

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроэнергетики и электротехники



**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ**

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине
«Переходные процессы в электроэнергетических системах»
для студентов всех форм обучения направления подготовки
«Электроэнергетика и электротехника»

Курск 2025

УДК 621.311

Составитель: В.Н. Алябьев

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *О.М.Ларин*

Переходные процессы в электроэнергетических системах: методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов всех форм обучения направления подготовки Электроэнергетика и электротехника/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.Н.Алябьев. Курск, 2025. 57 с.

Излагаются методические указания к выполнению практических занятий, посвященных изучению методов расчетов электромагнитных и электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах, выполняющихся для решения широкого спектра инженерных задач в области электроэнергетики.

Целью проведения данных занятий является выработка у студентов практических навыков расчета переходных процессов в электроэнергетических системах.

Предназначены для студентов всех форм обучения направления подготовки Электроэнергетика и электротехника.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60х84 1/16.
Усл. печ. л. 3,56 . Уч.-изд.л. 2,79 . Тираж 100 экз. Заказ. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1	Приведение параметров элементов системы к базисным условиям. Составление схем замещения и их преобразование. Определение результирующего сопротивления короткозамкнутой цепи	4
2	Расчет начального и установившегося тока короткого замыкания. Расчет ударного тока короткого замыкания	8
3	Определение токов короткого замыкания в произвольный момент времени по расчетным кривым	13
4	Расчет токов короткого замыкания с учетом подпитки от крупных двигателей	17
5	Расчет тока несимметричного короткого замыкания с использованием правила эквивалентности прямой последовательности	20
6	Расчет токов короткого замыкания в сетях до 1000 В	25
7	Выбор и проверка выключателей по отключающей способности	28
8	Угловые характеристики одномашинной системы, работающей на шины бесконечной мощности. Статическая устойчивость нерегулируемой системы при нагрузке, заданной постоянным сопротивлением или статическими характеристиками	32
9	Расчет статической устойчивости узла нагрузки, в том числе заданной эквивалентным асинхронным двигателем	36
10	Расчет динамической устойчивости электропередачи с одним генератором, работающей на шины бесконечной мощности	39
11	Метод последовательных интервалов	44
12	Расчет динамической устойчивости узла нагрузки, заданной эквивалентным асинхронным двигателем	47
	Приложение 1	50
	Приложение 2	51
	Приложение 3	52
	Приложение 4	52
	Приложение 5	53
	Библиографический список	57

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

ПРИВЕДЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ К БАЗИСНЫМ УСЛОВИЯМ. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ И ИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ

ЦЕЛЬ: Приобретение практических навыков подготовки расчета токов коротких замыканий

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Система относительных базисных единиц.

Под относительным значением какой-либо величины следует понимать ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу измерения. Следовательно, чтобы выразить отдельные величины в относительных единицах, нужно, прежде всего, выбрать те величины, которые должны служить соответственными единицами измерения, или, как говорят, установить базисные единицы (или условия).

Пусть за базисный ток и базисное междуфазное напряжение приняты некоторые произвольные величины I_B и U_B . Тогда базисная мощность трехфазной системы, очевидно, будет:

$$S_B = \sqrt{3} I_B * U_B.$$

За базисную мощность S_B (МВА) целесообразно принимать число, кратное 10 (10, 100, 1000 МВА и т.д.), близкое к установленной мощности генераторов в расчетной схеме. За основное базисное напряжение U_B (кВ) следует принимать номинальное напряжение аварийной ступени.

Приведение схем обычно осуществляют по приближенным коэффициентам трансформации, устанавливая для каждой ступени трансформации средние номинальные напряжения: 0.127; 0.230; 0.400; 0.525; 0.690; 3.15; 6.3; 10.5; 13.8; 15.75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 750 кВ. Тогда формулы для вычисления параметров эквивалентной схемы замещения имеют вид:

для генераторов

$$X_{*d} = X_d \frac{S_B}{S_H}, \quad X_{*d}'' = X_d'' \frac{S_B}{S_H},$$

где X_d , X_d'' - синхронное сопротивление генератора по продольной оси и его сверхпереходное сопротивление в относительных номинальных единицах;

S_H - номинальная мощность генератора, МВА;

для трансформаторов

$$X_{*T} = \frac{u_{k\%}}{100\%} \frac{S_B}{S_H},$$

где $u_{k\%}$ - номинальное напряжение короткого замыкания двухобмоточного трансформатора (%) либо напряжение короткого замыкания стороны трехобмоточного трансформатора и автотрансформатора, определяемое по формулам

$$\begin{aligned} u_{kB} &= 0,5 \cdot (u_{kB-H} + u_{kB-C} - u_{kC-H}), \\ u_{kC} &= 0,5 \cdot (u_{kB-C} + u_{kC-H} - u_{kB-H}), \\ u_{kH} &= 0,5 \cdot (u_{kB-H} + u_{kC-H} - u_{kB-C}); \end{aligned}$$

S_H - номинальная мощность трансформатора, МВА;

для токоограничивающего реактора

$$X_{*P} = X_P \frac{S_B}{\sqrt{3} U_H I_H} = X_P \frac{I_{Bk}}{I_H},$$

где X_P - сопротивление реактора в относительных номинальных единицах;

U_H - среднее номинальное напряжение ступени, где установлен реактор, кВ;

I_H - номинальный ток реактора, кА;

$I_{Бк}$ - базисный ток на расчетной ступени, кА;

для линий электропередачи (воздушных, кабельных)

$$X_{*Л} = X_0 l \frac{S_B}{U_{БЛ}^2},$$

где X_0 - удельное сопротивление линии, Ом/км;

l - длина линии, км;

$U_{БЛ}$ - среднее номинальное напряжение линии, кВ;

для нагрузок

$$Z_{*Н} = \frac{1}{S_{*Н}} (\cos \varphi_H + j \sin \varphi_H),$$

где $S_{*Н}$ - мощность нагрузки, выраженная в относительных единицах

$$S_{*Н} = \frac{S_H}{S_B};$$

φ_H - номинальный угол нагрузки.

Если расчетная схема составляется с учетом активных сопротивлений, то в формулах величины X заменяются на Z .

Схема замещения.

При наличии трансформаторов (или автотрансформаторов) в схеме для упрощения проводимых расчетов такую схему целесообразно предварительно представить схемой замещения, т. е. имеющиеся в ней магнитносвязанные цепи заменить одной эквивалентной электрически связанной цепью. Составление такой схемы замещения сводится к приведению параметров элементов и э. д. с. различных ступеней трансформации заданной схемы к какой-либо одной ступени, выбранной за основную. Само приведение осуществляется на основе соотношений, которые вытекают из известной теории трансформатора.

Преобразования схемы замещения.

Первоочередной задачей расчета коротких замыканий обычно является нахождение тока непосредственно в аварийной ветви или в месте короткого замыкания. Поэтому преобразование схемы выгодно вести так, чтобы аварийная ветвь по возможности была сохранена до конца преобразования или, в крайнем случае, участвовала в нем только на последних его этапах.

Когда металлическое трехфазное короткое замыкание находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, этот узел можно разрезать, сохранив на конце каждой образовавшейся ветви такое же короткое замыкание.

Для определения токов и напряжений в приведенной схеме при КЗ необходимо полученную схему путем последовательных преобразований привести к простейшему виду (рис. 1.1).

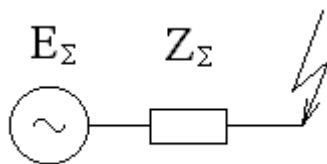


Рис. 1.1. Эквивалентная схема замещения.

Основные приемы преобразования схем приведены в приложении 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Общие сведения об электроэнергетических системах.
2. Для чего вводятся базисные единицы?
3. Приведение к одной ступени напряжения.
4. Способы преобразования схем замещения.
5. Что такое результирующее сопротивление короткозамкнутой цепи?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО И УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ. РАСЧЕТ УДАРНОГО ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

ЦЕЛЬ: Приобретение практических навыков расчета начального, ударного и установившегося тока короткого замыкания.

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Для упрощения расчета трехфазного КЗ при составлении схемы замещения принимают следующие допущения:

- все элементы схемы считают линейными;
- токами намагничивания трансформаторов пренебрегают;
- параметры всех фаз считают одинаковыми;
- емкостными проводимостями линий пренебрегают или учитывают их в виде емкостей, сосредоточенных по концам линии;
- нагрузки учитывают приближенно;
- скорости вращения роторов всех машин схемы в течение КЗ считают неизменными;
- пренебрегают активными сопротивлениями элементов схемы.

Последнее допущение приемлемо только при расчетах начального и конечного значений переходного процесса в основных звеньях высокого напряжения расчетной схемы; приближенный учет активных сопротивлений находит отражение только при оценке постоянных времени затухания свободных составляющих токов. В тех случаях, когда расчет производится для протяженной кабельной или воздушной линии электропередачи с относительно небольшими сечениями проводников, а также для установок и сетей напряжением до 1000 В, данное допущение неприемлемо.

Расчет сверхпереходного тока КЗ.

Генераторы, крупные синхронные двигатели и компенсаторы, а также обобщенные нагрузки мощных узлов учитываются в схеме замещения своими сверхпереходными ЭДС (E'') и сопротивлениями (X'').

ЭДС генераторов, синхронных двигателей и компенсаторов находят по следующей формуле:

$$E'' = \sqrt{(U_0 \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \cdot \sin \varphi_0 + I_0 X_d'')^2},$$

где U_0 , I_0 , φ_0 - параметры доаварийного режима на зажимах машины. Допускается использование упрощенной формулы

$$E'' = U_0 + I_0 X_d'' \cdot \sin \varphi_0.$$

ЭДС обобщенной нагрузки находят по формуле

$$E'' = \sqrt{(U_0 \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \cdot \sin \varphi_0 - I_0 X_H'')^2},$$

или по упрощенной формуле

$$E'' = U_0 - I_0 X_H'' \cdot \sin \varphi_0.$$

где U_0 , I_0 , φ_0 - параметры доаварийного режима на зажимах нагрузки.

При отсутствии необходимых данных о доаварийном режиме, а также в приближенных расчетах принимают средние значения E'' и X'' , приведенные в приложении 2. Эти величины считаются отнесенными к полной номинальной мощности и среднему номинальному напряжению соответствующей ступени.

Если доаварийным режимом является холостой ход, то нагрузки в схеме отсутствуют, а ЭДС всех генераторов и синхронных компенсаторов принимаются равными $E'' = 1$.

После построения эквивалентной электрической схемы замещения и определения всех ее параметров приводят схему путем последовательных преобразований к простейшему виду (рис.1.1). Определяют сверхпереходный ток в месте КЗ:

$$I_k'' = \frac{E_{\Sigma}''}{X''}.$$

Последовательно разворачивая схему к первоначальному виду, находят токи и напряжения у всех ее элементов.

С помощью формул обратного пересчета вычисляют эти токи и напряжения в именованных единицах.

Расчет ударного тока короткого замыкания.

Ударный ток - это максимальное мгновенное значение тока КЗ при наиболее неблагоприятных расчетных условиях. Его определяют по формуле

$$i_y = k_y I_m'',$$

где I_m'' - амплитуда периодической слагающей тока в первый момент КЗ (амплитуда сверхпереходного тока I'')

$$I_m'' = \sqrt{2} I'';$$

k_y - ударный коэффициент.

$$k_y = 1 + e^{-0.01/T_a},$$

где T_a - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ.

Величину k_y можно определить из таблицы приложения 3.

В сложной схеме апериодическую составляющую считают затухающей с эквивалентной постоянной времени

$$T_a \approx T_{\Sigma} = \frac{X_{\Sigma}''}{\omega R_{\Sigma}},$$

где X_{Σ}'' - результирующее реактивное сопротивление схемы относительно точки КЗ (при закороченных активных сопротивлениях);

R_{Σ} - результирующее активное сопротивление схемы относительно точки КЗ (при неучете реактивных сопротивлений).

Если точные значения активных сопротивлений элементов схемы неизвестны, то их определяют по усредненным значениям X/R (приложение 4).

При грубых расчетах эквивалентную постоянную времени не определяют, а ударный коэффициент принимают усредненно (приложение 3).

Действующее значение ударного тока находят по формуле

$$I_y = I'' \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}.$$

Расчет установившегося тока КЗ.

