a X_{d\Sigma}$ – индуктивная, реактивная составляющая, опережающая ток I_a на угол 90° и т.д.); $I_a = I \cos \varphi$; $X_{d\Sigma} = X_d + X_c$; $X'_{d\Sigma} = X'_d + X_c$.

Решая записанные уравнения относительно тока I_a и подставляя его в выражение для активной мощности $P = UI_a$, получим выражения для отдаваемой генератором активной мощности через различные ЭДС:

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta; \quad P_{E'} = \frac{E' U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta'; \quad P_{U_{\Gamma}} = \frac{U_{\Gamma} U}{X_c} \sin \delta_c. \quad (58)$$

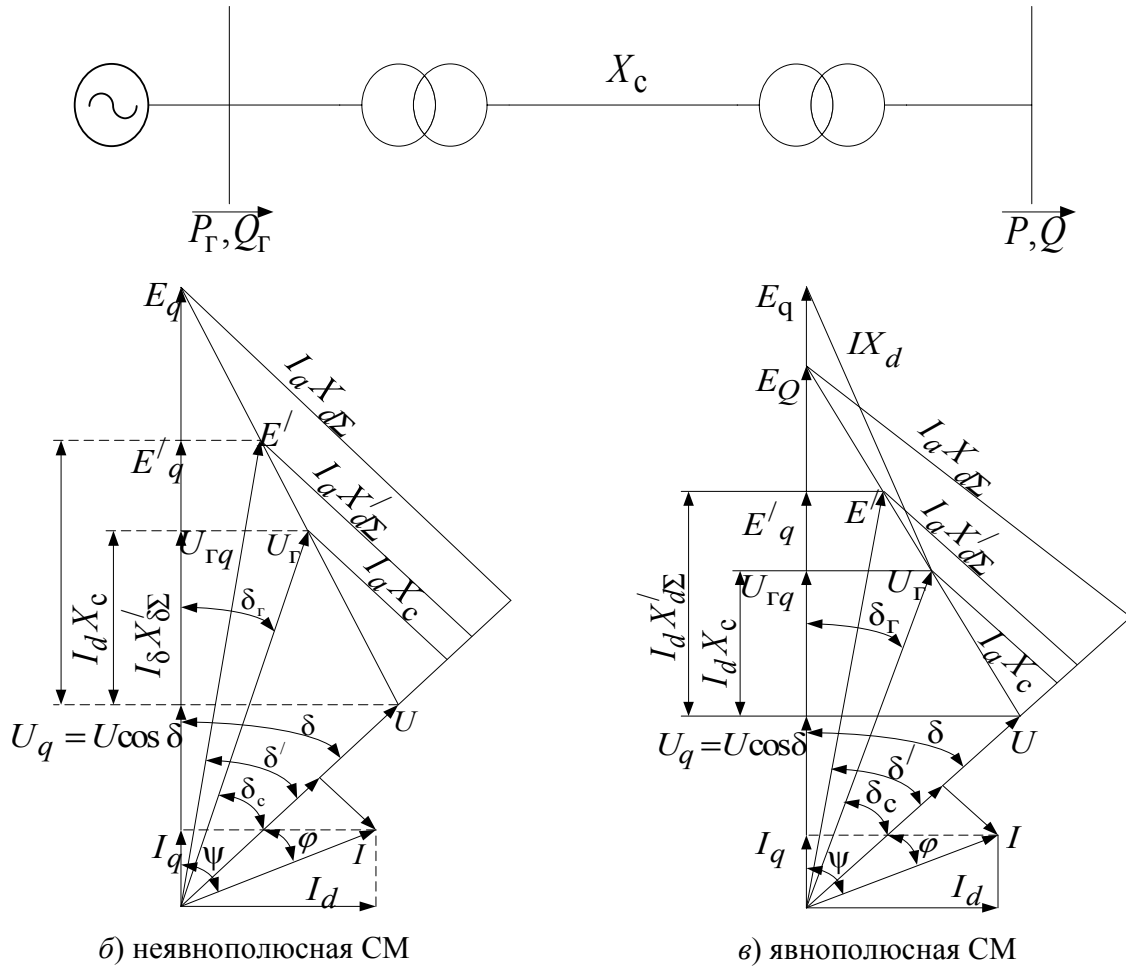


Рис. 9. Расчетные векторные диаграммы системы (а), состоящей из синхронной машины, связанной реактивным сопротивлением X_c с шинами неизменного напряжения

В общем случае для любой ЭДС E_X , приложенной за сопротивлением ΔX , активная мощность определяется по формуле

$$P_{EX} = \frac{E_X U}{X_c + \Delta X} \sin \delta_X. \quad (59)$$

По изменению угла δ , характеризующего положение ротора в пространстве и не изменяющегося скачком, определяют относительную механическую скорость и ускорение ротора:

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega; \quad \frac{d^2\delta}{dt^2} = \alpha. \quad (60)$$

Именно поэтому выражения мощности (вращающего момента), содержащие угол δ , являющегося определенной пространственной и механической координатой ротора, наиболее удобны при исследовании электромеханических переходных процессов. Углы δ' , δ_c , δ_Γ , δ_X отражают, главным образом, электромагнитный режим и могут изменяться скачком. Поэтому целесообразно получить выражения для активной мощности через любую ЭДС и угол δ . Для этого используют соотношения

$$\varphi = \psi - \delta; \quad P = UI \cos(\psi - \delta) = UI(\cos \psi \cos \delta + \sin \psi \sin \delta); \quad I_q = I \cos \psi;$$

$$I_d = I \sin \psi; \quad U_q = U \cos \delta; \quad U_d = U \sin \delta; \quad P = (U_q I_q + U_d I_d); \quad I_q = \frac{U \sin \delta}{X_{d\Sigma}};$$

$$I_d = \frac{E'_q - U \cos \delta}{X'_{d\Sigma}}; \quad I_d = \frac{U_{\Gamma q} - U \cos \delta}{X_c}; \quad I_d = \frac{E_{qx} - U \cos \delta}{X_c + \Delta X}. \quad (61)$$

Тогда, после преобразований, получим

$$P_{E'q} = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_d - X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma} X'_{d\Sigma}} \sin 2\delta;$$

$$P_{U_{\Gamma q}} = \frac{U_{\Gamma q} U}{X_c} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_d}{X_{d\Sigma} X_c} \sin 2\delta; \quad (62)$$

$$P_{E_{qx}} = \frac{E_{qx} U}{(X_c + \Delta X)} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_d - \Delta X}{X_{d\Sigma} (X_c + \Delta X)} \sin 2\delta.$$

Аналогично, по векторной диаграмме, находят выражения для реактивной мощности, отдаваемой генератором. Подставляя в выражение для внутренней реактивной мощности $Q_{Eq} = E_q I_d$ значение $I_d = \left(\frac{E_q - U \cos \delta}{X_{d\Sigma}} \right)$,

получим

$$Q_{Eq} = \frac{E_q^2}{X_{d\Sigma}} - \frac{E_q}{X_{d\Sigma}} U \cos \delta. \quad (63)$$

Реактивная мощность, выдаваемая генератором:

$$Q_\Gamma = U_\Gamma I_{p_\Gamma} = U_\Gamma \left(\frac{U_\Gamma - U \cos \delta_c}{X_c} \right) = \frac{U_\Gamma^2}{X_c} - \frac{U_\Gamma U}{X_c} \cos \delta_c. \quad (64)$$

Если подставить в выражение для Q_{Eq} значение тока

$$I_d = \frac{E_q - U_\Gamma \cos \delta_\Gamma}{X_d},$$

получим

$$Q_{Eq} = \frac{E_q^2}{X_d} - \frac{E_q U_\Gamma}{X_d} \cos \delta_\Gamma. \quad (65)$$

Из полученных выше выражений для мощности определим ЭДС:

$$E_q = \sqrt{\left(U_\Gamma + \frac{Q_\Gamma X_d}{U_d} \right)^2 + \left(\frac{P_\Gamma X_d}{U_\Gamma} \right)^2}. \quad (66)$$

Из векторной диаграммы также следует

$$\delta_\Gamma = \arctg \frac{P_\Gamma X_d}{U_\Gamma^2 + Q_\Gamma X_d}. \quad (67)$$

Поперечные составляющие переходной ЭДС E' и напряжения U_Γ определяются как проекции E' и U_Γ на направление вектора E_q :

$$E'_q = E \cos(\delta - \delta'); \quad U_{\Gamma q} = U_\Gamma \cos(\delta - \delta_c) = U_\Gamma \cos \delta_\Gamma; \quad U_q = U \cos \delta. \quad (68)$$

Для явнополюсной машины в векторную диаграмму системы необходимо ввести искусственную ЭДС E_Q , заменив E_q , кроме того, заменить X_d и $X_{d\Sigma}$ соответственно на X_q и $X_{q\Sigma}$. Тогда из векторной диаграммы на рис. 9, в следует

$$E_Q = \sqrt{\left(U_\Gamma + \frac{Q_\Gamma X_q}{U_\Gamma} \right)^2 + \left(\frac{P_\Gamma X_q}{U_\Gamma} \right)^2} = \sqrt{\left(U + \frac{Q X_{q\Sigma}}{U} \right)^2 + \left(\frac{P X_{q\Sigma}}{U} \right)^2}. \quad (69)$$

Формулы активной мощности в зависимости от вида ЭДС:

$$\begin{aligned} P_{Eq} &= \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta, \\ P_{Eq} &= \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta, \\ P_{Eq} &= \frac{E'_q U}{X'_{q\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X_q - X'_d}{X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta. \end{aligned} \quad (70)$$

Реактивная (внутренняя) мощность генератора

$$Q_{EQ} = \frac{E_Q^2}{X_{q\Sigma}} - \frac{E_Q U}{X_{q\Sigma}} \cos \delta = \frac{E_Q^2}{X_q} - \frac{E_Q U_\Gamma}{X_q} \cos \delta_\Gamma. \quad (71)$$

Реактивная мощность на шинах генератора

$$Q_\Gamma = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \cos \delta - \frac{U^2}{2} \frac{X_{d\Sigma} + X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \cos 2\delta, \quad (72)$$

$$Q_\Gamma = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \cos \delta - \frac{U^2}{2} \frac{X_{q\Sigma} + X'_{q\Sigma}}{X_{q\Sigma} X'_{q\Sigma}} + \frac{U^2}{2} \frac{X_q - X'_d}{X_{q\Sigma} X'_{d\Sigma}} \cos 2\delta. \quad (73)$$

Приведённые выше выражения реактивной мощности справедливы и для синхронного компенсатора (СК).

При наличии активного сопротивления цепи, связывающей генератор с шинами неизменного напряжения, значения токов I_d и I_q выразятся через ЭДС E_q аналогично (63):

$$I_d = \frac{(E_q - U \cos \delta) X_{q\Sigma} - U r \sin \delta}{r^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}}, \quad (74)$$

$$I_q = \frac{(E_q - U \cos \delta) r + U X_{d\Sigma} \sin \delta}{r^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}}. \quad (75)$$

Активные и реактивные мощности на шинах системы (в конце передачи)

$$P_{E_{qc}} = \frac{E_q U}{Z_{dq}^2} Z_q \sin(\delta + \alpha_q) - U^2 \frac{r}{Z_{dq}^2} + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{Z_{dq}^2} \sin 2\delta, \quad (76)$$

$$\begin{aligned} Q_{E_{qc}} &= \\ &= \frac{E_q U}{Z_{dq}^2} Z_q \cos(\delta + \alpha_q) - U^2 \frac{(X_{d\Sigma} + X_{q\Sigma})}{2 \cdot Z_{dq}^2} + \frac{U^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{Z_{dq}^2} \cos 2\delta, \end{aligned} \quad (77)$$

где $Z_{dq} = \sqrt{r^2 + X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}}$; $Z_q = \sqrt{r^2 + X_{q\Sigma}^2}$.

Выражения для мощностей через переходную ЭДС E'_q можно получить, заменяя в формулах (74) – (77) E_q на E'_q , X_d на X'_d , Z_d на Z'_d .

В схеме замещения простейшей системы при представлении генератора реактивностью X и электродвижущей силой E , где $E = E_q$, а $X = X_d$ – для неявнополюсной машины; $E = E_Q$ и $X = X_q$ – для явнополюсной машины, мощность определяется исходя из общих положений метода наложения:

$$\text{– в начале передачи } P_1 = \frac{E^2}{Z} \sin \alpha + \frac{EU}{Z} \sin(\delta - \alpha); \quad (78)$$

$$\text{– в конце передачи } P_2 = \frac{U^2}{Z} \sin \alpha - \frac{EU}{Z} \sin(\delta + \alpha); \quad (79)$$

$$\text{– в начале передачи } Q_1 = \frac{E^2}{Z} \cos \alpha - \frac{EU}{Z} \cos(\delta - \alpha); \quad (80)$$

$$\text{– в конце передачи } Q_2 = \frac{U^2}{Z} \cos \alpha - \frac{EU}{Z} \cos(\delta + \alpha), \quad \text{где } \alpha = \arctg \frac{r}{X}. \quad (81)$$

Отметим, что при связи генератора и системы через полное сопротивление $Z = r_c + jX_c$ действующее значение напряжения генератора U_Γ и фазный угол δ_c определяются через напряжение системы U и поступающие на ее шины активную и реактивную мощности P_c и Q_c по формуле

$$U_\Gamma = \sqrt{\left(U + \frac{P_c r_c + Q_c X_c}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_c X_c - Q_c r_c}{U} \right)^2}, \quad (82)$$

$$\operatorname{tg} \delta_c = \frac{P_c X_c - Q_c r_c}{U^2 + P_c r_c + Q_c X_c}.$$

Аналогично записывается выражение для фиктивной ЭДС E_Q :

$$E_Q = \sqrt{\left(U + \frac{P_c r_c + Q_c X_{q\Sigma}}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_c X_{q\Sigma} - Q_c r_c}{U} \right)^2}, \quad (83)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_c X_{q\Sigma} - Q_c r_c}{U^2 + P_c r_c + Q_c X_{q\Sigma}}.$$

При неявнополюсной машине (турбогенераторе) индексы q заменяются на d .

7.3. Характеристики режима простейшей системы при синхронной скорости вращения генератора

Угловые характеристики мощности СМ (зависимость активной мощности от угла δ), связанной с шинами неизменного напряжения, выраженные через различные ЭДС (формулы приведены выше), показаны на рис. 10. Отметим, что максимум мощности зависит от ЭДС, постоянство которой поддерживается и достигается при наибольшем значении угла δ при постоянстве $U_{Гq} = \text{const}$. Наличие активного сопротивления сдвигает характеристику мощности в начале передачи в сторону больших углов, а в конце передачи – в сторону меньших. Характеристики режима простейшей системы отображаются в виде функциональных зависимостей всех параметров (рис. 11), входящих в расчетные формулы мощности от значения активной мощности P .

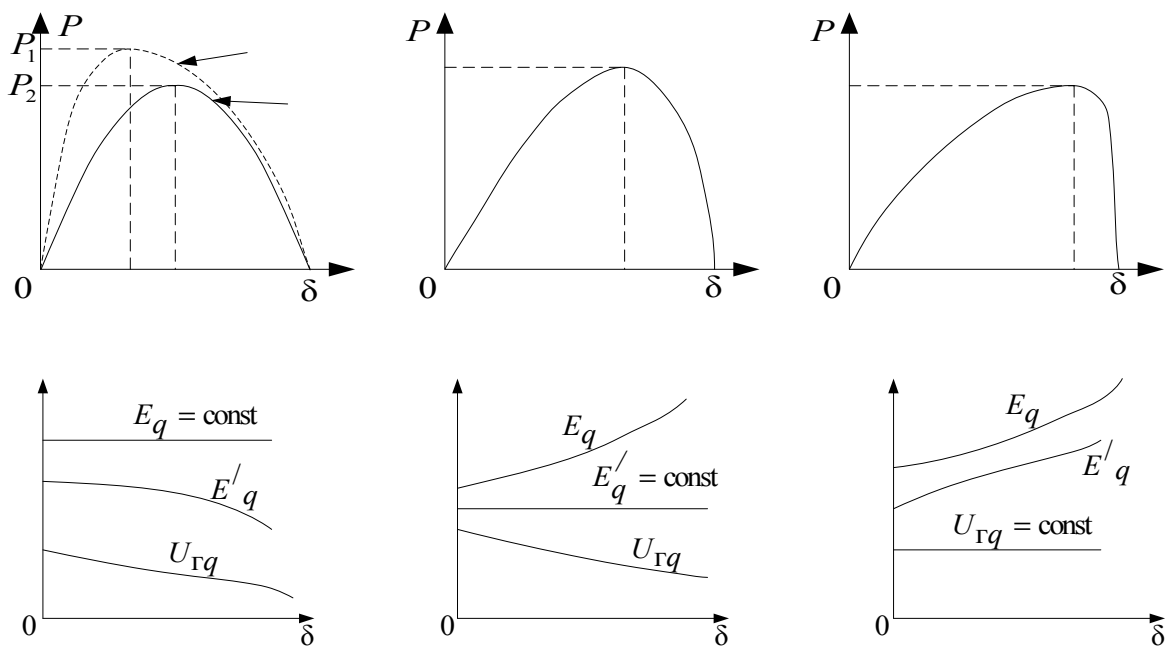


Рис. 10. Угловые характеристики СМ: а – при постоянстве ЭДС E_q (1 – для неявнополюсной СМ; 2 – для явнополюсной СМ); б – при $E'_q = \text{const}$; в – при $U_{Гq} = \text{const}$

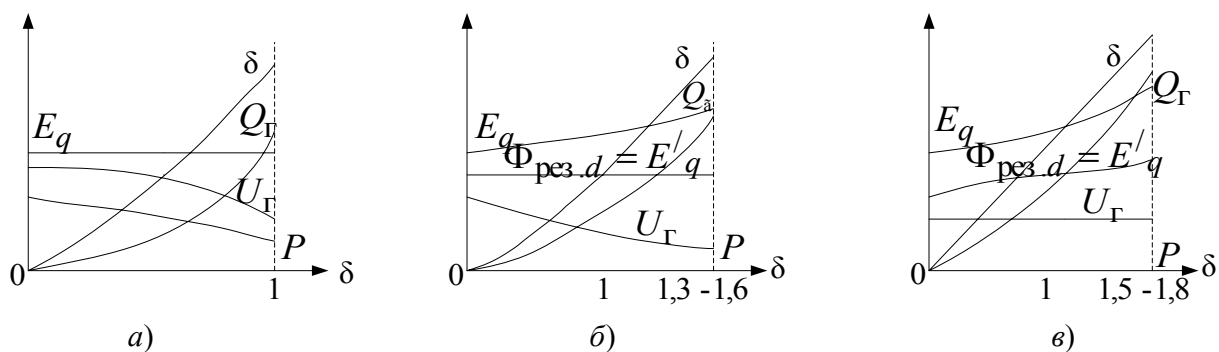


Рис. 11. Примерные характеристики режима электропередачи при длине линии 100÷300 км, напряжением 220 кВ: *а* – при $I_f = \text{const}$; *б* – при $U_{\Gamma} = \text{const}$; *в* – при $\psi_{\text{рез}} = \text{const}$

В генераторах, ток возбуждения которых не регулируется (см. рис. 10, *а*), ЭДС E_q при любых медленных изменениях нагрузки P остается постоянной. Если ток возбуждения регулируется так, чтобы поддержать постоянство $E'_q \equiv \psi_{\text{рез.}d}$, то предельное значение мощности примерно на 30÷60 % выше, чем в случае $I_f = \text{const}$ (см. рис. 10, *б*). В случае, отображенном на рис. 10, *в*, увеличение мощности достигло бы 50÷80 % по сравнению с $I_f = \text{const}$. Если с увеличением активной мощности регулировать ток возбуждения для поддержания постоянства напряжения генератора U_{Γ} , то на характеристике $P = f(\delta)$ точка режима будет скользить по кривой *а* – *е* (рис. 12). В зависимости от интенсивности регулирования тока возбуждения кривая *а* – *е* проходит либо выше, либо ниже. Например, при слабом регулировании это кривая *а* – *е'*.

Таким образом, из всех возможных характеристик режима выделяют три наиболее существенных:

1) **статическую характеристику** – при изменении режима остается постоянным ток возбуждения, что имеет место только при медленных изменениях режима нерегулируемой СМ;

2) **условно динамическую характеристику**, получаемую при постоянстве переходной ЭДС ($E'_q = \text{const}$), соответствующую постоянству результирующего потокосцепления обмотки возбуждения по продольной оси.

Эта характеристика имеет место в синхронной машине, автоматические

регуляторы тока возбуждения (АРВ) которой настроены на поддержание постоянства переходной ЭДС E'_q . При переходном процессе приближенно считают ($E'_q = \text{const}$), в течение $0,1 \div 0,2$ с (интервал времени срабатывания защиты). Отметим, что подобная характеристика может быть получена и при достаточно медленных изменениях режима с АРВ. Разница статической и динамической характеристик видна из рассмотрения рис. 13;

3) **характеристику, отвечающую постоянству напряжения на зажимах генератора ($U_\Gamma = \text{const}$)**, что может быть обеспечено таким сильным регулированием тока возбуждения, которое полностью компенсировало бы изменение реакции якоря при изменении режима работы генератора.

