

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.ДВ.10.02 Переходные процессы.

Направление подготовки 35.03.06 Агроинженерия

Профиль образовательной программы Электрооборудование и электротехнологии

Форма обучения заочная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Конспект лекций.....	3
1.1 Лекция № 1 Общие сведения об электромагнитных переходных процессах.	
Составление схем замещения.....	3
1.2 Лекция № 2 Практические методы расчета токов КЗ.....	7
1.3 Лекция № 3 Основные понятия о переходных электромеханических процессах в ЭЭС. Динамическая устойчивость.....	11
1.4 Лекция № 4,5 Статическая устойчивость электрической системы.....	17
2. Методические материалы по выполнению лабораторных работ.....	23
2.1 Лабораторно-практическая работа №1-2 Переходные электромагнитные процессы в синхронной машине.....	23
2.2 Лабораторно-практическая работа № 3 Переходные процессы в сети с источником бесконечной мощности. Влияние нагрузки на ток КЗ.....	23
2.3 Лабораторно-практическая работа № 4 Переходные электромеханические процессы в ЭЭС.....	23
2.4 Лабораторно-практическая работа № 5 Определение динамической устойчивости ЭЭС.....	23
2.5 Лабораторно-практическая работа № 6 Определение статистической устойчивости ЭЭС. Пределы мощности и пределы устойчивости.....	24

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1. 1 Лекция № 1 (2 часа).

Тема: «Общие сведения об электромагнитных переходных процессах. Составление схем замещения»

1.1.1 Вопросы лекции:

- 1.Основные понятия.
- 2.Причины возникновения переходных процессов.
- 3.Требования к расчетам переходных процессов.
- 4.Основные допущения, принимаемые при расчетах.

1.1.2 Краткое содержание вопросов:

- 1.Основные понятия.
- 2.Причины возникновения переходных процессов.
- 3.Требования к расчетам переходных процессов.
- 4.Основные допущения, принимаемые при расчетах.

1. Основные понятия.

Система электроснабжения – часть электрической системы, которая представляет собой совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией. В свою очередь, электрическая система – совокупность электрических станций и электрических сетей энергосистемы. В состав электрической системы входят синхронные генераторы электростанций, трансформаторы повышающих и понижающих подстанций, линии электропередачи (ЛЭП), потребители электрической энергии. В любой момент времени или на интервале времени в системе протекают процессы, совокупность которых называется режимом системы и характеризуется параметрами, определяющими условия работы системы. Это значения напряжений в различных точках системы, углов сдвига фаз между эдс генераторов и напряжением на шинах приемников, токов и мощностей.

Режимы системы могут быть установленными и неустановившимися (переходными). Переходные режимы (процессы) возникают в электрической системе при изменении условий ее работы, которые происходят как при нормальной эксплуатации (включение и отключение нагрузки (Н), пуск асинхронных двигателей (АД), отключение одной цепи ЛЭП и т. д.), так и в аварийных ситуациях (короткое замыкание (к. з.), обрыв цепи ЛЭП, автоматическое регулирование, возбуждения (АРВ) генераторов и др.)

В общем случае переходный процесс сопровождается нарушением первоначального электромагнитного состояния элементов системы и скорости вращения электрических машин, т. е. процесс характеризуется взаимосвязанными между собой волновыми, электромагнитными и электромеханическими изменениями. В схемах сельского электроснабжения допустимо рассматривать переходный процесс только как электромагнитный.

Изучение переходных режимов необходимо для того, чтобы уметь оценивать значения параметров режима и тем самым заранее предотвращать опасные последствия таких режимов.

Наиболее распространенными и опасными повреждениями в электрической системе являются короткие замыкания. Продолжительность к. з. часто составляет доли секунды или секунды. Однако их последствия иногда бывают весьма тяжелыми. Так, следствием к. з. могут быть: понижение напряжения в значительной части электроэнергетической системы, приводящее к нарушению нормальной работы потребителей электроэнергии и браку продукции; разрушение поврежденного оборудования под действием электрической дуги; разрушение электрооборудования в

результате электродинамического и термического действия токов к. з.; нарушение устойчивости электроэнергетической системы.

Коротким замыканием называется всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы замыкание между фазами, а в системах с заземленной нейтралью (или четырехпроводных) также замыкание одной или нескольких фаз на землю (или на нулевой провод). При этом токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту замыкания, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима. Виды коротких замыканий представлены в таблице 1.

Короткое замыкание на землю в электроустановке обусловлено соединением с землей одной, двух или трех фаз какого-либо ее элемента, а короткое замыкание с землей сопровождается контактированием точки К.З. с землей.

2. Причины возникновения переходных процессов.

В общем случае в электрической цепи переходные процессы могут возникать, если в цепи имеются индуктивные и емкостные элементы, обладающие способностью накапливать или отдавать энергию магнитного или электрического поля. В момент коммутации, когда начинается переходный процесс, происходит перераспределение энергии между индуктивными, емкостными элементами цепи и внешними источниками энергии, подключенными к цепи. При этом часть энергия безвозвратно преобразуется в другие виды энергий (например, в тепловую на активном сопротивлении).

После окончания переходного процесса устанавливается новый установившийся режим, который определяется только внешними источниками энергии. При отключении внешних источников энергии переходный процесс может возникать за счет энергии электромагнитного поля, накопленной до начала переходного режима в индуктивных и емкостных элементах цепи.

Изменения энергии магнитного и электрического полей не могут происходить мгновенно, и, следовательно, не могут мгновенно протекать процессы в момент коммутации. В самом деле, скачкообразное (мгновенное) изменение энергии в индуктивном и емкостном элементе приводит к необходимости иметь бесконечно большие мощности $P = dW/dt$, что практически невозможно, ибо в реальных электрических цепях бесконечно большой мощности не существует.

Таким образом, переходные процессы не могут протекать мгновенно, так как невозможно в принципе мгновенно изменять энергию, накопленную в электромагнитном поле цепи. Теоретически переходные процессы заканчиваются за время $t \rightarrow \infty$. Практически же переходные процессы являются быстропротекающими, и их длительность обычно составляет доли секунды. Так как энергия магнитного W_M и электрического полей W_E описывается выражениями

$$W_M = \frac{LI^2}{2}; \quad W_E = \frac{CU^2}{2},$$

то ток в индуктивности и напряжение на емкости не могут изменяться мгновенно. На этом основаны законы коммутации.

Первый закон коммутации состоит в том, что ток в ветви с индуктивным элементом в начальный момент времени после коммутации имеет то же значение, какое он имел непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения он начинает плавно изменяться. Сказанное обычно записывают в виде $i_L(0-) = i_L(0+)$, считая, что коммутация происходит мгновенно в момент $t = 0$.

Второй закон коммутации состоит в том, что напряжение на емкостном элементе в начальный момент после коммутации имеет то же значение, какое оно имело непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения оно начинает плавно изменяться: $U_C(0-) = U_C(0+)$.

Следовательно, наличие ветви, содержащей индуктивность, в цепи, включаемой под напряжение, равносильно разрыву цепи в этом месте в момент коммутации, так как

$i_L(0) = i_L(0_+)$. Наличие в цепи, включаемой под напряжение, ветви, содержащей разряженный конденсатор, равносильно короткому замыканию в этом месте в момент коммутации, так как $U_C(0) = U_C(0_+)$.

Однако в электрической цепи возможны скачки напряжений на индуктивностях и токов на емкостях.

В электрических цепях с резистивными элементами энергия электромагнитного поля не запасается, вследствие чего в них переходные процессы не возникают, т.е. в таких цепях стационарные режимы устанавливаются мгновенно, скачком.