Расчет установившегося режима трехфазного КЗ при отсутствии АРВ генераторов отличается от расчета сверхпереходного режима только параметрами схем замещения генераторов и нагрузок. Генератор замещается ЭДС E_d , включенной за синхронным сопротивлением X_d . Если величина E_d заранее неизвестна, ее можно определить по формуле

$$E_d = \sqrt{(U_0 \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \cdot \sin \varphi_0 + I_0 X_d)^2},$$

где U_0 , I_0 , φ_0 - параметры доаварийного режима на зажимах генератора.

Нагрузки учитываются эквивалентными сопротивлениями. В приближенных расчетах их замещают эквивалентным реактивным сопротивлением $X_{нагр} = 1.2$, считая его отнесенным к полной мощности-нагрузки (МВА) и среднему номинальному напряжению ступени, к которой она подключена.

Если доаварийным режимом был холостой ход, то нагрузки в схеме замещения отсутствуют, а ЭДС всех ее генераторов $E = 1$.

После построения эквивалентной схемы замещения и определения всех параметров ее приводят к простейшему виду (рис.1.1.) путем последовательных преобразований, затем определяют ток в точке КЗ и, развертывая схему к первоначальному виду, находят токи и напряжения у всех ее элементов. С помощью формул обратного пересчета вычисляют эти токи и напряжения в именованных единицах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое короткое замыкание?
2. Какие параметры генераторов используются для расчета начального тока короткого замыкания?
3. Какие параметры генераторов используются для расчета установившегося тока короткого замыкания?
4. Причины, приводящие к возникновению ударного тока короткого замыкания.
5. Пределы изменения ударного коэффициента.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ПРОИЗВОЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ ПО РАСЧЕТНЫМ КРИВЫМ

ЦЕЛЬ: Приобретение практических навыков расчета тока короткого замыкания, соответствующего произвольному моменту времени, например, времени срабатывания выключателя.

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Метод расчетных кривых основан на применении специальных кривых, которые дают для произвольного момента процесса короткого замыкания при различной расчетной реактивности схемы относительные значения периодической слагающей тока в месте короткого замыкания.

Исходная схема преобразуется к простому виду (Рис.3.1), после чего можно воспользоваться расчетными кривыми.

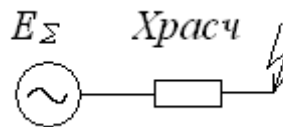


Рис.3.1.

Под расчетной реактивностью принята сумма реактивностей $X_{расч} = X''_d + X_{\kappa}$, т. е. в ней не отражено наличие нагрузки в схеме, чем, в сущности, и определяется методика пользования расчетными кривыми.

Приведенные в приложении 5 расчетные кривые соответствуют типовым генераторам средней мощности (до 50—100 МВт). Значения тока и $X_{расч}$ выражены в относительных единицах при номинальных условиях генератора. Разделение кривых по типу генераторов (турбо- и гидро-) вызвано тем, что их параметры существенно отличаются между собой (табл. 3.1.). По мере увеличения расчетной реактивности (или удаленности короткого замыкания) различие между токами во времени, как видно, становится все меньше. Это позволяет практически считать, что при

$X_{расч} > 3$ периодическая слагающая тока короткого замыкания остается неизменной и равной своему начальному значению.

Следует также отметить, что с увеличением $X_{расч}$ различие в типах генераторов сказывается все меньше и уже при $X_{расч} \geq 1$ расчетные кривые для генераторов разных типов почти совпадают.

Таблица 3.1.

Параметры типовых союзных генераторов средней мощности

Наименование параметров	Турбогенератор	Гидрогенератор	
		с демпферными обмотками	без демпферных обмоток
Реактивность x''_d , отн.ед.	0,125	0,20	0,27
То же x''_q , отн.ед.	0,175	0,30	0,65
„ „ x'_d , отн.ед.	0,21	0,30	0,30
„ „ x_d , отн.ед.	1,72	1,00	1,00
„ „ x_q , отн.ед.	1,72	0,65	0,65
„ „ x_q , отн.ед.	0,11	0,17	0,17
Отношение к.з. K_c	0,70	1,06	1,06
Постоянная времени T_{f0} , сек	7,00	5,00	5,00
То же T_e , сек	0,57	0,57	0,57
Ток возбуждения при номинальной нагрузке $I_{fн}$, отн.ед.	2,26	1,80	1,80
Предельный ток возбуждения, $I_{fпр}$, отн.ед.	3,96	3,15	3,15
Характеристика холостого хода	Стандартная по данным завода „Электросила“		

Порядок расчета:

1. Составляют схему замещения. Генераторы в ней замещаются сверхпереходными сопротивлениями X_d'' и ЭДС $E'' = 1$. Нагрузки из схемы исключаются, кроме крупных синхронных двигателей и компенсаторов (особенно находящихся вблизи точки КЗ), учитывающихся как генераторы соответствующей мощности.
2. Для заданных S_B и U_B определяют параметры элементов в схеме замещения.

3. С помощью последовательных преобразований упрощают схему, причем в процессе преобразований не эквивалентизируют генераторы разных типов (гидро- и турбогенераторы, машины с АРВ и без АРВ). Систему (при ее наличии) обязательно выделяют в самостоятельную ветвь.

4. Для каждой из результирующих ветвей определяют величину расчетной реактивности

$$X_{расч} = X_{\Sigma} \frac{S_{H\Sigma}}{S_B},$$

где $S_{H\Sigma}$ - суммарная номинальная мощность генераторов в данной ветви.

5. По соответствующим расчетным кривым для полученных расчетных реактивностей определяют, интерполируя при необходимости, относительные значения токов $I_{\Pi kt}$ в ветвях для интересующих моментов времени.

Если в процессе преобразований не удалось избежать эквивалентирования генераторов различных типов, то используются расчетные кривые для тех генераторов, которые находятся ближе к месту КЗ.

Если $X_{расч} \geq 3$, то величину $I_{\Pi kt}$ для любого момента можно считать постоянной и равной

$$I_{\Pi kt} = \frac{1}{X_{расч}}.$$

Периодическую слагающую тока КЗ от системы также считают не затухающей во времени и определяют как

$$I_{\Pi kt} = \frac{U_C}{X_{\Sigma C}}.$$

6. Найденные значения токов $I_{\Pi kt}$ переводят к прежнему значению базисной мощности S_B , умножая на отношение $S_{H\Sigma} / S_B$.

7. Разворачивая схему в обратном направлении, находят токи и напряжения во всех ее элементах.

8. Определяют искомые токи и напряжения в именованных единицах, умножая их на базисные для данной ступени.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Причина затухания периодической составляющей тока короткого замыкания.
2. Влияние АРВ на величину периодической составляющей тока короткого замыкания.
3. Методика построения расчетных кривых.
4. Как определить расчетное сопротивление?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С УЧЕТОМ ПОДПИТКИ ОТ КРУПНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ЦЕЛЬ: Приобретение практических навыков расчета тока короткого замыкания в схеме с двигательной нагрузкой.

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Наличие крупных двигателей, расположенных "электрически" близко, от места короткого замыкания.

В начальный момент нарушения режима необходим учет подпитки точки короткого замыкания токами крупных двигателей.

Ток, поступающий от двигателей, определяется выражением

$$I_{Д}'' = \frac{E''}{X_{\Sigma}''},$$

где E'' — среднее значение ЭДС двигателя.

$$X_{\Sigma}'' = X_{Д}'' + X_{ВН},$$

где $X_{Д}''$ - среднее значение сопротивления двигателя;

$X_{ВН}$ - эквивалентное сопротивление электрической цепи между точкой подключения двигателя и точкой короткого замыкания.

Для расчета начального сверхпереходного тока, возникающего при рассматриваемом внезапном нарушении режима, нужно составить схему замещения, введя в нее все генераторы, крупные синхронные и асинхронные двигатели, компенсаторы, а также обобщенные нагрузки отдельных достаточно мощных узлов своими приведенными значениями x'' и E''_0 . При отсутствии необходимых данных и во всех приближенных расчетах можно принимать средние значения x'' и E''_0 , указанные в приложении 2.

Абсолютная величина начального сверхпереходного тока в месте трехфазного короткого замыкания может быть определена как

$$I''_{к} = U_{к0} / x''_{\Sigma},$$

где $U_{ко}$ — предшествующее напряжение в месте короткого замыкания;

x''_{Σ} — результирующая реактивность схемы относительно точки короткого замыкания.

Пуск двигателя по существу можно рассматривать как возникновение короткого замыкания за реактивностью x'' данного двигателя. Соответственно величина пускового тока может быть найдена по (3.1), где под $U_{ко}$ следует понимать предшествующее напряжение в той точке сети, к которой присоединяется двигатель, а в x''_{Σ} должна входить реактивность x'' двигателя.

Когда задан предшествующий режим, часто используют известный принцип наложения, в соответствии с которым режим в начальный момент переходного процесса может быть получен наложением собственно аварийного режима на предшествующий режим. При этом для упрощения расчет собственно аварийного режима производят приближенно, учитывая только индуктивные сопротивления элементов; при известных условиях отбрасывают также нагрузочные ветви.

При определении максимального мгновенного значения тока или, иначе, ударного тока обычно учитывают затухание лишь апериодической слагающей тока, считая, что амплитуда сверхпереходного тока за полпериода практически сохраняет свое начальное значение. При этом ударный ток, определяемый для наиболее тяжелых условий, будет:

$$i_y = k_y \sqrt{2} I'',$$

где k_y — ударный коэффициент (см. указания к работе №2).

При учете асинхронных двигателей в качестве дополнительных источников питания нужно иметь в виду, что затухание периодической и апериодической слагающих посылаемого ими тока происходит примерно с одинаковыми постоянными времени. Поэтому в ударном коэффициенте для асинхронных двигателей обычно учитывают одновременное затухание обеих слагающих тока. Проведенные испытания в этом направлении позволили выявить примерный диапазон величин ударного коэффициента асинхронных двигателей в зависимости от их номинальной мощности. Такая зависимость представлена на рис. 4.1, где заштрихованная зона указывает диапазон отклонения этого коэффициента от среднего

значения (средняя кривая). Для мелких двигателей, а также для обобщенной нагрузки практически $k_y \approx 1$.

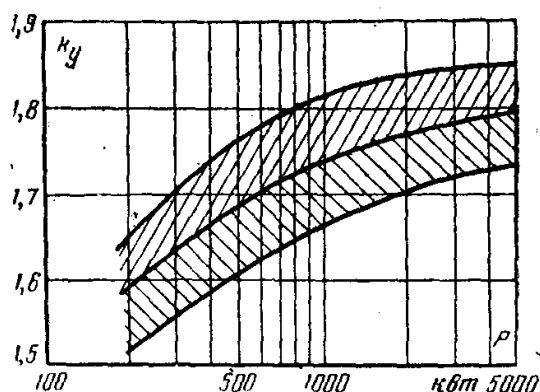


Рис.4.1.

Таким образом, при отдельном учете асинхронных двигателей ударный ток в месте короткого замыкания составляет:

$$i_y = k_y \sqrt{2} I'' + k_{y.д} \sqrt{2} I''_{д},$$

где $I''_{д}$ и $k_{y.д}$ — начальный сверхпереходный ток и ударный коэффициент асинхронных двигателей.

У синхронных двигателей величина ударного коэффициента примерно та же, что и у синхронных генераторов равновеликой мощности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Генераторный режим синхронных двигателей.
2. Генераторный режим асинхронных двигателей.
3. Величина Э.Д.С. и сопротивлений различных двигателей.
4. Величина Э.Д.С. и сопротивлений обобщенной нагрузки.
5. Ударный ток подпитки от двигателей.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

РАСЧЕТ ТОКА НЕСИММЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРАВИЛА ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

ЦЕЛЬ: Приобретение практических навыков расчета тока несимметричного короткого замыкания.

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Правило эквивалентности прямой последовательности.

Токи и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в точке КЗ. В свою очередь, ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определен как ток при трехфазном КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $Z_{\Delta}^{(n)}$, определяемое видом КЗ.

Если не учитывать дугу в месте КЗ (металлическое КЗ), то правило эквивалентности прямой последовательности имеет вид

$$I_{ka1}^{(n)} = \frac{E_{a\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{\Delta}^{(n)}},$$

где I_{ka1} - ток прямой последовательности в фазе А в точке КЗ;

$E_{a\Sigma}$ - результирующая ЭДС схемы прямой последовательности;

$Z_{1\Sigma}$ - результирующее сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки КЗ;

$Z_{\Delta}^{(n)}$ - дополнительное сопротивление, определяемое видом КЗ.

