

ПРОГРАММА КУРСА  
“ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ”  
Для студентов филиала ЮУрГУ в г. Миассе

«Электромагнитные переходные процессы»

1. Общие сведения.

Основные определения. Причины возникновения переходных процессов и их следствия. Система относительных единиц. Составление схемы замещения. Преобразование схем замещения.

2. Переходные процессы в простейших трехфазных цепях.

Постановка задачи и ограничения. Трехфазное короткое замыкание в неразветвленной цепи. Принужденная и свободная составляющие в токе КЗ. Действующие значения полных величин и их составляющих.

3. Установившиеся режимы короткого замыкания.

Основные характеристики и параметры синхронной машины. Приведение цепи ротора к статору. Влияние и учет нагрузки. Расчет токов КЗ при отсутствии автоматического регулирования возбуждения. Влияние автоматического регулирования возбуждения.

4. Начальный момент нарушения режима.

Переходные и сверхпереходные ЭДС и реактивности синхронной машины. Сравнение реактивностей. Характеристики двигателей и нагрузки. Практический расчет начального сверхпереходного и ударного токов КЗ.

5. Уравнения переходного процесса в синхронной машине.

Основные допущения. Исходные уравнения. Изменения индуктивностей синхронной машины. Линейные преобразования трехфазной системы. Система *d,q,0*. Уравнения Парка-Горева и выражение их в операторной форме. Операторные реактивности синхронной машины.

6. Форсировка возбуждения синхронной машины.

Изменение ЭДС холостого хода и переходной ЭДС при внезапном КЗ генератора

7. Внезапное короткое замыкание синхронной машины

Внезапное КЗ синхронной машины без демпферных обмоток. Влияние и приближенный учет демпферных обмоток. Влияние АРВ при внезапном КЗ.

9. Практические методы расчета переходного процесса короткого замыкания. Общие замечания. Приближенный учет системы. Расчет для выбора выключателей по отключающей способности. Метод типовых кривых.

10. Несимметричные короткие замыкания.

Применяемость метода симметричных составляющих к исследованию переходных процессов. Параметры элементов системы для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Схемы отдельных последовательностей. Двухфазное КЗ. Однофазное КЗ. Двухфазное КЗ на землю. Правило эквивалентности прямой последовательности. Комплексные схемы замещения. Сравнение видов КЗ. Применение практических методов к расчету переходного процесса при однократной поперечной несимметрии. Продольная несимметрия. Сложные виды несимметрии.

11. Замыкания в распределительных сетях и системах электроснабжения. Общие замечания. Простое замыкание на землю. Учет изменения параметров проводников сети. Учет местных источников и нагрузок. Расчет токов КЗ в установках напряжением до 1000 В.

«Электромеханические переходные процессы»

1. Общие сведения об устойчивости электрических систем.

Сущность проблемы устойчивости. Статическая устойчивость. Задача статической устойчивости. Критерий статической устойчивости. Простейшая оценка динамической устойчивости. Задача динамической устойчивости.

2. Основные характеристики системы.

Характеристика мощности простейшей электрической системы. Эквивалентные постоянные системы (постоянные эквивалентного четырехполюсника). Круговые диаграммы мощностей. Характеристики мощности начала и конца передачи. Влияние параметров схемы на характеристики мощности. Векторные диаграммы, статические и динамические характеристики мощности при наличии у генераторов АРВ пропорционального и сильного действия.

3. Уравнение движения ротора и его запись в системе относительных единиц.

Время, скорость, мощность и вращающий момент, ускорение в системе относительных единиц. Уравнение движения ротора при отсутствии и наличии демпферного момента.

4. Статическая устойчивость нерегулируемой электрической системы.

Замена исходных уравнений линеаризованными. Анализ устойчивости нерегулируемой системы без учета электромагнитных процессов в контурах ротора без учета и с учетом демпферного момента. Условия устойчивости электрических систем. Правило Ляпунова. Алгебраический критерий Гурвица. Частотный критерий Михайлова. Метод *D* – разбиений.

5. Динамическая устойчивость.

Основные допущения, принимаемые при анализе динамической устойчивости. Энергетические соотношения, характеризующие движение ротора. Способ площадей и вытекающий из него критерий динамической устойчивости. Определение предельного угла отключения при коротком замыкании. Способ площадей при анализе действия АРВ. Метод последовательных интервалов. Правила площадей и метод последовательных интервалов в случае двух станций соизмеримой мощности.