В действительности любой элемент цепи обладает каким-то сопротивлением r , индуктивностью L и емкостью C , т.е. в реальных электротехнических устройствах существуют тепловые потери, обусловленные прохождением тока и наличием сопротивления r , а также магнитные и электрические поля.

Переходные процессы в реальных электротехнических устройствах можно ускорять или замедлять путем подбора соответствующих параметров элементов цепей, а также за счет применения специальных устройств.

3. Требования к расчетам переходных процессов.

Для цепи после коммутации составим систему дифференциальных уравнений по первому и второму законам Кирхгофа:

$$-i + i_1 + i_2 = 0; \quad (14.65a)$$

$$ri + Ldi/dt + u_C = E; \quad (14.65b)$$

$$ri_2 - u_C = 0. \quad (14.65c)$$

где $i_1 = Cdu_C/dt$. После подстановки u_C в (14.65) и дифференцирования уравнений (14.65 6 и в) получим систему уравнений для трех неизвестных токов:

$$\left. \begin{array}{l} -i + i_1 + i_2 = 0; \\ rdi/dt + Ld^2i/dt^2 + i_1C = 0; \\ -i_1C + rdi_2/dt = 0. \end{array} \right\} \quad (14.66)$$

Независимые начальные условия - ток в индуктивном элементе $i_L(0+)$ и напряжение на емкостном элементе $u_C(0+)$ - неизвестны. Поэтому определим их из расчета режима цепи до коммутации с применением законов коммутации. Считая, что до коммутации в левом контуре был установленный режим, при постоянной ЭДС E конденсатор был заряжен до напряжения $u_C = E$, т.е. $u_C(0-) = u_C(0+) = u_C(0) = E$, а ток был равен нулю, т.е. $i(0-) = i(0+) = i(0) = 0$. Это и есть независимые начальные условия.

3. Запишем искомую величину в виде суммы установившейся и свободной составляющих: $i_1 = i_{1y} + i_{1se}$.

4. Установившуюся составляющую найдем, рассчитав режим цепи постоянного тока (ЭДС в цепи постоянная) после коммутации.

В установившемся режиме после коммутации ток есть только во внешнем контуре, а $i_{1y} = 0$.

5. Составим характеристическое уравнение и найдем его корни. Из системы трех уравнений (14.66) с тремя неизвестными i_1, i_2, i_3 можно исключить токи i_1 и i_2 и для полученного дифференциального уравнения записать характеристическое уравнение. Однако для определения корней можно составить главный определитель системы (14.66) и приравнять его к нулю:

$$\Delta p = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 \\ rp + Lp^2 & 1/C & 0 \\ 0 & -1/C & rp \end{vmatrix} = 0$$

4. Основные допущения, принимаемые при расчетах

В сетях выше 1000В

- 1) пренебрегают насыщением магнитных систем всех элементов цепи КЗ (генераторов, трансформаторов, двигателей);
- 2) если $r_{рез}/X_{рез} \leq 1/3$ (результатирующее сопротивление от источника до точки КЗ), то пренебрегают активным сопротивлением элементов схемы; активное сопротивление учитывают только в кабельных линиях и воздушных линиях со стальными проводами;
- 3) пренебрегают различиями значений сверхпереходных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям синхронных машин;
- 4) приближенно учитывают нагрузки в схемах замещения;
- 5) пренебрегают емкостными проводимостями воздушных линий до 220кВ, выше ей пренебречь нельзя, т.к. там оно влияет на переходные процессы;
- 6) система, в которой протекает переходной процесс, считается симметричной, все расчеты проводятся на одну фазу, фазу А;
- 7) пренебрегают токами намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов (исключение: случай включения трехстержневого трансформатора Y_0/Y_0 на напряжение нулевой последовательности).

Расчеты $I_{к.з.}$ в сетях до 1000В выполняют с такими же допущениями, но с учетом активных сопротивлений силовых элементов сети. В расчетную схему КЗ необходимо включать также сопротивление проводников, кабелей, шин длиной 10 – 15м и более, токовых катушек расцепителей автоматических выключателей, первичных обмоток многовитковых трансформаторов тока, переходных сопротивлений контактов, коммутационных аппаратов, переходных сопротивлений в месте КЗ, несимметрию сопротивлений фаз. 1) **На первом этапе** расчета аварийных режимов КЗ на основе принципиальной схемы составляют – расчетную схему (РС).

РС соответствует аварийным режимам СЭС, и на ней в однолинейном изображении показывают: источники СЭС; точку КЗ и все силовые элементы, по которым возможно протекание $I_{к.з.}$ или его составляющих (т.е. генераторы, синхронные компенсаторы, статические источники реактивной мощности, силовые трансформаторы и автотрансформаторы, реакторы, воздушные и кабельные линии, связывающие источники питания с точками КЗ, малоудаленные электрически обобщенные нагрузки).

В расчетной схеме учитываются электродвигатели, как источники подпитки точек КЗ при их небольшой удаленности и $S_{сум} \geq 1000$ кВА.

Под *электрической удаленностью* от точки КЗ до источника питания или подпитки понимают сопротивление короткозамкнутой цепи, в относительных единицах:

если $X_{\Sigma}^* > 3$ – удаленное КЗ

если $X_{\Sigma}^* \leq 3$ – малоудаленное КЗ

Можно оценивать удаленность КЗ по отношению тока источника в начальный момент КЗ к его номинальному току, если отношение ≥ 1 – малоудаленное

если отношение < 1 – удаленное.

2) **На втором этапе** на расчетной схеме замещения отмечают точки КЗ, и указывают вид КЗ, уточняют расчетные условия (какие ее элементы должны быть включены, момент времени КЗ и т.д.).

Каждый элемент схемы характеризуется соответствующими параметрами (см. табл.2).

Схема замещения составляется на основе ее расчетной схемы для начального момента переходного процесса. Ее компонуют для каждой точки КЗ и в нее включают те элементы расчетной схемы, по которым возможно протекание I_{K3} или его составляющих к данной точке КЗ.

Сопротивление элементов, ЭДС источников питания, а так же значения токов и напряжений в любых точках схемы замещения могут быть выражены в именованных или относительных единицах.

Относительное значение какой-либо величины – это отношение этой величины к другой одноименной величине, выбранной за единицу (обычно относительные значения параметров элементов заданы при номинальных условиях):

1.2 Лекция № 2 (2 часа).

Тема: «Практические методы расчета токов КЗ»

1.2.1 Вопросы лекции:

1. Расчет тока КЗ в начальный момент времени от группы синхронных и асинхронных двигателей, от комплексной и обобщенной нагрузок.
2. Метод типовых кривых.
3. Учет действия токоограничивающих устройств.

1.2.2 Краткое содержание вопросов:

1. Расчет тока КЗ в начальный момент времени от группы синхронных и асинхронных двигателей, от комплексной и обобщенной нагрузки;

При близких коротких замыканиях напряжение на выводах электродвигателей резко падает и может оказаться меньше их ЭДС. Поскольку двигатели по инерции продолжают вращаться, то они на короткое время переходят в режим генератора и осуществляют подпитку током места повреждения.

При расчете максимального начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ необходимо учитывать подпитку от синхронных и асинхронных двигателей мощностью 100 кВт и более, если эти электродвигатели не отделены от точки КЗ силовыми трансформаторами или токоограничивающими реакторами.

Синхронные и асинхронные двигатели должны быть введены в схему замещения своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями.

Синхронные двигатели.