При однофазном КЗ $Z_{\Delta}^{(n)} = Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}$.

При двухфазном КЗ $Z_{\Delta}^{(n)} = Z_{2\Sigma}$.

При двухфазном КЗ на землю $Z_{\Delta}^{(n)} = Z_{2\Sigma} \parallel Z_{0\Sigma}$.

Здесь $Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ - результирующие сопротивления схем замещения обратной и нулевой последовательностей относительно точки КЗ.

Модуль фазного тока в аварийной фазе выражается через ток прямой последовательности:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{ka1}^{(n)},$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент, определяемый видом КЗ.

При неучёте активных сопротивлений в схеме этот коэффициент равен:

при однофазном КЗ

$$m^{(1)} = 3;$$

при двухфазном КЗ

$$m^{(2)} = \sqrt{3};$$

при двухфазном КЗ на землю

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma}}{(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})^2}},$$

где $Z_{2\Sigma}$ и $Z_{0\Sigma}$ берутся по модулю.

Схемы замещения для токов различных последовательностей.

Результирующие сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей определяют по схемам замещения соответствующих последовательностей, эквивалентирова их относительно точки КЗ.

Схема прямой последовательности соответствует схеме расчета трехфазного КЗ. В зависимости от применяемого метода расчета и момента времени, генераторы и нагрузки вводятся в схему соответствующими ЭДС и реактивными сопротивлениями; все остальные элементы входят в нее неизменными во времени сопротивлениями.

Началом схемы прямой последовательности является точка нулевого потенциала, а ее концом - точка КЗ.

Схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности, но ЭДС всех генерирующих элементов в ней приравниваются нулю, а сопротивления обратной последовательности всех элементов считаются неизменными во времени.

Если точные значения сопротивлений обратной последовательности для генераторов, двигателей и обобщенной нагрузки неизвестны, то принимают:

$$\text{для машин без демпферной обмотки } X_2 \approx 1.45 X_d'';$$

для турбогенераторов и машин с демпферной обмоткой $X_2 \approx 1.22 X_d''$;

для обобщенной нагрузки $X_2 = 0.35$ (сети 6...10 кВ) или $X_2 = 0.45$ (сети 35 кВ), считая эту величину отнесенной к полной мощности нагрузки и среднему напряжению той ступени, где она присоединена.

В практических расчетах для машин с демпферной обмоткой часто принимают $X_2 \approx X_d''$.

Параметры остальных элементов (токоограничивающие реакторы, трансформаторы, автотрансформаторы, воздушные и кабельные линии) соответствуют параметрам схемы прямой последовательности.

Началом схемы обратной последовательности является точка нулевого потенциала, а ее концом - точка КЗ.

Схема нулевой последовательности в значительной степени определяется соединением обмоток трансформаторов и автотрансформаторов, так как ток нулевой последовательности является, по существу, однофазным током, разветвленным между тремя фазами и возвращающимся через землю.

Сопротивления элементов в схеме нулевой последовательности в общем случае существенно отличаются от их сопротивлений в схемах обратной и прямой последовательностей:

1. Синхронные машины обычно имеют $X_0 = (0.15...0.16) X_d''$. Как правило, схемы соединения обмоток трансформаторов и подключаемых к ним генераторов подбирают такими, чтобы исключить протекание через генераторы токов нулевой последовательности.

2. Для обобщенной нагрузки X_0 определяется сопротивлениями и схемами соединения входящих в нее элементов и питающих обмоток понижающих трансформаторов. Как правило, питающие обмотки понижающих трансформаторов соединяются в Δ ("треугольник"), что исключает проникновение в нагрузку токов нулевой последовательности от внешних (за питающим трансформатором) коротких замыканий.

3. Для трансформаторов величина X_0 определяется их конструкцией и соединением обмоток. Ток нулевой последовательности может подтекать к трансформатору лишь со стороны обмотки, соединенной в "звезду" с заземленной нейтралью

(Y-0). Во вторичных обмотках в этом случае наводится ЭДС нулевой последовательности и, в определенных условиях, может протекать трансформированный ток нулевой последовательности (рис. 5.1).

Величина X_T соответствует его величине для прямой (обратной) последовательности.

Величина $X_{\mu 0}$ определяется конструкцией трансформаторов. Для групп из трех однофазных или для трехфазных пятистержневых трансформаторов $X_{\mu 0} = \infty$, а для трехфазных трехстержневых трансформаторов $X_{\mu 0} = (0.3...1.0)$ о.е.

Схемы замещения трехобмоточных трансформаторов определяются аналогично.

Если в нейтраль обмотки трансформатора, по которой протекает ток нулевой последовательности, включено сопротивление, то оно учитывается последовательным включением в схему замещения сопротивления утроенной величины.

4. Автотрансформаторы с глухим заземлением нейтрали имеют схему замещения нулевой последовательности, аналогичную схеме замещения трансформатора.

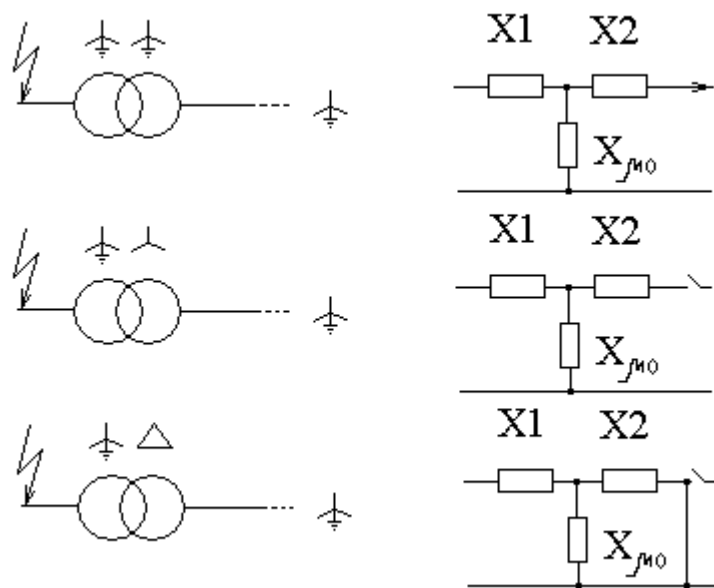


Рис.5.1.

5. Воздушные линии имеют сопротивление X_0 , значительно большее, чем их сопротивление токам прямой (обратной) последовательности. В практических расчетах обычно принимают:

для одноцепной линии без тросов $X_0 = 3.5 X_1$;

то же, со стальными тросами $X_0 = 3.0 X_1$;

для двухцепной линии без тросов $X_0 = 5.5 X_1$;

то же, со стальными тросами $X_0 = 4.7 X_1$.

6. Для кабельной линии в практических расчетах принимают $R_0 \approx 10R_1$, $X_0 = (3.5...4.6) X_1$.

7. Для токоограничивающих реакторов $X_1 = X_2 = X_0$.

Схему замещения для токов нулевой последовательности начинают отроить от точки КЗ, последовательно прослеживая пути протекания токов нулевой последовательности. В цепи, электрически связанной с точкой КЗ, токи нулевой последовательности потекут лишь в сторону элементов, соединенных в $Y-0$.

Протекая через обмотки трансформаторов (автотрансформаторов), соединенные в $Y-0$, токи нулевой последовательности наводят в остальных обмотках трансформаторов ЭДС нулевой последовательности. Но ток нулевой последовательности потечет в них лишь в том случае, если они соединены в Δ (ток замыкается в треугольнике и не будет протекать в подключенной к нему цепи) или если во вторичной цепи, кроме соединенной в $Y-0$ обмотки трансформатора, имеются еще заземленные нейтрали.

Началом схемы нулевой последовательности является точка нулевого потенциала, а ее концом - точка КЗ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Метод симметричных составляющих.
2. Что такое фазный множитель?
3. Граничные условия при однофазном коротком замыкании.
4. Граничные условия при двухфазном коротком замыкании.
5. Граничные условия при двухфазном на землю коротком замыкании.
6. Правило эквивалентности прямой последовательности.
7. Значения $m^{(i)}$ и $X_{\Delta}^{(i)}$ для различных видов несимметрии.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ ДО 1000 В

ЦЕЛЬ: Приобретение практических навыков расчета токов коротких замыканий в низковольтных сетях.

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Электрические установки напряжением до 1000 В, питаемые от распределительной сети электрической системы через понижающие трансформаторы, характеризуются, как правило, большой электрической удаленностью относительно источников питания. Это позволяет считать, что при коротком замыкании за таким понижающим трансформатором напряжение в точке сети, где он присоединен, практически остается неизменным и равным своему номинальному значению.

Наряду с индуктивными сопротивлениями здесь весьма существенную роль играют активные сопротивления, причем последние иногда могут преобладать. Заметное влияние оказывают сопротивления таких элементов, как сборные шины и присоединения к ним, трансформаторы тока и др., которыми при выполнении аналогичных расчетов для установок высокого напряжения всегда пренебрегают. Наконец, весьма существенно здесь сказываются сопротивления различных контактных соединений—болтовых соединений шин, зажимов и разъемных контактов аппаратов и др., а также контакта непосредственно в месте происшедшего замыкания.

В практических расчетах допускается учитывать их совокупно (включая контакт в месте замыкания), вводя в короткозамкнутую цепь активное сопротивление, величина которого в зависимости от места короткого замыкания оценивается в пределах 0,015—0,030 Ом (или 15—30 мОм). Нижний предел соответствует короткому замыканию около распределительного щита подстанции, а верхний—при коротком замыкании непосредственно у электроприемников, получающих питание от вторичных распределительных пунктов.

Поскольку сопротивления большинства элементов рассматриваемых установок задаются в именованных единицах, то весь расчет обычно ведут также в именованных единицах; при этом

ввиду малости самих сопротивлений их выражают в миллиомах (мом).

В качестве средних номинальных напряжений для соответствующих ступеней трансформации рекомендуется принимать: **690, 525, 400, 230, 127 В.**

Для проверки аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания производят расчет трехфазного короткого замыкания, поскольку при этом виде короткого замыкания ток достигает наибольшей величины. Исключение составляет только случай, когда для проверки трансформаторов тока, устанавливаемых в двух фазах, требуется определение тока двухфазного короткого замыкания (см. ниже).

Для настройки защиты от замыканий на землю (в соответствии с требованиями техники безопасности) проводят также расчет токов при однофазном коротком замыкании, чтобы выявить возможную наименьшую величину тока при этом виде замыкания.

По найденным результирующим сопротивлениям прямой и нулевой последовательностей относительно точки короткого замыкания $r_{1\Sigma}$, $r_{0\Sigma}$, $x_{1\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ легко определить начальное значение периодической слагающей тока:

трехфазного короткого замыкания

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3} \sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}} = \frac{U_{\text{ср}}(s)}{\sqrt{3} z_{\Sigma}(\text{мом})}, \text{ ка};$$

однофазного короткого замыкания

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} U_{\text{ср}}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}} = \frac{\sqrt{3} U_{\text{ср}}(s)}{z^{(1)}(\text{мом})}, \text{ ка},$$

где $U_{\text{ср}}$ —среднее номинальное напряжение той ступени, где рассматривается короткое замыкание; к этому же напряжению приведены все сопротивления цепи.

Наличие трансформаторов тока в двух фазах создает местную продольную несимметрию трехфазной цепи. Ее учет можно сделать, как указывалось в п. 3.5. Однако для проверки трансформаторов тока по условиям короткого замыкания можно исходить из величины тока, которая получается при *двухфазном коротком замыкании* (между фазами, где есть и где нет трансформатора тока), т. е.

$$I_k^{(2)} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{\text{ТТ}})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{\text{ТТ}})^2}},$$

где $r_{\text{ТТ}}$ и $x_{\text{ТТ}}$ —сопротивления трансформатора тока.

С увеличением удаленности короткого замыкания величина тока существенно снижается, причем тем интенсивнее, чем меньше сечение кабеля.

Одновременно с ростом удаленности короткого замыкания отношение x/r , как правило, падает, что приводит к снижению ударного коэффициента K_u .

Учет двигателей при определении ударного имеет смысл только если они находятся в непосредственной близости к месту короткого замыкания или питаются от той же секции шин, к которой присоединена аварийная цепь. Поскольку установленные здесь двигатели имеют сравнительно малую мощность, ударный коэффициент для них $k_u \approx 1$.