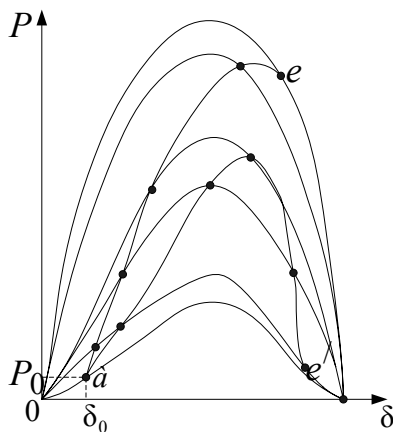


Рис. 12. Траектория точки режима при регулировании

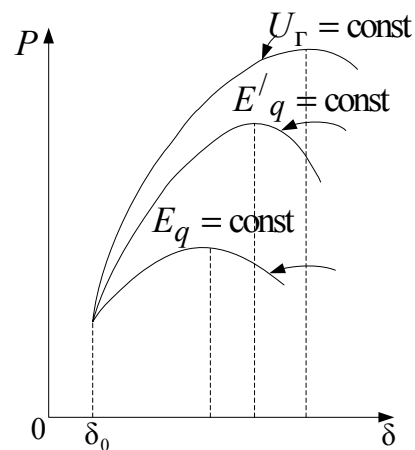


Рис. 13. Графики статических и динамических характеристик

Рассмотренные выше характеристики и соответствующие им пределы мощности (*идеальный предел мощности* для генератора без системы автоматического регулирования возбуждения и *действительный или внутренний предел мощности* для генераторов с АРВ) определялись в предположении, что система, принимающая мощность, представлена шинами неизменного напряжения ($U = \text{const}$). Это справедливо только в случае значительного превосходства мощности приемной системы над мощностью передающей станции. При соизмеримых мощностях напряжение не будет постоянным, а с увеличением передаваемой по шинам мощности будет снижаться, в связи с чем в действительности величина предела мощности будет меньше.

Ход кривой $a - e$ на рис. 12 зависит как от снижения напряжения на

шинах приемной стороны, так и от регулирующего эффекта нагрузки, под которым понимают изменение активной и реактивной мощностей, потребляемых нагрузкой, при изменении напряжения на ее шинах. Отметим, что на изменение напряжения при росте передаваемой мощности наиболее заметно влияет регулирующий эффект по реактивной мощности, что очевидно из векторных диаграмм на рис. 14 (в отличие от активной мощности, больше влияющей на изменение частоты и гораздо слабее на напряжение).

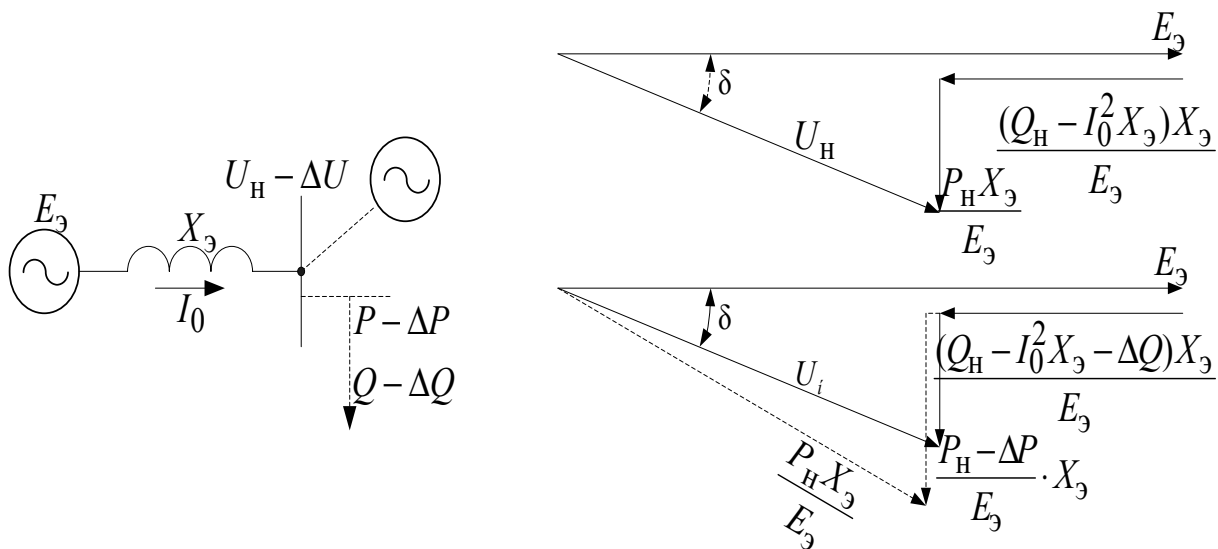


Рис. 14. Влияние изменений активной (ΔP) и реактивной (ΔQ) мощностей нагрузки на значение напряжения в конце линии (U_H)

7.4. Характеристики режима простейшей системы при несинхронной скорости вращения генератора

Схема простейшей системы, состоящей из синхронного генератора, ротор которого вращается с постоянной скоростью ω , отличной от синхронной, и шин неизменного по величине и частоте (ω_0) напряжения, показана на рис. 15, а векторная диаграмма системы на рис. 16. Предполагается, что начиная с некоторого значения угла $\delta = \delta_0$ скорость вращения вектора E изменяется и становится ω вместо ω_0 . Модуль вектора $E_\omega = E(\omega)$; угол $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$;

$\Delta\delta = -st\omega_0$, где $s = \frac{d\delta}{dt} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = 1 - \frac{\omega}{\omega_0}$ — скольжение.

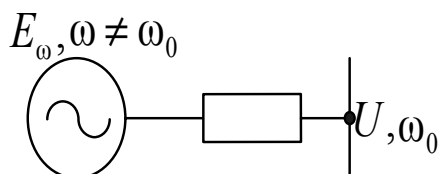


Рис. 15. Схема простейшей системы

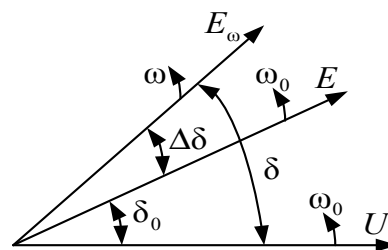


Рис. 16. Векторная диаграмма системы

Особенности этого несинхронного режима:

а) в синхронной машине и линии электропередачи циркулирует ток, имеющий слагающие двух частот ω и ω_0 (биения мгновенных значений результирующего тока на данном этапе анализа не учитываются);

б) синхронная машина одновременно приобретает свойства асинхронной, так как во всех короткозамкнутых обмотках ротора и эквивалентных им цепях появляются токи, обусловленные наличием скольжения;

в) появляются изменения параметров режима синхронной машины: ЭДС E_ω зависит от скольжения, а созданные этой ЭДС составляющие токов, имеющие частоту ω , проходят через реактивные сопротивления, изменяющиеся для этих токов в отношении ω/ω_0 и приобретающие новое значение $X_\omega = \omega X / \omega_0 = \omega X = (1 - s)X$.

Поставленная задача нахождения статических характеристик мощности при несинхронной работе синхронного генератора, сводящаяся к определению токов, мощностей и вращающих (электромагнитных) моментов, может быть решена тремя способами:

1) разделением рассматриваемой машины на две – синхронную и асинхронную (СМ и АМ). Синхронная машина связана с напряжением на шинах нагрузки U , работает с частотой ω , имеет ЭДС E_ω и развивает вращающий момент M_1 . Асинхронная машина присоединена к шинам напряжения U , работает со скольжением s и является в зависимости от его знака асинхронным двигателем или асинхронным генератором, развивающим момент $\pm M_2$, как это показано на рис. 17. При этом параметры асинхронной машины будут определяться всеми короткозамкнутыми витками ее ротора, а сопротивление

сети ($Z_{вн}$) в простейшем случае вводится в цепь статора каждой машины (предполагается, что внешнее сопротивление много меньше сопротивления генератора или при грубых расчетах первого приближения).

В первом способе выражения мощностей получают, используя схемы замещения и частотные характеристики машин и элементов системы, а токи каждой ветви по методу наложения;

2) второй способ сводится к определению дополнительных ЭДС, наводимых в каждой обмотке ротора, и нахождению некоторой новой ЭДС (E_q или E_Q), действующей в схеме замещения машины;

3) третий способ заключается в применении полных уравнений синхронной машины (уравнения Парка – Горева), позволяющих учесть все изменения скорости и обусловленные ими изменения ЭДС и моментов.

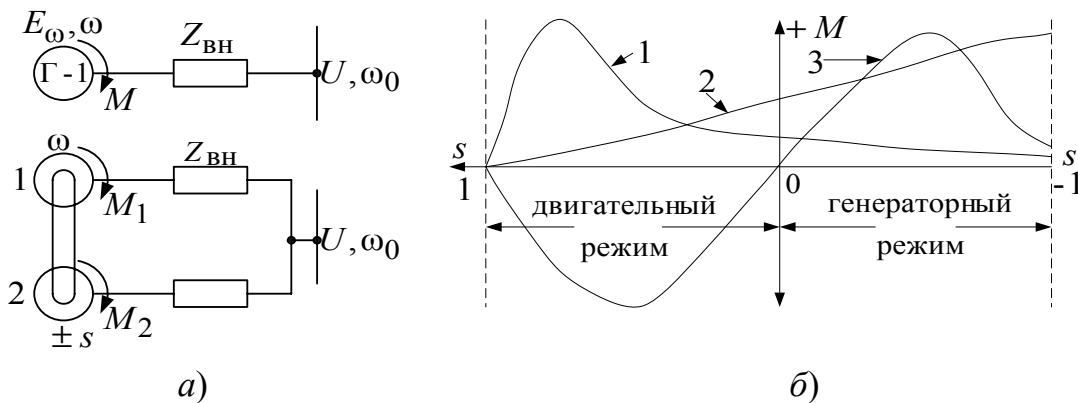


Рис. 17. К выводу упрощенного выражения вращающего момента при постоянном скольжении: *a* – представление СМ двумя машинами: СМ и АМ; *б* – собственный момент (1), взаимный момент (2), асинхронный момент (3)

Рассмотрим определение вращающих моментов по первому способу. Схема замещения синхронного генератора 1 показана на рис. 18.

Согласно методу наложения
$$\dot{I} = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{12} = \frac{\dot{E}_\omega}{\underline{Z}_\omega} - \frac{\dot{U}}{\underline{Z}},$$

где $\underline{Z} = r + jX$; $\underline{Z}_\omega = r + j\omega X = r + j(1-s)X$.

Полные мощности в начале и конце электропередачи:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_1 &= P_1 + jQ_1 = \dot{E}_\omega^* \dot{I}; \\ \dot{S}_2 &= P_2 + jQ_2 = \dot{U} \dot{I}^*. \end{aligned} \quad (84)$$

Поскольку наведенные токи в результате скольжения учтены в асинхронной машине, то условие равенства ЭДС $E_{\omega} = \omega E$ выполняется при независимом возбуждении.

Если возбудитель находится на одном валу с генератором, то справедливо соотношение $E_{\omega} = \omega^3 E$.

В общем случае выражение для несинхронной ЭДС принимает значение $E_{\omega} = \omega^n E$, тогда полную мощность можно оп-

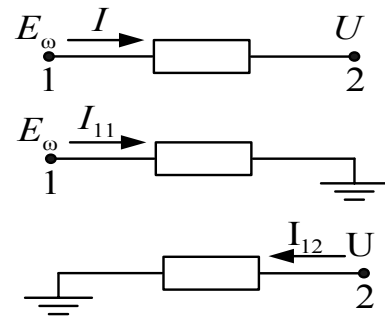


Рис.18. К определению моментов по первому способу

ределить по формуле $\tilde{S}_1 = \frac{\dot{E} E \omega^n}{Z}$.

Откуда $P_1 = \text{Re}(\tilde{S}_1) = \frac{E^2 \omega^2 r_{\omega}}{Z^2} + \frac{UE \omega^n}{Z} \sin(\delta_0 - st - \alpha),$ (85)

где $\alpha = \text{arctg} \frac{X}{r}$; $r_{\omega} = \frac{(r^2 + X^2)r}{r^2 + (\omega X)^2} \omega^{2n-2}$.

Вращающий момент генератора 1 (см. рис.17) в этом случае определяется по формуле

$$M_1 = \frac{P_1}{\omega} = \frac{E^2 (1-s)r_{\omega}}{Z^2} + \frac{EU(1-s)^{n-1}}{Z} \sin(\delta_0 - st - \alpha),$$
 (86)

где $\frac{E^2 (1-s)r_{\omega}}{Z^2} = M'_1$ – собственный момент, получаемый при взаимодействии обмотки ротора, питаемой ЭДС E и замкнутой на сопротивление обмотки статора.

При нулевом скольжении ($s = 0$) значение собственного момента M'_1 равно собственной мощности. Второе слагаемое M_1 называют взаимным моментом и при $s = 0$ он равен взаимной мощности.

Реактивная мощность в начале электропередачи

$$Q_1 = \frac{E^2 \omega^2}{Z^2} X_{\omega} - \frac{UE \omega^n}{Z} \cos(\delta_0 - st - \alpha), \quad (87)$$

где
$$X_{\omega} = \frac{(r^2 + X^2) \omega X}{r^2 + (\omega X)^2}.$$

В конце передачи значения активной и реактивной мощностей

$$P_2 = \operatorname{Re}(\overline{S_2}) = \frac{EU}{Z} \sqrt{\frac{1 + \rho^2}{(1-s)^2 + \rho^2}} \omega^2 \sin(\delta_0 - st + \alpha_{\omega}) - \frac{U^2}{Z} \sin \alpha; \quad (88)$$

$$Q_2 = \operatorname{Im}(\overline{S_2}) = \frac{EU}{Z} \sqrt{\frac{1 + \rho^2}{(1-s)^2 + \rho^2}} \omega^n \cos(\delta_0 - st + \alpha_{\omega}) - \frac{U^2}{Z} \cos \alpha; \quad (89)$$

где $\rho = \frac{r}{X}; \quad \alpha_{\omega} = \operatorname{arctg} \frac{r}{\omega X}.$

Разность активных мощностей в начале и конце передачи при непрерывном изменении положения и величины вектора E_{ω} оказывается не равна потерям мощности в активном сопротивлении:

$$P_1 - P_2 = I^2 r \pm \Delta \varphi(s), \quad (90)$$

где $\Delta \varphi(s)$ – дополнительные потери, связанные со скольжением.

Значение вращающего момента M_2 , развиваемого условно выделенной второй машиной, которую при отрицательном скольжении считаем генератором, а при положительном – двигателем, зависит от параметров схемы замещения эквивалентного асинхронного двигателя. Если на роторе генератора Г-1 имеется только одна равномерно распределенная обмотка, то вращающий момент можно определить по формуле

$$M_2 = -\frac{sU^2 r}{r^2 + (sX_1)^2} = -\frac{sU^2 \frac{X_1}{r}}{X_1 \left[1 + \left(\frac{X_1 X}{r} \right)^2 \right]}, \quad (91)$$

где X_1 и r – параметры схемы замещения асинхронного двигателя, включающие внешнее сопротивление $Z_{\text{вн}}$.

Переходя от параметров выделенного асинхронного двигателя к параметрам, характеризующим синхронный генератор и вводя постоянную времени асинхронного двигателя T'_d получим выражение вращающего момента:

$$M_2 = \frac{U^2(X_d - X'_d)}{X'_d X_d} \frac{sT'_d}{1 + (sT'_d)^2}, \quad (92)$$

где $\frac{X_1}{r} = T'_d$; $X_1 = \frac{X'_d X_d}{X_d X'_d}$.

Тогда результирующий вращающий момент на валу генератора Г-1

$$M = M_1 + M_2 = \frac{E^2(1-s)}{Z^2} r_\omega + \frac{EU(1-s)^{n-1}}{Z} \sin(\delta_0 - st - \alpha) - \frac{U^2(X_d - X'_d)}{X'_d X_d} \frac{sT'_d}{1 + (sT'_d)^2}. \quad (93)$$

При неизменном токе возбуждения $I_f = \text{const}$ и значении ЭДС $E = E_q$ – это выражение статической характеристики. Если ЭДС является функцией времени $E = f(t)$, то это динамическая характеристика, для которой значение ЭДС E определяется из уравнений, отражающих начальные условия.

Контрольные вопросы

1. Упрощенные уравнения Парка – Горева и векторные диаграммы СМ.
2. Векторная диаграмма явнополюсной СМ.
3. Векторная диаграмма неявнополюсной СМ.
4. Выражение мощности на шинах генератора через различные ЭДС.
5. Выражение мощности на шинах нагрузки (в конце передачи).
6. Угловые характеристики СМ для различных режимов.
7. Характеристики режима системы.
8. Статические характеристики мощности системы.
9. Условно динамические характеристики мощности системы.
10. Регулирующий эффект нагрузки.
11. Несинхронный режим СМ в простейшей системе.
12. Способы нахождения статических характеристик мощности при несинхронном режиме.

13. Влияние скольжения СМ на баланс активных мощностей в системе.

14. Условия взаимосвязи статических и динамических характеристик с вращающим моментом генератора при несинхронной скорости.

8. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Сложную систему можно представить совокупностью синхронных машин (генераторов, двигателей, компенсаторов), оснащенных различными регуляторами и соединенных линиями электропередачи и сетями с присоединенными в различных точках комплексными нагрузками, потребляемая мощность которых в общем случае зависит от напряжения. Особенность анализа сложной системы – взаимозависимость направлений потоков мощности от каждой станции с положениями векторов ЭДС каждого генератора, однозначно определяемыми положением его ротора.

При очень медленном изменении режима одного элемента или нескольких элементов (при практически неизменной частоте вращения роторов синхронных машин), а также для какого-то одного момента времени переходного процесса получение статических характеристик возможно по методу наложения. Для этого достаточно синхронную машину представить некоторыми постоянными сопротивлениями с приложенными за ними ЭДС, а асинхронные двигатели нагрузки – некоторыми пассивными элементами. Однако упрощенное представление иногда применяют и для достаточно больших интервалов времени переходного процесса.

8.1. Характеристики сложной линейной системы при одинаковой скорости всех машин ($\omega = \omega_0$)

В этом случае любая сложная система представляется схемой, аналогичной схеме на рис. 19, и далее по методу наложения определяются частичные токи от каждого источника ЭДС. Например, ток первой генерирующей ветви можно определить, рассчитав предварительно собственный и взаимные токи от всех остальных генерирующих ветвей. Входные и взаимные проводимости проще всего определить по методу контурных токов. При этом необходимо, чтобы ветви, взаимные и входные проводимости которых используют в расчете, входили бы каждая только в свой контур. Далее находят оп-

ределитель системы уравнений Δ и по нему необходимые алгебраические дополнения и, используя правило Крамера, рассчитывают искомые проводимости:

$$Y_{nn} = \Delta_{nn} / \Delta; \quad Y_{nm} = \Delta_{nm} / \Delta.$$

С учетом изложенного для тока первой ветви можно записать $\dot{I}_1 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{12} - \dot{I}_{13} - \dot{I}_{14} - \dots - \dot{I}_{mn} \dots - \dot{I}_{1k}$, где $\dot{I}_{11} = \dot{E}_n Y_{nn}$ – собственный ток, $\dot{I}_{nm} = \dot{E}_m Y_{nm}$ – взаимные токи, Y_{nn} – собственная проводимость, Y_{nm} – взаимная проводимость.

При применении способа единичных токов предполагают, что в ветви n расчетной схемы замещения приложена некая ЭДС ΔE_n , величина и фаза которой таковы, что в ветви K от действия только этой ЭДС протекает ток $\dot{I}_{kn} = 1$. Тогда падение напряжения в этой ветви, обусловленное током \dot{I}_{kn} , будет $\Delta \dot{U}_k = \dot{I}_{kn} \underline{Z}_k$. Далее находят токи и напряжения во всех ветвях и в конечном счете ток \dot{I}_{nn} и ЭДС $\Delta \dot{E}_n$. При этом взаимная проводимость равна $Y_{kn} = \frac{1}{\Delta} \dot{E}_n$, а собственная проводимость – $Y_{nn} = \dot{I}_{nn} / \Delta \dot{E}_n$. Записывая ком-

плекс полной мощности как $\tilde{S}_i = \dot{E}_i I_i^*$, получим выражения для активной и реактивной мощностей источника i -й ветви:

$$\begin{aligned} P_i &= E_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_j E_i E_j y_{ij} \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij}); \\ Q_i &= E_i^2 y_{ii} \cos \alpha_{ii} + \sum_j E_i E_j y_{ij} \cos(\delta_{ij} - \alpha_{ij}); \end{aligned} \quad (94)$$

где $y = \sqrt{g^2 + e^2}$; $\alpha = \pm \arctg \frac{g}{e}$.

Продольная и поперечная (собственно сдвинутая на 90° по отношению к E_1 и совпадающая с ней) составляющие тока в какой-либо (например первой) ветви:

$$I_{d1} = E_1 y_{11} \cos \alpha_{11} - E_2 y_{12} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}) - \dots - E_k y_{1k} \cos(\delta_{1k} - \alpha_{1k}); \quad (95)$$

$$I_{q1} = E_1 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_2 y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \dots + E_k y_{1k} \sin(\delta_{1k} - \alpha_{1k}); \quad (96)$$

$$\text{Полный ток ветви} \quad I_1 = \sqrt{I_{d1}^2 + I_{q1}^2}.$$

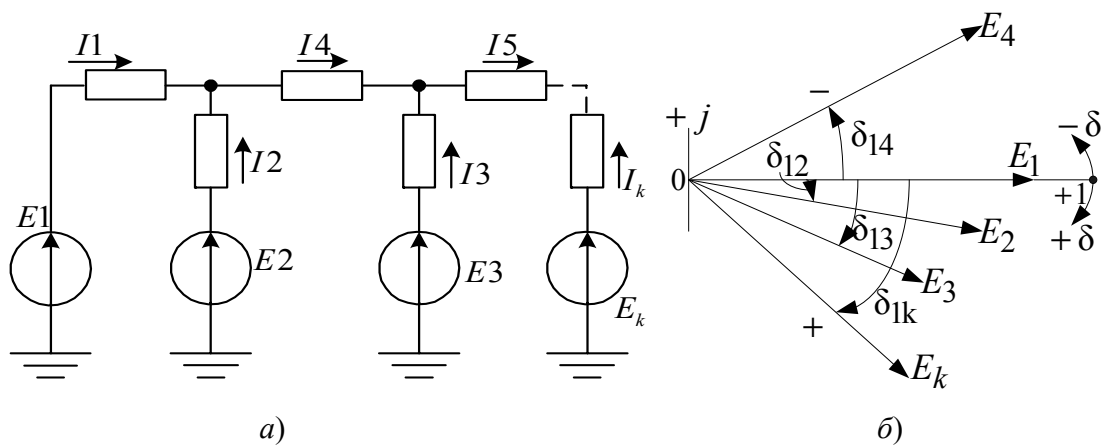


Рис. 19. Сложная электрическая система: *а* – схема замещения системы; *б* – векторная диаграмма ЭДС генерирующих ветвей

В первом, грубом приближении при резком изменении режима можно получить динамические характеристики, вводя в схемы замещения машин ЭДС E'_q вместо E_q . Более точные динамические характеристики будут рассмотрены ниже (учитывающие изменение ЭДС и изменение сопротивлений, изображающих нагрузку) с использованием метода последовательных интервалов.