Если в предшествующем короткому замыканию режиме электродвигатели работали с перевозбуждением, то сверхпереходную ЭДС следует определять по формуле

$$E''_{\Phi} \approx E''_0 = \sqrt{(U_{\Phi 0} + I_0 x''_d \cdot \sin \varphi_0)^2 + (I_0 \cdot x''_d \cdot \cos \varphi_0)^2},$$

а если с недовозбуждением – то по формуле

$$E''_{\Phi} = \sqrt{(U_{\Phi 0} - I_0 \cdot x''_d \cdot \sin \varphi_0)^2 + (I_0 \cdot x''_d \cdot \cos \varphi_0)^2}.$$

При отсутствии точных сведений о параметрах предшествующего режима можно принимать, что до КЗ электродвигатели работали в номинальном режиме.

Тогда для расчета сверхпереходной ЭДС в относительных единицах удобно воспользоваться формулой

$$E''_* = E''_{*(\text{ном})} = \sqrt{(1 + x''_{d(\text{ном})} \cdot \sin \varphi_{\text{ном}})^2 + (x''_{d(\text{ном})} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}})^2}.$$

Величину сверхпереходного сопротивления по продольной оси $X_{d(nom)}^{11}$, выраженную в относительных номинальных единицах, по известному типу двигателя можно найти в справочниках, каталогах или паспорте.

Асинхронные двигатели.

Для асинхронных двигателей фазное значение сверхпереходной ЭДС следует определять через параметры предшествующего режима $U\Phi 0$ (кВ), $I0$ (кА), $\cos\phi_0$ по формуле:

$$E''_{\Phi} = \sqrt{(U_{\Phi 0} - I_0 \cdot x'' \cdot \sin\phi_0)^2 + (I_0 \cdot x'' \cdot \cos\phi_0)^2},$$

причем сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного двигателя допустимо находить по выражению:

$$x'' = \frac{1}{K_{\Pi}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2 \cdot \cos\phi_{\text{ном}} \cdot \eta\% / 100\%}{P_{\text{ном}}}$$

где K_{Π} – кратность пускового тока асинхронного двигателя; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, кВ; $\cos\phi$ – номинальный коэффициент мощности электродвигателя; η – КПД электродвигателя, %; $P_{\text{ном}}$ – номинальная (механическая на валу) мощность электродвигателя, МВт.

2. Метод типовых кривых

Суть метода состоит в применении специальных кривых, использующих зависимости изменения во времени отношения тока КЗ генератора в произвольный момент времени к начальному при различных удаленностях точки КЗ. Упомянутые кривые справедливы для турбогенераторов мощностью от 12,5 до 800 мВт, гидрогенераторов мощностью до 500 мВт и для всех крупных синхронных компенсаторов. Они включены в Руководящие указания по расчету коротких замыканий, выбору и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания.

Типовые кривые представляют собой семейство основных кривых

$$\frac{I_{rt}}{I_{r0}} = f(t) \text{ при } \frac{I_{rt}}{I_{rmax}} = \text{var}$$

и семейство дополнительных кривых

$$\frac{I_{rt}}{I_{k0}} = f(\frac{I_{rt}}{I_{r0}}) \text{ при } \frac{I_{rt}}{I_{k0}} = \text{var},$$

где I_{rt} – периодическая составляющая тока генератора в произвольный момент времени t ($t=0,0,5$ с); I_{r0} – периодическая составляющая тока генератора в начальный момент КЗ; $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток генератора; I_{kt} – ток в месте КЗ в произвольный момент времени t ; I_{k0} – ток в месте КЗ в начальный момент времени.

Порядок расчета периодической слагающей тока КЗ в схеме с одним генератором:

- составляют схему замещения, в которую генератор вводят его ЭДС E''_q и сопротивлением X''_d ; нагрузочные ветви сети не учитывают;
- свертывают схему относительно точки КЗ и находят начальное значение тока в месте КЗ I_{k0} , равное току генератора I_{r0} ;

$$\frac{I_{rt}}{I_{r0}}$$

- находят отношение токов $\frac{I_{rt}}{I_{\text{ном}}} = I_{r0(n)*}$;

- по основным типовым кривым находят для интересующего момента

$$\frac{I_{rt}}{I_{r0}}$$

времени t отношение токов $\frac{I_{rt}}{I_{r0}} = \gamma_t$;

- находят искомый ток в месте КЗ $I_{rt} = I_{kt} = \gamma_t I_{r0}$.

При удаленных КЗ величина тока $I_{r0(H)*}$ составляет 1,2. По мере приближения точки КЗ к шинам генератора этот ток увеличивается до 6,8. Если значение тока оказывается дробным числом, то его округляют до ближайшего целого числа.

3. Учет действия токоограничивающих устройств;

Общие требования к токоограничивающим устройствам

Короткие замыкания сопровождаются появлением значительных токов КЗ, снижением напряжения в узлах сети и сбросом активной нагрузки генераторов электростанций. С учетом этого к токоограничивающим устройствам целесообразно предъявить следующие общие требования:

- ограничить значения токов КЗ;
- поддержать на возможно более высоком уровне напряжение в узлах сети;
- уменьшить по возможности сброс активной нагрузки с генераторов электростанций;
- не оказывать существенного влияния на нормальный режим работы сети;
- обеспечить в аварийном режиме условия, необходимые для действия релейной защиты сети;
- не вносить существенных нелинейных искажений в параметры режима сети, особенно при нормальном режиме ее работы;
- иметь стабильные характеристики при изменении схемы сети. Отсюда следует, что параметры ТОУ должны удовлетворять следующим условиям:
- при $I < I_{rp}$ должно быть

$$\Delta U \rightarrow 0; \Delta P \rightarrow \min; Z \rightarrow 0$$

где I_{rp} — граничный ток, при котором ТОУ должно вступить в действие или «сработать»; ΔU — падение напряжения в ТОУ; ΔP — потери мощности в ТОУ; Z — сопротивление ТОУ;

- при $I < I_{rp}$ должно быть

$$X \approx -\Delta X_{ng}$$

$$R \approx -\Delta R_{ng}$$

$$Z \approx -\Delta Z_{ng}$$

$$I_{rp} > I_{prod.ng}$$

$$I_{rp} > I_{ng.dop}$$

где $I_{prod.ng}$ — наибольший ток продолжительного режима; $I_{ng.dop}$ — допустимый ток перегрузки цепи с ТОУ.

В отдельных случаях, если это необходимо, может быть наложено более жесткое условие:

$$I_{rp} > I_{ax}$$

где I_{ax} — ток допустимого асинхронного режима (асинхронного хода) по цепи с ТОУ.

Если выполняется условие , являющееся следствием условий и , то режим работы генераторов и предвключенной нагрузки $ng1$ не изменяется при переходе от нормального режима к режиму КЗ. Однако выполнить условие обычно не представляется возможным из-за трудности выполнения условия . В реальных мощных электроустановках наиболее просто и полно может быть выполнено условие путем подбора и введения в поврежденную цепь дополнительного индуктивного сопротивления

Анализ показывает, что для удовлетворения перечисленных выше общих требований и условий токоограничивающее устройство должно обладать нелинейной характеристикой.

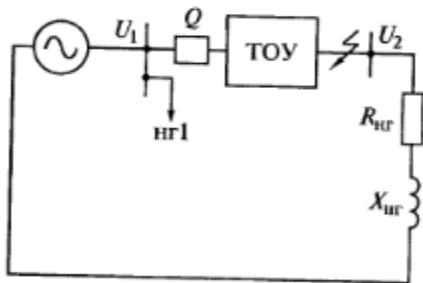


Рис. 9.8. Схема, поясняющая требования к ТОУ:

Q — выключатель; $R_{\text{нг}}$ и $X_{\text{нг}}$ — активное и индуктивное сопротивления нагрузки; нг1 — нагрузка на шинах с напряжением U_1 .