В тех случаях, когда в рассматриваемой установке имеется генератор, последний, разумеется, должен быть учтен отдельной генерирующей ветвью с параметрами, отвечающими данной мощности генератора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Особенности расчета токов коротких замыканий в низковольтных сетях.
2. Что такое переходное сопротивление и как оно учитывается в расчетах?
3. Как и с какой целью рассчитывается ток трехфазного короткого замыкания в низковольтных сетях?
4. Как и с какой целью рассчитывается ток двухфазного короткого замыкания в низковольтных сетях?
5. Как и с какой целью рассчитывается ток однофазного короткого замыкания в низковольтных сетях?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7

ВЫБОР И ПРОВЕРКА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПО ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

ЦЕЛЬ: Приобретение практических навыков выбора и проверки выключателей по отключающей способности.

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Отключающая способность выключателей характеризуется двумя величинами, соответствующими моменту расхождения дугогасительных контактов:

- а) эффективным значением периодической слагающей тока (симметричным током);
- б) апериодической слагающей тока или ее относительным содержанием

$$\beta = \frac{i_{a\tau}}{\sqrt{2}I_{п\tau}},$$

где $i_{a\tau}$ и $\sqrt{2}I_{п\tau}$ — мгновенное значение апериодической слагающей и амплитуда периодической слагающей тока в момент расхождения дугогасительных контактов.

Номинальные значения относительного содержания апериодической слагающей при данном номинальном токе отключения зависят от наименьшего возможного для данного выключателя времени τ от момента возникновения короткого замыкания до размыкания дугогасительных контактов и определяется приводимой кривой $\beta = f(\tau)$. При этом время τ принимается равным собственному времени отключения выключателя с добавлением 0,01 сек для выключателей, которые отключаются от встроенных реле.

При выборе или проверке выключателя по отключающей способности должно быть обеспечено, чтобы как номинальный ток отключения, так и номинальное относительное содержание апериодической слагающей не были превышены.

В зависимости от степени быстродействия выключателя его время τ (включая указанные 0,01 сек) находится в пределах 0,02—0,1 сек.

Таким образом, чтобы выбрать или проверить выключатель по отключающей способности, нужно предварительно определить для

его собственного времени отключения возможные величины периодической слагающей тока короткого замыкания и относительного содержания апериодической слагающей.

За столь короткий промежуток времени (до **0,1 сек**) изменение периодической слагающей происходит практически только за счет затухания свободного сверхпереходного тока, причем у машин с демпферными контурами оно проявляется заметнее. Чем больше удаленность короткого замыкания, тем меньше величина свободного сверхпереходного тока, но его затухание происходит несколько медленнее.

Значение периодической слагающей тока в произвольный момент времени τ можно выразить через начальный сверхпереходный ток как

$$I_{п\tau} = \gamma_{\tau} I'',$$

где γ_{τ} — коэффициент, характеризующий затухание периодической слагающей тока.

Для определения величины γ_{τ} могут служить кривые рис. 7.1, построенные в функции суммарной реактивности по которой производился подсчет тока I'' ; эта реактивность должна быть выражена в относительных единицах при суммарной мощности участвующих генераторов.

Указанные кривые соответствуют параметрам генераторов мощностью до 150 МВт.

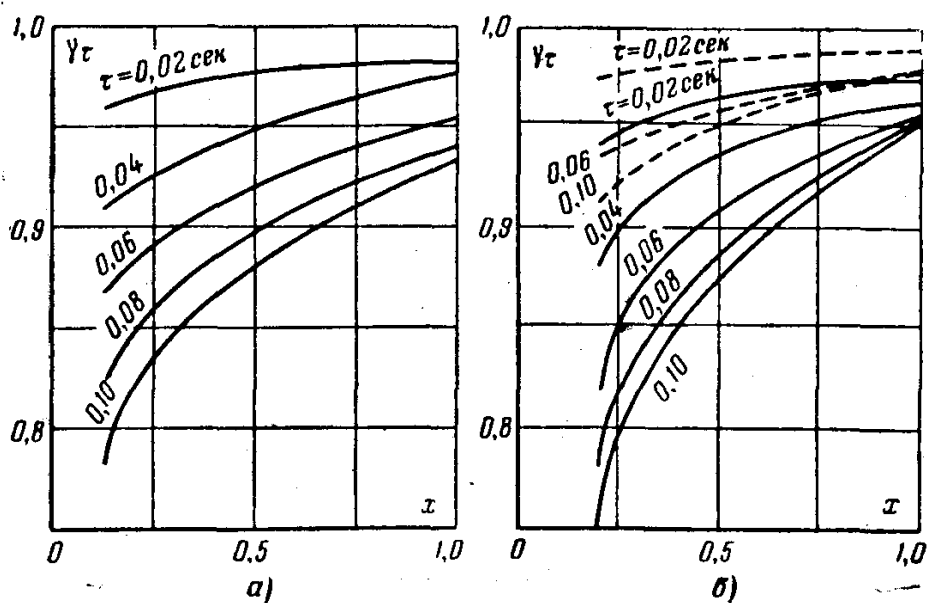


Рис. 7.1. Кривые изменения $\gamma_{\tau} = f(x)$ при разных τ .

а—для турбогенератора; б—для гидрогенератора (сплошные линии—с демпферными обмотками, пунктирные—без демпферных обмоток).

При реактивности $x > 1$ затуханием периодической слагающей тока за время до 0,1 сек. практически можно пренебрегать. Когда в схеме имеется источник бесконечной мощности, то для определения посылаемого им к месту короткого замыкания тока следует предварительно найти взаимную реактивность между этим источником и точкой короткого замыкания; искомый ток выражается отношением напряжения источника к найденной взаимной реактивности.

В общем случае при наличии сложной схемы для определения затухания апериодической слагающей тока короткого замыкания нужно помимо уже известной результирующей реактивности x_Σ найти результирующее активное сопротивление r_Σ (при $x=0$) схемы относительно точки короткого замыкания и определить $T_{a\tau}$ а затем искомое значение $i_{a\tau}$.

Последнее может быть также найдено при помощи кривых рис. 7.2, где так называемый коэффициент затухания апериодической слагающей

$$\lambda_\tau = \frac{i_{a\tau}}{i_{a0}} = \frac{i_{a\tau}}{\sqrt{2} I''}$$

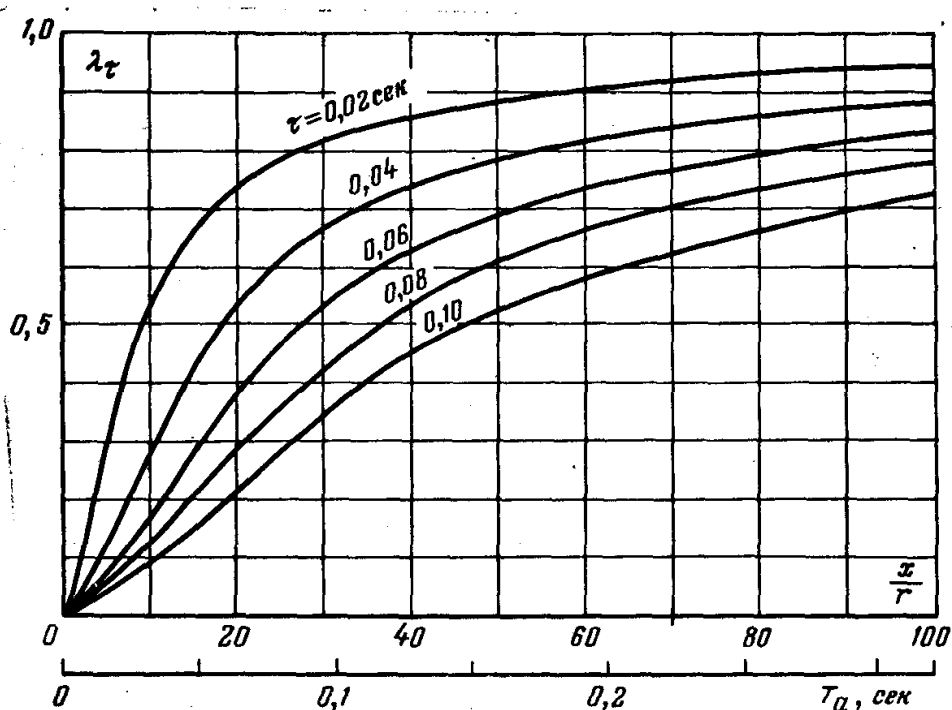


Рис. 7.2. Кривые изменения $\lambda_\tau = f(x/r)$ при разных величинах τ .

Таким образом, расчетная величина относительного содержания апериодической слагающей будет:

$$\beta = \frac{\sqrt{2} I'' \lambda_r}{\sqrt{2} I_{пк}}$$

Когда схема содержит независимые радиальные ветви, значение апериодической слагающей тока в месте короткого замыкания следует для большей точности находить, суммируя эти слагающие отдельных ветвей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Характеристики выключателей по времени отключения.
2. Определение степени затухания периодической и апериодической составляющих тока короткого замыкания к моменту отключения.
3. Выбор выключателя по допустимому периодическому току.
4. Выбор выключателя по допустимому апериодическому току или доле апериодического тока.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8

УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОМАШИННОЙ СИСТЕМЫ, РАБОТАЮЩЕЙ НА ШИНЫ БЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НЕРЕГУЛИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НАГРУЗКЕ, ЗАДАННОЙ ПОСТОЯННЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ИЛИ СТАТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

ЦЕЛЬ: Научиться строить угловые характеристики мощности электропередачи и анализировать с их помощью статическую устойчивость системы.

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Простейшая (одномашинная) модель энергосистемы представляется одной удалённой электростанцией (эквивалентным генератором), работающей через трансформаторные связи и линию электропередачи параллельно с генераторами мощной концентрированной энергосистемы, настолько мощной, что её приемные шины обозначают как шины бесконечной мощности (ШБМ). Отличительными признаками ШБМ являются неизменное по модулю напряжение ($U = \text{const}$) и неизменная частота $\omega_0 = \text{const}$ этого напряжения. При использовании ШБМ соответствующие им энергосистемы в электрических схемах, как правило, не изображаются. В схемах замещения шины бесконечной мощности используются как элемент, изображающий мощную систему.

Рассмотрим процессы в одномашинной энергосистеме (рис. 8.1,а), в которой от удалённого нерегулируемого генератора Γ через трансформаторы T_1 и T_2 и одноцепную линию электропередачи L передаётся активная мощность P при токе I в энергосистему C . Мощность поступает на приёмные шины энергосистемы, принимаемые за шины бесконечной мощности. Определим основные соотношения между параметрами режима одномашинной энергосистемы, необходимые для анализа процессов.

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

схема замещения имеет вид цепочки из индуктивных сопротивлений (см. рис. 8.1,б), включённой между двумя источниками электродвижущих сил (ЭДС). Источником E_q моделируется синхронная ЭДС генератора, источником U - напряжение на ШБМ.

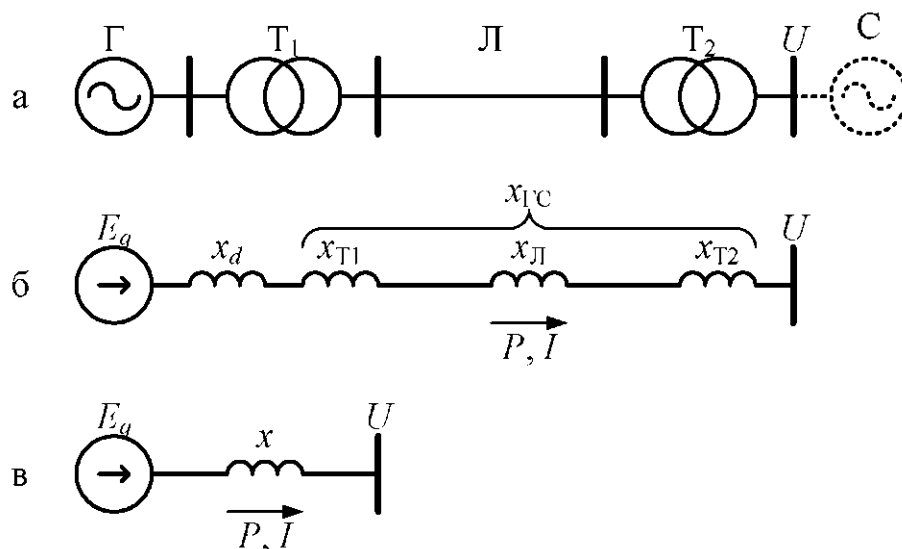


Рис. 8.1. Одномашинная модель энергосистемы

Эквивалентное индуктивное сопротивление x в эквивалентной схеме замещения (см. рис. 1.2, в) определено как сумма индуктивных сопротивлений:

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

Угловая характеристика мощности данной электропередачи представляет собой синусоидальную функцию активной мощности генератора от угла (рис.8.2)

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

Угловая характеристика является геометрическим местом точек, соответствующих всем возможным значениям мощности, передаваемой от генератора. В установившемся режиме от генератора передаётся только одна конкретная величина мощности, которой соответствует конкретное значение угла. Эта мощность P_0 равна мощности турбины P_T , вследствие чего турбина, вал и ротор генератора сохраняют равномерное вращательное движение.