8.2. Характеристики сложной линейной системы при неодинаковой скорости машины ($\omega \neq \omega_0$)

В сложной системе с произвольным числом станций некоторые из них, например n, k, l, g (рис. 20), работают со скоростями, отличными от синхронной. Мощность этих станций меньше мощности синхронно работающих частей системы. Задача получения характеристик $I = \varphi(\delta, s)$; $P = f(\delta, s)$; $Q = \psi(\delta, s)$ аналогична рассмотренным выше. При этом токи и мощности не синхронно работающих машин разделим на составляющие:

- обусловленные действием ЭДС, зависящих от возбуждения (синхронные машины);
- обусловленные асинхронными свойствами машин, работающих с не-синхронной скоростью (асинхронные машины).

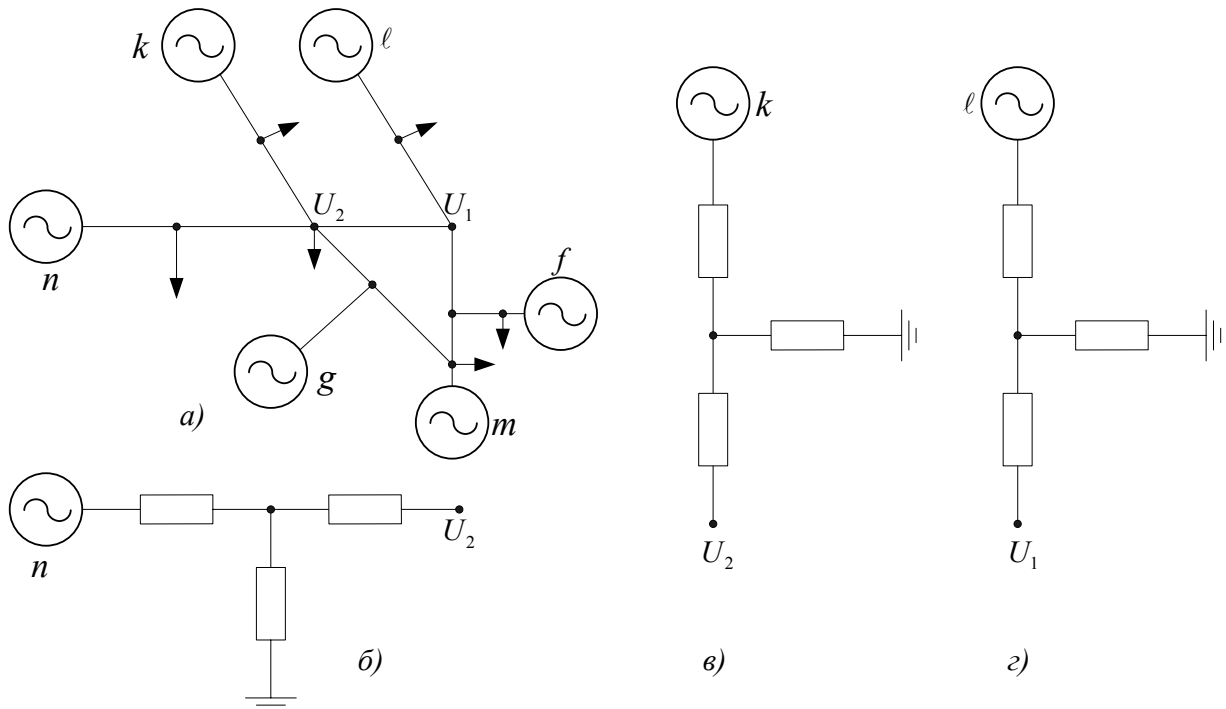


Рис. 20. Схема сложной системы (а) и выделение из нее подсистем (б, в, г), содержащих узловые точки, напряжения в которых условно принимаются неизменными

Далее для синхронных машин собственные и взаимные составляющие тока, которые определяются действием несинхронных ЭДС, определяют при учете изменений скорости. Например, в общем случае можно записать

$$\dot{I}_{nn} = (\dot{E}_{\omega})_n (Y_{nn})_{\omega}; \quad \dot{I}_{nm} = \dot{E}_m Y_{nm}; \quad \dot{I}_{nk} = (\dot{E}_{\omega})_k (Y_{nk})_{\omega}, \quad (97)$$

где $(\dot{E}_{\omega})_n$ – ЭДС, действующая в ветви n , определенная с учетом изменений скорости $(\dot{E}_{\omega})_n = \dot{E}_n \omega^{n_n}$ (n_n – характеризует влияние изменений скорости на данную ЭДС); $(Y_{nn})_{\omega}$ и $(Y_{nk})_{\omega}$ – собственная и взаимная проводимости, определенные с учетом изменения частоты.

Аналогично изложенному выше для тока и полной мощности получим

$$(\dot{I}_n)_{\omega} = \dot{I}_{nn} - \dot{I}_{nm} - \dot{I}_{nk} - \dot{I}_{nl} - \dot{I}_{ng} - \dot{I}_{nf}; \quad (98)$$

$$\tilde{S}_n = (\dot{E}_{\omega})_n (I_{\omega})_n^* = (P_{\omega})_n + j(Q_{\omega})_n. \quad (99)$$

Для приближенного определения асинхронных составляющих токов и мощности в схеме системы выделяются некоторые точки, напряжения которых можно условно считать неизменным. Если в схеме рис. 20, а выделить

напряжения U_1 и U_2 , то необходимо рассмотреть три подсхемы, для каждой из которых проводится расчет по формуле

$$M_2 = -\frac{U^2(X_d - X'_d)}{X'_d X_d} \cdot \frac{sT'_d}{1 + (sT'_d)^2}, \quad (100)$$

где вместо U подставляем U_1 либо U_2 при определении активной мощности $P_2 = \omega M_2$ и постоянной времени $T'_d = \frac{X_1}{r}$.

Повторением расчетов добиваются баланса активных и реактивных мощностей в узловых точках.

8.3. Статические характеристики нелинейной системы

В нелинейной системе построение любых характеристик может выполняться только методом подбора (численные методы). Например, для системы по схеме рис. 21 при заданных статических характеристиках нагрузок H_1 и H_2 построение характеристики генератора $P_1 = f(\delta)$ можно выполнить по методике, изложенной ниже.

Пусть ЭДС E_{q0} задана и является постоянной величиной независимо от режима система. Статические характеристики нагрузки заданы функциональными зависимостями:

$$P_{H1} = f(U_1); \quad Q_{H1} = \varphi(U_1); \quad P_{H2} = f(U_2); \quad Q_{H2} = \varphi(U_2). \quad (101)$$

Задавая значение активной мощности $P_3 = a$ и рядом значений $Q_3 = b$ по формуле (рис. 22), находим напряжение U_2 , соответствующее какому-либо значению Q_3 , и угол δ на этом участке. Затем по статическим характеристикам нагрузки H_2 определяем мощности P_{H2} и Q_{H2} , а после этого потоки мощности в электропередаче:

$$P_2 = P_3 + I_3^2 r_3 + P_{H2}; \quad Q_2 = Q_3 + I_3^2 X_3 + Q_{H2}. \quad (102)$$

Зная параметры режима в конце участка 2, находим по тем же формулам напряжение U_1 и угол δ на этом участке. Аналогично (102) определяем потоки мощности в конце первого участка, ЭДС генератора E_q и угол δ . Повторяя расчеты при различных значениях Q_3 , находим характеристику

$E_q = f(Q_3)$. Пересечение этой характеристики с линией $E_q = \text{const}$ указывает значение Q_3 , при которой режим системы при принятом значении $P_3 = a$ может существовать. По этим данным находим мощность P_1 и угол между ЭДС E_{q0} и напряжением U на шинах генератора (суммированием углов δ на участках 1, 2, 3). Таким образом, находится одна точка на характеристике $P_1 = f(\delta)$. Для получения следующих точек характеристики повторяем расчет при $P_3 = a_i$. Часть характеристики $P_1 = f(\delta)$, где $\frac{dP}{d\delta} > 0$, будет отвечать устойчивым режимам, а другая часть – неустойчивым режимам. Отметим, что вместо зависимости $E_q = f(Q_3)$ можно построить зависимость $E_q = f(P_3)$ или другие зависимости.

Один из возможных алгоритмов построения статических характеристик нелинейной системы будет иметь вид, показанный рис. 22.

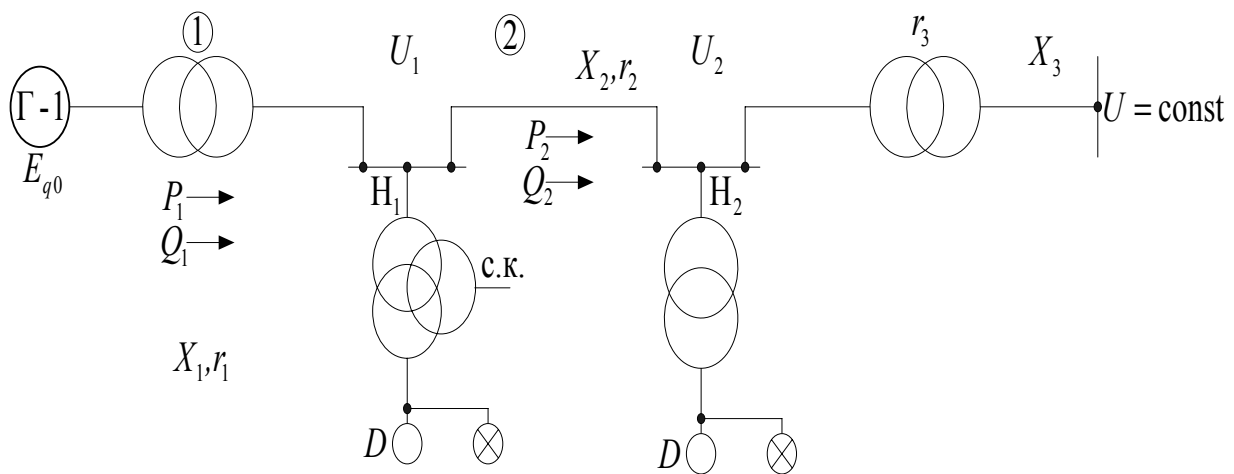


Рис. 21. Схема нелинейной системы

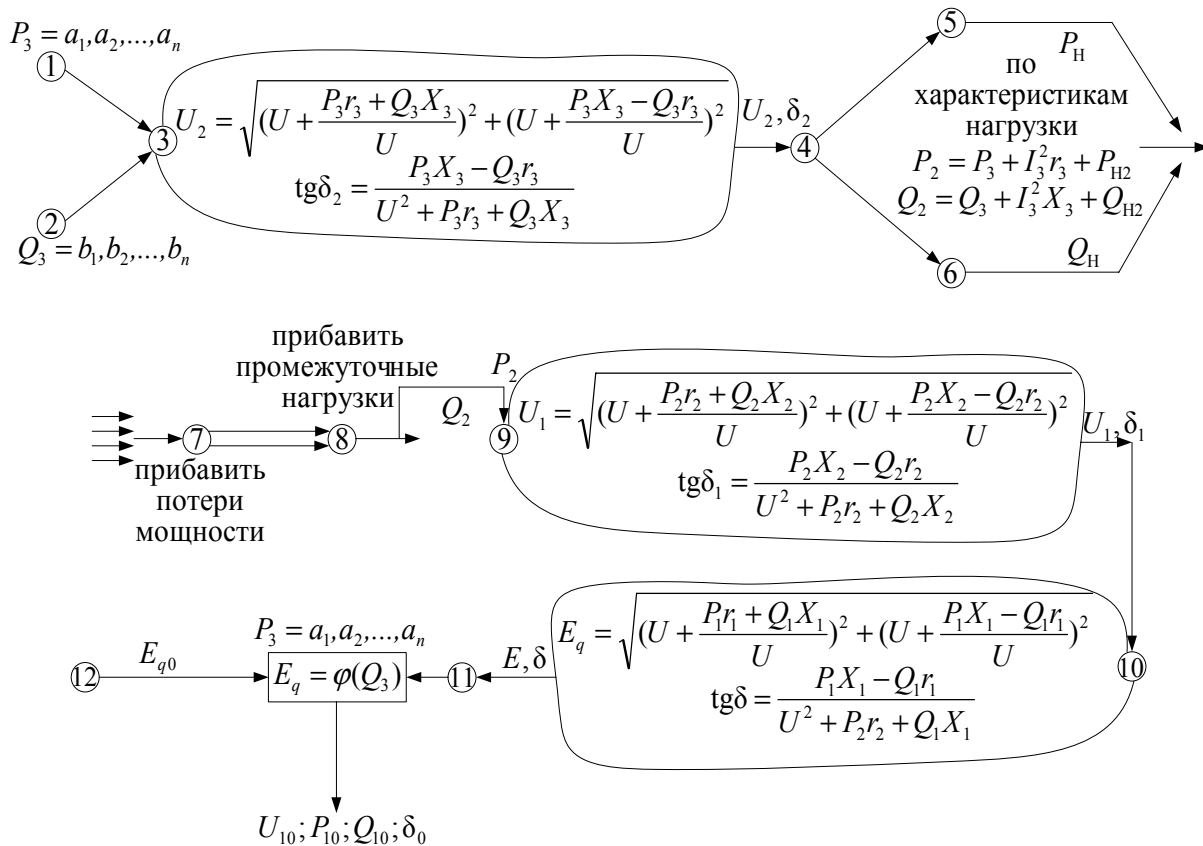


Рис. 22. Блок-схема алгоритма расчета устойчивости нелинейной системы

8.4. Максимальные и предельные нагрузки

С учетом изложенного выше можно определить наибольшие (максимальные) значения токов, мощностей и напряжений в каком-либо элементе системы. Так из формулы $P_{Ex} = \frac{E_X U}{X_e + \Delta X} \sin \delta_x$ следует, что *максимальная мощность электропередачи*, представленной в схеме замещения чисто реактивным сопротивлением X (рис. 23),

$$P_{m.l} = \frac{U_1 U_2}{X} \quad \text{при максимальном значении угла } \delta_m = 90^\circ. \quad (103)$$

При представлении той же линии полным сопротивлением Z , *максимальная мощность, определенная по генераторному концу*, определится по формуле

$$P_1 = \frac{E^2}{Z} \sin \alpha + \frac{EU}{Z}, \quad \text{при значении угла } \delta_m = 90^\circ + \alpha. \quad (104)$$

Если линия в расчетной схеме представлена четырехполюсником с параметрами A, B, C, D , то максимальная мощность линии

$$P_{m.л} = \frac{U_1^2 D}{B} \cos(\psi_B - \psi_D) + \frac{U_1 U_2}{B}, \quad \text{при } \delta_m = 90^\circ + \psi_B. \quad (105)$$

Полученные значения максимальной мощности относятся только к свойству передачи энергии переменным током и не связаны с нагревом проводов, изменением напряжения и т.д. При учете сопротивления генераторов максимальная мощность электропередачи оказывается меньше P_m за счет роста сопротивления $z = z_{л} + r_{Г} + jx_{Г}$, т.е.:

$$P_m > P = \frac{E^2}{z} \sin \alpha + \frac{EU_2}{z}. \quad (106)$$

Максимальную мощность электропередачи можно сделать равной максимальной мощности линии, если АРВ генераторов настроено на поддержание постоянства напряжения в начале передачи при изменениях нагрузки. В системе электропередачи, имеющей пассивные нагрузки, максимальная мощность генератора

$$P_m = E^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + EU_2 y_{12}, \quad \text{при } \delta_m = \delta + \alpha_{12} = 90^\circ. \quad (107)$$

Для характеристики электропередачи по температурным параметрам проводов, контактов, изменения напряжения вводят понятие **предельной нагрузки**, из которой следует ограничение по нагреву, по короне и т.п. (ограничиваются величины мощности, тока статора, тока возбуждения значениями, установленными по условиям нормальной работы мощности). При этом время действия предельной нагрузки ограничено.

Кроме этого вводят понятие **пропускной способности** элемента системы (линии, трансформатора, реактора и т.д.), определяя ее как ту наибольшую мощность, которую с учетом всех факторов (устойчивость, нагрев и т.д.) можно передать через данный элемент. Предельные мощности различных вариантов электропередачи показаны на рис. 24.

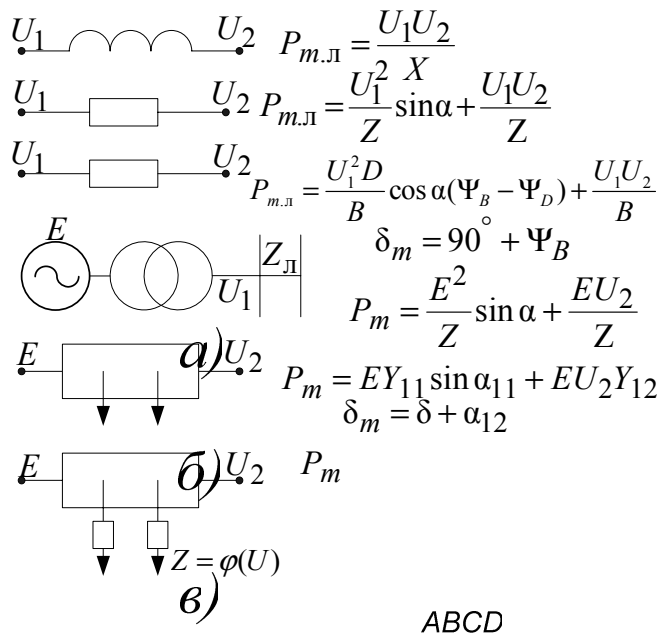


Рис. 23. Схемы замещения электропередачи

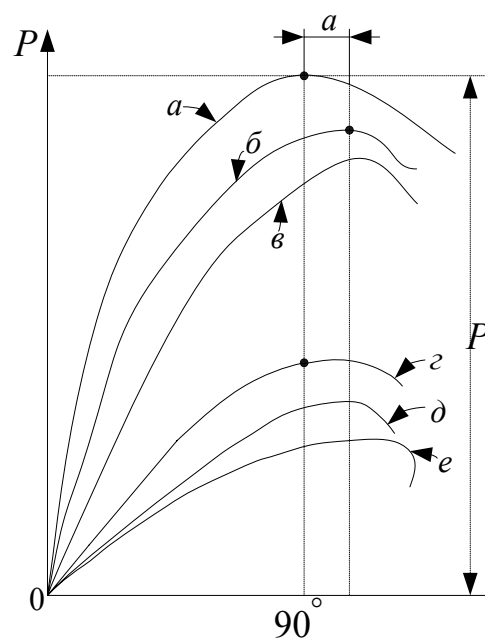


Рис. 24. Предельные мощности различных вариантов электропередач

г)

Контрольные вопросы

1. Задачи анализа сложной электрической системы при переходных режимах. д)
2. Исследование сложной электрической системы при синхронной частоте.
3. Метод единичных токов при исследовании распределения токов в ветвях электрической системы.
4. Исследование сложной электрической системы при неравномерной скорости синхронных машин. е)
5. Расчет асинхронных составляющих токов и мощностей сложной электрической системы при неравномерной скорости синхронных машин.
6. Алгоритм расчета статических характеристик нелинейной электрической системы.
7. Максимальная мощность в конце электропередачи.
8. Максимальная мощность электропередачи по генераторному концу.
9. Пропускная способность электропередачи в зависимости от принятой расчетной схемы замещения.

опр. по алгоритму

раздела 9.3

9. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ВИДЫ ЕЁ НАРУШЕНИЯ

При рассмотрении простейшей системы, состоящей из станции, связанной линией передачи (линиями, сетью) с шинами неизменного напряжения ($U = \text{const}$; $\omega = \omega_0 = \text{const}$), полагаем, что все нагрузки представлены постоянными комплексными сопротивлениями, а электромагнитный момент генератора получает малые изменения в соответствии с малыми отклонениями ротора от положения равновесия, и вращающий момент первичного двигателя (турбины) остается при этом неизменным.

9.1. Упрощенный анализ статической устойчивости нерегулируемой системы

Полагая, что скорость изменения положения ротора $d\delta/dt$ незначительна, принимаем равенство механического и электромагнитного моментов соответствующим мощностям и при этом пренебрегаем асинхронным моментом, который появляется при наличии скольжения $d\delta/dt \neq 0$, а также свободными составляющими токов в обмотке возбуждения (появляющимися при любом изменении режима).

Характеристика зависимости активной мощности генератора $P = f(\delta)$ при принятых допущениях имеет вид, показанный на рис. 25 для случая $E = E_q$; $I_f = \text{const}$. В этом случае угловую характеристику мощности генератора в окрестностях рабочей точки a с достаточной степенью точности можно считать линейной, т. е. приращения активной мощности пропорциональны приращению угла $\Delta P = \Delta\delta \cdot \text{tg}\epsilon$.

Наклон линии $a_1 - a_2$ определяется производной $\frac{\partial P}{\partial \delta} = \text{tg}\epsilon$. Тогда уравнение свободно-

го движения ротора для малых возмущений (малых отклонений угла $\Delta\delta$) имеет вид

$$T_j \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} = -\Delta P = -\Delta\delta \frac{\partial P}{\partial \delta}, \quad (108)$$

где $\Delta P = P - P_T$.