Токоограничивающий реактор — электрический аппарат, предназначенный для ограничения ударного тока короткого замыкания. Включается последовательно в схему и работает как индуктивное дополнительное сопротивление, уменьшающее ударный ток при коротком замыкании, что увеличивает устойчивость генераторов и системы в целом.

Применение: При коротком замыкании ток в цепи значительно возрастает по сравнению с током нормального режима. В высоковольтных сетях токи короткого замыкания могут достигать таких величин, что подобрать установки, которые смогли бы выдержать электродинамические силы, возникающие вследствие протекания этих токов, не представляется возможным. Для ограничения ударного тока короткого замыкания применяют токоограничивающие реакторы.

Устройство и принцип действия

Реактор — это катушка с постоянным индуктивным сопротивлением, включенная в цепь последовательно. В нормальном режиме на реакторе наблюдается падение напряжения порядка 3-4 %, что вполне допустимо

1.3 Лекция № 3 (2 часа).

Тема: «Основные понятия о переходных электромеханических процессах в ЭЭС. Динамическая устойчивость»

1.3.1 Вопросы лекции:

1. Классификация переходных процессов.
2. Векторная диаграмма простейшей электрической системы с неявнополюсными и явнополюсными генераторами. Угловые характеристики мощности.
3. Причины и характер больших возмущений. Уравнение движения ротора генератора.
4. Метод площадей. Определение предельного угла отключения КЗ.
5. Метод последовательных интервалов.
6. Учет переходных электромагнитных процессов. Учет форсировки и АРВ генератора.

1.3.2 Краткое содержание вопросов:

1 Классификация переходных процессов. Причины и характер больших возмущений;

При переходах системы от одного установившегося режима (состояния равновесия) к другому происходит изменение количества той энергии, которая была связана с электрической или электромеханической цепью в исходном режиме. Это явление, единое по своей природе, при анализе принимается состоящим из ряда процессов, каждый из которых отражает изменение определенной группы параметров режима. Выделенная группа параметров режима, характеризующая данный процесс, называется параметрами

процесса. При более строгом подходе переходные процессы надо было бы рассматривать одновременно во времени и пространстве (например, появление тока при коротком замыкании и распространение электромагнитных волн в пространство вдоль воздушных линий, кабелей, обмоток машин и трансформаторов). Однако решение задачи можно упростить, учитывая только наиболее существенные для конкретной задачи факторы. Такое упрощение принято в настоящей дисциплине, где рассмотрение переходных процессов ведется только во времени, но не в пространстве.

Переходные процессы при этом, так же как и режимы, различаются по ряду признаков:

- по условиям протекания ; так, в нормальных переходных режимах можно судить о нормальных переходных процессах, в аварийных режимах — об аварийных переходных процессах. Такое деление несколько условно, так как физическая природа процесса не зависит от того, является он нормальным или аварийным;
- по причинам возникновения — по видам возмущающих воздействий и значениям возмущений. Под возмущением при этом понимаются отклонения параметров режима, происходящие в начале переходного процесса в связи с появлением новых, т. е. не проявлявшихся ранее, факторов, изменяющих (возмущающих) режим. Эти факторы, являющиеся причиной возмущений и называемые возмущающими воздействиями, могут быть большими, малыми, синусоидальными, толчкообразными и т.д.

При этом можно рассматривать реальные физические причины переходного процесса или независимо от физических причин вводить в расчет некоторые пробные отклонения (большие или малые) параметров режима, на какое-то время изменяющие исходный режим:

- по допущениям, сделанным при составлении дифференциальных уравнений, т. е. по полноте математического описания;
- по скорости протекания процессов в системе, причем следует иметь в виду, что переходный процесс, начавшийся в момент возмущений режима, в линейной системе теоретически длится бесконечно долго. Практически считают, что процесс закончился, если параметр, характеризующий его изменение, отличается от теоретического установившегося значения на некоторое конечное значение, зависящее от конкретных условий;
- по структуре исследуемой системы, которая может быть или простой, содержащей радиальные передачи, или сложной, состоящей из ряда параллельных контуров;
- по допущениям, сделанным при математическом описании; эта градация переходных процессов особенно разнообразна, поэтому обычно приходится ограничиваться только некоторыми наиболее существенными признаками.

При исследованиях переходных процессов часто вводится линеаризация — упрощение реальной нелинейной системы, при котором имеющиеся в ней нелинейности при исследовании переходных процессов не учитываются. Нелинейные параметры режима принимаются постоянными или представляются линейными зависимостями.

Квазипереходные процессы. Приставка «квази», означающая «как бы», указывает на то, что при рассмотрении переходных процессов часть их параметров в течение всего процесса или отрезка его Δt вопреки реальности принята постоянной ($E'q$ на рис. 1.5) или изменяющейся по заранее заданному закону, например экспоненциальному (Eg на рис. 1.5); иногда часть параметров процесса может совсем не учитываться. Непрерывное изменение параметра процесса иногда заменяется ступенчатым — дискретным (см. штриховую линию). Разумеется, эти допущения справедливы, если показано, что они практически оправданы в данной задаче.

Полное и упрощенное описание. Если математическое описание изучаемых процессов учитывает все основные в данной постановке задачи составляющие процесса, то соответствующие уравнения называются полными. Если же часть влияющих, но в

данной задаче менее существенных составляющих процесса и соответственно часть его параметров не учтена или учтена неполно и с заведомыми искажениями, допустимыми в данном исследовании, то уравнения называются упрощенными.

Рассмотрим подробнее нормальные переходные процессы. Такие процессы сопровождают текущую эксплуатацию системы. Они связаны в основном с изменениями нагрузки, а также с реакцией на них регулирующих устройств. Эти процессы возникают при обычных коммутационных операциях: включении и отключении генераторов, трансформаторов и отдельных линий электропередач; нормальных эксплуатационных изменениях схемы коммутации системы; включении и отключении отдельных генераторов и нагрузок или изменениях их мощности.

При нормальной работе системы всегда имеются некоторые малые возмущающие воздействия, вызывающие малые возмущения режима, например изменения нагрузки

2 Векторная диаграмма простейшей электрической системы с неявнополюсными и явнополюсными генераторами;

Построение векторной диаграммы простейшей системы, па основе упрощенных уравнений легко выполнить это построение, рассмотрев установившийся режим. Связь между параметрами режима определяется в этом случае уравнениями

$$U_d = -\Psi_q - rI_d; \quad U_q = \Psi_d - rI_q.$$

Как известно [1, 2, 4],

$$\Psi_d = E_d + I_d x_d; \quad \Psi_q = I_q x_q.$$

$$U_d = -I_q x_q - rI_d; \quad U_q = E_d + I_d x_d - rI_q.$$

Введем фиктивную э. д. с. $E_Q = E_d + I_d (x_d - x_q)$, тогда систему уравнений можно представить в виде

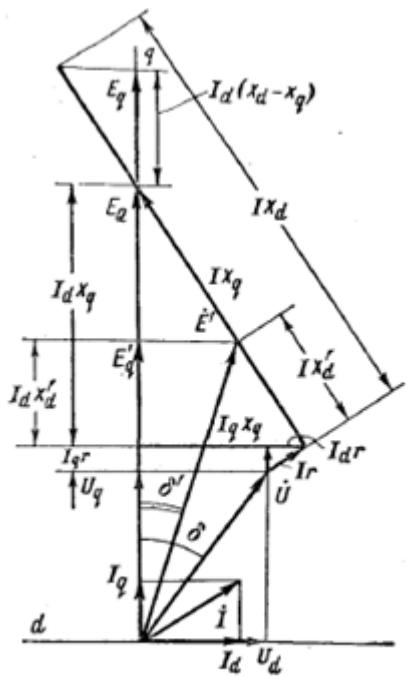
$$U_d = -I_q x_q - rI_d; \quad U_q = E_Q + I_d x_d - rI_q.$$

Запишем систему уравнений в векторной форме, приняв ось q за действительную, а ось d — за мнимую. Для этого сложим уравнения системы предварительно умножив первое уравнение на j :

$$U_q + jU_d = E_Q - (r + jx_q)(I_q + jI_d)$$

или

$$\dot{U} = E_Q - jZ.$$



Векторная диаграмма синхронной машины

Соотношение (6.25) есть выражение обобщенного закона Ома для участка цепи, обладающего полным сопротивлением Z .