Таким образом, в установившемся режиме на вал энергоагрегата действуют два одинаковых по абсолютной величине, но противоположных по направлению вращающих момента:

ускоряющий механический момент турбины и тормозящий электромагнитный момент генератора. Аналогами этих моментов, используемыми в электроэнергетике, являются механическая мощность турбины P_T и электрическая мощность генератора P_0 (см. рис. 8.2). Отклонение любой из этих мощностей (моментов) от установившегося значения отражается в виде появления небаланса мощностей (моментов) $\Delta P = P_T - P$ на валу, под действием которого ротор генератора будет ускорять либо замедлять своё вращательное движение. Соответственно, величина угла δ будет увеличиваться или уменьшаться.

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

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

$$\frac{\Delta P}{\Delta \delta} > 0.$$

При переходе к бесконечно малым приращениям и учёте экстремальной точки угловой характеристики, где $dP/d\delta = 0$, этот признак записывается в виде

$$\frac{dP}{d\delta} \geq 0$$

и используется как *практический критерий статической устойчивости одномашинной энергосистемы*.

Очевидно, что в условиях эксплуатации генератор не следует загружать до предельной мощности P_m , так как любое незначительное отклонение параметров режима может привести к потере синхронизма и переходу генератора в асинхронный режим. На случай

появления непредвиденных возмущений предусматривается запас по загрузке генератора, характеризуемый *коэффициентом запаса статической устойчивости*

$$K_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{м}} - P_0}{P_0}.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Векторная диаграмма нормального режима работы синхронной машины.
2. Угловая характеристика мощности синхронной машины.
3. Понятие о статической устойчивости.
4. Критерий статической устойчивости синхронного генератора.
5. Коэффициент запаса статической устойчивости.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 9

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛА НАГРУЗКИ, В ТОМ ЧИСЛЕ ЗАДАННОЙ ЭКВИВАЛЕНТНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

ЦЕЛЬ: Приобретение практических навыков расчета статической устойчивости узла нагрузки.

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Асинхронные двигатели составляют подавляющую часть промышленной нагрузки, и поэтому анализ условий сохранения их устойчивой работы имеет большое практическое значение.

Критерий статической устойчивости двигателя установим исходя из физических представлений. Нормальный установившийся режим двигателя определяется, как отмечено, точкой пересечения характеристики мощности механизма $P_{\text{мех}}(s)$ и характеристики электромагнитной мощности $P(s)$ (рис. 9.1).

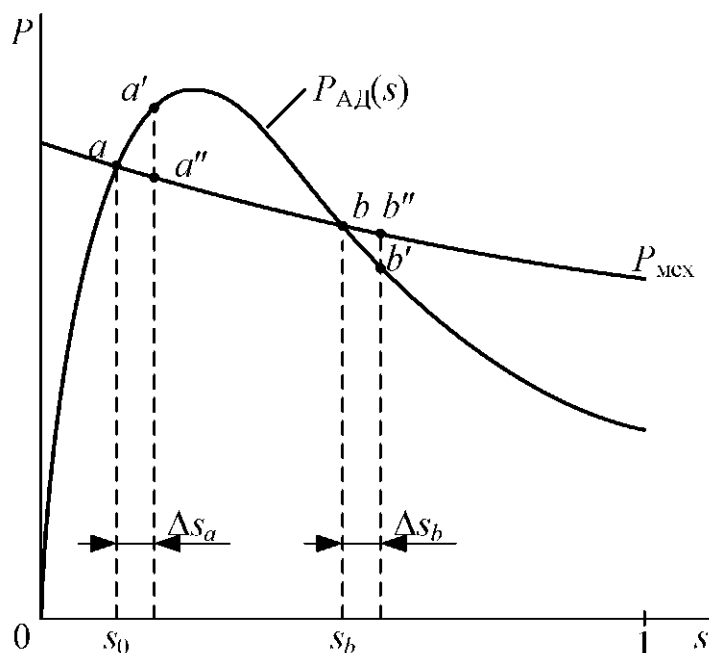


Рис. 9.1. Точки устойчивого a и неустойчивого b равновесных состояний асинхронного двигателя

В некоторых случаях, например, при пониженном напряжении таких точек может быть две (точки a и b на рис. 9.1), однако

устойчивому состоянию отвечает только точка a , расположенная на восходящей ветви характеристики электромагнитной мощности $P(s)$.

Действительно, если в точке a произойдет незначительное случайное отклонение скольжения на величину Δs_a , то на валу ротора двигателя возникнет избыточный ускоряющий момент $\Delta P_a = P_d - P_a$, который приведет к увеличению скорости вращения ротора и соответствующему уменьшению скольжения до величины s_0 . При отклонении скольжения s_b на величину Δs_b избыточный момент $\Delta P_b = P_b - P_b$ будет тормозящим вследствие превышения механического момента над электромагнитным, и поэтому скольжение ротора двигателя будет увеличиваться, скорость уменьшаться, и двигатель остановится. Следовательно, в точке b нормальная устойчивая работа двигателя невозможна.

Отметим, что небаланс мощностей (моментов) $\Delta P_{нб}$ на валу ротора двигателя, появляющийся при отклонениях скольжения относительно значений s_0 и s_b , образуется за счет изменений электромагнитного ΔP и механического $\Delta P_{мех}$ вращающих моментов. При этом

$$\Delta P_{нб} = \Delta P - \Delta P_{мех}.$$

В точке a положительному приращению небаланса моментов соответствует положительное приращение скольжения. Поэтому

$$\frac{\Delta P_{нб}}{\Delta s} = \frac{\Delta P - \Delta P_{мех}}{\Delta s} > 0.$$

При бесконечно малых приращениях это неравенство, включающее также знак производной в экстремальной точке, используется как

$$\frac{d(P - P_{мех})}{ds} \geq 0.$$

При $P_{мех} = \text{const}$ критерий статической устойчивости упрощается до вида

$$\frac{dP}{ds} \geq 0,$$

широко используемого для оценки статической устойчивости групп асинхронных двигателей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Характеристика мощности асинхронного двигателя.
2. Статическая устойчивость асинхронного двигателя.
3. Критерий статической устойчивости асинхронного двигателя.
4. Представление узла нагрузки эквивалентным асинхронным двигателем.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 10

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ОДНИМ ГЕНЕРАТОРОМ, РАБОТАЮЩЕЙ НА ШИНЫ БЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ

ЦЕЛЬ: Приобретение практических навыков расчета динамической устойчивости электропередачи с одним генератором.

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Рассмотрим динамические процессы, возникающие при больших возмущениях в энергосистеме (рис.10.1).

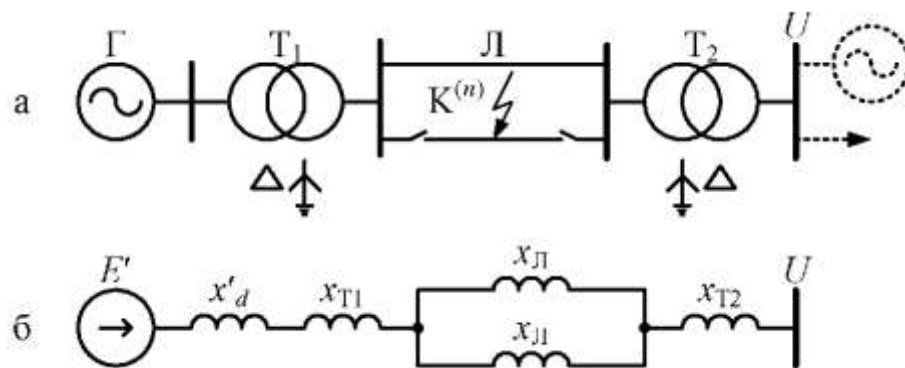


Рис. 10.1. Простейшая энергосистема (а)
и её схема замещения (б)

Следует составить три схемы замещения: для нормального, аварийного и после-варийного режимов. Во все эти схемы генератор вводится переходной ЭДС $\tilde{E}$ и переходным сопротивлением по продольной оси x'_d .

По схеме замещения нормального режима (рис. 10.1, б) определяется взаимное сопротивление x : между точкой приложения ЭДС $E'u$ шинами бесконечной мощности

$$x_1 = x'_d + x_{T1} + x_{Л}/2 + x_{T2}.$$

Тогда выражение для электромагнитной мощности генератора записывается в виде:

$$P_I = \frac{E'U}{x_I} \sin \delta.$$

В схеме замещения аварийного режима необходимо присоединить к точке короткого замыкания шунт, составленный из результирующих сопротивлений обратной и нулевой последовательностей, определяемых по соответствующим схемам замещения. Сопротивление шунта X_{Δ} определяется в зависимости от вида несимметричного КЗ, а взаимное сопротивление x_{II} определяется по формуле

$$x_{II} = (x'_d + x_{T1}) + (x_{L/2} + x_{T2}) + \frac{(x'_d + x_{T1})(x_{L/2} + x_{T2})}{x_{\Delta}^{(n)}}.$$

Выражение для электромагнитной мощности в аварийном режиме имеет следующий вид:

$$P_{II} = \frac{E'U}{x_{II}} \sin \delta,$$

Схема замещения послеаварийного режима отличается от схемы замещения нормального режима отсутствием сопротивления отключенной цепи

$$x_{III} = x'_d + x_{T1} + x_{L/2} + x_{T2},$$

а для электромагнитной мощности справедливо выражение:

$$P_{III} = \frac{E'U}{x_{III}} \sin \delta,$$

На рис.10.2 графически показаны угловые характеристики для нормального, аварийного и послеаварийного режимов.

В начальный момент короткого замыкания ротор генератора в силу инерции сохраняет угол δ_0 относительно синхронно вращающейся оси, а электромагнитная мощность падает до величины, ограниченной точкой b . На валу ротора возникает избыточный ускоряющий момент, под действием которого увеличивается относительная скорость, и возрастает угол δ . Если повреждённая цепь не отключится, то генератор выпадет из синхронизма. Однако через некоторое время (при $\delta = \delta_{\text{откл}}$) релейная защита отключает повреждённую цепь, и электрическая нагрузка на генератор скачком (от точки d до точки d'') возрастает в связи с переходом на послеаварийную характеристику. На валу ротора появляется избыточный тормозящий момент, под действием которого его

движение замедляется. Торможение ротора происходит до тех пор, пока дополнительная кинетическая энергия, приобретённая до момента отключения повреждённой цепи, не преобразуется в потенциальную. Поскольку площадь на плоскости $P - f(\delta)$ в некоторой пропорции отражает энергию (или работу), то в соответствии с законом сохранения количества энергии следует, что площадка $d'd''mm'd'$ ($F_{\text{ТОРМ}}$), соответствующая торможению, должна быть равна площадке $acd'dba$ (F), соответствующей ускорению ротора генератора.