Так как $P = f(\delta)$, то $\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{dP}{d\delta} = C_1$, где C_1 –

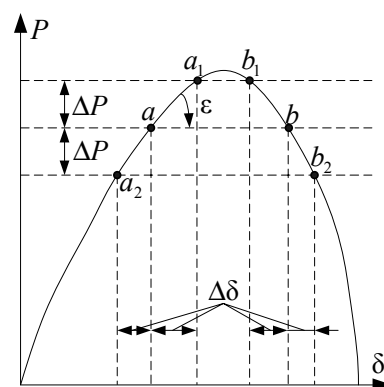


Рис. 25. Малые отклонения от положения равновесия

синхронизирующая мощность.

Представляя выражение (108) в операторном виде и используя замену $p = d/dt$, получим

$$T_j p^2 \Delta\delta + C_1 \Delta\delta = 0,$$

откуда приращение угла
$$\Delta\delta = \frac{0}{T_j p^2 + C_1}. \quad (109)$$

Отличное от нуля решение будет при условии, что $T_j p^2 + C_1 = 0$. Корни характеристического уравнения $p_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{-C_1}{T_j}}$. Для случая $C_1 > 0$ оба корня будут мнимыми, а для случая $C_1 < 0$ – действительными. При положительной синхронизирующей мощности ($C_1 > 0$) процесс имеет вид незатухающей синусоиды (рис. 26, а) и характеризуется уравнением

$$\Delta\delta = A_1 \sin \gamma t + A_2 \cos \gamma t = A_0 \sin(\gamma t + \psi) = A_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t + \psi\right), \quad (110)$$

где $\gamma = \sqrt{\frac{C_1}{T_j}}$; $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{T_j}{C_1}}$; $A_0 = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$; $\psi = \text{arctg} \frac{A_2}{A_1}$.

В действительности из-за наличия демпфирования и потерь на трение незатухающие колебания превратятся в затухающие, т.е. система будет устойчивой, а в качестве критерия устойчивости принимается условие $C_1 > 0$ или $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$.

Решение уравнения для случая $C_1 < 0$ имеет вид $\Delta\delta = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$.

Так как один из корней положительный ($p_1 = \sqrt{\frac{C_1}{T_j}}$; $p_2 = -\sqrt{\frac{C_1}{T_j}}$), то одна из составляющих будет непрерывно увеличиваться и система уйдет из положения равновесия, а процесс будет аperiodическим (рис. 27, б). Графики на рис. 26, в и рис. 26, г иллюстрируют соответственно влияние самораскачивания при отрицательном демпфировании и самораскачивание при действии регуляторов. В случае сохранения устойчивости характер колебаний $\Delta\delta = f(t)$

будет различным при различных нагрузках генераторов станции. Поскольку период колебаний $T_0 = 2\pi\sqrt{T_j/C_1}$, то при увеличении нагрузки и уменьшении синхронизирующей мощности $C_1 = \partial P/\partial\delta$ он будет увеличиваться и в пределе при условии $P = P_m$ станет бесконечно большим, т.е. процесс нарушения устойчивости должен протекать аperiodически и весьма медленно.

Таким образом, при принятых допущениях нарушение устойчивости возможно только аperiodическое и предел мощности совпадает с пределом устойчивости (именно при значении мощности $P = P_m$ коэффициент C_1 меняет знак, что указывает на нарушение устойчивости работы). Угол $\delta_{кр}$, при котором достигается максимальная мощность и нарушается устойчивость, будет равен 90° при чисто реактивном сопротивлении сети, связывающей неявнополюсный генератор с шинами неизменного напряжения. В остальных случаях значение $\delta_{кр}$ несколько больше 90° . Скорость изменения угла в начальной стадии процесса нарушения статистической устойчивости составляет $1 \div 2$ эл.град/сек (при динамическом нарушении режима порядка $200 \div 500$ эл.град/сек).

При наличии демпфирования характеристическое уравнение принимает вид

$$T_j p^2 + P_d p + C_1 = 0, \quad (111)$$

т.к. демпферный момент $\Delta P_{ac} = -P_\alpha S = P_d p \Delta\delta$ и приращение мощности $\Delta P = P - P_T = P_d p \Delta\delta + C_1 \Delta\delta$.

Корни характеристического уравнения (111):

$$p_{1,2} = -\frac{P_d}{2T_j} \pm \sqrt{-\left[\frac{C_1}{T_j} - \frac{(P_d)^2}{(2T_j)^2}\right]} = -\alpha \pm j\gamma_D, \quad (112)$$

где $\alpha = \frac{P_d}{2T_j}$ – декремент затухания.

Таким образом, демпфирование создает затухание и приводит к уменьшению частоты колебаний, но не изменяет условий устойчивости, а только влияет на процесс выпадения из синхронизма (чем больше P_d , тем медленнее нарастание угла δ).

С учетом регулирующего эффекта турбины, при появлении асинхронного момента ($-\frac{d\delta}{dt} = s \neq 0$), не влияющего на величину угла и не меняющего основного критерия ($C_1 > 0$), приращение мощности

$$\Delta P = \Delta P_{ac} + \Delta P_c - \Delta P_T, \quad (113)$$

где $\Delta P_{ac} = P_d p \Delta \delta$; $\Delta P_c = C_1 \Delta \delta$; $\Delta P_T = \frac{\partial P_T}{\partial \omega} \Delta \omega = -a_T p \Delta \delta$; $P_T = \varphi(\omega) = P_{T0} - a_T \omega$,

где $a_T = -\frac{\partial P_T}{\partial \omega}$ — коэффициент, отражающий регулировочный эффект первичного двигателя.

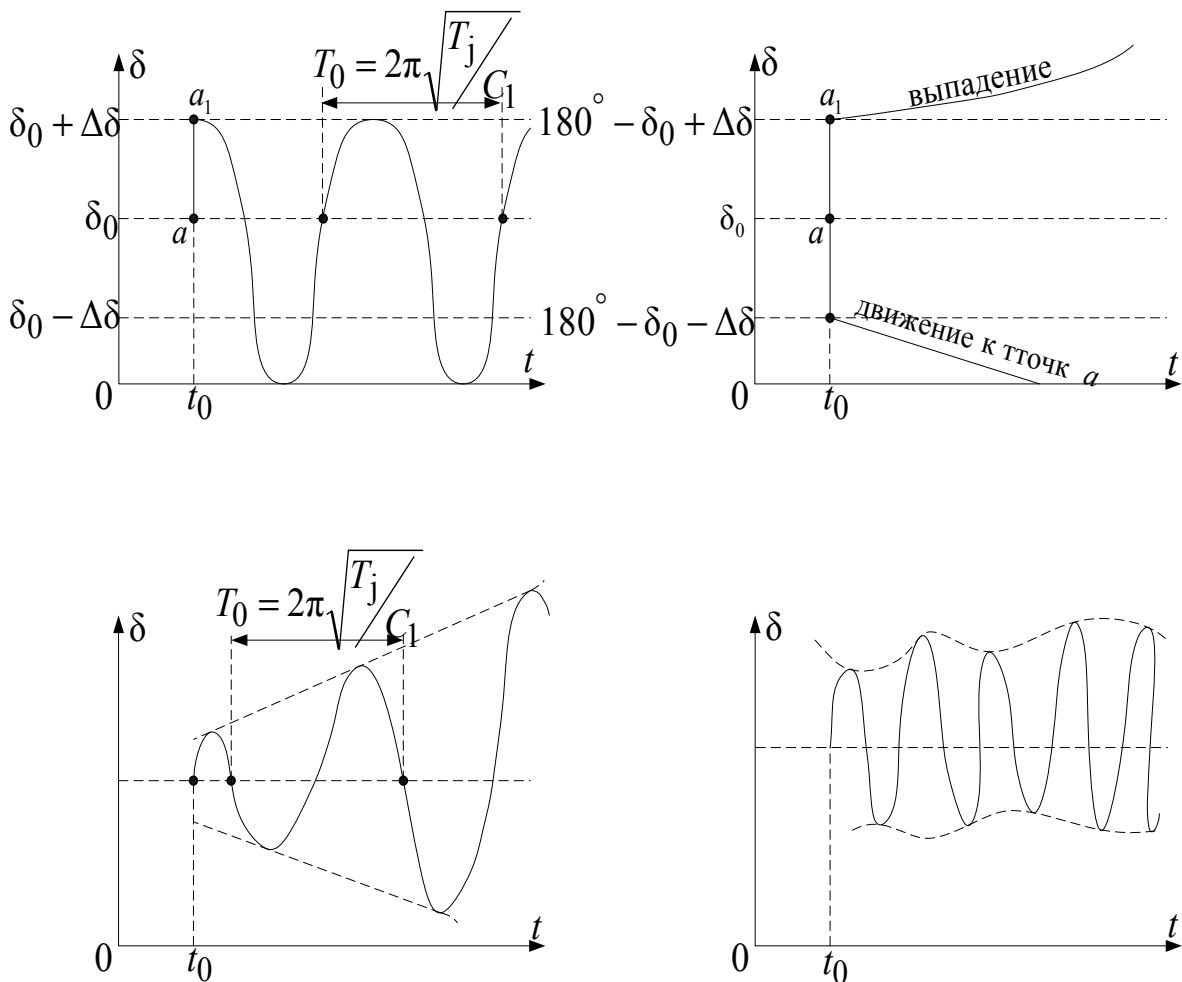


Рис. 26. Характер колебаний угла во времени $\Delta \delta = f(t)$

С учетом изложенного характеристическое уравнение (111) приводится к виду

$$T_j p^2 \Delta\delta + (P_d + a_T) p \Delta\delta + C_1 \Delta\delta = 0. \quad (114)$$

Из анализа приведенного уравнения (114) можно сделать вывод, что уменьшение мощности турбины при увеличении скорости равносильно увеличению демпферного момента и способствует затуханию колебаний. В случае увеличения мощности турбины с увеличением скорости значение $a_T < 0$ и при выполнении условия $|P_d| < |a_T|$ корни характеристического уравнения будут иметь вид $p_{1,2} = \pm j\gamma_D + \alpha$, где α – характеризует нарастание колебаний, причем инкремент нарастания $\alpha = \frac{|a_T - P_d|}{2T_j}$; а собственная частота

$\gamma_D = \sqrt{\frac{C_1}{T_j} - \alpha^2}$. В системе в этом случае наступает *самораскачивание*, вызванное отрицательным демпфированием (см. рис. 26, в).

9.2. Анализ статической устойчивости нерегулируемой системы с учетом переходных электромагнитных процессов и асинхронной мощности

Более точный анализ устойчивости позволяет обнаружить математические признаки трех возможных видов ее нарушения. Возмущенное движение системы при учете переходных электромагнитных процессов будет описываться следующими уравнениями:

а) $T_j p^2 \Delta\delta + \Delta P = 0$ – уравнение движения ротора генератора, (115)

где $\Delta P = \Delta P_{ac} + \Delta P_c$ – изменение электрической мощности;

$\Delta P_{ac} = -P_d s = P_d p \Delta\delta$ – асинхронная мощность;

б) уравнение синхронной мощности, зависящей от изменений угла и изменений ЭДС, появившихся в связи с возмущением и переходным процессом:

$$\Delta P_c = \frac{\partial P_{Eq}}{\partial \delta} \Delta\delta + \frac{\partial P_{Eq}}{\partial E_q} \Delta E_q = C_1 \Delta\delta + b_1 \Delta E_q, \quad (116)$$

где P_{Eq} – внутренняя мощность, выраженная через ЭДС генератора E_q ;

в) уравнение синхронной мощности б), записанное в следующем виде:

$$\Delta P_c = \frac{\partial P_{E'q}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_{E'q}}{\partial E_q} \Delta E'_q = C_2 \Delta \delta + b_2 \Delta E'_q, \quad (117)$$

где $\frac{\partial P_{E'q}}{\partial \delta} = C_1$; $\frac{\partial P_{E'q}}{\partial E_q} = b_1$; $\frac{\partial P_{E'q}}{\partial \delta} = C_2$; $\frac{\partial P_{E'q}}{\partial E'_q} = b_2$ – коэффициенты, зависящие

от режима, но при малых возмущениях рассматриваются как постоянные.

з) уравнения изменения ЭДС E_q и E'_q .

$$\frac{-\Delta E_q}{T_{d0}} = \frac{d\Delta E'_q}{dt} \quad \text{или} \quad \Delta E_q = -T_{d0} p \Delta E'_q. \quad (118)$$

Решение системы из четырех уравнений (115), (116), (117), (118) дает возможность сформулировать условия статической устойчивости путем нахождения временной зависимости $\Delta \delta = f(t)$. В матричном виде система уравнений для рассматриваемых случаев а), б), в), з) представляется соотношением

$$\begin{bmatrix} T_j p^2 + P_d p & 1 & 0 & 0 \\ C_1 & -1 & b_1 & 0 \\ C_2 & -1 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & T_{d0} p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta P_c \\ \Delta E_q \\ \Delta E'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (119)$$

откуда по формуле Крамера искомые переменные можно представить в виде

$$\Delta \delta = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad \Delta P_c = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad \Delta E_q = \frac{\Delta_3}{\Delta}; \quad \Delta E'_q = \frac{\Delta_4}{\Delta}.$$

Очевидно, что согласно правилу Крамера все определители $\Delta_i = 0$; а определитель системы уравнений $\Delta = D(p) = 0$ можно рассмотреть как характеристическое уравнение

$$D(p) = T_j T_{d0} b_1 p^3 + (T_j b_2 + P_d T_{d0} b_1) p^2 + (C_2 T_{d0} b_1 + P_d b_2) p + C_1 b_2 = 0. \quad (120)$$

Рассматривая систему только с чисто реактивными сопротивлениями и вводя обозначение для постоянной времени

$$T'_d = T_{d0} \frac{b_1}{b_2} \quad (\text{при } r=0 \text{ и } \frac{b_1}{b_2} = \frac{X'_d \Sigma}{X_d \Sigma} = \frac{X'_d + X_c}{X_d + X_c}), \quad \text{уравнение (120) мож-}$$

но привести к виду, более удобному для анализа:

$$T_j T'_d p^3 + (T_j + P_d T'_d) p^2 + (C_2 T'_d + P_d) p + C_1 = 0. \quad (121)$$

По правилу Гурвица для отсутствия положительных корней характеристического уравнения требуется, чтобы все коэффициенты исследуемого уравнения и определитель Гурвица, составленный из этих коэффициентов, были положительными. Для данного уравнения третьего порядка определитель Гурвица имеет вид

$$\Delta_{\text{гур}} = \begin{vmatrix} T_j + P_d T_d & C_1 \\ T_j T_d & C_2 T_d + P_d \end{vmatrix}. \quad (122)$$

Условия Гурвица могут нарушаться и в уравнении (122) появятся положительные или комплексно-сопряженные корни с положительными действительными частями только в том случае, если в выражении для определения коэффициента C_1 угол $\delta > 90^\circ$:

$$C_1 = \frac{\partial P_{Eq}}{\partial \delta} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \cos \delta. \quad (123)$$

Следовательно, электрическая система статически устойчива только при углах $\delta < 90^\circ$. При значении $\delta = 90^\circ$ наступает критический режим и медленное, без качаний, апериодическое нарушение устойчивости («сползание»). Соотношения для расчета коэффициентов C_i и b_i простейшей системы для значений без учета активного сопротивления статора СМ ($r = 0$) приведены в табл. 4.

Таблица 4

C_1	C_2	b_1	b_2
$\frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \cos \delta$	$\frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \cos \delta - U^2 \frac{(X_d - X'_d)}{X_{d\Sigma} X'_{d\Sigma}} \cos 2\delta$	$\frac{U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$	$\frac{U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta$

Из рассмотрения определителя Гурвица (122) следует, что выражения на главной диагонали определителя $\Delta_{\text{гур}}$ могут быть отрицательными, т. е. $(T_j + P_d T'_d) < 0$ и $(C_2 T'_d + P_d) < 0$, однако при этом должно выполняться условие $|T'_d| > \left| \frac{T_j}{P_d} \right|$ и $|T'_d| > \left| \frac{P_d}{C_2} \right|$. При этом коэффициент при p^3 становится отрицательным, а это означает, что независимо от знаков коэффициентов при

p^2 и p устойчивость системы определяется знаком коэффициента при p^3 . Этот коэффициент в свою очередь зависит от знака постоянной времени, определяемой для простейшей системы при $r = 0$ по формуле

$$T'_d = \frac{X'_d + X_c}{X_d + X_c} T_{d0}. \quad (124)$$

Постоянная времени $T'_d < 0$, если внешнее сопротивление $X_c < 0$ (емкостное) удовлетворяет условию $X'_d < X_c < X_d$. Возникающее при этом явление неустойчивости, имеющее колебательный характер, носит название **самовозбуждения** (рис. 27). Требование $\Delta_{\text{Гур}} > 0$ приводит после раскрытия определителя Гурвица к необходимости выполнения условия

$$(T_j + P_d T'_d)(C_2 T'_d + P_d) - C_1 T_j T'_d > 0 \quad (125)$$

или $C_2(1 + \frac{P_d}{C_2 T'_d})(1 + \frac{P_d T'_d}{T_j}) - C_1 \geq 0$, которое не удовлетворяет условию $\Delta_{\text{Гур}} > 0$

только в случае $C_1 > C_2$.

Выражая C_2 через C_1 и E_q , получим (см. табл. 4)

$$C_2 = C_1 + \frac{X_d - X'_d}{X'_d \Sigma X_d \Sigma} U^2 \sin^2 \delta.$$

Полагая в определителе Гурвица $P_d = 0$ (отсутствие демпфирования), получим условие появления критического режима только при $\delta = 0$, что свидетельствует о возможном нарушении условия (125) и появлении неустойчивости – **самораскачивания**. Такой режим возможен только в цепи с пренебрежимо малым активным сопротивлением в цепи статора ($r = 0$) и отсутствии демпфирования даже при холостом режиме.

Полная характеристика процесса самораскачивания возможна только при учете тех свободных составляющих токов и напряжений, которые связаны с членами $p\psi_d$ и $p\psi_q$ уравнений Парка – Горева. Отметим, что при $r \neq 0$ нарушение условия (125) и появление неустойчивости в виде самораскачивания оказывается возможным и при режиме, отличным от холостого, при конечных, но достаточно малых нагрузках, соответствующих углам, меньше критических.

В этом случае синхронизирующая мощность определяется через внутреннюю мощность генератора $C_1 = \frac{\partial P_{Eq}}{\partial \delta}$, где P_{Eq} – внутренняя активная мощность генератора, определяемая через поперечную ЭДС E_q по формуле

$$P_{Eq} = \frac{E_q^2}{Z_{dq}^4} Z_q^3 \sin \alpha_q + \frac{E_q U Z_q^2}{Z_{dq}^4} \cdot \left[Z_d \sin(\delta - \alpha_d) + \frac{r(X_d - X_q)}{Z_q} \cdot \cos(\delta - \alpha_q) \right] + \frac{U^2 Z_d Z_q (X_d - X_q)}{Z_{dq}^4} \cdot \cos(\delta - \alpha_q) \cdot \sin(\delta - \alpha_q). \quad (126)$$

Аналогично можно показать, что это возможно и при выражении синхронизирующей мощности через переходную ЭДС $C_1 = \frac{\partial P_{E'q}}{\partial \delta}$, где $P_{E'q}$ – внутренняя активная мощность генератора, определяемая по формуле

$$P_{E'q} = \frac{E_q'^2}{Z_{dq}^4} Z_q^3 \sin \alpha_q + \frac{E_q' U Z_q^2}{Z_{dq}^4} \times \left[Z_d \sin(\delta - \alpha_d') - \frac{r(X_q - X_d')}{Z_q} \cos(\delta - \alpha_q) \right] - \frac{U^2 Z_d' Z_q (X_q - X_d')}{Z_{dq}^4} \cdot \cos(\delta - \alpha_q) \times \sin(\delta - \alpha_q'). \quad (127)$$

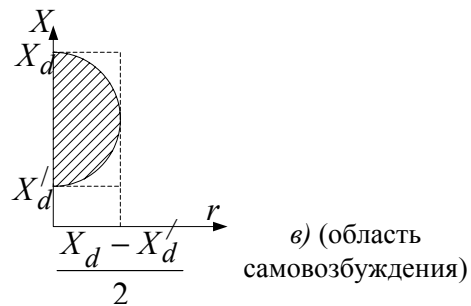
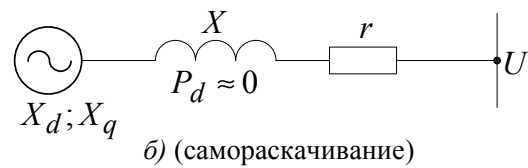
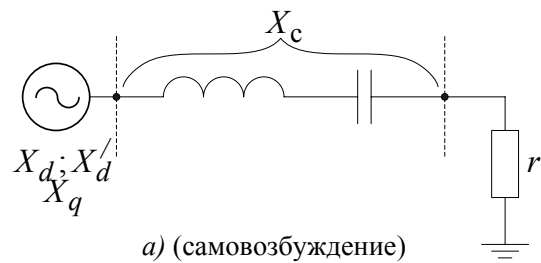


Рис. 27. Условия появления самовозбуждения и самораскачивания

Значение критического угла $\delta_{кр}$, определяемое при $P_d = 0$ и $r \neq 0$, будет

$$\delta_{кр} = \arctg \frac{r}{X_q + X_c}. \quad (128)$$

Учет демпфирования приводит к тому, что значение критического угла тем больше, чем больше E_q .

Критерий Рауса – Гурвица. Число корней с положительной действительной частью действительного алгебраического уравнения равно числу перемен знака в любой из последовательностей (в предположении, что T_i отличны от нуля), т.е. для уравнения

$$a_0 X^n + a_1 X^{n-1} + a_2 X^{n-2} + \dots + a_{n-1} X + a_n = 0 \quad (129)$$

можно составить ряд последовательностей

$$T_0, T_1, \frac{T_2}{T_1}, \frac{T_3}{T_2}, \dots, \frac{T_n}{T_{n-1}}, \text{ или } T_0, T_1, T_1 T_2, T_2 T_3, \dots, T_{n-2} T_{n-1}, a_n,$$

где $T_0 = a_0 > 0$; $T_1 = a_1$; $T_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix}$; $T_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ a_5 & a_4 & a_3 \end{vmatrix}$; $T_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \\ a_7 & a_6 & a_5 & a_4 \end{vmatrix}$.