Следовательно, синхронную машину в установившемся режиме можно рассматривать как источник напряжения E_q за сопротивлением Z . Графически это можно представить в виде векторной диаграммы (рис. 6.5). Заметим, что в случае неявнополюсной машины фиктивная э. д. с. E_q равна э. д. с. холостого хода E_q при $x_d = x_q$.

Следовательно, векторная диаграмма, соответствующая упрощенным уравнениям Парка—Горева, может быть использована при анализе переходных режимов в той мере, в какой справедливы упрощенные уравнения. Из диаграммы следует, что при $E' = \text{const}$ генератор может быть представлен в схеме системы величиной x_d , при $E_q = \text{const}$ — величиной x_q , при $E_q = E_q = \text{const}$ — величиной $x_q = x_d$. Этой величиной генератор может быть введен в схему системы. Допуская, что исходному режиму соответствует точка a . При небольшом возмущении, вызывающем увеличение угла, уменьшается напряжение на шинах генератора. Но регулятор не работает до тех пор, пока отклонение угла лежит в зоне нечувствительности. При увеличении угла на валу генератора возникает ускоряющий избыточный момент, вызывающий дальнейшее его увеличение. Когда траектория движения пересекает границу зоны нечувствительности (точка b), регулятор начинает работать.

Увеличение тока возбуждения, а следовательно ЭДС генератора, замедляет снижение мощности, перемещая рабочую точку на характеристики мощности, соответствующие большим ЭДС (точки c, d). В точке e избыток мощности исчезает, но инерция ротора вызывает дальнейшее увеличение угла. В точке f угол становится максимальным, после чего начинает уменьшаться. После того как будет пройдена точка g , лежащая на верхней характеристике, регулятор начнет уменьшать напряжение возбудителя и кривая изменения мощности в обратном направлении. Таким образом, в силу внутренней неустойчивости возникают незатухающие колебания угла δ . Амплитуда этих колебаний зависит от ширины зоны нечувствительности регулятора, в месте с углом колеблются напряжение, мощность и ток генератора. Эти колебания затрудняют контроль за работой генератора и заставляют от его эксплуатации в подобных режимах.

Обеспечить устойчивую работу генератора во всех точках, соответствующим углам $\delta > 90^\circ$, позволяет усложнение системы регулирования возбуждения, которая должна

реагировать не только на изменение напряжения, но и на скорость и даже ускорение изменения напряжения. Такие регуляторы называются регуляторами сильного действия.

Регуляторы сильного действия обеспечивают постоянство напряжения на шинах генератора (без риска самораскачивания), поэтому генератор, снабженный такими регуляторами, может быть представлен в расчетах статической устойчивости напряжением на своих зажимах ($U_G=\text{const}$) и $x_G=0$

3. Причины и характер больших возмущений. Уравнение движения ротора генератора.

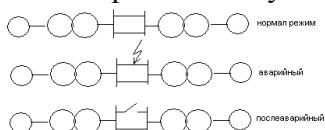
Большие возмущения режима, появляются в сложных электрических системах, чаще всего вызываются отклонениями мощных нагрузок или несущих нагрузку генераторов, трансформаторов, ЛЭП.

К еще более резким изменениям режима приводят КЗ, при которых изменения мощности на отдельных участках системы могут быть соизмеримы с величиной суммарной мощности всей системы. Так, например. Трехфазное КЗ на одноцепной ЛЭП изменяет передаваемую по этой линии мощность на 100%, так как передача мощности в систему полностью прекращается. КЗ в зависимости от места системы (в котором они происходят) и их вида (трехфазные, двухфазные и т.д.) могут приводить к различным изменениям передаваемой мощности, или, как говорят, сбросам мощности. Они, следовательно различны по своей тяжести. Наиболее тяжелым считается трехфазное КЗ, полностью прерывающее передачу мощности через тот элемент, на котором эта авария произошла. Более легкими являются двухфазное КЗ на землю, еще более легкими – двухфазное КЗ без замыкания на землю и самыми легкими – однофазное КЗ.

Место КЗ в сильной степени влияет на тяжесть аварии в отношении как величины токов КЗ, так и воздействия на устойчивость системы. Чем дальше КЗ от источников энергии, тем, как правило, меньше токи КЗ. Чем симметричнее место КЗ по отношению к генераторам системы, тем легче авария в смысле ее влияния на устойчивость системы. Это объясняется тем, что при одинаковом сбросе мощности генераторы в равной мере (или примерно в равной мере) ускоряются и остаются устойчивыми относительно друг друга.

4. Метод площадей. Определение предельного угла отключения КЗ.

Рассмотрим систему которая имеет 3 режима



Приравнивая площадку ускорения к площадке торможения тогда выражая угол δ в рад а мощность в о.е можно записать

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{\text{окл}}} (P_0 - P_m^3) \sin \delta d\delta = - \int_{\delta_{\text{окл}}}^{\delta_{\text{окл}}} (P_0 - P_m^2 \sin \delta) d\delta$$

Предельный угол – это угол при отключении до которого устойчивость простейшей системы сохраняется. После преобразования можем записать

$$P_0(\delta_{\text{окл}} - \delta_0^1) + P_m^3(\cos \delta_{\text{окл пр}} - \cos \delta_0^1) + P_0(\delta_{\text{окл пр}} - \delta_{\text{окл пр}}) + P_m^2(\cos \delta_{\text{окл пр}} - \cos \delta_{\text{окл пр}}) = 0$$

$$\text{Тогда } \cos \delta_{\text{окл пр}} = (P_0(\delta_{\text{окл пр}} - \delta_0^1) + P_m^2(\cos \delta_{\text{окл пр}} - P_m^3 \cos \delta_0^1)) / P_m^2$$

В случае 3^хфазного к.з. или полного разрыва передачи характеристика аварийного режима при этом $P_m^3 = 0$

Предельному углу отключения соответствует определённое время от начала к.з. которое называется временем отключения если к.з. будет отключено за время $t < t_{\text{окл пр}}$ то система сохранит устойчивость при к.з. если больше устойчивость нарушиться.

Проведённый анализ позволяет сформулировать критерий динамической устойчивости системы площадка ускорения должна быть меньше площадки торможения

5. Метод последовательных интервалов.

Метод последовательных интервалов в принципиальном отношении должен обеспечить тем большую точность, чем мельче выбрать интервалы At. Однако при этом увеличивается количество вычислений, каждое из которых производится с определенной степенью точности. Может оказаться, что ошибки будут нараставать, так как ошибка, допущенная при вычислении величины в каком-нибудь интервале, отражается на значениях этих величин во всех последующих интервалах.