6. Устойчивость нагрузки.

Устойчивость асинхронного двигателя. Статические характеристики нагрузки. Вторичные признаки устойчивости.

7. Действительный предел передаваемой мощности.

Влияние мощности приемной системы на амплитуду характеристики мощности.

Определение действительного предела передаваемой мощности.

Рекомендуемая литература

1. Столбов Ю.А. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения: Учебное пособие с примерами и иллюстрациями. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2000. – 251 с.
2. Переходные процессы в системах электроснабжения / В.Н. Винославский, Г.Г. Пивняк, Л.И. Несен и др.; Под ред. В.Н. Винославского. – Киев. Высшая шк. Головное издательство, 1989.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970.
3. ГОСТ 27514-87 Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1978.
5. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / Под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979.

Таблица 1

# КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

## ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»

ДЛЯ СТУДЕНТОВ  
ФИЛИАЛА ЮУрГУ В Г. МИАССЕ

### ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

По заданной схеме сети (рис.1-4) провести расчет периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в указанной точке для моментов времени  $t=0$ ,  $t=0,15$  с и  $t=1,5$  с по методу типовых кривых. Определить значение ударного тока.

При расчетах следует принять мощность системы равной бесконечности, а ее сопротивление  $X_c=0,12$  при  $S_G=100$  МВА. Все генераторы снабжены АРВ и работают в номинальном режиме с коэффициентом мощности  $\cos\varphi=0,8$ .

Исходные данные к схемам рис. 1-4 приведены в табл.1.

#### Указания к решению

Метод типовых кривых положен в основу “Руководящих указаний по расчету коротких замыканий”, разработанных Московским энергетическим институтом. Указанный метод, как и все другие практические методы, является приближенным и его рекомендуется применять при выборе электрических аппаратов и проводников.

Элементы схем и их параметры		Номер элемента										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Трансформаторы	$S_{ном}$ , МВА	80	80	25	40	80	80	25	40	40	63	80
	$P_{кз}$ , кВт	310	310	120	175	390	390	120	175	175	180	310
	$U_{кз}$ , %	10,5	10,5	10,5	10,5	В-С, 10,5	В-Н, 17	С-Н, 6	10,5	10,5	10,5	см № 5
Линии	$L$ , км	25	20	15	1	30	25	40	20	0,8	1,2	
	$U_{ном}$ , кВ	110	110	110	6	330	330	330	330	35	10	
Генераторы	$P_{ном}$ , МВт	60	60	50	50	50	60					
	$U_{ном}$ , кВ	10	10	6	6	10	10					
	$X''_{d*(ном)}$	0,2	0,2	0,22	0,22	0,2	0,15					
Нагруз-ки	$S_{наз}$ , МВА	10	25	25	15	20						Реактивные сопротивления линий: воздушных – 0,4 Ом/км; кабельных – 0,08 Ом/км
	$U_{ном}$ , кВ	6	10	10	10	10						
	$E''_{*(ном)}$	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85						
	$X''_{*(ном)}$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35						
Двигатели	Тип	АТМ	СДН	А	СТМ							
	$P_{ном}$ , МВт	4	4	1	12							
	$U_{ном}$ , кВ	6	10	10	10							
	$\eta$ , %	96	96	94	95							
	$\cos\varphi_{ном}$	0,91	0,9	0,88	0,9							
	$X''_{d*(ном)}$	-	0,22	-	0,2							
	$I_{пуск}$	6,3	-	6,2	-							

Окончание табл. 1

Элементы схем и их параметры		Номер элемента	
		1	2
Реакторы	$U_{ном}$ , кВ	6	10
	$I_{ном}$ , кА	6	4
	$X_L$ , %	6	8

Определение действующего значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени

Таблица 2

1. Схема анализируется с целью ее упрощения. На этом этапе из нее исключаются те элементы, по которым токи при КЗ не протекают или протекают заведомо малые токи. К элементам, по которым токи не протекают, можно отнести, например, элементы схемы, включенные между точками одинакового потенциала. К элементам, по которым протекают малые токи – те элементы схемы, по которым в точку КЗ протекают токи от асинхронных двигателей малой (до 5 МВт) мощности, удаленных от точки КЗ на две и более трансформации (реактивное сопротивление может быть приравнено к трансформации).

