

Федеральное агентство по образованию
Нижекамский химико-технологический институт (филиал)
Государственное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
«Казанский государственный технологический университет»

Составители:
Профессор Амирова С. С.,
ст. пр. Чекунов Н. И.

Рецензент:
д. т. н. профессор Кузнецов А. В.

Переходные процессы в электроэнергетических системах

(Методические указания для заочников
по специальности 140211 «Электроснабжение»)

В данном учебно-методическом изложении теоретические основы переходных процессов в электроэнергетических системах, задачи к практическим занятиям, задания к выполнению контрольных работ и курсовым работам.

1 Теоретические основы

Основным объектом, изучаемым в дисциплине «Переходные процессы в электрических системах», является электрическая система.

Под электрической системой (ЭС) понимается совокупность электрических станций, электрических сетей и узлов потребления, объединенных единым процессом производства передачи и распределения электрической энергии.

В любой ЭС могут быть выделены:

- силовые элементы (синхронные генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, выпрямители и инверторы, электрические двигатели и т.д.);
- элементы управления (коммутирующая аппаратура, силовые выключатели, устройства автоматики: автоматические регуляторы возбуждения, автоматические регуляторы скорости и т.п.);
- элементы защиты: разрядники, реакторы, предохранители.

Поведение электрической системы определяется ее **режимом** - состоянием, характеризуемым значениями мощностей, напряжений, частоты и других физических величин - **параметров режима**.

Режимы ЭС можно разделить **неустановившиеся**, имеющие практически неизменные параметры, и **переходные** - с быстрыми изменениями параметров режима. Переходные режимы связаны с **возникновением переходных процессов**, при которых происходит изменение электрического состояния элементов системы, обусловленное как естественными причинами, так и работой устройств автоматики.

В переходных процессах происходит закономерное изменение во времени одного или нескольких параметров режима в результате действия определенных причин, называемых **возмущающими воздействиями**

Переходные процессы делятся на **волновые, электромагнитные и электромеханические**.

В **волновых переходных процессах** происходит локальное изменение электрического состояния системы, сопровождаемое резким увеличением электрического разряда в линиях электропередачи с повышением напряжения, связанного с атмосферными воздействиями. Они являются быстродействующими процессами: скорость изменения параметров - 10^{-10} Гц. Опасность волновых переходных процессов заключается в появлении перенапряжений, приводящих к повреждению изоляции элементов ЭС и т.д.

Следует отметить, что при волновых переходных процессах не происходит изменения относительного положения роторов электрических машин и скорости их вращения.

Электромеханические переходные процессы являются низкочастотными. Скорость их протекания изменяется от 10 до 50 Гц. Происходит изменение как электрических, так и механических параметров режима.

Электромагнитные переходные процессы возникают:

- при включении и отключении двигательных и других агрегатов;
- в результате коротких замыканий (к.з.) и простых замыканий;
- при местной несимметрии;
- при работе форсировки возбуждения, регуляторов возбуждения, автоматов гашения поля и т.п.;
- несинхронного включения синхронных машин (СМ).

Электромагнитные переходные процессы сопровождаются изменением электромагнитного состояния элементов ЭС. Механические параметры режима остаются неизменными. Скорость протекания от 50 до 150 Гц.

Из всего многообразия электромагнитных переходных процессов наиболее распространенными являются процессы, вызванные к.з.

Большая часть к з - дуговые, как правило, самоликвидирующиеся, реже - металлические, при которых фазы электроустановки соединяются между собой или с землей. Последствия к.з проявляются:

- в резком увеличении токов в ветвях системы, особенно в месте к.з.; в некоторых ветвях увеличение тока может быть небольшим,

- в значительном снижении напряжения в узлах ЭС; при трехфазном к.з. (K^3) напряжение в точке к.з. снижается до нуля; при несимметричных к.з. (двухфазное – K^2 однофазное – K^1 , двухфазное на землю – $K^{1,1}$) напряжение в точке к.з. частично сохраняется;

- в искажении симметрии напряжений и токов при несимметричных к.з. в результате которого увеличивается электромагнитное и электростатическое влияние линий электропередачи (ЛЭП) на линии связи и другие объекты,

- в тепловом действии токов к.з., приводящем к повреждению изоляции, спеканию контактов электроаппаратуры и т.д.;

- в динамическом действии токов к.з., в появлении механических усилий, повреждающих конструкции машин и аппаратов.