Метод последовательных интервалов представляет собой один из методов численного интегрирования дифференциального уравнения первого порядка.

Метод последовательных интервалов позволяет рассчитывать токи с учетом нелинейности коэффициентов, например с учетом влияния насыщения магнитной цепи на параметры машины.

Метод последовательных интервалов, в принципе, должен обеспечивать тем большую точность, чем меньшими выбраны интервалы At. Однако при этом увеличивается количество вычислений, которые производятся с определенными погрешностями. Может оказаться, что погрешности будут нарастиать, так как погрешность, допущенная при вычислении некоторой величины в каком-то интервале, отражается на значениях этой величины во всех последующих интервалах.

Метод последовательных интервалов менее критичен к выбору шага решения, чем метод Эйлера.

Метод последовательных интервалов в принципе должен обеспечивать тем большую точность, чем меньшими выбраны интервалы AL. Однако при этом увеличивается количество вычислений, которые производятся с определенными погрешностями. Может оказаться, что погрешности будут нарастиать, так как погрешность, допущенная при вычислении некоторой величины в каком-то интервале, отражается на значениях этой величины во всех последующих интервалах.

6. Учет переходных электромагнитных процессов. Учет форсировки и АРВ генератора.

Любой рабочий режим электроустановки можно рассматривать как установившийся. Он характеризуется определенными установившимися параметрами, такими как рабочее напряжение, рабочий ток, частота сети питания, частота вращения и другие.

При необходимости изменения режима работы, например в регулировочном режиме, параметры можно изменить, управляя режимом работы. При этом новый режим работы также установившийся, но уже с другими параметрами. Например, регулирование скорости двигателя изменит режим работы технологической установки на другой. Изменение не может произойти мгновенно и займет некоторое время, в течение которого и произойдет изменение скорости в силу электромагнитной и электромеханической природы происходящих процессов.

Изменение режима работы может произойти и в результате аварий. Произойдет переход от рабочего режима к аварийному, что также изменит параметры электроустановки в течении некоторого времени.

Переходной процесс – это процесс перехода от одного установившегося режима электроустановки к другому.

Любой переходной процесс в электроустановке, например генераторе, сопровождается изменением электромагнитного состояния и соответственно происходит нарушение баланса между моментом на валу вращающейся машины и электромагнитным моментом.

Поэтому переходной процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и электромеханических изменений в электроустановке.

Благодаря значительной механической инерции вращающихся машин начальная стадия переходного процесса характеризуется преимущественно электромагнитными изменениями.

В данном курсе лекций рассматриваются электромагнитные и электромеханические переходные процессы, соответствующие аварийным режимам.

Электромагнитный переходный процесс в электроустановке — переходный процесс, характеризуемый изменением значений только электромагнитных величин электроустановки.

Электромеханический переходный процесс в электроустановке — переходный процесс, характеризуемый одновременным изменением значений электромагнитных и механических величин, определяющих состояние электроустановки.

1.4 Лекция № 4,5 (4 часа).

Тема: «Статическая устойчивость электрической системы»

1.4.1 Вопросы лекции:

1. Практические критерии статической устойчивости.
2. Математическое описание переходных процессов.
3. Метод малых колебаний. Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости и вид переходного процесса.
4. Самораскачивание и самовозбуждение.
5. Анализ статической устойчивости простейшей электрической системы с учетом электромагнитных переходных процессов и регуляторов возбуждения.

1.4.2 Краткое содержание вопросов:

1 Практические критерии статической устойчивости;

Анализ опыта эксплуатации электропередач, являющихся слабыми межсистемными связями, показывает, что причиной нарушения их устойчивости чаще всего является превышение предела статической устойчивости из-за отключения одной из параллельных линий или сравнительно медленного повышения потока мощности, обусловленного изменением его среднего значения или нерегулярными колебаниями. Поэтому определение области статически устойчивых режимов для межсистемных связей электропередач является важной задачей.

На предельную по условиям статической устойчивости мощность влияет ряд факторов: напряжение по концам электропередачи, активные и реактивные сопротивления линий электропередачи, промежуточные нагрузки и значения статистизма соединяемых энергетических систем. Прежде всего оценим, насколько предельный угол электропередачи может отличаться от 90° за счет влияния активных сопротивлений электропередачи и значений статистизма соединяемых систем. При этом анализе будем считать постоянными эквивалентные э. д. с. энергетических систем. Тогда предельный по условиям устойчивости угол будет определяться из соотношения

$$\alpha = \frac{1}{T_{J1}} \frac{dP_1}{d\delta} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{dP_2}{d\delta} > 0.$$

Для слабой связи можно принять, что*

$$P_1 = (P_{\text{т1}} - P_{\text{н1}}) + b_{f1*} s_* P_{\text{н1}} + P_{12} \sin(\delta - \alpha) = P_{01} + b_{f1*} s_* P_{\text{н1}} + P_{12} \sin(\delta - \alpha);$$

$$P_2 = (P_{\text{т2}} - P_{\text{н2}}) + b_{f2*} s_* P_{\text{н2}} - P_{12} \sin(\delta + \alpha) = P_{02} + b_{f2*} s_* P_{\text{н2}} - P_{12} \sin(\delta + \alpha).$$

Суммируя эти выражения и переходя к приращениям, в предположении, что мощности энергосистем балансируются при $\delta \approx \delta_0$, получим

$$s_* = 2P_{12} \sin \alpha \cos \delta_0 / (b_{f1*} P_{H1} + b_{f2*} P_{H2}).$$

$$A \cos \delta + B \sin \delta = \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\delta - \lambda) > 0,$$

откуда $\delta_{\text{пр}} = 90^\circ + \lambda$, где

$$A = P_{12} (T_{J1} + T_{J2}) \cos \alpha; \quad B = P_{12} [(T_{J2} - T_{J1}) + \\ + 2 \frac{T_{J1} b_{f2*} P_{H2} - T_{J2} b_{f1*} P_{H1}}{b_{f1*} P_{H1} - b_{f2*} P_{H2}}] \sin \alpha = P_{12} \frac{(T_{J1} + T_{J2}) (b_{f2*} P_{H2} - b_{f1*} P_{H1})}{b_{f1*} P_{H1} + b_{f2*} P_{H2}} \sin \alpha; \\ \operatorname{tg} \lambda = \frac{B}{A} = \frac{b_{f2*} P_{H2} - b_{f1*} P_{H1}}{b_{f2*} P_{H2} + b_{f1*} P_{H1}}; \quad \lambda = \operatorname{arctg} \left(\frac{b_{f2*} - b_{f1*} \beta}{b_{f2*} + b_{f1*} \beta} \operatorname{tg} \alpha \right),$$

причем $\beta = P_{H1}/P_{H2}$ при $P_{H1} > P_{H2}$

Из приведенных выражений видно, что чем меньше отношение активного сопротивления электропередачи к реактивному, т. е. чем меньше α и λ , тем ближе $\delta_{\text{пр}}$ к 90° . При равных относительных значениях статистизма энергосистем максимальное значение $\lambda_{\text{max}} = \alpha$ получается при $\beta = 0$, а при $\beta = 1$ — значение $\lambda = 0$. Если статистизмы различны, то λ_{max} не изменяется, а изменяется лишь величина β , при которой $\lambda = 0$. Постоянные инерции энергосистемы не влияют на величину λ , если не учитывается статистизмы энергосистем. Если же считать, что мощность энергосистем не зависит от частоты, то угол λ зависит от постоянных инерции. Объясняется это положение тем, что в первом случае при появлении ΔP частота в энергосистеме изменяется на ограниченную величину s^* , а во втором — неограниченно. Хотя второй случай дает физически неверную картину явления, конечный результат получается одинаковым, если

$$T_{f1*} = T_{f2*} \quad \text{и} \quad b_{f1*} = b_{f2*}$$

2 Математическое описание переходных процессов;

Для математического описания электромеханических переходных процессов нужно иметь:

- описание движения ротора генератора, работающего в системе;
- описание электромагнитных процессов, происходящих во время этого движения.