Все корни уравнения имеют отрицательную действительную часть в том и только в том случае, если все числа $T_0, T_1, T_2, \dots, T_n$ положительны.

9.3. Статическая устойчивость простейшей системы при АРВ пропорционального типа

Упрощенная принципиальная схема регулятора возбуждения пропорционального типа и его структурная схема показана на рис. 28. Приращение напряжения ΔU на выходе преобразовательного (П) и измерительного (И) элементов равно $\Delta U = \frac{K_{\text{И}}(-\Delta U_{\Gamma})}{1 + pT_{\text{И}}}$, где $T_{\text{И}}$ – постоянная времени; $K_{\text{И}}$ – коэффициент деления звена П-И.

Представляя приращение ЭДС ΔE_q в виде двух составляющих $\Delta E_q = \Delta E_{q\text{св}} + \Delta E_{qe}$, где $\Delta E_{q\text{св}} = -T_{d0} p \Delta E'_q$ – ЭДС, обусловленная процессами, происходящими непосредственно в генераторе, отражает влияние реакции якоря;

$\Delta E_{qe} = -\Delta U_{\text{В}} = K_{\text{В}} \Delta i_{\text{ВВ}}$ – ЭДС, отражающая изменение тока возбуждения;

$$\Delta i_{\text{ВВ}} = \frac{\Delta \ell}{R_e + L_e p} = \frac{\Delta \ell}{R_e(1 + pT_e)} - \text{приращение тока возбуждения, обуслов-$$

ленное изменением ЭДС, приложенной к обмотке возбуждения (с индуктивностью L_e и активным сопротивлением R_e), и в свою очередь, зависящей от действия регулятора возбуждения;

$$\Delta \ell = \frac{K_y \Delta U}{1 + T_y p}, \text{ где } T_y \text{ и } K_y - \text{ постоянная времени и коэффициент усиления усилителя.}$$

ния усилителя.

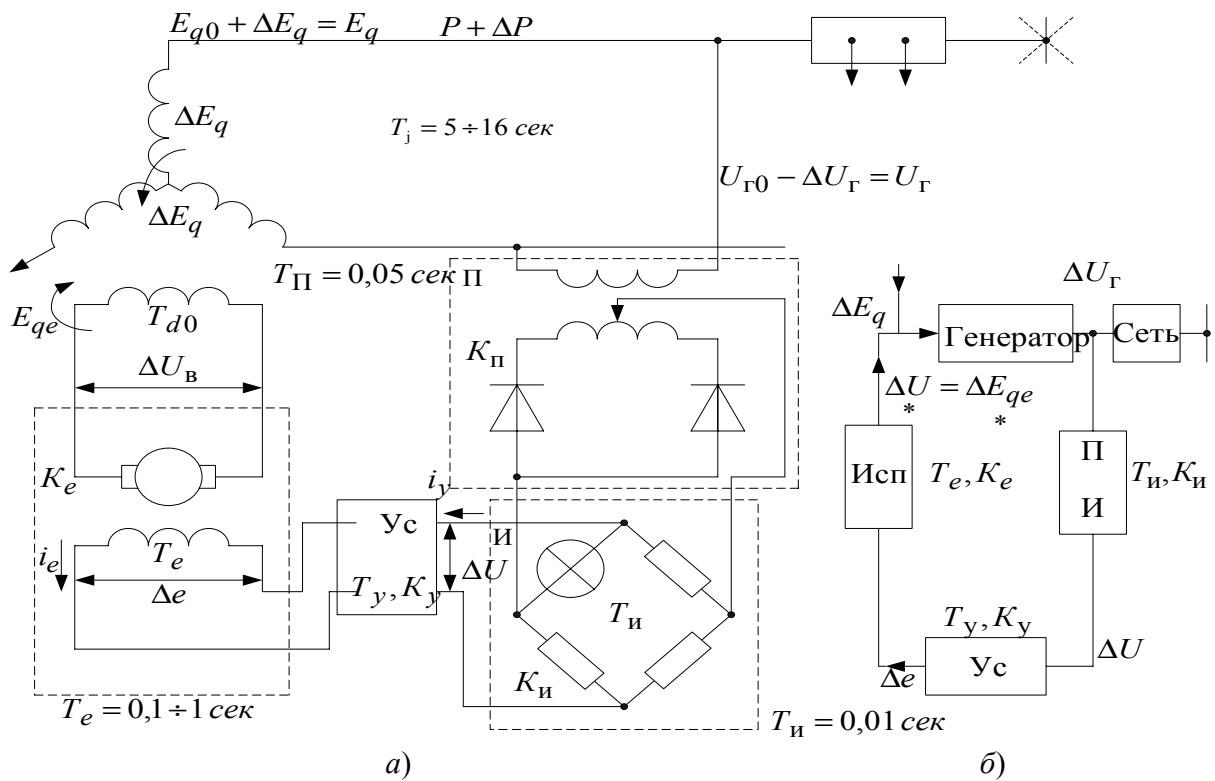


Рис. 28. Регулятор возбуждения пропорционального типа (а) и его структурная схема (б)

Тогда выражение для ЭДС, обуславливающей изменение тока возбуждения, принимает вид

$$\Delta E_{qe} = \frac{K_{\text{оИ}}(-\Delta U_{\Gamma})}{(1 + T_{\text{И}} p)(1 + pT_y)(1 + pT_e)} = \gamma(p)(\Delta U_{\Gamma}), \quad (130)$$

где $K_{\text{оИ}} = \frac{K_{\text{В}}}{K_{\text{С}}} K_y K_{\text{И}}$ – коэффициент усиления системы регулирования;

$$\gamma(p) = \frac{-K_{\text{ои}}}{(1+T_{\text{и}}p)(1+pT_{\text{y}})(1+pT_{\text{e}})}. \quad (131)$$

В установившемся режиме значение $p=0$ и $\gamma = -K_{\text{ои}}$, следовательно, приращение ЭДС определится по формуле $\Delta E_{qe} = -K_{\text{ои}}\Delta U_{\Gamma}$.

В общем случае при n – инерционных элементах системы с постоянными времени T_1, T_2, \dots, T_n и коэффициентами усиления K_1, K_2, \dots, K_n

$$\gamma(p) = \frac{K_1 K_2 \dots K_n}{(1+T_1 p)(1+pT_2) \dots (1+pT_n)}. \quad (132)$$

С учетом изложенного выше, уравнения, характеризующие рассматриваемую электрическую систему, можно привести к виду

$$1) \Delta E_q = \xi(p)\Delta E'_q + \gamma(p)\Delta U_{\Gamma}; \quad 2) \Delta p = -T_j p^2 \Delta \delta. \quad (133)$$

Приращение мощности можно выразить через приращения ЭДС ΔE_q ; $\Delta E'_q$ и приращения напряжения ΔU_{Γ} :

$$\begin{aligned} 3) \Delta P &= \frac{\partial P_{Eq}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_{Eq}}{\partial E_q} \Delta E_q = C_1 \Delta \delta + b_1 \Delta E_q; \\ 4) \Delta P &= \frac{\partial P_{E'q}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_{E'q}}{\partial E'_q} \Delta E'_q = C_2 \Delta \delta + b_2 \Delta E'_q; \\ 5) \Delta P &= \frac{\partial P_{U_{\Gamma}}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_{U_{\Gamma}}}{\partial U_{\Gamma}} \Delta U_{\Gamma} = C_3 \Delta \delta + b_3 \Delta U_{\Gamma}. \end{aligned} \quad (134)$$

Для простейшей системы справедливы соотношения $C_3 = C_1 + U^2 \frac{X_d}{X_d \Sigma X_c} (\sin \delta - \text{tg} \delta_{\Gamma} \cos \delta) \sin \delta$; $b_3 = \frac{U}{X_c} \sin \delta \frac{1}{\cos \delta_{\Gamma}}$,

где $\delta_{\Gamma} = (\dot{E}_q \dot{U}_{\Gamma})$; $\cos \delta_{\Gamma} = \sqrt{1 - \left(\frac{U X_d \sin \delta}{U_{\Gamma} X_d \Sigma} \right)^2}$.

Формулы расчета значений C_1 , C_2 , b_1 и b_2 приведены в табл. 4.

Для вычисления приращений угла δ приведенные выше уравнения 1) ÷ 5) целесообразно преобразовать к виду:

$$1. (T_j p^2 + C_1) \Delta \delta + b_1 \xi(p) \Delta E'_q + b_2 \gamma(p) \Delta U_{\Gamma} = 0.$$

$$\begin{aligned}
2. & (T_j p^2 + C_2)\Delta\delta + b_2\Delta E'_q + 0 = 0. \\
3. & (T_j p^2 + C_3)\Delta\delta + 0 + b_3\Delta U_\Gamma = 0.
\end{aligned} \tag{135}$$

Из решения уравнений 1 и 2 (системы (135)) можно найти изменения угла $\Delta\delta$ при случайных малых возмущениях: $\Delta\delta = \frac{0}{D(p)}$,

$$\text{где } D(p) = \begin{vmatrix} T_j p^2 + C_1 & b_1 & b_1 \\ T_j p^2 + C_2 & b_2 & 0 \\ T_j p^2 + C_3 & 0 & b_3 \end{vmatrix}.$$

Характеристическое уравнение системы получим, приравняв определитель нулю $D(p) = 0$, при этом полином будет иметь шестой порядок относительно оператора p . Без учета инерционности преобразователя П и регулятора, т.е. при $T_{\text{и}} = 0$ и $T_y = 0$ характеристическое уравнение с учетом значения коэффициентов b_1, b_2, b_3 (см. табл. 4) имеет четвертый порядок:

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + (a_2 + \Delta a_2) p^2 + a_3 p + (a_4 + \Delta a_4) = 0, \tag{136}$$

где $a_0 = T_e T'_d T_j$; $T'_d = T_{d0} \frac{X_d \Sigma}{X_d \Sigma}$; $a_1 = T_j (T'_d + T_e)$; $a_2 = T_j + T'_d T_e C_2$;

$$a_3 = T'_d C_2 + T_e C_1; a_4 = C_1; \Delta a_2 = K_{\text{ои}} T_j \frac{b_1}{b_3}; \Delta a_4 = K_{\text{ои}} C_3 \frac{b_1}{b_3}.$$

При исследовании устойчивости системы обычно для анализа характеристического уравнения применяют способ Гурвица. В этом случае сначала необходимо записать условия положительности всех коэффициентов характеристического уравнения:

1. $a_0 > 0$ и $a_1 > 0$, т.к. $T_e > 0$; $T'_d > 0$; $T_j > 0$.
2. $a_3 > 0$ при $C_2 > -C_1 T_e / T'_d$ или $\frac{\partial P_{E'q}}{\partial \delta} > (-\frac{\partial P_{Eq}}{\partial \delta}) \frac{T_e}{T'_d}$.

Кроме того, для случая $a_3 > 0$ значение C_2 должно быть положительным и иметь значение тем больше, чем больше значение постоянной времени T_e . Нарушение условия положительности $C_2 > 0$ приводит к нарушению устойчивости системы;

$$3. a_2 + \Delta a_2 = T_j + T'_d T_e C_2 + K_{\text{ои}} T_j \frac{b_1}{b_3} > 0 \text{ при } C_2 > 0 \text{ и условие } K_{\text{ои}} > 0$$

всегда соблюдается.

$$4. a_4 + \Delta a_4 = C_1 + K_{\text{ои}} C_3 \frac{b_1}{b_3} > 0 \text{ при } K_{\text{ои}} > \frac{(-C_1) b_3}{C_3 b_1}. \text{ Чем больше зна-}$$

чение $K_{\text{ои}}$, тем лучше, но значение $K_{\text{ои}}$ ограничено условием $\Delta_{\text{гур}} > 0$.

Определитель Гурвица исходного характеристического уравнения:

$$\begin{aligned} & a_1 a_3 (a_2 + \Delta a_2) - a_1^2 (a_4 + \Delta a_4) - a_3^2 a_0 = \\ & = a_3 [a_1 (a_2 + \Delta a_2) - a_0 a_3] - a_1^2 (a_4 + \Delta a_4) > 0. \end{aligned}$$

Раскрывая значения коэффициентов a и Δa , получим из этого неравенства величину максимального коэффициента усиления:

$$K_{\text{оимакс}} = \frac{\frac{C_2 - C_1}{C_3 - C_2} \frac{b_3}{b_1} \left[1 + \frac{T_e^2 T'_d C_2 + T_e C_1}{T_j T_e + T'_d} \right]}{1 + \frac{T_e}{T'_d} \frac{C_3 - C_1}{C_3 - C_2}}. \quad (137)$$

Нарушение условия $K_{\text{ои}} \leq K_{\text{оимакс}}$ приведет к нарушению устойчивости системы, обычно имеющего характер *самораскачивания*. Графики для определения предельного угла по условию $C_2 > -C_1 \frac{T_e}{T'_d}$ показаны на рис. 29, а, и предельного значения коэффициента усиления $K_{\text{оимакс}} = f(\delta)$ при различных значениях T_e – на рис. 29, б.

Из рассмотрения вышеизложенного можно сделать выводы:

1) регулирование пропорционального типа (без зоны нечувствительности) расширяет область устойчивой работы и позволяет работать при углах, больших 90° . Предельный угол при $T_e = 0$ определяется условием $C_2 = \frac{\partial P_{E'q}}{\partial \delta} = 0$ (рис. 29, а);

2) чем меньше постоянная времени возбудителя T_e , тем меньше оказывается возможный максимальный коэффициент усиления $K_{\text{ои}}$ (рис. 29, б) и при малых постоянных времени и больших предельных углах не удастся обеспечить хорошее поддержание напряжения, т.е. устойчивость нарушается

около 90° при хорошем поддержании напряжения и при $\delta > 90^\circ$ – худшем поддержании напряжения.

Однако в обоих упомянутых случаях предельная передаваемая мощность близка к $P_{E'q}$, т.е. к максимуму мощности, определенному при постоянстве переходной ЭДС E'_q . Поэтому в упрощенных расчетах генераторы, снабженные АРВ пропорционального типа, вводятся в схему замещения реактивным переходным сопротивлением X'_d и приложенной за ним переходной ЭДС $E' \approx E'_q = \text{const}$.

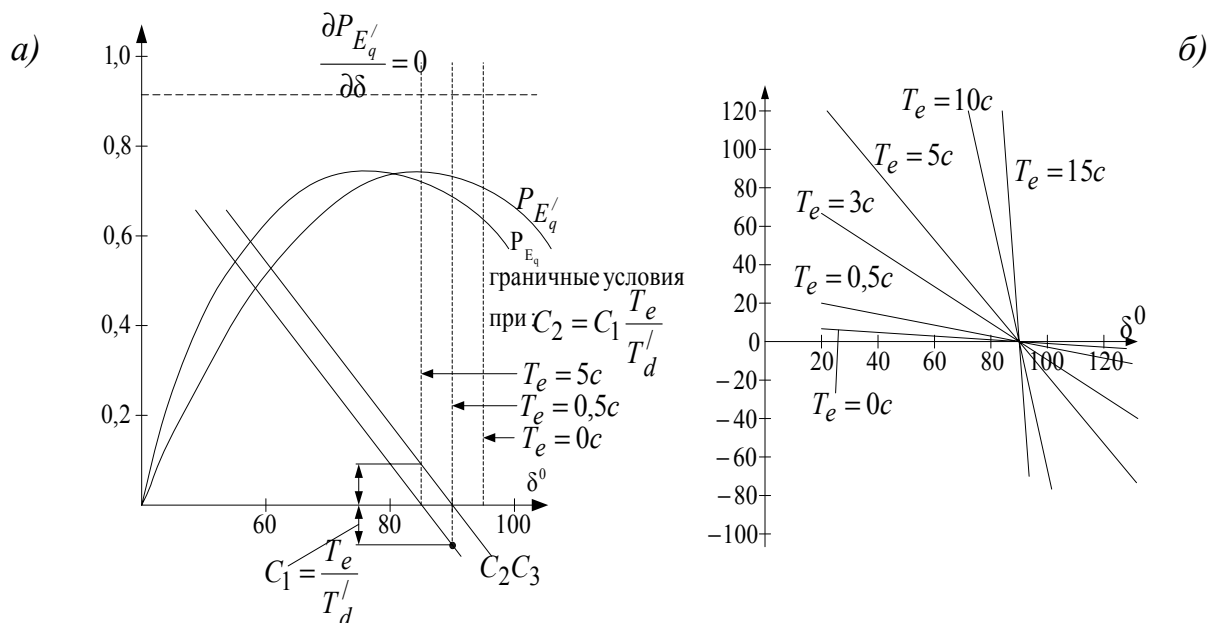


Рис. 29. Ограничение зоны устойчивой работы при регуляторе возбуждения пропорционального типа: *a* – по предельному углу; *б* – по предельному значению коэффициента усиления

9.4. Статическая устойчивость простейшей системы при сильном регулировании возбуждения

Сильное регулирование расширяет возможности передачи мощности на расстояние и повышает качество работы электрической системы. При известном напряжении в начале U_1 и в конце U_2 линии передачи наибольшая передаваемая мощность (предел по линии) $P_{л. \max} = \frac{U_1 U_2}{X_{л}}$, где $X_{л}$ – сопротив-

ление линии. При наличии нерегулируемых генераторов и трансформаторов наибольшая передаваемая мощность уменьшается до значения, определяемого по формуле

$$P_{\max E_q} = \frac{E_q U_2}{X_d + X_{\text{л}} + 2X_{\text{T}}}; \quad (138)$$

Наличие АРВ пропорционального типа увеличивает предел по линии до значения

$$P_{\max E'_q} = \frac{E'_q U_2}{X'_d + X_{\text{л}} + 2X_{\text{T}}}. \quad (139)$$

При регулировании возбуждения не только по отклонению регулируемой величины, но и по её первой и второй производным обеспечивается устойчивая работа при передаче мощности, почти равной пределу линии (так называемое *сильное регулирование*)

$$P_{\max} \approx \frac{U_1 U_2}{X_{\text{л}} + X_{\text{T}}}. \quad (140)$$

Таким образом, сильное регулирование позволяет поддерживать неизменное напряжение на шинах генератора или за повышающим трансформатором, а также расширяет возможности передачи мощности на расстояние и повышает качество работы электрической системы. Отметим, для хорошего поддержания напряжения и получения устойчивой работы необходимо осуществлять регулирование не только по отклонению напряжения, но и по ряду других параметров режима (например тока и (или) частоты) и их первым и вторым производным. Структурная схема простейшей системы с сильным регулированием показана на рис. 30.

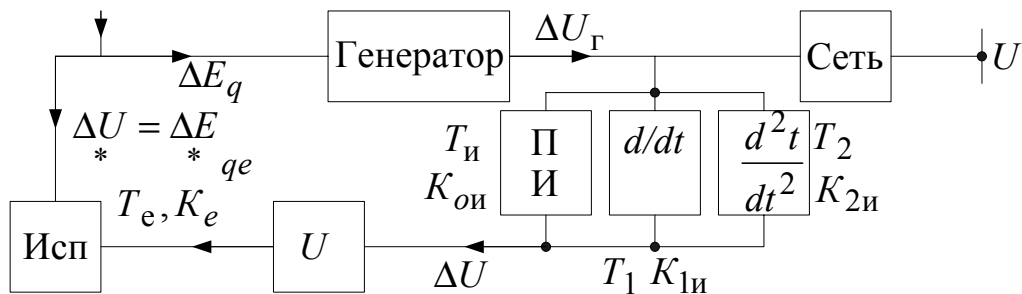


Рис. 30. Структурная схема простейшей электрической системы с АРВ сильного действия на генераторе

В общем случае напряжение ΔU на входе усилителя АРВ сильного действия можно привести к виду

$$\Delta U = \frac{K_{oi}(-\Delta U_r)}{1 + pT_{и}} + \frac{K_{1и}p(-\Delta U_r)}{1 + pT_1} + \frac{K_{2и}p^2(-\Delta U_r)}{1 + pT_2}; \quad (141)$$

Полагая равенство постоянных времени $T_1 = T_2 = T_{и}$ и обозначая зависимости (взаимосвязь коэффициентов) $K_{IU} = \frac{K_{1и}}{K_{oi}}$; $K_{III} = \frac{K_{2и}}{K_{oi}}$, получим следующее выражение для приращения напряжения:

$$\Delta U = \frac{K_{oi}(1 + K_{IU}p + K_{III}p^2)(-\Delta U_r)}{1 + pT_{и}}. \quad (142)$$

Тогда функциональную зависимость $\gamma(p)$ можно представить в виде

$$\gamma(p) = \frac{-K_{oi}(1 + K_{IU}p + K_{III}p^2)}{(1 + pT_y)(1 + pT_{и})(1 + pT_e)} \quad \text{и} \quad \Delta E_{qe} = \gamma(p)\Delta U_r. \quad (143)$$

Характеристическое уравнение системы с учетом изложенного после преобразований можно привести к виду

$$(a_0 + K_{III}\Delta a_2)p^4 + (a_1 + K_{IU}\Delta a_2)p^3 + (a_2 + \Delta a_2 + K_{III}\Delta a_4)p^2 + (a_3 + K_{IU}\Delta a_4)p + a_4 + \Delta a_4 = 0.$$

Для определения ограничений на коэффициенты усиления предположим для начала, что $K_{1и} = K_{2и} = K_{oi}$ при $K_{IU} = \frac{K_{1U}}{K_{0U}}$; $K_{III} = \frac{K_{2U}}{K_{0U}}$, т.е. при

$K_{IU} = K_{III} = 1$. При этом предположении можно выявить влияние введения производных на ограничение по углу зоны устойчивой работы. При пропорциональном регулировании предел устойчивости наступает при условии

$$C_2 = C_{2\text{пред}} = \frac{\partial P_{E'}}{\partial \delta} = -C_1 \frac{T_e}{T'_d}.$$

Теперь же при сильном регулировании значение $C_{2\text{пред}}$ определяется по формуле

$$C_{2\text{пред}} = -C_1 \frac{T_e}{T'_d} - C_3 \frac{K_{oi} b_1}{T'_d b_3}.$$

Появление второго слагаемого в выражении $C_{2\text{пред}}$ свидетельствует о расширении зоны устойчивой работы по сравнению с предыдущим случаем.