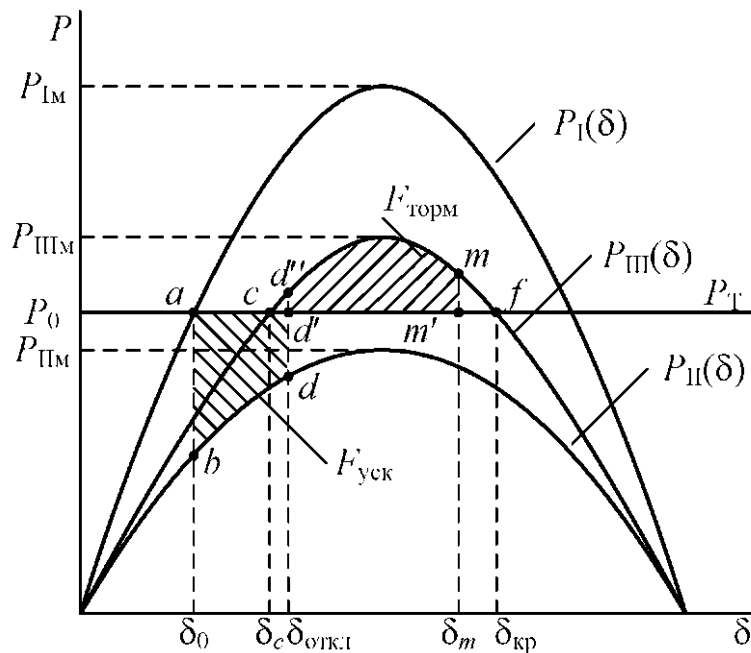


Рис.10.2. Площадки ускорения и торможения при устойчивом динамическом переходе генератора

Равенство между площадками торможения и ускорения

$$F_{\text{торм}} = F_{\text{уск}}$$

называется *правилом площадей*.

Как видно из рис. 10.2, для рассматриваемого случая имеется возможность дальнейшего торможения, то есть в случае более позднего отключения повреждённой цепи ротор мог бы затормозиться. Поэтому площадь $d'd''mfm'd'$ можно назвать *площадью возможного торможения* $F_{\text{ВОЗМ торм}}$.

Отношение площади возможного торможения к площади ускорения представляет собой *коэффициент запаса динамической устойчивости*:

$$K_{д.у} = \frac{F'_{\text{возм.торм}}}{F'_{\text{уск}}}.$$

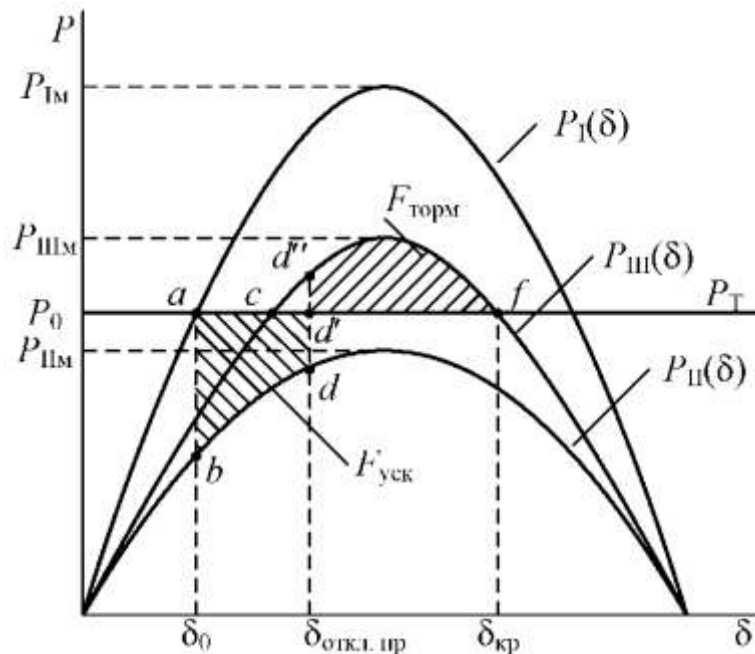


Рис10.3. Площадки ускорения и торможения при предельном динамическом переходе генератора

Если отключение повреждённой цепи осуществляется несколько позднее, то есть при $t_{\text{откл}} > i_{\text{откл.пр}}$ и, соответственно, при $\delta_{\text{откл}} > \delta_{\text{откл.пр}}$, то генератор выпадает из синхронизма. На рис. 10.3 показан случай, соответствующий предельному углу отключения $\delta_{\text{откл.пр}}$ повреждённой цепи.

Величина $\delta_{\text{откл.пр}}$ легко может быть определена из энергетических соображений. Поскольку площадь возможного торможения и площадь ускорения в данном случае одинаковы, то, очевидно, их алгебраическая сумма будет равна нулю:

$$F'_{acd'dba} + F'_{d'd''fd'} = 0,$$

$$P_0(\delta_{\text{откл.пр}} - \delta_0) + P_{IIIм}(\cos \delta_{\text{откл.пр}} - \cos \delta_0) +$$

$$P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta_{\text{откл.пр}}) + P_{IIIм}(\cos \delta_{\text{кр}} - \cos \delta_{\text{откл.пр}}) = 0,$$

$$\cos \delta_{\text{откл.пр}} = \frac{P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta_0) + P_{IIIм} \cos \delta_{\text{кр}} - P_{IIм} \cos \delta_0}{P_{IIIм} - P_{IIм}}$$

где углы δ_0 и $\delta_{кр}$ выражены в радианах. Величина критического угла определяется, в соответствии с рис. 10.3, по выражению

$$\delta_{кр} = \pi - \arcsin \frac{P_0}{P_{ШМ}}.$$

При практических расчётах обычно интересует не предельный угол отключения, а предельное время отключения, с тем, чтобы предъявить требования к работе релейной защиты и автоматики.

С помощью правила площадей непосредственно определить время отключения невозможно. Для этого необходимо решить уравнение движения ротора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие о динамической устойчивости.
2. Относительное движение ротора в переходном процессе.
3. Работа сил ускорения и торможения, её геометрическая интерпретация.
4. Правило площадей.
5. Критерий динамической устойчивости.
6. Коэффициент запаса динамической устойчивости.
7. Предельный угол отключения.
8. Уравнение движения ротора синхронного генератора.
9. Частные решения уравнения движения.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 11

МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

ЦЕЛЬ: Приобретение практических навыков расчета динамической устойчивости двухмашинной системы.

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Метод последовательных интервалов разработан для практического анализа динамической устойчивости энергосистем. Несмотря на большое количество других более общих методов численного решения дифференциальных уравнений метод последовательных интервалов используется часто, поскольку при удовлетворительной точности даёт наглядное представление о взаимосвязи между параметрами режима в динамических процессах. С помощью этого метода можно установить предельное время отключения элемента с коротким замыканием, учесть действие автоматических регуляторов возбуждения, изменение реакции статора во времени и другие явления. Как и другие численные методы, метод последовательных интервалов позволяет получать приближённые решения дифференциальных уравнений, в частности, приближённое решение уравнения движения ротора генератора. Для больших интервалов времени Δt , и для каждого из этих интервалов последовательно вычисляются приращения угла $\Delta\delta$.

$$\alpha_{(0)} = \frac{\Delta P_{(0)}}{T_j}.$$

$$\Delta P_{(0)} = P_0 - P_{\text{IIIm}} \sin \delta_0,$$

под воздействием которого ротор получает начальное ускорение.

Для достаточно малого интервала времени Δt можно допустить этот небаланс неизменным, а относительное движение ротора, соответственно, равноускоренным. Тогда по формулам равноускоренного движения нетрудно вычислить приращение угла $\Delta\delta$ в течение первого интервала времени:

$$\Delta\delta(1) = \frac{360f\Delta t^2 \Delta P_0}{2T_j},$$

где угол в конце первого интервала определится как

$$\delta_{(1)} = \delta_0 + \Delta\delta_{(1)},$$

Небаланс мощностей

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{\text{IIм}} \sin \delta_{(1)}.$$

создаёт в начале второго интервала пропорциональное ему ускорение. При вычислении приращения угла $\Delta P_{(2)}$ в течение второго интервала времени необходимо учесть, что помимо действующего в этом интервале ускорения прирост угла происходит и за счёт относительной скорости, приобретённой ротором в течение первого интервала.

$$\text{Поэтому } \Delta \delta_{(2)} = v_1 \Delta t + a_1 \frac{\Delta t^2}{2}.$$

Для получения более точных результатов расчета относительную скорость $v_{(1)}$ определяют не по начальному ускорению $a_{(0)}$, а по среднему ускорению $a_{\text{ср}(1)}$, действующему на первом интервале времени:

$$v_{(1)} = a_{\text{ср}(1)} \cdot \Delta t = \frac{\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)}}{2} \Delta t.$$

При таком усреднении

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + K \Delta P_{(1)}.$$

Угол в конце второго интервала составит величину

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)},$$

а небаланс мощностей на валу определится как

$$\Delta P_{(2)} = P_0 - P_{\text{IIм}} \sin \delta_{(2)}.$$

Дальнейший расчёт приращений угла на интервалах времени осуществляется по рекуррентной формуле

$$\Delta \delta_{(i-1)} = \Delta \delta_{(i)} + K \Delta P_{(i)}.$$

Расчёт методом последовательных интервалов, как и другими численными методами, ведётся до тех пор, пока угол δ не начнёт уменьшаться или пока не выяснится, что его величина беспрестанно возрастает и, следовательно, генератор выпадает из синхронизма.

Метод последовательных интервалов можно применять совместно с правилом площадей для определения предельно допустимого времени отключения $t_{0\text{ТКЛпр}}$ повреждённой цепи.

Для этого по правилу площадей определяют предельный угол отключения $\delta_{0\text{ТКЛ пр}}$ и с помощью метода последовательных интервалов вычисляют зависимость $\delta = f(t)$ (рис. 11.1). С помощью этой зависимости по координате $\delta_{0\text{ТКЛпр}}$ определяют предельное время отключения повреждённой цепи.

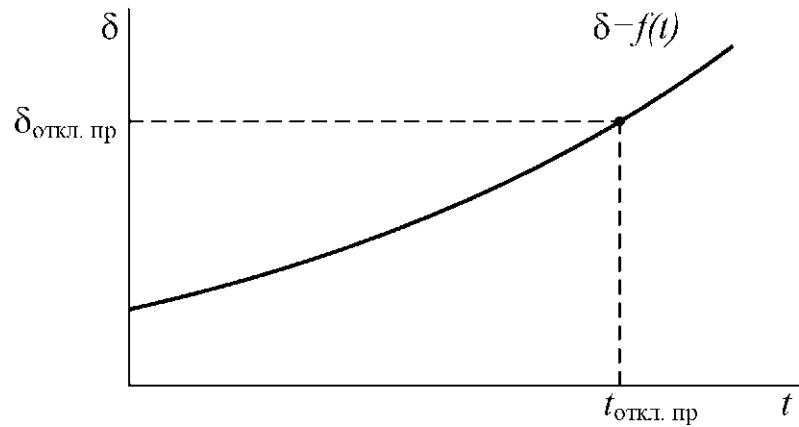


Рис. 11.1. Определение времени отключения поврежденной цепи

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Характеристика мощности двухмашинной системы.
2. Правило площадей в двухмашинной системе.
3. Относительный угол расхождения роторов.
4. Относительное ускорение роторов.
5. Как задача «станция» - «станция» сводится к задаче «станция» - «шины бесконечной мощности»?.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 12

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛА НАГРУЗКИ, ЗАДАННОЙ ЭКВИВАЛЕНТНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

ЦЕЛЬ: Приобретение практических навыков расчета динамической устойчивости узла нагрузки.

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЗАНЯТИЯ

Большие возмущения параметров режима асинхронного двигателя появляются либо вследствие резкого изменения механического момента (например, у двигателей подъёмных кранов, лифтов и др.), либо из-за резких изменений питающего напряжения.

В обоих случаях ход процессов зависит от начальных больших, но не скачкообразных изменений токов в обмотках двигателя. Влияют также инерционные свойства ротора, проявляющиеся при изменениях скольжения.

Оба эти фактора изменяют активное и индуктивное сопротивление двигателя в динамических переходах, вследствие чего изменения его активной мощности проходят не по статическим зависимостям $P_d(s)$, $P_{\text{мех}}(s)$, а по более сложным динамическим характеристикам (рис. 12.1, 12.2).

В частности, при резком набросе механического момента от $P_{\text{мех}} \text{ А}$ до $P_{\text{мех}} \text{ Б}$ и последующем его сбросе траектории перехода ротора проходят по разные стороны от статической характеристики (кривые $d1$, $d2$ на рис. 12.1).

При резком снижении и последующем повышении напряжения динамические свойства двигателя также проявляются в виде переходов по разным траекториям (кривые $d1$, $d2$ на рис. 12.2).

Если это медленный переход (медленное снижение напряжения), то траектория перехода из точки a в точку b совпадает с кривой $P_{\text{мех}}(s)$.

При скачкообразном снижении напряжения траектория перехода проходит по кривой $d1$. Резкое повышение напряжения сопровождается переходом режима из точки b в точку a по кривой $d2$.