2. Принимаются базисные величины на основной ступени, в качестве которой, как правило, выбирают ступень КЗ. Затем, если это необходимо, через них определяют базисные величины на всех других ступенях.

3. Составляется схема замещения для начального момента КЗ, в которую все источники вводятся своими сверхпереходными ЭДС  $E''$  и реактивностями  $X_d''$ . Высоковольтные асинхронные двигатели вводятся в схему замещения отдельно, если они связаны с точкой КЗ непосредственно или через линейные реакторы, кабели, токопроводы, одну ступень трансформации. В противном случае они, и прочие электроприемники учитываются в виде обобщенной нагрузки.

При наличии исходной информации величина сверхпереходной ЭДС в начальный момент КЗ может быть определена для синхронных генераторов и электродвигателей, работающих с перевозбуждением по известной формуле

$$E_{|0|}'' = E_0'' = \sqrt{(U_0 + I_0 X_d'' \sin \varphi_0)^2 + (I_0 X_d'' \cos \varphi_0)^2}$$

а для синхронных двигателей, работающих с недозвозбуждением и асинхронных двигателей,

$$E_{|0|}'' = E_0'' = \sqrt{(U_0 - I_0 X_d'' \sin \varphi_0)^2 + (I_0 X_d'' \cos \varphi_0)^2}$$

При определении ЭДС асинхронного двигателя величину сверхпереходной реактивности следует определить как величину, обратную относительному значению пускового тока.

При отсутствии исходной информации для определения ЭДС, их значения могут быть приняты по табл.2.

Все параметры схемы замещения выражаются в относительных единицах, приведенных к базисным условиям. Найденные величины указываются в схеме замещения. Сопротивления и ЭДС на схеме замещения обозначаются в виде дроби, в числителе которой указывается порядковый номер, а в знаменателе – численное значение.

Тип машины	$E_{*}''(ном)$	$X_{*}''(ном)$
Турбогенератор мощностью до 100 МВт	1,08	0,125
Турбогенератор мощностью свыше 100 МВт	1,13	0,2
Гидрогенератор с успокоительной обмоткой	1,13	0,2
Гидрогенератор без успокоительной обмотки	1,18	0,27
Синхронный компенсатор	1,2	0,2
Синхронный двигатель	1,1	0,2
Асинхронный двигатель	0,9	0,2
Обобщенная нагрузка	0,85	0,35

4. Производится преобразование схемы замещения.

4.1. Некоторые источники можно объединить в отдельные группы, например, электрически равноудаленные от точки КЗ однотипные и равной мощности синхронные генераторы, компенсаторы, синхронные или асинхронные двигатели. В дальнейшем эти группы следует рассматривать как отдельные источники.

4.2. Схема замещения преобразуется в многолучевую звезду, в центре которой расположена точка КЗ, а по концам ветвей источники с ЭДС  $E_{i|0|}''$ . Здесь  $i$  – номер ветви звезды, соответствующий номеру источника.

Для преобразования схемы замещения и приведения ее к простейшему виду используются расчетные выражения, известных из теории линейных электрических цепей. К ним относятся: последовательное и параллельное сложение сопротивлений; преобразование звезды в треугольник и обратно, многолучевой звезды в многоугольник с диагоналями; замена нескольких генерирующих ветвей с разными ЭДС, присоединенными к общему узлу, одной эквивалентной; совмещение точек с одинаковым потенциалом; разрезание схемы в узлах, к которым подключены источники бесконечной мощности; преобразование схемы с использованием коэффициентов токораспределения.

Обязательным при преобразовании схемы замещения является приведение всех промежуточных схем, которые должны быть оформлены как и исходная. В этих схемах элементы, перешедшие из предыдущей без изменения, обозначаются теми же порядковыми номерами, а всем другим присваиваются новые номера в порядке возрастания.

5. По закону Ома определяются действующие значения периодической составляющей токов КЗ ветвей для начального момента времени

$$I_{m|0|} = \frac{E_{i|0|}''}{X_{i*}''}, \text{ где } X_{i*}'' - \text{сопротивление } i\text{-го луча схемы.}$$

При определении тока от АД в начальный момент КЗ можно пренебречь внешними сопротивлениями, если они не превышают 20% сверхпереходного

сопротивления электродвигателей. При сравнении их необходимо приводить к одним условиям. Тогда начальная величина действующего значения периодической составляющей тока от АД, приведенная, например, к номинальным условиям,  $I_{п\Delta\lambda|0} = K_{\Delta} I_{пуск} I_{ном.АД}$ , где коэффициент  $K_{\Delta} = 1,2$  для двигателей типа ВДД и ДВДА и  $K_{\Delta} = 1$  для двигателей других серий.