Уравнение движения (см. гл. 4) будем считать известным и рассмотрим описание электромагнитных процессов, получив из него выражения для токов, потокосцеплений, вращающих моментов.

Общее математическое описание электромагнитных явлений, происходящих в электрической системе, могло бы быть составлено на основе феноменологической модели Фарадея—Максвелла, с использованием вектора Пойнтинга—Умова, потоком которого энергия передается через воздушные зазоры электрических машин и по электропередачам направляется в пространство вдоль проводов. Однако такое общее и физически точное описание не может быть использовано непосредственно в инженерных задачах. Упрощая это описание и приспособливая его к конкретным условиям (например, в ряде задач пренебрегая токами смещения, процессами распространения энергии в пространстве и т. д.), можно прийти к практическим — инженерным — методам.

Если все эти элементы электрической системы, статические нагрузки и статорные цепи электрических машин — трехфазные, то наиболее естественным с физической точки зрения было бы составление уравнений переходных процессов для этих элементов, а следовательно, и системы для каждой из фаз, т. е. запись уравнений в так называемой неподвижной трехфазной системе координат. Это был бы весьма наглядный и физически ясный подход, но он приводит, однако, к громоздким уравнениям, неудобным для практических расчетов. Действительно, токи и напряжения в фазах элементов

электрической системы будут синусоидальными функциями времени, а в переходных процессах синусоиды будут искажаться свободными составляющими, определяемыми динамическими свойствами системы. Особенno важным, осложняющим анализ фактором является взаимосвязь между уравнениями фаз элементов системы. Эта взаимосвязь обусловлена взаимоиндукцией фазных проводов ЛЭП, обмоток машин и трансформаторов, междуфазной емкостью проводов и т. д. Коэффициенты самоиндукции и взаимоиндукции обмоток фаз статора синхронных машин (индуктивности) являются при этом периодическими функциями времени. Так, уравнения потокосцеплений ψ для трехфазных обмоток (A, B, C), обмотки возбуждения (f), продольной (D) и поперечной (Q) записываются

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \hline \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Af} & L_{AD} & L_{AQ} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Bf} & L_{BD} & L_{BQ} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Cf} & L_{CD} & L_{CQ} \\ \hline L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{DA} & L_{DB} & L_{DC} & L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{QA} & L_{QB} & L_{QC} & L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ \hline i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

образом:

Здесь индуктивности L_{jh} с разными индексами зависят от времени, являясь функцией u , т. е. угла поворота ротора. Исключение составляют только взаимные индуктивности обмоток ротора:

$$L_{fD} = L_{Qf} = \text{const}; L_{fQ} = L_{Qf} = 0; L_{QD} = L_{DQ} = 0.$$

3 Метод малых колебаний;

Рассмотренный метод малых колебаний является универсальным методом исследования статической устойчивости. Метод применим как для простых, так и для сложных систем и позволяет учесть все переходные процессы и действие любых устройств автоматического регулирования.

Недостатками метода малых колебаний являются сложность и трудоемкость расчетов. Последний недостаток в значительной мере снимается при использовании вычислительных машин непрерывного действия или цифровых машин дискретного счета. Однако вопрос о разумных упрощениях при проведении практических расчетов и эксплуатационной оценке устойчивости системы остается существенным.

В свете этого представляется целесообразным отыскать такие простейшие схемы замещения, которые позволили бы регулируемый генератор представлять в расчетах переходных процессов так же, как и нерегулируемый (x_d, x_q, x_a). Это оказывается возможным, если считать, что настройка системы возбуждения генератора идеальна в том смысле, что самораскачивание полностью устранено и нарушение устойчивости может быть только апериодическим. Наиболее благоприятные условия устойчивости любая электрическая система при поддержании заданного напряжения будет иметь тогда, когда самораскачки задание будет каким-то путем полностью устранено и предел мощности совпадет с пределом устойчивости. Нарушение устойчивости в этом случае будет носить апериодический характер и в зависимости от степени поддержания напряжения определяться по одному из условий: $c_1 = 0; c_2 = 0; c_3 = 0$.

В самом деле, характеристическое уравнение простейшей регулируемой электрической системы имеет вид (при $T_e = 0$)

$$T_d T_d' p^3 + (T_d + T_d' K_{0U} b_1/b_3) p^2 + c_2 T_d' p + c_1 + c_3 K_{0U} b_1/b_3 = 0.$$

Предположим, что коэффициент усиления K_{0U} очень велик ($K_{0U} \rightarrow \infty$) и, следовательно, $U_r = \text{const}$, что возможно при исключении самораскачивания. Тогда

уравнение системы после деления всех членов на значение Kou , которое стремится к бесконечности, запишется как

$$p^2 T_j + c_3 = 0$$

Корни этого уравнения

$$P_{1,2} = \sqrt{-c_3/T_j}$$

Условием устойчивости будет

$$c_3 > 0 \text{ или } \partial P_{UG} / \partial \delta > 0.$$

Если постоянная времени T_d' очень велика ($T_d' \rightarrow \infty$) и в силу этого э. д. с. $E_d' = \text{const}$, то уравнение системы примет вид

$$p(T_j p^2 + c_2) = 0, \text{ где } p_{1,2} = \sqrt{-c_2/T_j}$$

Условием устойчивости будет

$$c_2 > 0 \text{ или } \partial P_{Eq} / \partial \delta > 0$$

Если возбуждение не регулируется ($Kou = 0$) и задано от такого мощного источника, что ток возбуждения всегда постоянен и в обмотках генератора не может происходить никаких переходных процессов, способных стимулировать изменение тока возбуждения, то (принимая $E_q' = \text{const}$), следует предположить $Tdo = 0$, $T'd = 0$. В этом случае уравнение системы представим в виде

$$T_j p^2 + c_1 = 0, \quad p_{1,2} = \sqrt{-c_1/T_j}$$

Условием устойчивости при этом будет

$$c_1 > 0 \text{ или } \partial P_{Eq} / \partial \delta > 0$$

Из приведенного анализа видно, что, сняв каким-либо образом опасность самораскачивания, можно получить методически одинаковый подход к определению мощности, при которой произойдет нарушение устойчивости. Нарушение это всегда будет апериодическим, а мощность будет тем большей, чем лучше поддерживается напряжение. Здесь не учитывается то обстоятельство, что в действительности стремление обеспечить постоянство напряжения за счет увеличения коэффициента усиления (уменьшения статизма) приводит к возможности самораскачивания, которое, если не принято специальных мер, возникает до того, как будет достигнут предел по условию апериодической устойчивости.