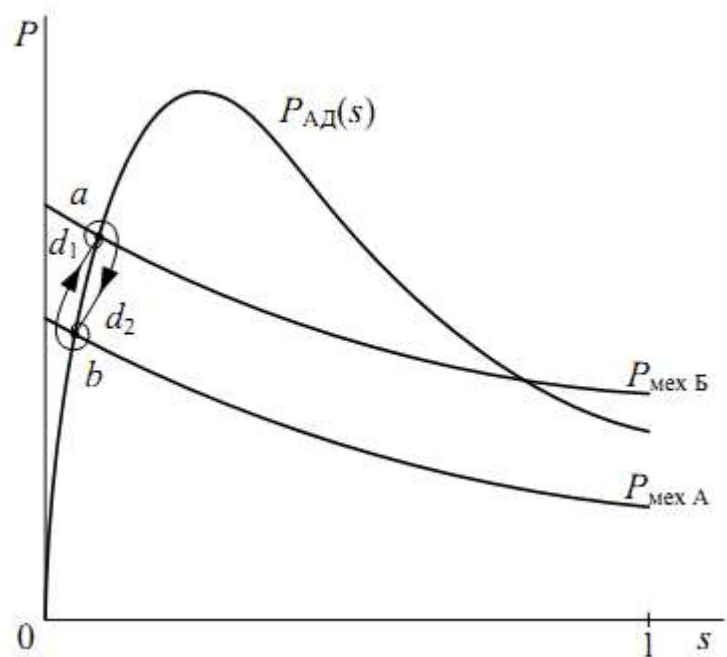


Рис. 12.1. Динамические характеристики $P_{\text{д}}(s)$ асинхронного двигателя при резком набросе и последующем сбросе механического момента

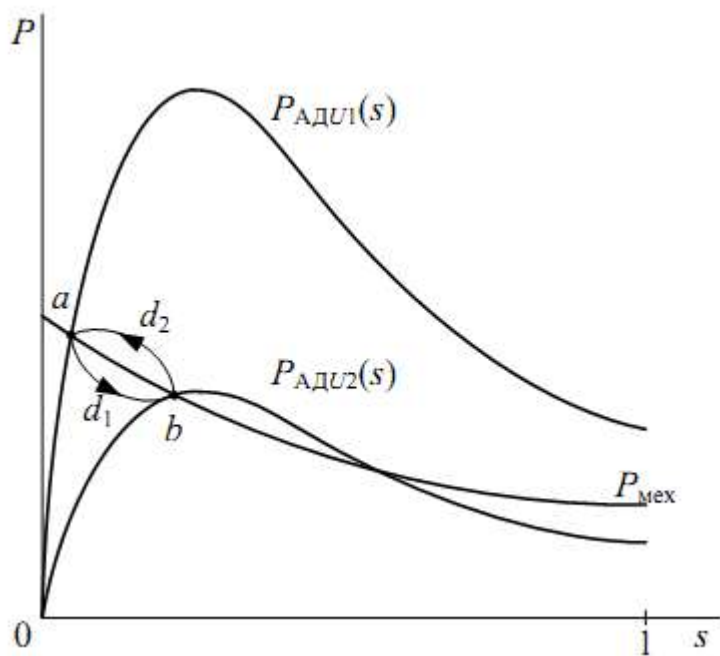


Рис. 12.2. Динамические характеристики $P_{\text{д}}(s)$ асинхронного двигателя при резком снижении и последующем повышении напряжения

Полнота и точность учета динамических свойств электродвигателей увеличиваются по мере уточнения их математических моделей. Однако к чрезмерному уточнению этих моделей не следует стремиться. Сложность модели определяется условиями разумной достаточности в достижении цели, поставленной перед расчётом.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Динамическая устойчивость асинхронного двигателя.
2. Динамические характеристики нагрузки.
3. Резкие изменения режима работы узла нагрузки.
4. Наброс нагрузки на синхронный двигатель.
5. Наброс нагрузки на асинхронный двигатель.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Основные формулы преобразования схем

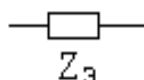
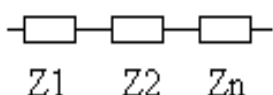
1. Последовательное соединение

До преобразования

После

Параметры

преобразования



$$Z_{\text{э}} = Z_1 + Z_2 + Z_n$$

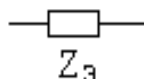
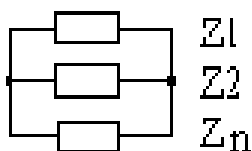
2. Параллельное соединение

До преобразования

После

Параметры

преобразования



$$Z_{\text{э}} = 1/Y_{\text{э}}$$

$$Y_{\text{э}} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n.$$

При n=2:

$$Z_{\text{э}} = Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$$

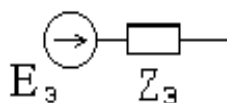
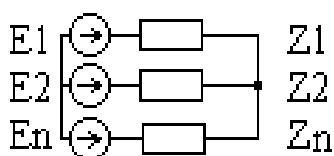
3. Замена нескольких источников эквивалентным

До преобразования

После

Параметры

преобразования



$$E_{\text{э}} = 1/Y_{\text{э}} \sum E_i Y_i,$$

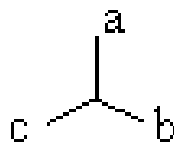
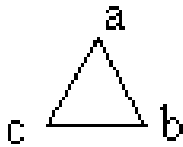
$$Y_{\text{э}} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n.$$

При n=2:

$$E_{\text{э}} = (E_1 Z_2 + E_2 Z_1) / (Z_1 + Z_2)$$

4. Преобразование треугольника сопротивлений в звезду

До преобразования После Параметры
преобразования

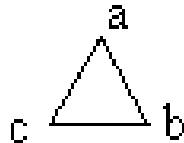
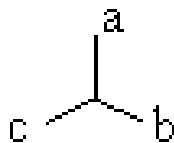


Например, для Z_a :

$$Z_a = Z_{ab}Z_{ac} / (Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{bc})$$

5. Преобразование звезды сопротивлений в треугольник

До преобразования После Параметры
преобразования



Например, для Z_{ab} :

$$Z_{ab} = Z_a + Z_b + \frac{Z_a Z_b}{Z_c}$$

Приложение 2

Средние значения E'' и X''
(в относительных единицах при номинальных условиях)

Наименование элемента	X''	E''
Турбогенератор до 100 МВт	0,125	1,08
до 500 МВт	0,200	1,13
Гидрогенератор с демпферными обмотками	0,200	1,13
без демпферных обмоток	0,270	1,18
Синхронный двигатель	0,200	1,10
Синхронный компенсатор	0,200	1,20
Асинхронный двигатель	0,200	0,90
Обобщенная нагрузка	0,350	0,85

Приложение 3

Средние значения ударного коэффициента при КЗ в различных
точках электрической системы

Место короткого замыкания	Ударный коэффициент
На сборных шинах 6...10 кВ станций с генераторами мощностью 30...60 МВт	1,92 – 1,96
За линейным реактором, присоединенным к сборным шинам станции	1,85 – 1,95
На сборных шинах повышенного напряжения станций с трансформаторами мощностью 100 МВА и выше	1,89 – 1,95
30...100 МВА	1,85 – 1,94
На сборных шинах вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 100 МВА и выше	1,85 – 1,92
30...100 МВА	1,85 – 1,89
В точках системы, удаленных от генераторов (сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами 20 МВА и ниже, в распределительных сетях и др.	1,80 и ниже

Приложение 4

Средние значения X/R для элементов электрических систем

Наименование элемента	Отношение X/R
Турбогенератор мощностью до 100 МВА	15-85
от 100 до 500 МВА	100-140
Гидрогенератор с демпферными обмотками	40-60
без демпферных обмоток	60-90
Трансформатор мощностью 5... 30 МВА	7-17
60... 500 МВА	20-50
Реакторы 6... 10 кВ с током до 1000 А	15-70
1500 Д и выше	40-80
Воздушные линии	2-8
Кабельные линии 6...10 кВ	0,2-0,8
Обобщенная нагрузка	2,5

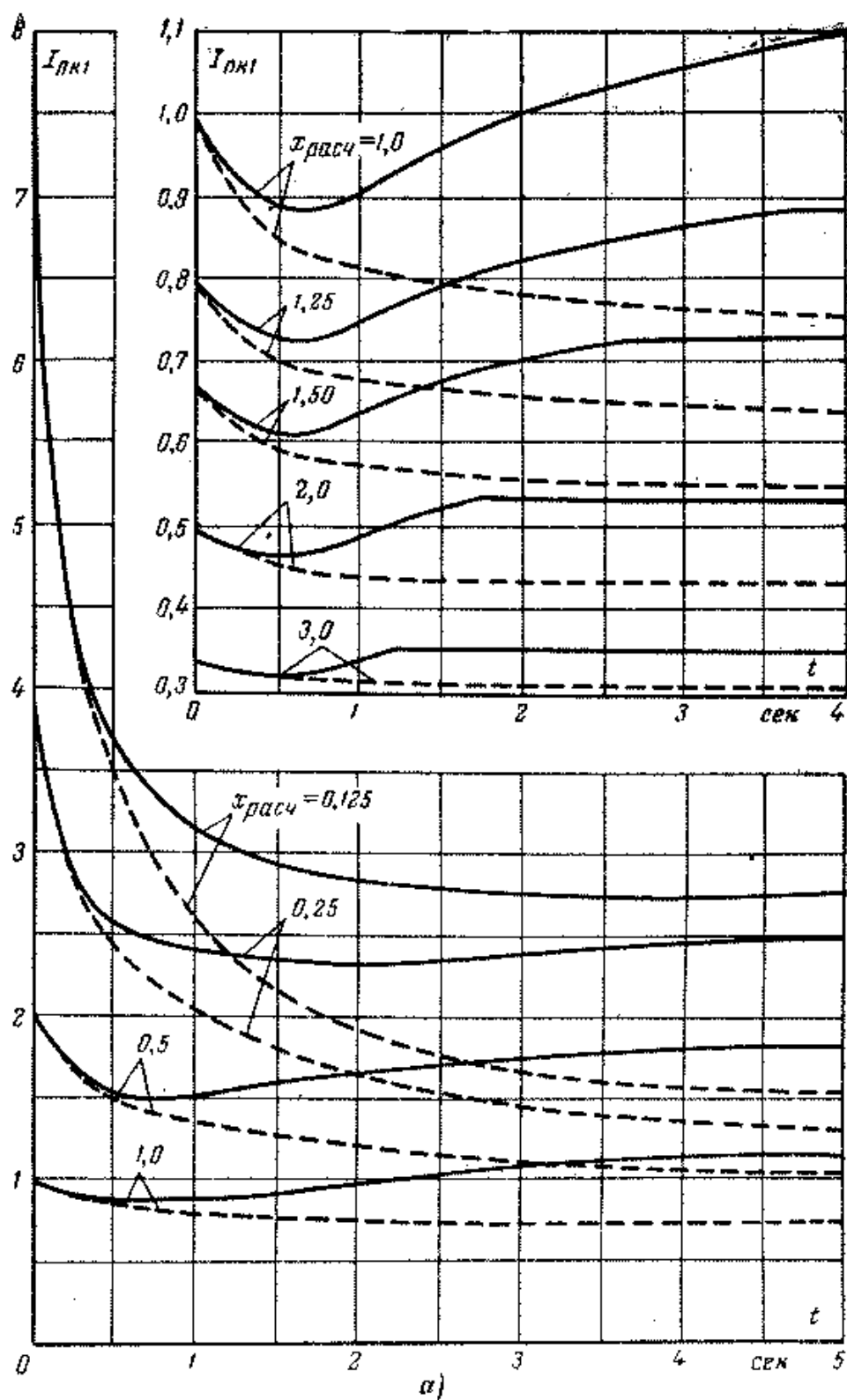


Рис. П5.1,а. Расчетные кривые для турбогенератора средней мощности
(сплошные линии – при наличии АРВ, пунктирные – при отсутствии АРВ)