6. Проводится оценка удаленности генераторов от точки КЗ. Критерием удаленности при этом служит значение относительного тока источника в момент КЗ  $\beta = I_{пг|0}^{*ном} = I_{пг|0}^{*б} * I_{б} / I_{Гном}$ . Если полученная величина меньше 1,5 точка КЗ считается значительно удаленной от источника. Такие условия, как правило, имеют место при КЗ за двумя трансформаторами связи, за линейными реакторами с небольшим номинальным током, в распределительных сетях 6-10 кВ и т.д. Ветви, для которых выполняется указанное условие, могут быть объединены с системой в один эквивалентный источник бесконечной мощности, действующее значение периодической составляющей тока от этого источника затухать не будет.

7. С учетом пункта 7 поводится «коррекция» многолучевой звезды.

8. Определяется действующее значение периодической составляющей тока, посылаемого в точку КЗ каждой группой источников в заданный момент времени.

8.1. От источника бесконечной мощности.

Известно, что периодическая составляющая тока КЗ от источника бесконечной мощности имеет постоянную амплитуду и для любого момента времени

$$I_{псг} = I_{псг|0} = I_{п0*б} * I_{б}$$

8.2. От синхронных генераторов и компенсаторов.

По соответствующей известной величине относительного тока генератора (компенсатора)  $\beta = I_{пг|0}^{*ном}$  и кривой рис.5 для заданного момента времени  $t$  находится отношение  $\gamma_{гг} = I_{пг} / I_{пг|0}$ . Затем определяется искомый ток

$$I_{пгг} = \gamma_{гг} * I_{пг|0}^{*б} * I_{б}$$

8.3. От синхронных двигателей.

По кривой рис.6 находится соотношение  $\gamma_{сдг}$ , с использованием которого находится искомый ток  $I_{псдг}$ .

9.4. От асинхронных двигателей (АД).

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ от АД

$$I_{п\Delta\lambda} = I_{п\Delta\lambda|0}^{*б} * I_{б} * e^{-\frac{t}{T'_p}}$$

где  $T'_p$  – расчетная постоянная времени затухания периодической составляющей тока АД при КЗ,

$$T'_p = T'_{р\Delta\lambda} \left( 1 + \frac{X_{вн}}{X_{\Delta\lambda}} \right)$$

Здесь  $T'_{р\Delta\lambda}$  – постоянная времени затухания периодической составляющей тока асинхронного двигателя при КЗ на его выводах, определяемая из табл.3;  $X_{вн}$  – внешнее индуктивное сопротивление до точки КЗ.

Таблица 3

Параметр	Двигатель						
	А	АО	ДАЗО	АТД	АТМ	ВДД, ДВДА	ДАМСО
$T'_{р\Delta\lambda}, c$	0,04	0,04	0,09	0,06/ $S_{н\Delta}$	0,075	0,06	0,044
$T_{\Delta\lambda}, c$	0,04	0,04	0,02	0,058	0,043	0,05	0,035
$K_{\gamma}$	1,56	1,49	1,5	-	1,67	1,66	1,55

Отметим, что при  $t \geq 0,2$  с асинхронные двигатели можно не учитывать в токе КЗ, так как постоянные времени затухания как периодической, так и аperiodической составляющих их тока малы.

9. Суммарный ток в месте КЗ определяется как сумма токов всех источников.

#### Расчет ударного тока КЗ

При расчетах токов КЗ принимают, что ударный ток имеет место через 0,01 с после начала КЗ. Ударный ток в месте КЗ определяется путем суммирования ударных токов в ветвях, связанных с точкой КЗ. Для каждой ветви ударный ток определяется по выражению

$$i_{\gamma} = K_{\gamma} \sqrt{2} * I_{пг|0}$$

Значения ударных коэффициентов для ветвей содержащих генераторы и источники бесконечной мощности приведены в табл.4.