Необходимо отметить, что потребители (нагрузка) в ЭС очень чувствительны к снижению напряжения. Так, например, асинхронные двигатели (АД), составляющие до 50% нагрузки, при снижении напряжения затормаживаются, что приводит к увеличению тока нагрузки и дальнейшему снижению напряжения на ее зажимах. Появляется опасность нарушения устойчивости параллельной работы электрических машин (ЭМ) в системе, которая в этом случае распадается на части, работающие несинхронно. В результате происходит длительное нарушение электропитания потребителей, приводящее к огромному материальному ущербу.

Подавляющее число к.з. (85%), происходящих в ЭС, связано с замыканием на землю. Трехфазное к.з. является очень редким (5%), но изучение процессов, происходящих при этом виде к.з., имеет первостепенное значение, поскольку последствия трехфазных к.з. являются самыми тяжелыми для ЭС.

Кроме того, применение метода симметричных составляющих позволяет определить величины токов и напряжений прямой последовательности любого несимметричного к.з.

$K^1 K^2 K^3$ как соответствующие величины: при некоторых условиях трехфазных замыканий.

Существующие методы расчета и анализа электромагнитных переходных процессов при трехфазных к.з. можно разбить на две группы: аналитические и практические.

В основу аналитического метода расчета положен анализ электромагнитных процессов по уравнениям Парка-Горева. Он позволяет с высокой точностью определить величину тока при внезапном к.з. в начальный момент времени для простейшей системы, состоящей из одного синхронного генератора (СГ).

При переходе к схемам с несколькими генераторами задача точного расчета переходного процесса усложняется. Появляется необходимость учета возникающих качаний генераторов и поведения присоединенных нагрузок; изменения свободных токов в каждом из генераторов, связанных между собой. При наличии автоматического регулирования возбуждения (АРВ) аналогичная связь имеется между приращениями вынужденных токов. Поэтому практическое применение аналитического метода весьма ограничено. Его можно рассматривать лишь как эталон для оценки других приближенных методов расчета. При решении многих практических задач не требуется знания точных результатов, поэтому возможно использование приближенных инженерных методов.

Все расчеты переходных процессов при к.з. базируются на решении дифференциальных уравнений, описывающих поведение системы при временных изменениях параметров режима.

Практический подход, применяемый для решения всех инженерных задач и использующий мгновенные значения параметров режима, позволяет перейти от дифференциальных уравнений к алгебраическим и тригонометрическим.

При нахождении значений токов к.з. в электрических системах необходимо выделять две различные ситуации:

- к.з. происходит в ЭС, имеющей мощные источники с режимом работы не зависящим от режима работы электрической системы (исключение составляет режим к.з. вблизи источников);

- к.з. рассматривается в электрической системе, режим которой существенно влияет на режимы работы источников.

В первом случае источники имеют значительно большую мощность, нежели узлы потребления ими питаемые, или источники питания удалены от ЭС, в которой возникают различные виды к.з. (системы электроснабжения, распределительные сети и т.д.).

Во втором - источники и подключаемая к ним система имеют соизмеримые мощности или к.з. происходит в системообразующих сетях (вблизи шин электрических станций).

Несмотря на различие ситуаций подходы к расчету токов к.з. в обоих случаях имеют много общего, основываются на одних и тех же понятиях допущениях.

Гораздо более различны методы расчета симметричных $K^{(3)}$ и несимметричных ($K^{(n)}$, $n=1; 1,1; 2$) к.з. Последнее обстоятельство является определяющим при формировании структуры и методики изучения расчета и анализа электромагнитных переходных процессов в ЭС

На первом этапе выделяются основные, общие подходы, применяемые при расчетах всех видов к.з.

На втором - детально рассматриваются практические методы расчета симметричных трехфазных к.з.

И только затем - особенности расчета несимметричных кз.

Порядок расчета тока к.з. в аварийной ветви

Для сложных ЭС расчет тока трехфазного к.з. в аварийной ветви выполняется следующим образом:

- формулируются основные расчетные допущения, дающие возможность пользоваться упрощенными представлениями о переходных процессах,
- в соответствии с целевым назначением расчета определяются расчетные условия,
- в зависимости от принятых допущений составляется схема замещения ЭС и определяются параметры ее элементов,
- при необходимости исключаются «трансформаторные» связи между отдельными элементами, в частности, выполняется

приведение параметров схемы замещения к одной ступени напряжения;

- схема замещения последовательными преобразованиями приводится к простейшему виду - неразветвленной цепи;

- определяется периодическая составляющая тока к.з., значение эквивалентной постоянной времени апериодической составляющей тока к.з., предполагается, что начальное значение апериодической составляющей в одной из фаз аварийной ветви максимально;

- рассчитывается ударный ток к.з. в выделенной фазе аварийной ветви;

- при необходимости находится распределение тока к.з. в схеме замещения ЭС.