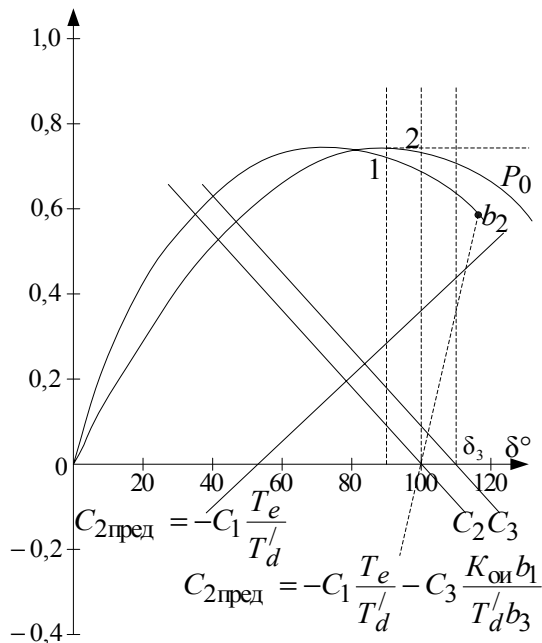


Рис. 31. Ограничение зоны устойчивой работы при регуляторе возбуждения сильного действия:
 1 – для регулятора пропорционального типа;
 2 – для регулятора сильного действия.

Однако, как это показано на рис. 31, достижение режима с углом δ_3 (максимум характеристики $P = f(\delta)$ при $U_r = \text{const}$) при таком регуляторе не возможно, т.к. при значении $\delta \rightarrow \delta_3$ величина $C_3 \rightarrow 0$ и даже при больших значениях второе слагаемое $K_{\text{ои}}$ стремится к нулю. Если $C_{2\text{пред}}$ принимает отрицательное значение, то в системе произойдет апериодическое нарушение устойчивости. Значение $K_{\text{ои}}$, как правило, выбирается на основе анализа определителя Гурвица, поэтому нарушение условия $\Delta_{\text{гур}} > 0$ обычно ведет к появлению колебаний и самораскачиванию системы.

Контрольные вопросы

1. Задачи анализа статической устойчивости нерегулируемой системы.
2. Синхронизирующая мощность и приращение угла δ .
3. Оценка статической устойчивости нерегулируемой системы по линеаризованной угловой характеристике мощности.
4. Условия статической устойчивости идеальной СМ.
5. Условия статической устойчивости реальной СМ.
6. Влияние демпфирования на условия статической устойчивости.
7. Признаки нарушения статической устойчивости при учете электромагнитных процессов.
8. Условия статической устойчивости по критерию Гурвица.
9. Неустойчивость типа самовозбуждение.
10. Неустойчивость типа самораскачивание.
11. Статическая устойчивость при АРВ пропорционального типа.
12. Статическая устойчивость при АРВ сильного действия.

10. ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Электрическая энергия, выработанная в генерирующих устройствах, передается по линиям электропередачи и распределяется электрическими сетями между нагрузками – потребителями, вновь преобразующими электроэнергию в другие виды энергии. Баланс энергии в системе показан на рис. 32.

В отличие от электрических цепей переходные процессы в системе при изменении режима (изменение напряжения, частоты, параметров передач и сетей) обычно рассматривают не в отдельных нагрузках, а в узлах нагрузки, т.е. в группе нагрузок, присоединенных к мощной подстанции, высоковольтному кольцу, линии передач и т.д. не только с целью обеспечения их устойчивости и надежности, но и с точки зрения обеспечения надежности всей системы электроснабжения. В состав узла нагрузки могут включаться также синхронные компенсаторы или мелкие отдельные генераторы или станции, как это показано на рис. 33. Состав потребителей узла нагрузки меняется в широких пределах в зависимости от района. Для примера в табл. 5 приведены средние цифры процентного состава нагрузок, характеризующие город.

Обычно при анализе приближенными методами рассматривают два аспекта переходных процессов в узлах нагрузки:

а) поведение самой нагрузки при переходных процессах и влияние этих процессов на работу потребителей;

б) влияние переходных процессов в нагрузке на режим системы (например, самозапуск двигателей может привести к понижению напряжения в системе, а в неправильно спроектированной системе даже к нарушению устойчивости).

Кроме того, толчкообразное потребление энергии мощными потребителями (например наличие мощных двигателей прокатных станков), обуславливающее колебания напряжения и частоты, может неблагоприятно сказываться на работе остальных потребителей системы.

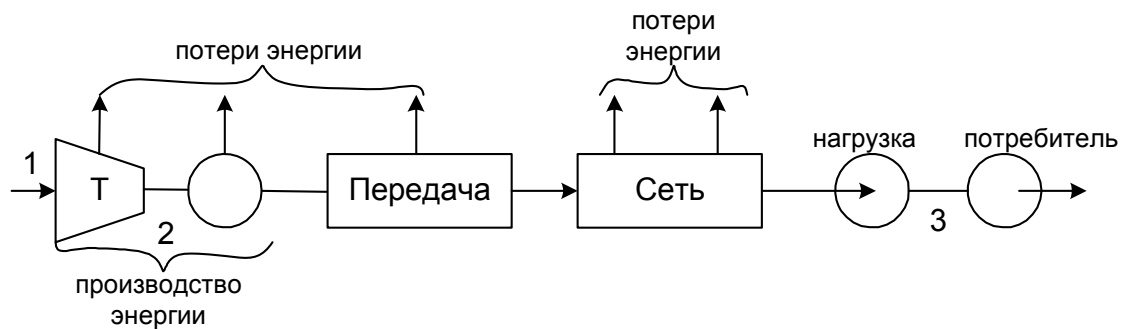


Рис. 32. Баланс энергии в системе: 1 – преобразование энергоносителя и получение механической энергии; 2 – преобразование механической энергии в электрическую; 3 – преобразование электрической энергии в другие виды энергии

Таблица 5

Состав потребителей узла нагрузки	% от общего кол-ва
1. Мелкие асинхронные двигатели	34
2. Крупные асинхронные и синхронные двигатели	14 + 10
3. Освещение	25
4. Выпрямители и инверторы, печи и нагревательные приборы	10
5. Потери в сетях	7

10.1. Характеристики элементов нагрузки

Под характеристикой элемента нагрузки понимают зависимости потребляемой им активной и реактивной мощностей, вращающегося момента или тока от напряжения или частоты. Различают два вида характеристик нагрузки: статические и динамические.

Статическая характеристика $P, Q, M, I = f_1(U)$ или $f_2(\omega)$, снятые при настолько медленных изменениях режима, что каждую её точку можно считать соответствующей установившемуся режиму.

Динамической характеристикой называется та же зависимость, но снятая при столь быстрых изменениях режима, что скорость их протекания должна быть учтена. Общее выражение динамической характеристики

$$P, Q, M, I = f_1 \left(U, f, \frac{dU}{dt}, \frac{df}{dt}, \frac{d^2U}{dt^2}, \frac{d^2f}{dt^2}, \dots, \frac{d^n U}{dt^n}, \frac{d^n f}{dt^n} \right).$$

Иными словами, динамическая характеристика может быть представлена гиперповерхностью, проходящей в фазовом пространстве, с координатами

$$U; f; \frac{dU}{dt}; \frac{df}{dt}; \frac{d^2U}{dt^2}; \frac{d^2f}{dt^2}; \dots; \frac{d^n U}{dt^n}; \frac{d^n f}{dt^n}.$$

Простейшим случаем динамической характеристики будет поверхность в пространстве трех измерений.

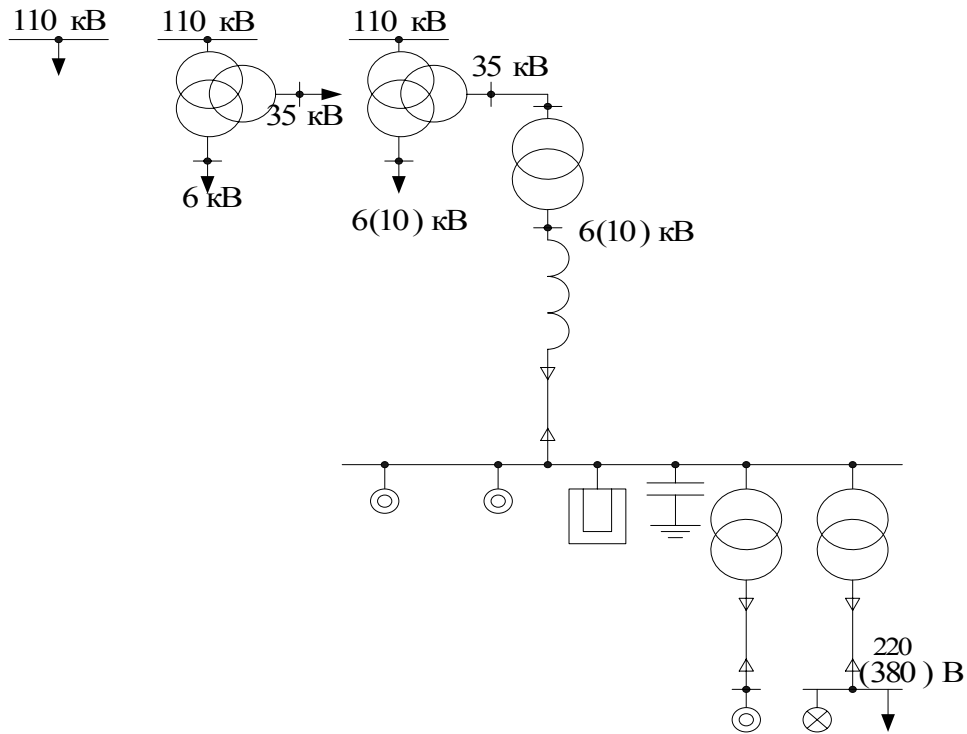


Рис. 33. Примерные схемы узлов нагрузки: *а* – эквивалентная нагрузка, подключенная к сети высокого напряжения; *б* – нагрузка на напряжение 35 и 6 кВ; *в* – развернутая схема узла нагрузки

10.2. Статические и динамические характеристики осветительной нагрузки

Осветительная установка с лампами накаливания потребляет активную мощность, которая не зависит от частоты и примерно пропорциональна напряжению в степени 1,6. Активная мощность осветительной нагрузки, состоящей из дуговых ламп низкого (люминесцентные лампы) и высокого давления (ртутные и натриевые), заметно зависит от частоты, уменьшаясь на 0,5 – 0,8 % с изменением частоты на 1 % , но в меньшей степени зависит от питающего напряжения. В первом приближении при анализе электромеханиче-

ских переходных процессов принимают, что *статические характеристики осветительной нагрузки совпадают с динамическими.*

10.3. Характеристики асинхронной нагрузки

Запас статической устойчивости отдельного асинхронного двигателя (АД), определяемый по отношению максимального момента к рабочему, составляет обычно 1,5 – 1,7. Поэтому небольшие изменения напряжения, величина которого не зависит от режима двигателя, не приводят к нарушению его устойчивости. При питании группы двигателей от генератора соизмеримой мощности напряжение на их шинах зависит от режима их работы (от скольжения эквивалентного асинхронного двигателя). Условия нарушения устойчивости (опрокидывания) двигателя в этом случае совершенно иные и оценку критических условий целесообразно проводить исходя не из напряжения на зажимах двигателя, а исходя из той ЭДС генератора, которую в данных условиях можно считать не зависящей от изменений режима. В нерегулируемом генераторе это E_q , с регулятором пропорционального типа – E'_q , с АРВ сильного действия – U_r . На основании упрощенной схемы замещения АД (рис. 34) выражение для максимального вращающего момента в этом случае имеет вид

$$M_{\max E} = \frac{E^2}{2(X_r + X_c + X_s)}. \quad (144)$$

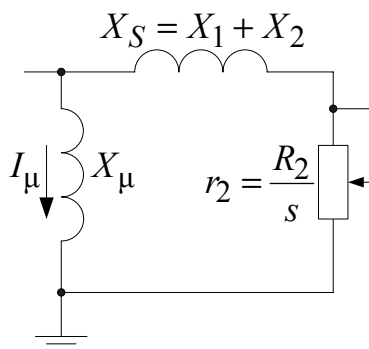


Рис. 34. Упрощенная схема замещения АД

Количественные соотношения обычно устанавливают по упрощенной схеме замещения, пренебрегая, потерями в статоре и стали. При этом активная мощность, потребляемая нагрузкой, и соответственно вращающий момент двигателя будут, при этих условиях определяться мощностью (моментом) машин, приводимых во вращение, т.е. $M_{\text{мех}} = f(\omega)$. Изменения активной мощности P и вращающего момента M бу-

дут зависеть от режима питающей сети и механических характеристик приводимых машин, т.е. зависимостей механического момента от скорости вращения. Пренебрегая потерями в двигателе и принимая, что $M_{\text{мех}}$ не зависит

от скольжения, можно записать:

$$M_{\text{мех}} = M = \frac{P}{\omega_0} = \frac{I^2 R_2}{\omega_0 s} = \text{const}, \quad (145)$$

отсюда при $\omega_0 = 1$ получим $s = \frac{I^2 R_2}{P}$ или $s \equiv I^2$.

В соответствии со схемой замещения реактивная мощность АД имеет две составляющие: Q_μ - намагничивающую мощность и Q_s - мощность рассеяния полей ротора и статора:

$$Q = Q_\mu + Q_s, \text{ где } Q_s = I^2 X_s; \quad Q_\mu = \frac{U^2}{X_\mu} = I_\mu U, \quad I_\mu - \text{ток холостого хода,}$$

зависящий при $U = U_0$ от мощности двигателя и от скорости (у мощных двигателей I_μ в процентном отношении меньше номинального чем у маломощных и при малых скоростях I_μ больше). В общем случае значение тока намагничивания асинхронной машины составляет $I_\mu = 20 - 60\% I_{\text{ном}}$.

Различие статических и динамических характеристик асинхронных нагрузок обусловлено появлением свободных токов при быстром изменении скольжения двигателя.

10.4. Статические характеристики АД

Из анализа известной T-образной схемы замещения АД можно получить зависимость активной мощности от скольжения $P = f(s)$:

$$P = I^2 \frac{R_2}{s} = \frac{U^2 R_2}{\left[\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_s^2 \right] s} = \frac{U^2 R_2 s}{R_2^2 + (X_s s)^2}. \quad (146)$$

Отметим, что активная мощность, потребляемая асинхронной машиной, пропорциональна вращающему моменту на валу. Зависимости $P = f(s)$ и $U = f(s)$ показаны на рис. 35. Зависимость $Q = f(U)$ будет иметь такой же вид как $s = f(U)$ (рис. 36), так как $Q_s = I^2 X_s$ и $I^2 \equiv s$ при постоянном механическом моменте.

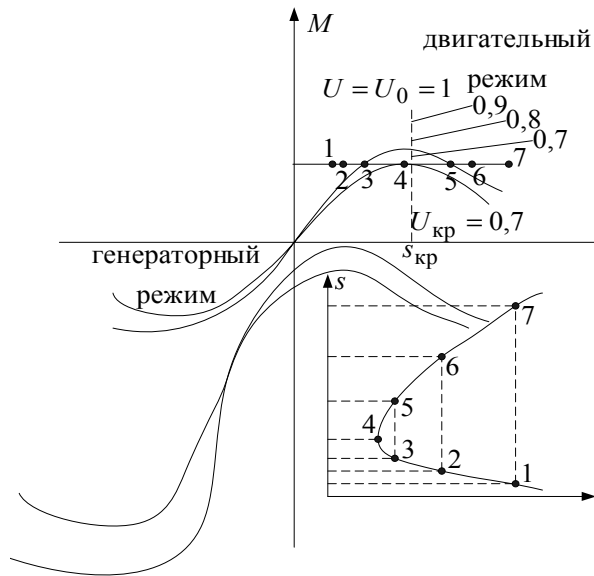


Рис. 35. Зависимости момента и напряжения АД от скольжения.

Выражения для критической мощности и скольжения получим из первой производной активной мощности по скольжению

$$\frac{dP}{ds} = U^2 R_2 \frac{R_2^2 - s^2 X_s^2}{(R_2^2 + X_s^2)^2} = 0,$$

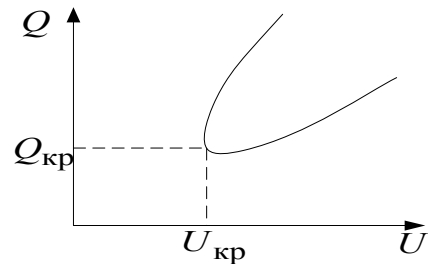


Рис. 36. Зависимость реактивной мощности АД от напряжения

откуда выражение для критического скольжения и критического значения активной мощности

$$s_{кр} = \frac{R_2}{X_s}; \quad P_{кр} = \frac{U_2}{2X_s}; \quad \text{или} \quad s_{кр} = s_0 \left(\frac{P_{кр}}{P_0} + \sqrt{\frac{P_{кр}^2}{P_0^2} - 1} \right),$$

или в общем виде
$$s_{кр} = s_0 \left(b_0 + \sqrt{b_0^2 - 1} \right), \quad (147)$$

где s_0 – номинальное скольжение; $b_0 = \frac{P_{кр}}{P_0}$.

С учетом изложенного выражение для мощности можно привести к виду

$$P = \frac{2P_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \quad \text{или при} \quad \omega = 1 \quad \text{в относительных единицах для}$$

механического (вращающего) момента
$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}. \quad (148)$$

Для случая отличия частоты сети ω_0 от синхронной ω_c , т.е. при $\omega_0 \neq \omega_c \neq 1$,

выражение для момента имеет вид $M = \frac{P}{\omega_0}$.

Механическая мощность при $\omega_0 \neq \omega_c \neq 1 \rightarrow P_{\text{мех}} = M(1-s) = P(1-s)$.

Асинхронная машина в переходных режимах может работать не только двигателем, но и тормозом ($s > 1$) или генератором ($s < 0$) как это показано на рис. 37 с учетом соотношения мощностей и моментов.

Выражение для реактивной мощности рассеяния $Q_s = I^2 X_s$ можно привести к виду

$$Q_s = I^2 s = \frac{U^2 s^2 X_s}{R_2^2 + X_s^2 s^2} = P \frac{s}{s_{\text{кр}}} \quad (149)$$

Работа двигателя устойчива при выполнении условия $\frac{dP}{ds} > 0$ и эта область находится между синхронной скоростью и критическим скольжением. В этом случае любое случайное отклонение скольжения и перемещение ротора приводят к появлению небаланса между электрическим и механическим моментами (ускоряющим и тормозящим), который заставляет ротор вернуться в исходное положение и восстановить исходный режим. При снижении напряжения или увеличении механического вращения двигатель может оказаться в критическом режиме и при дальнейшем снижении напряжения рабочая точка перейдет на падающую часть характеристики, двигатель будет тормозиться, так и реактивная мощность будет резко расти, далее двигатель остановится или «*опрокинется*». Обычно это происходит при напряжении на шинах АД на 20 ÷ 40 % меньше номинального.

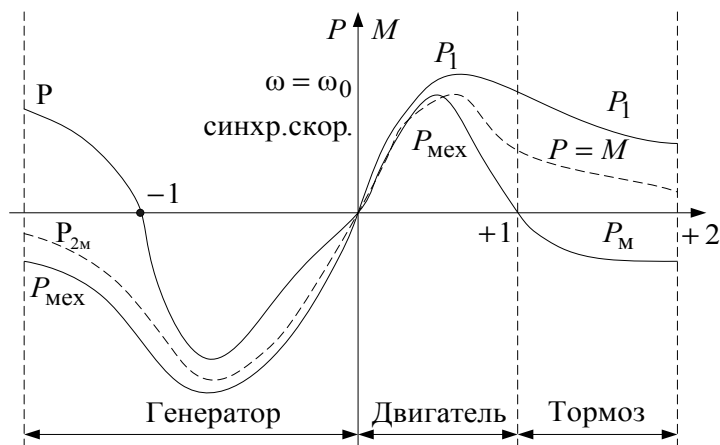


Рис. 38. Механические характеристики асинхронной машины

Процесс снижения напряжения и опрокидывания группы двигателей, по мощности соизмеримых с источником питания, в узлах нагрузки называют **лавиной напряжения**. В этом случае двигатели в электрическом отношении оказываются сильно удаленными от той ЭДС или напряжения,

которые можно считать не зависящими от режима асинхронного двигателя.

10.5. Изменение активной и реактивной мощностей асинхронной машины от изменения частоты системы при неизменном напряжении

При постоянстве механического момента $M_{\text{мех}} = \text{const}$ активная мощность, потребляемая двигателем, меняется пропорционально частоте ($P = \omega M$), а критическое скольжение при снижении частоты увеличивается

$s_{\text{кр}} = \frac{R_2 \omega_0}{\omega X_{s0}}$, что способствует устойчивости, так как при этом увеличивается и критический момент. Реактивная мощность $Q = Q_s + Q_\mu$ зависит от изменений частоты. При этом $s = \frac{I^2 R_2}{\omega M}$ или $I^2 \equiv \omega s \rightarrow Q_s = I^2 \frac{X_{s0}}{\omega_0} \omega$, или $Q_s = \omega^2 s$,

и критический момент. Реактивная мощность $Q = Q_s + Q_\mu$ зависит от изменений частоты. При этом $s = \frac{I^2 R_2}{\omega M}$ или $I^2 \equiv \omega s \rightarrow Q_s = I^2 \frac{X_{s0}}{\omega_0} \omega$, или $Q_s = \omega^2 s$,

и критический момент. Реактивная мощность $Q = Q_s + Q_\mu$ зависит от изменений частоты. При этом $s = \frac{I^2 R_2}{\omega M}$ или $I^2 \equiv \omega s \rightarrow Q_s = I^2 \frac{X_{s0}}{\omega_0} \omega$, или $Q_s = \omega^2 s$,

$Q_\mu = \frac{U^2}{X_{\mu 0} \omega} \equiv \frac{1}{f}$, т.е. составляющая Q_s уменьшается с уменьшением частоты, а составляющая Q_μ , напротив, возрастает.