Таблица 4

Элемент или часть системы электроснабжения и их краткая характеристика	$K_{\gamma}$
Турбогенератор: мощностью до 60 МВт мощностью от 100 до 1000 МВт	1,94 – 1,995 1,975 – 1,98
Блок турбогенератор мощностью до 60 МВт – трансформатор при номинальном напряжении генератора: 6,3 кВ 10,5 кВ	1,95 1,935
Блок турбогенератор 100 – 200 МВт – трансформатор	1,965
Блок турбогенератор 300 – 800 МВт – трансформатор	1,967 – 1,983
Система, с которой подстанция связана воздушной линией напряжением 35 – 220 кВ	1,6 – 1,717
Система, связанная со сборными шинами 6 – 10 кВ через трансформатор мощностью: 32 – 80 МВА более 80 МВА	1,82 – 1,9 1,85 – 1,935
Присоединения, подключенные через реакторы с номинальным током: 630 А и менее 1000 А и более	1,904 1,956
Распределительные сети напряжением 6 – 10 кВ	1,37

Для ветвей, содержащих синхронные двигатели ударный коэффициент определяется по выражению

$$K_{\text{УСД}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$$

где постоянная времени

$$T_a = \frac{X_d'' + X_m}{\omega \left( X_d'' \omega T_{dH} + R_m \right)}$$

Здесь  $T_{dH}$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока двигателя при КЗ на его выводах, определяемая по кривым рис.7 или из табл. 3.

Для ветвей, содержащих асинхронные двигатели

$$K_{\gamma} = e^{-\frac{0,01}{T_p}} + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$$

Значение постоянной времени  $T_a$  может быть определено из табл.3.