4 Самораскачивание и самовозбуждение;

Проведенное исследование устойчивости, однако, еще не было достаточно полным, так как в нем не рассматривались нарушения устойчивости, имеющие специфический характер самораскачивания и самовозбуждения. Такие нарушения могут наступать при наличии в сети, связывающей исследуемую станцию (эквивалентный генератор) с системой (в частности, с шинами бесконечной мощности), или заметного активного сопротивления ($r!x > 0,05$), или значительной емкости ($-T_d'$). В первом случае возникают установившиеся или нарастающие колебания — самораскачивание, во втором происходят самопроизвольный рост тока и увеличение напряжения генераторов, потребляющих емкостную ($-Q$) реактивную мощность — самовозбуждение. Анализ происходящих явлений можно было бы провести исходя из уравнения. Но это уравнение даже после упрощения будет затемнять физическую картину изучаемых явлений, отражая влияние регулирования и процессов в возбудителе. Поэтому пренебрежем ими, приняв в $Kou = 0$ и $T_e = 0$, но учтем демпфирование ($P_d \neq 0$) и переходные-процессы ($T_d' \neq 0$). Тогда получим следующее уравнение третьего порядка:

$$T_j T_d' p^3 + (T_j + P_d T_d') p^2 + (c_2 T_d' + P_d) p + c_1 = 0$$

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0.$$

Под самовозбуждением следует понимать вид электромагнитной неустойчивости генераторов, при появлении которой в значительной степени или полностью теряется возможность управления установившимся режимом. При этом в отдельных точках системы самопроизвольно могут устанавливаться значения напряжений, опасные для изоляции оборудования. Нарастание тока и напряжения в процессе самовозбуждения может быть либо апериодическим (синхронное самовозбуждение), либо колебательным (асинхронное самовозбуждение). Частота тока и напряжения при самовозбуждении соответствует частоте собственных колебаний в электрическом контуре, образованном внешней сетью с входным емкостным сопротивлением, и электрической машиной. Амплитуда собственных колебаний ограничивается насыщением стали машин и трансформаторов.

Асинхронное самовозбуждение является наиболее опасным для электрических систем вследствие того, что колебания тока и напряжения нарастают до максимального значения в течение нескольких периодов, а существующие автоматические регуляторы возбуждения не в состоянии подавить этот быстроразвивающийся процесс.

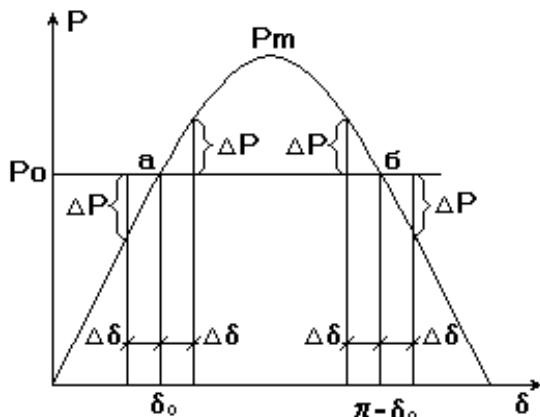
Точное определение условий, при которых возможно появление самовозбуждения, следует выполнять анализом системы линейных неоднородных дифференциальных уравнений для вращающейся машины и внешней сети, содержащей емкость. Для нахождения соотношений параметров машины и внешней сети, при которых возможно появление самовозбуждения, а также мероприятий, устраняющих это явление, насыщение может не учитываться [Л.22-30].

Под самораскачиванием следует понимать вид электромеханической периодической неустойчивости энергосистемы, при которой ротор синхронной машины совершает самопроизвольные колебания, заканчивающиеся либо выпадением машины из синхронизма, либо установлением какого-то предельного цикла колебаний, препятствующих нормальной работе энергосистемы. Самораскачивание - явление редкое в практике работы энергосистем и может появиться у небольших слабо загруженных синхронных и асинхронных машин, работающих на сеть со значительным активным сопротивлением, когда отрицательный демпферный момент может быть существенным.

5 Анализ статической устойчивости простейшей электрической системы с учетом электромагнитных переходных процессов и регуляторов возбуждения

Устойчивыми будут режимы, в которых при возмущении факторы, стремящиеся нарушить режим, изменяются менее интенсивно, чем факторы, противодействующие этому нарушению.

Рассмотрим т.а:



$\Delta\vec{\delta}$, $\Delta\delta = \delta - \delta_0$ (+)
- увеличение

ΔP - избыток эл.маг. мощности (тормозной момент больше ускоряющего) приводит к торможению, возвращаясь в исходное положение. (устойчивая работа)

- уменьшение $\Delta\bar{\delta}$, $\Delta\delta = -\delta + \delta_0$ (-)

ΔP – избыток генераторной мощности (тормозной момент меньше ускоряющего) приводит к ускорению, возвращаясь в исходное положение. (устойчивая работа)

Рассмотрим т.б: - наоборот

$$\frac{d(P_{\text{ЭЛ.МАГ.}} - P_0)}{d\delta} = \frac{dP_{\text{изб.}}}{d\delta} > 0$$

- прямой (практический) критерий устойчивости.

Режим работы в точке b не устойчив, а значит, невозможен.

(*) Критерий устойчивости, если производная избыточной мощности в точке исходного режима больше нуля, то (электромеханическая система) устойчива.

$90^0 > \delta_0 > 90^0$ - зона устойчивости при

$$P_0 = \text{const}$$

Угловые характеристики регулируемых систем (упрощенные) и динамическую угловую характеристику мощности можно получить аналогично.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1 Лабораторно-практическая работа №1-2 (4 часа).

Тема: «Переходные электромагнитные процессы в синхронной машине».

2.1.1 Цель работы: Изучить переходные электромагнитные процессы в синхронной машине

2.1.2 Задачи работы:

Рассмотреть переходные электромагнитные процессы в синхронной машине

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Синхронный двигатель, методические указания

2.1.4 Описание (ход) работы: Лабораторные занятия включают выполнение экспериментов и расчет, решение отдельных задач, обсуждение решений.

2.2 Лабораторно-практическая работа № 3 (2 часа).

Тема: «Переходные процессы в сети с источником бесконечной мощности. Влияние нагрузки на ток КЗ».

2.2.1 Цель работы: Изучить влияние нагрузки на ток КЗ

2.2.2 Задачи работы:

Рассмотреть влияние нагрузки на ток КЗ

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Методические указания

2.2.4 Описание (ход) работы: Лабораторные занятия включают выполнение экспериментов и расчет, решение отдельных задач, обсуждение решений.

2.3 Лабораторно-практическая работа № 4 (2 часа).

Тема: «Переходные электромеханические процессы в ЭЭС»

2.3.1 Цель работы: изучить переходные электромеханические процессы в ЭЭС

2.3.2 Задачи работы:

Рассмотреть переходные электромеханические процессы в ЭЭС

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:
Методические указания

2.3.4 Описание (ход) работы: Лабораторные занятия включают выполнение экспериментов и расчет, решение отдельных задач, обсуждение решений.

2.4 Лабораторно-практическая работа № 5 (2 часа).

Тема: Определение динамической устойчивости ЭЭС

2.4.1 Цель работы: научится определять динамическую устойчивость ЭЭС

2.4.2 Задачи работы:

Рассмотреть динамическую устойчивость ЭЭС

2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:
Методические указания

2.4.4 Описание (ход) работы: Лабораторные занятия включают выполнение экспериментов и расчет, решение отдельных задач, обсуждение решений.

2.5 Лабораторно-практическая работа № 6 (2 часа).

Тема: «Определение статистической устойчивости ЭЭС. Пределы мощности и пределы устойчивости»

2.5.1 Цель работы: научится определять статистическую устойчивость ЭЭС, пределы мощности и пределы устойчивости

2.5.2 Задачи работы:

Рассмотреть статистической устойчивости ЭЭС

2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:
Методические указания

2.5.4 Описание (ход) работы: Лабораторные занятия включают выполнение экспериментов и расчет, решение отдельных задач, обсуждение решений.