а составляющая Q_μ , напротив, возрастает.

Соотношение между Q_s и Q_μ асинхронного двигателя таково, что характер изменения результирующей реактивной мощности $Q = Q_s + Q_\mu$ при малых отклонениях частоты определяется первой слагающей, а при значительном её росте – второй, как это показано на рис. 38.

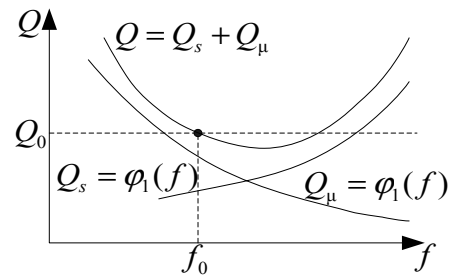


Рис. 39. Зависимости реактивных мощностей АД от частоты

При анализе переходных процессов в узлах нагрузки практический интерес представляют временные зависимости характеристик асинхронного двигателя, динамические характеристики в различных режимах его работы: пуск; отключение от шин питания; работа при сниженном напряжении на его зажимах.

Динамические характеристики АД можно определить путем численного интегрирования уравнения движения двигателя:

$$\Delta M = M_{\text{Э}} - M_{\text{МХ}} = T_j \frac{ds}{dt}, \quad (150)$$

где ΔM – избыточный момент (в относительных единицах – о.е.);

$M_{\text{Э}}$ – электромагнитный момент, о.е.;

$M_{\text{МХ}}$ – статический момент сопротивления производственного механизма, о.е.;

T_j – механическая постоянная времени агрегата: двигатель – производственный механизм, с.

Выражение электромагнитного момента $M_{\text{Э}}$ можно получить из формулы Клосса

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} \left(\frac{U}{U_{\text{H}}} \right)^2, \quad (151)$$

где M_{max} – критический момент двигателя, о.е.;

$s_{\text{кр}}$ – критическое скольжение, определяемое через номинальное скольжение

s_0 и момент M_0 из соотношения

$$s_{кр} = s_0 \left(\frac{M_{max}}{M_0} + \sqrt{\left(\frac{M_{max}}{M_0} \right)^2 - 1} \right). \quad (152)$$

Для большинства производственных механизмов значение M_{MX} можно рассчитать по формуле

$$M_{MX} = M_{П.МХ} + (K_3 - M_{П.МХ}) \left(\frac{1-s}{1-s_0} \right)^\gamma, \quad (153)$$

где $M_{П.МХ}$ – момент трения механизма, о.е.;

K_3 – коэффициент загрузки двигателя, о.е.;

γ – показатель, характеризующий зависимость $M_{MX} = f(s)$.

Механическую постоянную времени T_j обычно определяют по формуле

$$T_j = \frac{n_0^2 (GD^2 + GD_{прив.МХ}^2)}{364 P_H}, \quad (154)$$

где GD^2 – маховой момент ротора двигателя, т·м²;

$GD_{прив.МХ}^2$ – приведённый к валу двигателя маховой момент механизма, т·м²;

n_0 – синхронная частота вращения магнитного поля статора, мин⁻¹ $\left(\frac{об}{мин} \right)$.

Значение приведенного к валу двигателя махового момента определяют по формуле

$$GD_{прив.МХ}^2 = GD_{МХ}^2 \left(\frac{n_{0МХ}}{n_0} \right)^2, \quad (155)$$

где $n_{0МХ}$ – синхронная частота вращения вала механизма, мин⁻¹.

Заменяя производную $\frac{ds}{dt}$ в выражении для приращения вращающего момента $\Delta M = M_\varepsilon - M_{MX} = -T_j \frac{ds}{dt}$ на конечное приращение $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ и разбивая зависимость $\Delta M = f(s)$ на конечное число интервалов по скольжению, можно

определить среднее значение избыточного момента $\Delta M_{i\text{ср}}$ в каждом интервале Δs_j :

$$\Delta M_{i\text{ср}} = -T_j \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (156)$$

С учетом произведённой замены формула расчета длительности переходного процесса $t_{\text{пп}}$ (при пуске, посадке напряжения, выбеге и др.) имеет вид:

$$t_{\text{пп}} = -T_j \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{\Delta M_{i\text{ср}}}. \quad (157)$$

Относительная погрешность определения значения $t_{\text{пп}}$ тем меньше, чем больше число интервалов n по скольжению.

Значение $\Delta M_{i\text{ср}}$ можно также определить для каждого интервала по характеристике $\Delta M_{\text{Э}} = f(s)$ и $M_{\text{МХ}} = f(s)$.

10.6. Характеристики синхронной нагрузки

Без учета потерь в статоре СД мощность и вращающий момент пропорциональны величине напряжения

$$P = \frac{UE_q}{X_d} \sin \delta \quad \text{и} \quad M = \frac{P}{\omega_0}. \quad (158)$$

При изменении частоты выражение для момента M можно привести к виду

$$M = \frac{UE_{q0} \omega^{n-2}}{X_{d0}^*} \sin \delta, \quad (159)$$

где X_{d0} определено при $\omega = \omega_0$; $\omega = \frac{\omega}{\omega_0}$, а n характеризует систему воз-

буждения двигателя. (при независимом возбуждении $n=1$. Если возбудитель на одном валу с СМ, то $n=2$; если возбудитель и подвозбудитель на одном валу с СМ, то $n=3$). У явнополусных синхронных двигателей еще имеется момент явнополусности

$$M_{\text{явн}} = \frac{U^2}{2\omega_*} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\delta. \quad (160)$$

В целом для синхронных двигателей без учета насыщения справедли-

во утверждение о пропорциональности момента току ротора $M \equiv I_{\text{рот}}$. Кроме того, для синхронного двигателя в нормальном режиме обычно значение угла $\delta = 25^\circ \div 30^\circ$, поэтому он обладает значительной (больше чем у АД) перегрузочной способностью, при этом коэффициент перегрузки $K_{\text{п}}$ изменяется в пределах от 2 до 4:

$$K_{\text{п}} = \frac{M_{\text{мех}}}{M_0} = 2 \div 2,5, \quad \text{а у специальных} \quad K_{\text{п}} = 3 \div 4.$$

При решении задач электроснабжения синхронный двигатель интересен и как компенсатор реактивной мощности. Условия генерации реактивной мощности заданного знака без учета потерь в статоре можно получить из выражения для реактивной мощности

$$Q = \frac{UE_{q0} \omega^{n-1}}{X_{d0}^*} \cos \delta - \frac{U^2}{X_{d0}}. \quad (161)$$

При выполнении условия $\frac{E_{q0} \omega^{n-1}}{X_{d0}^*} \cos \delta > \frac{U^2}{X_{d0}}$ двигатель генерирует индуктивную реактивную мощность и регулировкой угла δ (изменением тока возбуждения) изменяют знак реактивной мощности, однако при этом необходимо обеспечить режим двигателя по активной мощности.

Статические характеристики синхронного двигателя обычно представляются зависимостями активной и реактивной мощностей от параметров

режима системы в относительных единицах $P, Q = \psi \left(\begin{matrix} U, f \\ * \quad * \end{matrix} \right)$.

Динамические характеристики СД разнообразны и зависят от характера переходного процесса. Например, при резком изменении напряжения в качестве динамической характеристики можно представить зависимость активной и реактивной мощностей от скорости изменения напряжения на шинах двигателя при условии $X'_d = \text{const}$ и приложенной за ним ЭДС $E'_q = \text{const}$.

10.7. Статические характеристики комплексной нагрузки узлов нагрузки электрических систем

Комплексная нагрузка электрической системы состоит из отдельных

элементов осветительной, бытовой и двигательной нагрузок, а также инверторов и выпрямителей, потерь в трансформаторах, линиях электропередачи и кабелях. Однако при исследовании переходных процессов нагрузки целесообразно представлять не в виде комплексных сопротивлений, потребляемая мощность которых не зависит от изменения напряжения, а в виде статических характеристик с нелинейной зависимостью потребляемой активной и реактивной мощностями от напряжения.

Статические характеристики комплексной нагрузки можно получить из анализа приращений активной и реактивной мощностей при изменении параметров режима:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f; \quad \Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f; \quad (162)$$

Изменения мощности, потребляемой нагрузкой, с изменением напряжения и частоты характеризуются величинами $\frac{\partial P}{\partial U} = a_u$; $\frac{\partial Q}{\partial U} = b_u$; $\frac{\partial P}{\partial f} = a_f$;

$\frac{\partial Q}{\partial f} = b_f$, которые называются **регулирующим эффектом нагрузки** соответственно по напряжению и по частоте. Количественно регулирующий эффект в относительных единицах по частоте комплексной нагрузки (при нормальной частоте) находится в пределах $a_f = 1,5 \div 3$ для активной мощности и $b_f = 5 \div 6$ для реактивной, а по напряжению 0,3 – 0,75 для активной мощности и 1,5 – 3,5 для реактивной.

Комплексная нагрузка электрических систем при расчетах может представляться либо в виде схемы замещения, учитывающей основные составляющие, либо при помощи статических (эквивалентных) характеристик нагрузки. В качестве таких характеристик берут или реальные статические характеристики нагрузки или касательные в некотором интервале к этим характеристикам, как это показано на рис. 39. Однако замена реальной характеристики касательной вида $P = A_1 + k_1 U$ и $Q = -A_2 + k_2 U$ дает хороший результат только в небольшом интервале изменения напряжения. С увеличением этого интервала значительно увеличивается погрешность вычислений.

В электрических системах изменение частоты сопровождается изменениями напряжения. Как правило, уменьшение частоты влечет за собой снижение напряжения и уменьшение мощности, потребляемой нагрузкой, но

может рассматриваться как временное мероприятие, направленное на сохранение устойчивости сильно перегруженных систем. Характер изменения можно проследить по статической характеристике АД (рис. 40), из которой видно, что максимальный вращающий момент АД, работающего при пониженной частоте увеличивается, критическое скольжение увеличивается, рабочее скольжение при заданном моменте сопротивления ($M_{\text{мех}} = \text{пост.}$) уменьшается. Таким образом, снижение частоты влияет на устойчивость работы АД аналогично повышению напряжения. В условиях одновременного снижения напряжения и частоты синхронные двигатели также благоприятно влияют на устойчивость нагрузки в целом, как и АД, поскольку при уменьшении напряжения СД увеличивают выпуск реактивной мощности и уменьшают его при снижении частоты.

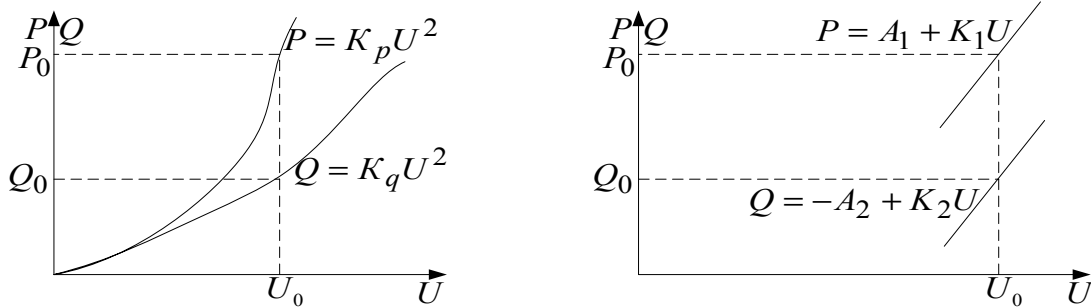


Рис. 39. Различные способы представления характеристик нагрузки: а – статическими характеристиками; б – комплексным сопротивлением

Так как нагрузка электрических систем обычно состоит из различного рода потребителей электрической энергии и асинхронные двигатели (АД) составляют в ней некоторую долю (примерно до 30 %), то трудно определить

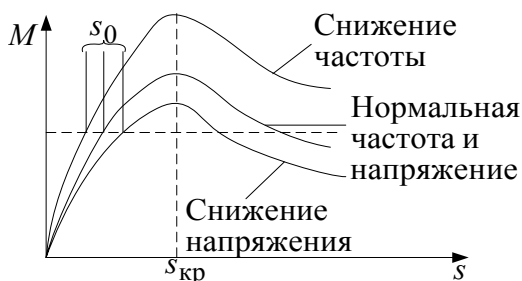


Рис. 40. Зависимость механической характеристики АД от частоты

точные параметры эквивалентного двигателя. В этом случае используют вторичный критерий устойчивости $\frac{dE}{dU} = 0$ вместо $\frac{dP}{ds} = 0$, если напряжение на зажимах комплексной нагрузки рассматривать как величину, зависящую от режима двига-

теля, а эквивалентную ЭДС E_3 – как независимую переменную. Для простейшей системы (рис. 41) можно установить следующую взаимосвязь между напряжением и эквивалентной ЭДС

$$U = \sqrt{\left(E_3 - \frac{Q_3 X_3}{E_3}\right)^2 + \left(\frac{P X_3}{E_3}\right)^2} \approx E_3 - \frac{Q_3 X_3}{E_3}, \quad (163)$$

где Q_3 – внутренняя реактивная мощность генератора.

Тогда, исследуя производную напряжения по эквивалентной ЭДС, можно сделать вывод о равноценности практических критериев оценки устойчивости:

$$\frac{dU}{dE_3} = 1 - \frac{\left(E_3 \frac{dQ_3}{dE_3} - Q_3\right) X_3}{E_3^2}. \quad (164)$$

Следовательно, при условии $\frac{dQ_3}{dE_3} \rightarrow \infty$ значение $\frac{dU}{dE_3}$ также $\rightarrow \infty$ или

$\frac{dE_3}{dU} \rightarrow 0$, этим и подтверждается равноценность

критериев $\frac{dQ_3}{dE_3} = -\infty$ критерию $\frac{dE}{dU} = 0$, а так как

условие $\frac{dQ_3}{dE} = -\infty$ равноценно $\frac{dP}{ds} = 0$, то можно

считать равноценными три критерия

$$\frac{dE}{dU} = 0; \quad \frac{dQ}{dE} = -\infty; \quad \frac{dP}{ds} = 0. \quad (165)$$

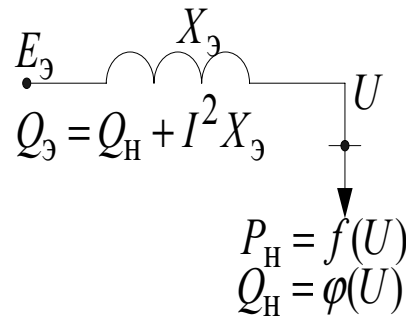


Рис. 41. Модель простейшей системы

Наибольшая опасность нарушения устойчивости нагрузки может иметь место в случае, когда нагрузка оказывается в электрическом центре системы или вблизи от него. В каждой системе при данном её исходном режиме существует точка, где напряжение оказывается минимальным. Эта точка носит название **электрического центра системы**. Появление таких точек обусловлено тем, что во время качаний генераторов или асинхронного хода напряжение в различных точках электрических сетей и электропередачи, связывающих эти генераторы, изменяется.

Контрольные вопросы

1. Узлы нагрузки. Понятия и определения.
2. Задачи анализа устойчивости узла нагрузки.
3. Статические и динамические характеристики узла нагрузки.
4. Как можно получить расчетом и экспериментом статические характеристики комплексной нагрузки?
5. Задачи анализа устойчивости асинхронной нагрузки.
6. Статические характеристики асинхронного двигателя.
7. Понятие критического скольжения, момента, мощности.
8. «Опрокидывание» асинхронного двигателя.
9. Лавина напряжения и методы борьбы с ней.
10. Динамические характеристики асинхронного двигателя.
11. Характеристики синхронной нагрузки.
12. Влияние изменения частоты на статическую устойчивость асинхронного двигателя.
13. Регулирующий эффект нагрузки.
14. Понятие электрического центра системы.

11. УСТОЙЧИВОСТЬ НОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Под сложной электроэнергетической системой понимают совокупность синхронных машин – генераторов, компенсаторов, снабженных различными регуляторами и соединенных мощными линиями электропередачи и электрическими сетями с присоединенными в различных точках комплексными нагрузками. При анализе статической устойчивости сложной системы с АРВ сильного действия используют методики для простейшей системы, но при составлении расчетной схемы предварительно выявляют участки электрической системы, для которых с минимальной погрешностью можно считать неизменными значения эквивалентных напряжений и ЭДС. Это приводит к снижению порядка дифференциального уравнения системы за счет исключения из схемы синхронных машин этих участков. Кроме того, считая станции системы электрически достаточно удаленными и не учитывая при этом взаимные влияния АРВ, можно с некоторой погрешностью рассматривать отдельные участки, а не всю систему в целом.

В общем случае при исследовании устойчивости сложной системы составляется система линеаризованных дифференциальных уравнений переходного процесса всех станций сложной системы. Для придания общности все уравнения станций записываются по отношению к некоторым узловым точкам с последующим добавлением уравнений связи между этими точками. Например, для сложной системы, изображенной на рис. 20, состоящей из m станций, связанных между собой сетью с M узловыми точками I, II, ..., M , уравнения записываются следующим образом:

– уравнения относительного движения роторов машин каждой из станций

$$T_{j1}p^2 \Delta\delta_1 = -\Delta P_1 = -\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{1I}} \Delta\delta_{1I} - \frac{\partial P_1}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} - \frac{\partial P_1}{\partial U_1} \Delta U_1;$$

$$\begin{aligned} T_{j(m-1)}p^2 \Delta\delta_{(m-1)} &= -\Delta P_{(m-1)} = \\ &= -\frac{\partial P_{(m-1)}}{\partial \delta_{(m-1)M}} \Delta\delta_{(m-1)M} - \frac{\partial P_{(m-1)}}{\partial E_{q(m-1)}} \Delta E_{q(m-1)} - \frac{\partial P_{(m-1)}}{\partial U_{(m-1)}} \Delta U_{(m-1)}; \end{aligned}$$

$$T_{jm}p^2 \Delta\delta_m = -\Delta P_m = -\frac{\partial P_m}{\partial \delta_{mM}} \Delta\delta_{mM} - \frac{\partial P_m}{\partial E_{qm}} \Delta E_{qm} - \frac{\partial P_m}{\partial U_M} \Delta U_M; \quad (166)$$

– уравнения, выражающие абсолютный угол ротора через его относительный угол, отсчитанный от узловой точки M ($\Delta\delta_{mM}$), относительный угол его узловой точки M по отношению к другой I, условно принятой за исходную, ($\Delta\delta_{IM}$), и абсолютный угол этой узловой точки ($\Delta\delta_I$)

$$\Delta\delta_1 = \Delta\delta_I + \Delta\delta_{1I}; \quad \Delta\delta_m = \Delta\delta_I + \Delta\delta_{IM} + \Delta\delta_{mM}; \quad (167)$$

– уравнения баланса отклонений потоков активных мощностей в узловых точках

$$\begin{aligned} \sum \Delta P_1 = 0 &= \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P'_{1II} + \dots + \Delta P_1; \\ \sum \Delta P_{(M)} = 0 &= \Delta P_m + \Delta P_{m-1} + \dots + \Delta P''_{(m-1)M} + \dots + \Delta P_M; \end{aligned} \quad (168)$$

– уравнения баланса отклонений потоков реактивных мощностей в узловых точках

$$\begin{aligned} \sum \Delta Q_1 = 0 &= \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \dots + \Delta Q'_{1II} + \dots + \Delta Q_1; \\ \sum \Delta Q_{(M)} = 0 &= \Delta Q_m + \Delta Q_{m-1} + \dots + \Delta Q''_{(m-1)M} + \dots + \Delta Q_{(M)}; \end{aligned} \quad (169)$$

– уравнения переходного процесса в роторах генераторов

$$\Delta E'_{q1} p T_{d_{01}} + \Delta E_{q1} = \Delta E_{q_{e1}}; \quad \Delta E'_{qm} p T_{d_{0m}} + \Delta E_{qm} = \Delta E_{q_{em}}; \quad (170)$$

– уравнения переходного процесса в возбуждателях

$$\Delta E_{q_{e1}} (T_{e1} p + 1) = \Delta U_1; \quad \Delta E_{q_{em}} (T_{em} p + 1) = \Delta U_m; \quad (171)$$

– уравнения переходного процесса в регуляторах (правые части этих уравнений содержат передаточные функции регуляторов и отклонения параметра, введенного в систему регулирования)

$$\Delta U_1 (T_{y1} p + 1) = W_1(p) \Delta \Pi_1; \quad \Delta U_m (T_{ym} p + 1) = W_m(p) \Delta \Pi_m; \quad (172)$$

– уравнения связи между отклонениями ЭДС за переходным реактивным сопротивлением и отклонением синхронной ЭДС, напряжением ближайшей узловой точки и углом между ними

$$\begin{aligned} \Delta E'_{q1} &= \frac{\partial E'_{q1}}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + \frac{\partial E'_{q1}}{\partial U_1} \Delta U_1 + \frac{\partial E'_{q1}}{\partial \delta_{11}} \Delta \delta_{11}; \\ \Delta E'_{qm} &= \frac{\partial E'_{qm}}{\partial E_{qm}} \Delta E_{qm} + \frac{\partial E'_{qm}}{\partial U_M} \Delta U_M + \frac{\partial E'_{qm}}{\partial \delta_{mM}} \Delta \delta_{mM}. \end{aligned} \quad (173)$$

– уравнения отклонений относительных углов через абсолютный угол ротора и механические постоянные

$$\begin{aligned} p^2 (\Delta \delta_{11} - \Delta \delta_{21}) &= \left(-\frac{\Delta P_1}{T_{j1}} + \frac{\Delta P_2}{T_{j2}} \right); \\ p^2 (\Delta \delta_{11} - \Delta \delta_{1M} - \Delta \delta_{mM}) &= \left(-\frac{\Delta P_1}{T_{j1}} + \frac{\Delta P_m}{T_{jm}} \right). \end{aligned} \quad (174)$$

Представленная система уравнений может быть дополнена (с целью уточнения) зависимостями электромагнитных или механических моментов от абсолютной скорости каждой машины, и в уравнениях относительного движения ротора появились бы слагаемые вида $P_{dn} \frac{\partial \delta_n}{\partial t}$ и $T_{Mn} \frac{\partial \delta_n}{\partial t}$, учитывающие влияние скорости на момент первичного двигателя (системы с полной диссипацией).