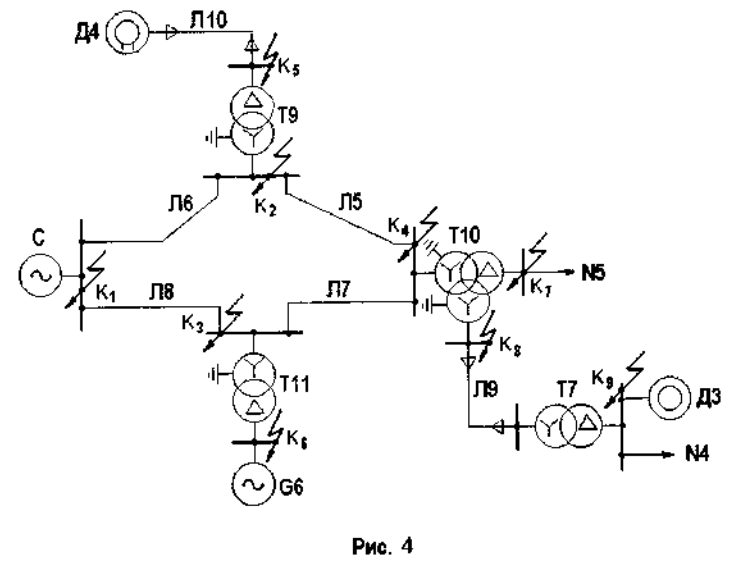
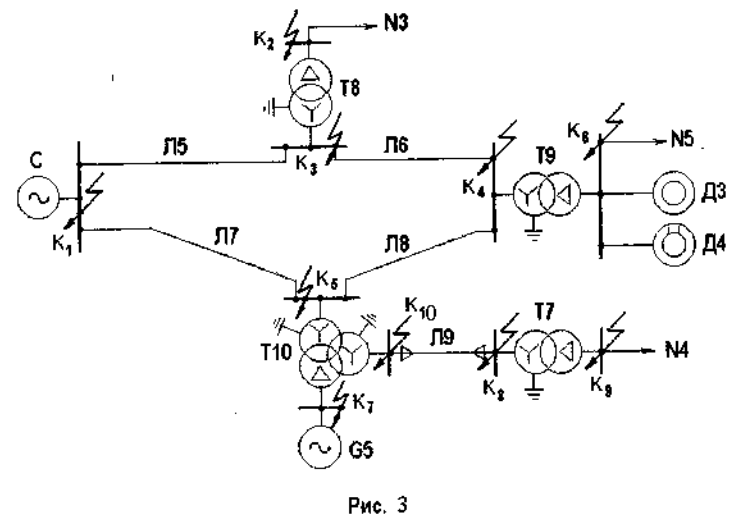
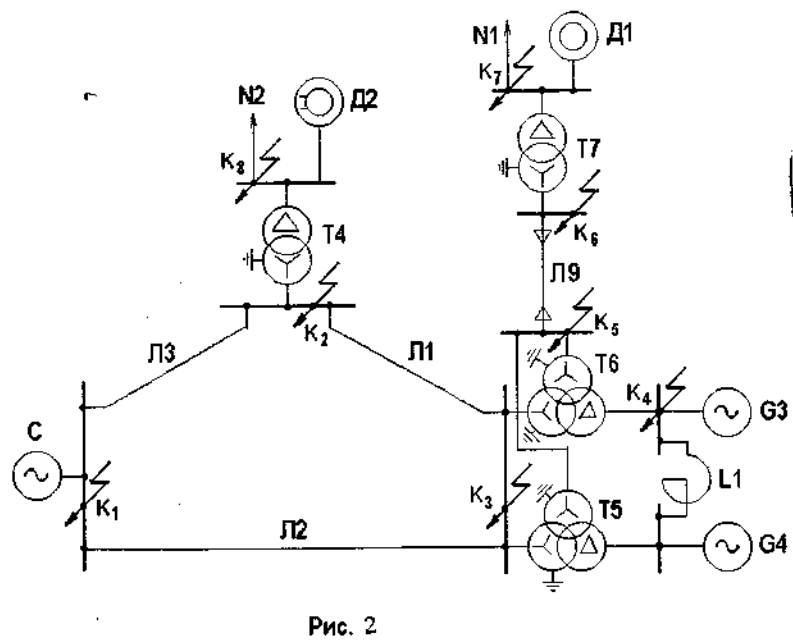
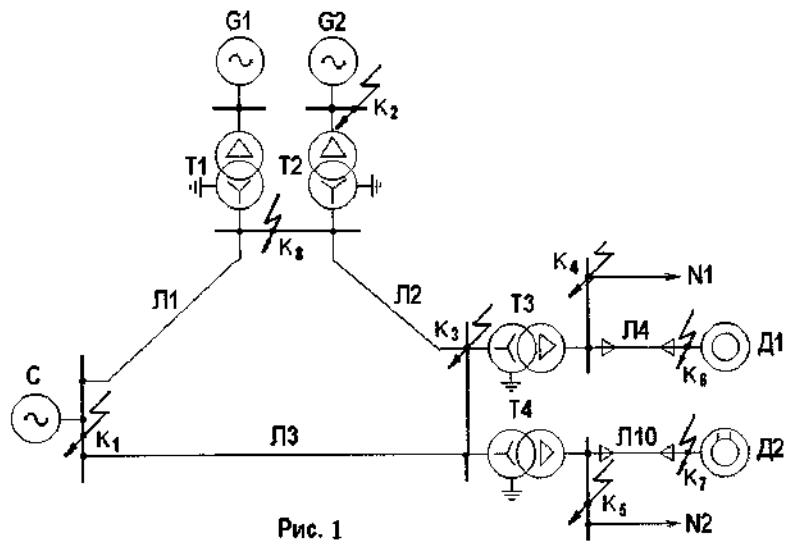
### НЕСИММЕТРИЧНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

Определить ток несимметричного КЗ для начального момента времени. Принять: для генераторов, электродвигателей, обобщенной нагрузки  $X_2 = X_d''$ ; для системы  $X_1 = X_2$ ,  $X_0 = 0,2$  для линий  $X_0 = (2,5-4,5)X_1$ ; для трансформаторов  $X_{\mu 0} = 80\%$ . Вид несимметричного КЗ задан в табл.5, где: О – однофазное КЗ, Д – двухфазное КЗ, ДЗ – двухфазное КЗ на землю.

Таблица 5

№ рисунка	Номер точки КЗ									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	О	Д	О	Д	Д	Д	Д	ДЗ	-	-
2	ДЗ	О	ДЗ	Д	О	ДЗ	Д	Д	-	-
3	ДЗ	Д	О	О	ДЗ	Д	Д	Д	О	Д
4	О	О	ДЗ	ДЗ	Д	Д	Д	О	Д	-

Решение целесообразно начинать с составления схем замещения для токов отдельных последовательностей. Определение тока прямой последовательности особой фазы следует проводить по правилу эквивалентности прямой последовательности. Суммарный ток КЗ определить по выражениям, приведенным в учебнике.