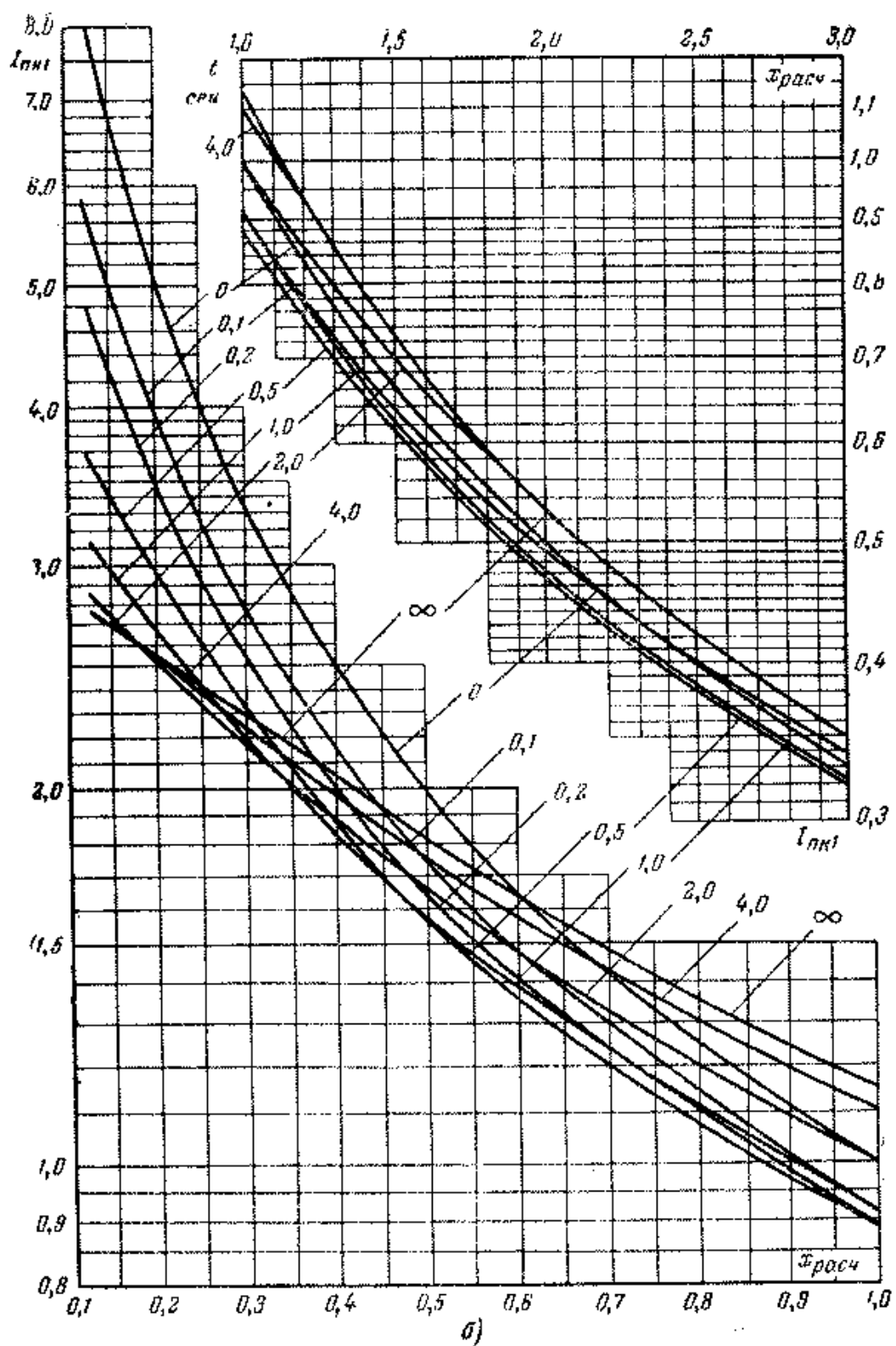


Рис. П5.1,б. Расчетные кривые для турбогенератора средней мощности
(сплошные линии – при наличии АРВ, пунктирные – при отсутствии АРВ)

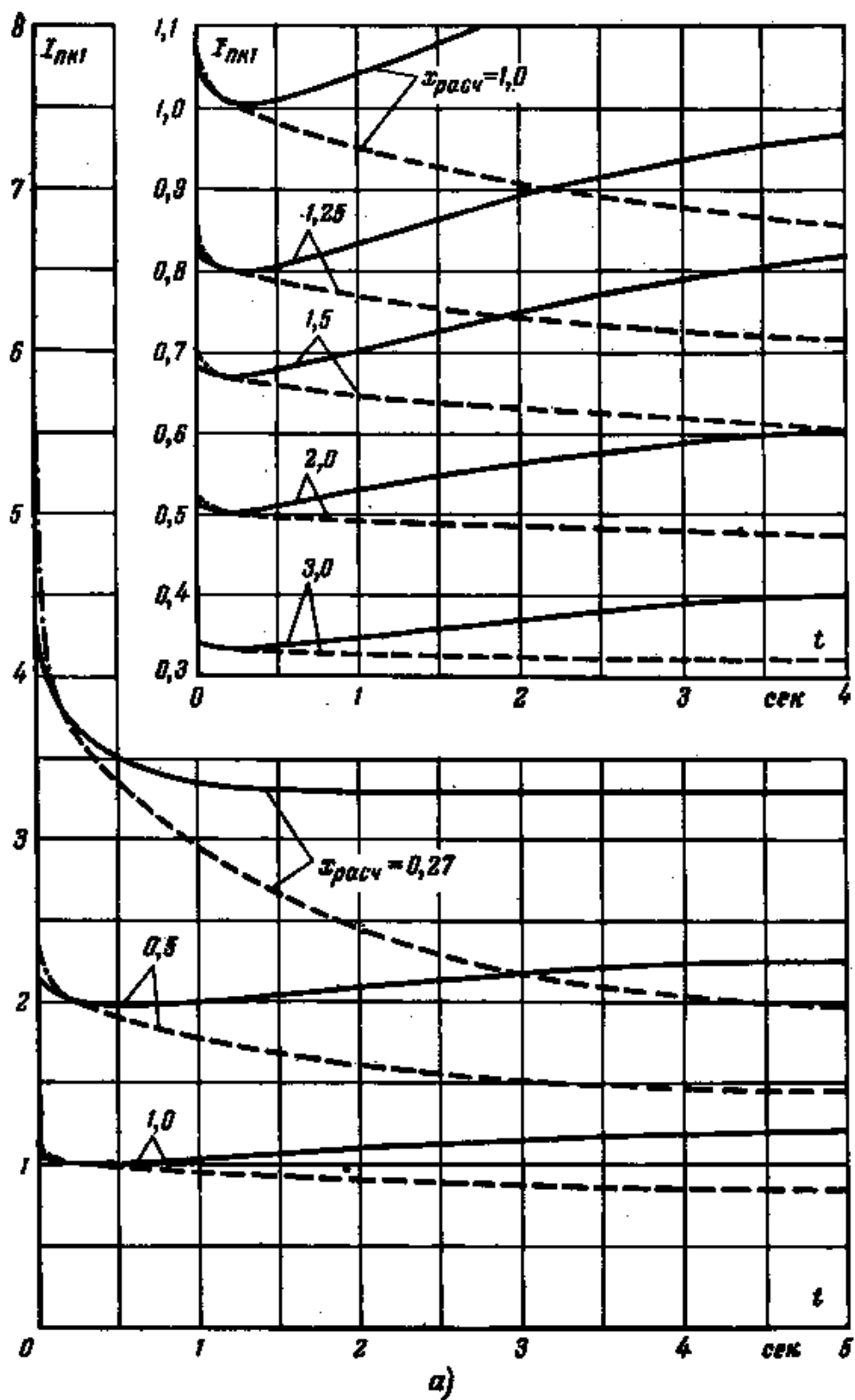


Рис. П5.2,а. Расчетные кривые для гидрогенератора средней мощности (сплошные линии – при наличии АРВ, пунктирные – при отсутствии АРВ)

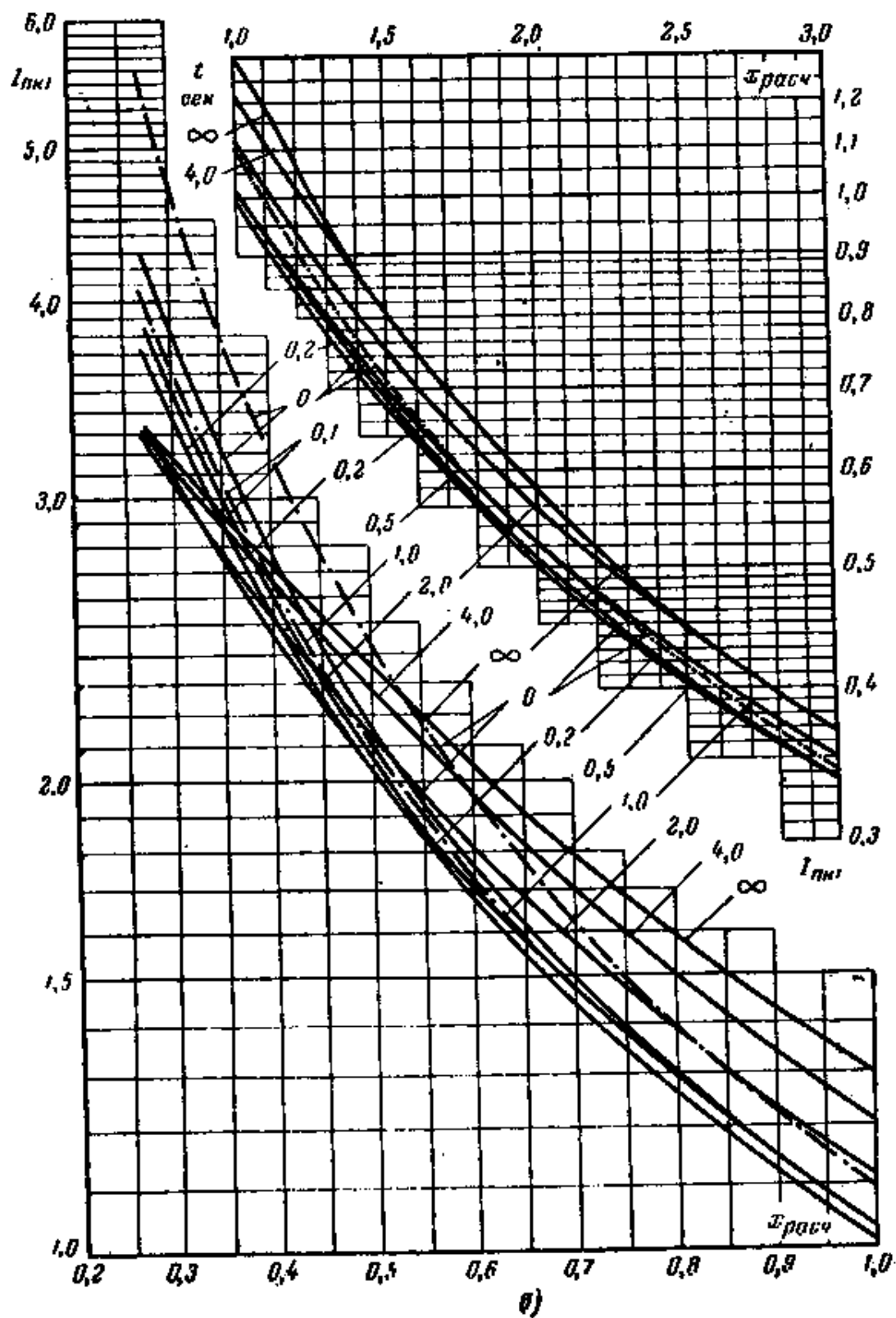


Рис. П5.2,б. Расчетные кривые для гидрогенератора средней мощности
(сплошные линии – при наличии АРВ, пунктирные – при отсутствии АРВ)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электроэнергетические системы и сети [Текст] : учебное пособие / Н. В. Хорошилов [и др.] ; Минобрнауки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ). - Курск : ЮЗГУ, 2014. - 147 с.
2. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования [Текст] : учебное пособие / под ред. И. П. Крючкова, В. А. Старшинова. - М. : Академия, 2005. - 416 с.
3. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах [Текст] : учебник для вузов / В. А. Веников. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 1985. - 535 с.
4. Рожкова Л. Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций [Текст] : учебник для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. - М. : Академия, 2004. - 448 с.
5. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем [Текст] / П. С. Жданов ; под ред. Л. А. Жукова. - М. : Энергия, 1979. - 455 с.
6. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования [Текст] : учебное пособие для студ. вуз. / Под ред. О. Д. Гольдберга. - М. : Высшая школа, 2001. - 512 с.