Решение поставленной задачи сводится к исследованию характеристического уравнения системы n уравнений с n неизвестными, представляющими переходный процесс рассматриваемой электроэнергетической системы при

малых отклонениях. Общий вид характеристического уравнения в этом случае такой же, как и для простейшей системы:

$$D(p) = (a_0 + \Delta a_0)p^n + \dots + (a_n + \Delta a_n) = 0,$$

где Δa – добавки, значение которых зависит от действия системы регулирования генераторов, причем регулирование должно создавать такие значения добавок, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения были положительными.

11.1. Проверка устойчивости простейшей и сложной систем При произвольном числе станций, работающих на общую нагрузку упрощенными методами

Упрощенные методики расчета статической устойчивости базируются на учете только относительных углов сдвига роторов синхронных генераторов (системы позиционного типа), на пренебрежении взаимным влиянием генераторов при действии АРВ, на постоянстве ЭДС E_X за некоторой реактивностью ΔX . В этом случае при регуляторах пропорционального типа принимают, что $E_X = E'_q \approx E'$, а $\Delta X \approx X'_d$. При регуляторах сильного действия за E_X принимают внутреннюю ЭДС, приложенную за сопротивлением рассеяния обмотки статора генератора, или напряжение на шинах генератора U_G . С учетом этих допущений регулируемая система становится полностью аналогичной нерегулируемой, устойчивость которой может нарушаться только аperiodически (необходимо также помнить о способности такой системы к раскачиванию). Поэтому выводы об устойчивости системы будут надежными для нерегулируемой системы и условными – для регулируемой.

С учетом принятых допущений рассмотрим устойчивость системы из двух станций конечной мощности, работающих при постоянных ЭДС и неизменных вращающих моментах на общую нагрузку. Схема замещения такой системы показана на рис. 42.

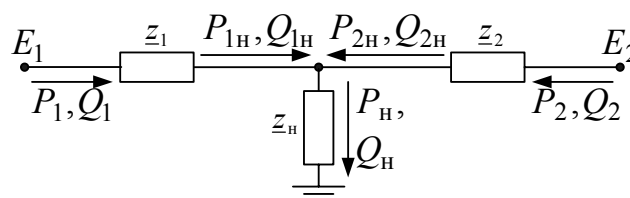


Рис. 42. Схема замещения системы из двух станций

Дифференциальные уравнения для каждой станции при этих условиях можно представить в следующем виде:

$$p^2 \Delta \delta_{12} + \left[\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \cdot \frac{1}{T_{j1}} - \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \cdot \frac{1}{T_{j2}} \right] \Delta \delta_{12} = 0;$$

$$p^2 \Delta \delta_1 + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \cdot \frac{1}{T_{j1}} \Delta \delta_{12} = 0; \quad p^2 \Delta \delta_2 + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \cdot \frac{1}{T_{j2}} \Delta \delta_{12} = 0. \quad (175)$$

Характеристическое уравнение системы и его решение имеют следующий вид:

$$p^2 + \alpha = 0; \quad p_{1,2} = \pm \sqrt{-\alpha}, \quad (176)$$

где $\alpha = \left[\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \cdot \frac{1}{T_{j1}} - \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \cdot \frac{1}{T_{j2}} \right]$ имеет смысл относительного ускорения (угла расхождения ЭДС станций или аргумента взаимного сопротивления между двумя станциями).

Следовательно, устойчивость системы будет определяться положительностью относительного ускорения, которое и будет критерием устойчивости, а предел устойчивости определится величинами постоянных инерции станций. Нарушение устойчивости будет происходить только аperiodически.

При произвольном числе станций сложной системы отдаваемая мощность каждой из них зависит от взаимных углов между ЭДС данной станции и ЭДС всех остальных станций. Для позиционной задачи с постоянством ЭДС изменение напряжений в узловых точках системы может быть вызвано только изменением углов расхождения ЭДС. Поэтому изменение мощностей станций и нагрузок целесообразно представлять функциями относительных углов:

$$\Delta P_k = f(\delta_{12}, \delta_{13}, \dots, \delta_{1k}); \quad T_{jk} p^2 \delta_k = -\Delta P_k. \quad (177)$$

Представляя приращение мощности n -й станции в виде

$$\Delta P_n = \frac{\partial P_n}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \frac{\partial P_n}{\partial \delta_{13}} \Delta \delta_{13} + \dots + \frac{\partial P_n}{\partial \delta_{1k}} \Delta \delta_{1k}, \quad (178)$$

с учетом предыдущих уравнений (175) – (177) получим систему уравнений для определения изменения относительных углов

$$p^2 \Delta \delta_{1k} + \alpha_{1k}^{12} \Delta \delta_{12} + \alpha_{1k}^{13} \Delta \delta_{13} + \dots + \alpha_{1k}^{1k} \Delta \delta_{1k} = 0. \quad (179)$$

Верхний индекс в выражении относительного ускорения (179) указывает, какие приращения мощности входят в разность, а нижний – по какому углу берутся производные. Признак неустойчивости системы – прогрессирующее увеличение относительных углов $\Delta\delta_{12}, \Delta\delta_{13}, \dots, \Delta\delta_{1k}$. Оценка устойчивости электрической системы производится при исследовании характеристического уравнения предыдущего выражения (177).

11.2. Изменение частоты и мощности в электроэнергетической системе

В момент внезапного нарушения режима дополнительная нагрузка между станциями распределяется в соответствии со значениями ЭДС и относительной электрической удаленностью станции от места возмущения. Замедление вращения роторов генераторов происходит в соответствии с величинами полученных набросов мощности и инерционностью агрегатов. Очевидно, что машины с наибольшим относительным набросом замедляются более интенсивно, что приводит к увеличению взаимных углов и перераспределению дополнительной мощности между станциями. В этот момент переходного электромеханического процесса регуляторы скорости и регуляторы частоты ещё не работают (они вступают в работу через 0,3 – 2 с), поэтому происходит понижение средней частоты в системе, сопровождаемое качаниями роторов генераторов относительно друг друга и самосинхронизацией части из них. Небаланс момента на валу каждого генератора приводит, соответственно, к изменению скорости вращения его ротора и частоты:

$$\Delta\omega_k = \omega_k - \omega_0 = \frac{\partial\delta_k}{\partial t}; \quad \Delta f_k = f_k - f_0. \quad (180)$$

При вступлении в работу регуляторов скорости (всегда раньше регуляторов частоты) установившееся отклонение частоты связано с отклонением мощности соотношением

$$\Delta f_k = \frac{\Delta M}{K_k} \cong \frac{-\Delta P}{K_k} = -\sigma_k \Delta P, \quad (181)$$

где K_k – энергия регулирования (МВт/Гц); $\sigma_k = 1/K_k$ – статизм агрегата.

Отметим, что мгновенные изменения частоты каждого генератора при изменениях нагрузки во время переходного процесса различны и после его завершения они становятся одинаковыми.

Колебания суммарной нагрузки системы $P_{\Sigma H}$, вызывающие изменение

частоты электрических систем, условно делят на три группы:

– быстрые колебания с периодом порядка 1 – 3 с и амплитудой не более $10^{-3} P_{\Sigma H}$, обусловленные малыми перемещениями роторов генераторов (электромеханическими процессами в генераторах системы) и вызывающие колебания частоты в сотые доли герц ($1 \cdot 10^{-2} \div 2 \cdot 10^{-2}$);

– средние колебания суммарной нагрузки с периодом в десятки секунд (10 – 30) и амплитудой не более $10^{-2} P_{\Sigma H}$, обусловленные нерегулярными изменениями мощности при работе потребителей электрической системы и вызывающие колебания частоты в десятые доли герц ($1 \cdot 10^{-1} \div 2 \cdot 10^{-1}$);

– медленные колебания суммарной мощности системы с периодом от минут до десятков минут, обусловленные изменениями суммарной нагрузки во времени и по условиям технологических процессов, а также атмосферными явлениями и другим факторами.

Контрольные вопросы

1. Задачи анализа устойчивости сложной системы.
2. Основные дифференциальные уравнения сложной линеаризованной электрической системы.
3. Упрощенные методы исследования устойчивости сложной линеаризованной электрической системы.
4. Динамика работы сложной электрической системы в момент внезапного нарушения режима.
5. Причины изменения частоты и мощности в сложной электрической системе и пути их минимизации.

12. ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ БОЛЬШИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Режим узла нагрузки электрической системы может нарушаться при включении или коммутации нагрузки, соизмеримой по суммарной мощности с мощностью остальной системы. Например, при пуске мощных двигателей, при осуществлении автоматического повторного включения, при одновременном переключении множества потребителей на резервное питание. Эти процессы, как правило, сопровождаются понижением напряжения в электри-

ческой системе и, как следствие, уменьшением вращающего момента двигателей, как переключаемых, так и работавших до этого в нормальном режиме. При кратковременном отключении всей нагрузки все двигатели, как значительно затормозившееся, так и полностью остановившееся, одновременно оказываются подключенными к восстановившемуся напряжению и снова *самозапускаются*. Если не предусмотрены меры, устраняющие последствия самозапуска на режим узла электрической нагрузки, то устойчивость нагрузки может нарушиться. Особое внимание следует обратить на обеспечение устойчивости самих двигателей при толчкообразных нагрузках, работающих с переменным моментом (электрическая тяга, приводные двигатели прокатных станов и т.д.).

Определение времени разбега при пуске или выбега при остановке производится на основании установленной зависимости вращающего момента двигателя M и момента сопротивления нагрузки $M_{\text{мех}}$ от скольжения. С целью упрощения вычислений упомянутых временных интервалов можно использовать статические характеристики двигателя. При этом полагают, что моменты двигателя и нагрузки зависят только от скольжения и по их статическим характеристикам можно определить разность моментов $\Delta M = \psi(s)$, разбивая эту зависимость на ряд равных интервалов по скольжению, записывают уравнение движения ротора на любом интервале характеристики в следующем виде:

$$\Delta M_i = T_j \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i}, \quad (182)$$

где ΔM_i – среднее значение разности моментов на интервале.

Тогда время от момента пуска двигателя до конца любого интервала можно вычислить по формуле

$$t = T_j \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{\Delta M_i}. \quad (183)$$

В частном случае при неизменном моменте сопротивления нагрузки $M_{\text{мех}}$ **время разбега** от скорости $\omega_1 = (1 - s_1)\omega_0$ до скорости $\omega_2 = (1 - s_2)\omega_0 > \omega_1$ при $b_c > 1$ определяется по формуле

$$t_p = \frac{T_j}{M_{\text{мех}}} \left[\frac{b_c}{\sqrt{b_c^2 - 1}} \left(s_\phi \ln \frac{s_\phi - s_2}{s_\phi - s_1} + s_{\text{уст}} \ln \frac{s_1 - s_{\text{уст}}}{s_2 - s_{\text{уст}}} \right) + (s_2 - s_1) \right], \quad (184)$$

где $b_c = \frac{b}{M_{\text{мех}}}$; $b = \frac{M_m U^2 f_0^2}{M_{\text{НОМ}} U_0^2 f^2}$; $s_\phi = s_{\text{кр}} \left(b_c + \sqrt{b_c^2 - 1} \right)$ – фактическое скольжение; $s = \frac{R}{X_s}$; $s_{\text{уст}} = \frac{s_{\text{кр}}}{b_c + \sqrt{b_c^2 - 1}}$ – установившееся значение скольжения по окончании разбега.

Время пуска можно определить приближенно, принимая $s_2 = s_{\text{уст}} + 0,01$, по формуле

$$t_{\text{пуск}} = \frac{T_j}{M_{\text{мех}}} \left[\frac{b_c}{\sqrt{b_c^2 - 1}} \left(s_\phi \ln \frac{s_\phi - s_{\text{уст}} - 0,01}{s_\phi - s_1} + s_{\text{уст}} \ln 100(1 - s_{\text{уст}}) \right) + (s_2 - s_1) \right] \quad (185)$$

Время выбега от скорости $\omega_1 = (1 - s_1)\omega_0$ до скорости $\omega_2 = (1 - s_2)\omega_0 < \omega_1$ при $b_c < 1$ определяется по формуле

$$t_{\text{в}} = \frac{T_j}{M_{\text{мех}}} \left[s_2 - s_1 + b_c s_{\text{кр}} \left(\ln \frac{s_2^2 - 2b_c s_{\text{кр}} s_2 + s_{\text{кр}}^2}{s_1^2 - 2b_c s_{\text{кр}} s_1 + s_{\text{кр}}^2} + \frac{2b_c (\varphi_2 - \varphi_1)}{\sqrt{1 - b_c^2}} \right) \right], \quad (186)$$

где $\varphi_1 = \arctg \frac{-b_c + s_1/s_{\text{кр}}}{\sqrt{1 - b_c^2}}$; $\varphi_2 = \arctg \frac{-b_c + s_2/s_{\text{кр}}}{\sqrt{1 - b_c^2}}$.

Время выбега от предшествующего установившегося режима до полной остановки двигателя определяется при подстановке в выражение (186) значений $s_2 = 1$; $s_1 = s_{\text{уст}}$.

Для одиночного двигателя при отключении его от питающей сети:

– *время выбега* и скорость вращения:

$$t_{\text{в}} = \frac{T_j}{M_{\text{мех}}} (s - s_{\text{уст}}); \quad \omega_* = \frac{\omega}{\omega_0} = \omega_{\text{уст}} - M_{\text{мех}} \frac{t}{T_j}, \quad (187)$$

где скорость до отключения двигателя в относительных единицах $\omega = 1 - s_{\text{уст}}$.

При пуске асинхронных двигателей, имеющих мощность, соизмеримую с мощностью источника, понижается напряжение на шинах генератора и резко изменяются пусковые характеристики двигателя (увеличивается длитель-

ность пуска, уменьшается момент двигателя). В первом приближении можно считать, что поперечная ЭДС генератора E_{qe} при посадке напряжения меняется скачком до нового установившегося значения или при отсутствии регулирования остается постоянной. С учетом принятых допущений можно считать, что изменение напряжения на шинах генератора от начального значения $U_{нач}$ до установившегося после окончания электромагнитного переходного процесса $U_{уст}$ практически происходит по экспоненциальному закону:

$$U = U_{уст} - (U_{уст} - U_{нач}) e^{-\frac{t}{T'_d}}. \quad (188)$$

Начальное напряжение генератора определяется по начальному значению переходной ЭДС в момент включения двигателя:

$$U_{нач} = \frac{X_{пуск}}{X_{пуск} + X'_d} E'_{q_{нач}}. \quad (189)$$

Полагая равенство начального напряжения на шинах генератора и допустимого напряжения на шинах двигателя $U_{нач} = U_{доп}$, можно определить предельно допустимую мощность $P_{д.доп}$ пускаемых двигателей при этих условиях:

$$P_{д.доп} = \frac{S_{г.ном} \eta_{д.ном} \cos \varphi_{д.ном}}{X_{пуск} \left(\frac{U_{г.ном}}{U_{д.ном}} \right)^2 \cdot k}, \quad (190)$$

где $X_{пуск} = \frac{X'_d}{\frac{E'_{q_{нач}}}{U_{доп}} - 1}$; $\eta_{д.ном}$ – к.п.д. двигателя; $\cos \varphi_{д.ном}$ – коэффициент

мощности двигателя; k – коэффициент загрузки.

Изменение напряжения питающей сети или механической нагрузки на валу двигателя (*наброс нагрузки*) одинаково вызывает изменение скольжения. С уменьшением напряжения или ростом момента скольжение увеличивается. При уменьшении напряжения от U_0 до U_1 электромагнитный момент упадет

в $\left(\frac{U_1}{U_0} \right)^2$ раз:

$$M_1 = M_0 \left(\frac{U_1}{U_0} \right)^2 = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \left(\frac{U_1}{U_0} \right)^2. \quad (191)$$

Уравнение движения ротора принимает вид

$$M_{\text{мех.0}} - M_1 = T_j \frac{ds}{dt}. \quad (192)$$

Время, на которое можно понизить напряжение с U_0 до U_1 , с тем чтобы после восстановления напряжения двигатель, не останавливаясь, мог продолжить свою нормальную работу, вычислим интегрируя выражения (191)

и (192) в пределах от $s_0 = \frac{s_0}{s_{кр}}$ до $s_1 = \frac{s_1}{s_{кр}}$ и от $t = 0$ до $t = t_1$, где s_1 соответствует скольжению на границе устойчивости двигателя:

$$t_1 = \frac{T_j s_{кр}}{M_{\text{мех.0}}} \left[s + k \ln \left(s^2 - 2k s + 1 \right) + \frac{2k^2}{\sqrt{1-k^2}} \operatorname{arctg} \frac{s-k}{\sqrt{1-k^2}} \right]_{s_0}^{s_1}. \quad (193)$$

Верхний и нижний пределы интегрирования можно определить из выражения

$$M_{\text{мех.0}} = \frac{2M_m}{s + \frac{1}{s}}, \quad \text{отсюда} \quad s = \frac{M_m}{M_{\text{мех.0}}} \pm \sqrt{\left(\frac{M_m}{M_{\text{мех.0}}} \right)^2 - 1}, \quad (194)$$

где знак «плюс» соответствует s_1 , а знак «минус» — s_0 .

При пуске синхронного двигателя начальный толчок периодической слагающей тока статора можно оценить по соотношению

$$I \cong \frac{U}{X''_{d\Sigma}}, \quad (195)$$

где U — напряжение сети в той точке, где оно может быть принято не зависящим от режима двигателя; $X''_{d\Sigma} = X''_d + X_{\text{ст}}$; $X_{\text{ст}}$ — внешнее сопротивление цепи статора между точкой с напряжением U и выводами статора данного двигателя.

Аналитические зависимости изменения токов статора и ротора в процессе разгона двигателя может быть найдено с помощью уравнений Парка – Горева, а длительность разгона до подсинхронной скорости может быть вычислена так же, как для асинхронных двигателей. Время наброса нагрузки синхронной машины, в течение которого допустимо понижение напряжения или увеличение механического момента, определяется с помощью метода последовательных интервалов (см. 2.1).

Контрольные вопросы

1. Условия возникновения режима самозапуска двигателей.
2. Расчет времени разбега асинхронного двигателя.
3. Расчет времени пуска асинхронного двигателя.
4. Расчет времени выбега асинхронного двигателя.
5. Наброс нагрузки асинхронного двигателя.
6. Расчет допустимого времени наброса нагрузки асинхронного двигателя.
7. Пуск синхронного двигателя и расчет допустимого времени наброса нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задачи анализа переходных процессов в электрических системах предполагает поиск путей оптимальных условий сооружения и эксплуатации электрической системы. Критерий оценки оптимальности – качество переходного процесса и наибольшая устойчивость при экономически оправданных вложениях средств на мероприятия, улучшающие качество переходных процессов и устойчивость. При этом необходимо сопоставить вероятный экономический ущерб от аварийного отключения того или иного элемента системы и понижения качества переходного процесса со стоимостью сооружения и эксплуатации устройств, обеспечивающих улучшение качества переходных процессов и устойчивости.

Задачи исследования переходных процессов для реализации упомянутых целей направлены:

- на определение характера переходных процессов, происходящих при нормальных коммутационных операциях;
- определение максимальных значений токов коротких замыканий, наибольших изменений напряжений («посадок» и «перенапряжений») и их влия-

ния на оборудование и режим системы в целом, а также мероприятий, уменьшающих эти последствия;

- определение устойчивости и запасов устойчивости возможных режимов системы, выявление характера переходных процессов;

- выбор мероприятий по повышению устойчивости энергосистем, электропередач и узлов нагрузок;

- разработку требований к основным элементам энергосистем и их оборудованию, а также к релейной защите и устройствам системной автоматики с точки зрения устойчивости энергосистем.

При исследовании электромеханических переходных процессов важно основное оборудование энергосистем и средства автоматики рассматривать как единый комплекс. Оценка любого аварийного режима должна носить вероятностный характер, поскольку точно неизвестны ни сочетания начальных условий, при которых возникает авария, ни ее место, ни параметры системы в аварийном режиме. Кроме того, следует учитывать недостаток статистических данных о протекании аварий, связанных с нарушением устойчивости энергосистем и случайный характер условий возникновения аварийных режимов.

При расчете устойчивости из-за неточности исходных данных неизбежна некоторая условность результатов, поэтому окончательная оценка устойчивости производится сопоставлением результатов расчета с результатами эксплуатации данной или аналогичной энергосистемы, а также с данными специальных испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. – М. : Высш. шк., 1985. – 536 с.

2. Зуев, Э. Н. Математическое описание элементов электрической системы: учеб. пособие по курсу "Переходные режимы в электрических системах" / Э. Н. Зуев, В. А. Строев. – М. : Моск. энергет. ин-т, 1983. – 84 с.

3. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях : учеб. пособие для вузов / под ред. В. А. Веникова. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.

4. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. П. Крючков [и др.]; под ред. И. П. Крюčkова, В. А. Старшинова. – М. : Академия, 2005. – 416 с. – ISBN 5-7695-1998-3.

5. Жданов, П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов. – М. : Энергия, 1979. – 520 с.

Учебное издание

КОЛЕСНИК Григорий Платонович

ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Учебное пособие

Подписано в печать 02.09.08.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 6,74. Тираж 200 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87