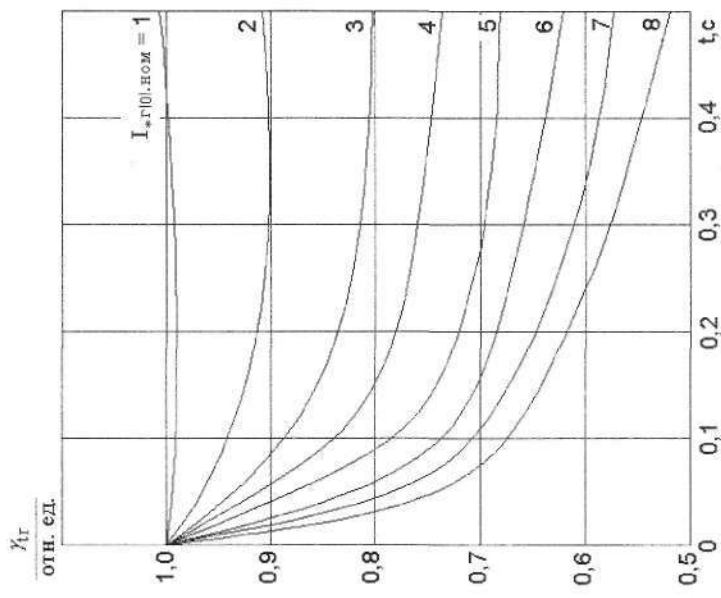
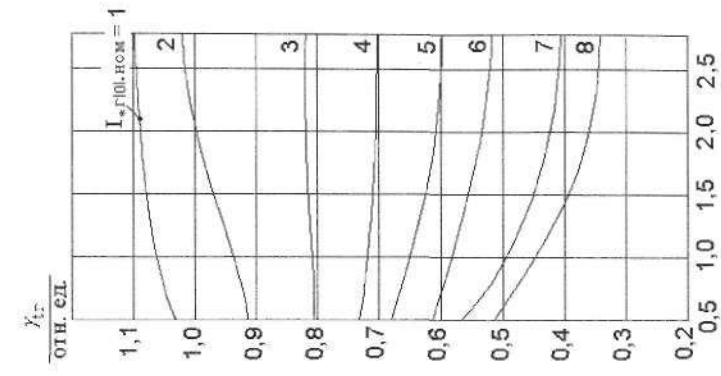


Рис. 5

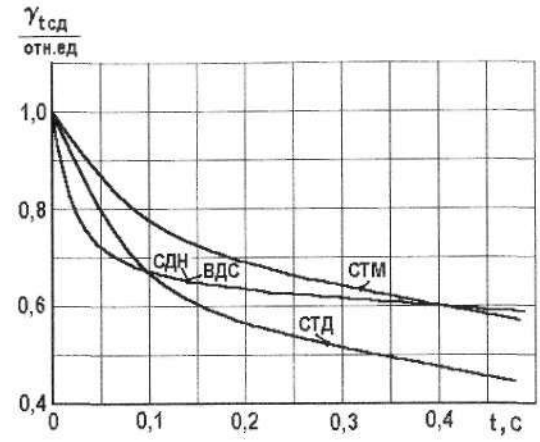


Рис. 6

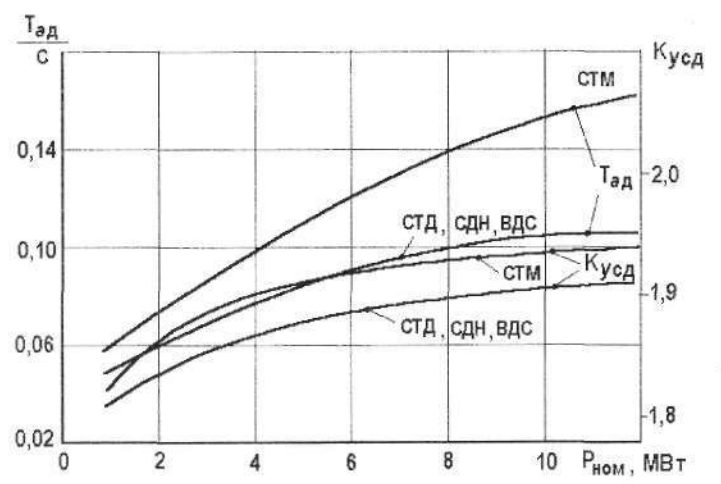


Рис. 7