2 Задачи к практическим занятиям

Задача 1.

Для электрической сети (рис. 1) составить схему замещения трехфазного КЗ в точке K и определить результирующее сопротивление короткозамкнутой цепи точным и приближенным методами, пользуясь именованными и относительными единицами.

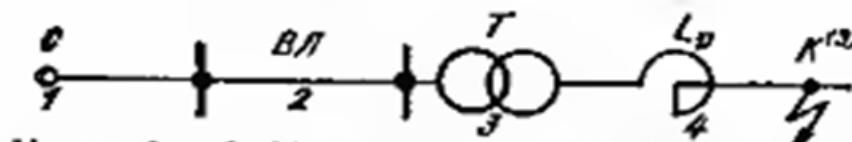


Рис 1

Таблица 1

№ варианта	U_c const	x_c	l км	x_0 Ом/км	$S_{тр.ном}$ МВ А	U_B/U_H кВ	u_k %	U_p ном кВ	I_p ном А	x_p Ом
1	166	0	120	0.4	63	160/6.6	12	10	4000	0.105
2	168	0	125	0.4	65	160/6.6	10	10	4150	0.105
3	155	0	110	0.4	75	160/6.6	11	10	3900	0.105
4	190	0	115	0.4	80	160/6.6	13	10	4100	0.105
5	180	0	100	0.4	100	160/6.6	14	10	4200	0.105
6	176	0	105	0.4	85	160/6.6	12	10	4350	0.105
7	161	0	130	0.4	90	160/6.6	10	10	4400	0.105
8	163	0	133	0.4	95	160/6.6	14	10	4330	0.105
9	171	0	137	0.4	70	160/6.6	13	10	4100	0.105
10	177	0	127	0.4	60	160/6.6	12	10	4000	0.105

Задача 2

Для СЭС, схема которой показана на рис 2, известны токи и напряжения предшествующего режима; заданные токи — индуктивные. Расчетные параметры элементов СЭС указаны на рисунке. Определить начальную периодическую составляющую аварийного тока в месте замыкания и цепях автотрансформатора Т2, а так же линейные напряжения в точках М и N при КЗ в точке К.

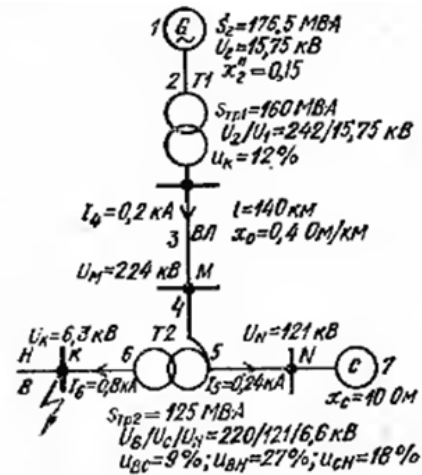


Рис 2

Задача 3

При трехфазном КЗ в точке K_2 СЭС, схемой которой изображена на рисунке 3, определить периодическую составляющую тока, мощность и ударный ток в месте повреждения при раздельной и параллельной работе трансформаторов.

$S_6 = 100 \text{ МВ А}$ $U_6 = 6.3 \text{ кВ.}$, $u_k = 10.5\%$.

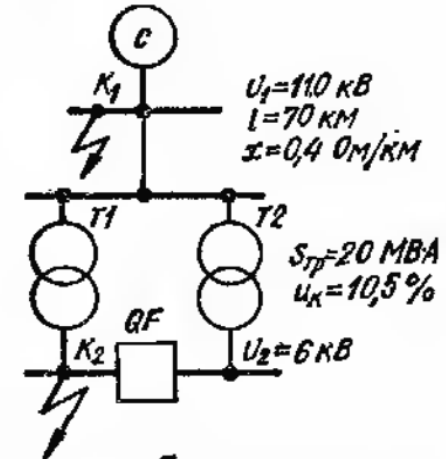


Рис 3

Таблица 2

№ варианта	U_1 кВ	L км.	$S_{тр}$ МВ А	U_2 кВ
1	110	70	20	6
2	220	100	40	35
3	110	60	63	6
4	220	90	40	110
5	35	18	20	6
6	35	15	25	6
7	220	80	75	110
8	110	55	63	35
9	220	85	55	35
10	35	5	30	6

Задача 4

Для схемы электрической системы (рис. 4) составить схему замещения и рассчитать ее параметры с «точным» приведением их значений к одной ступени напряжения. При расчете учитывается наличие в нагрузочном узле асинхронной двигательной нагрузки.

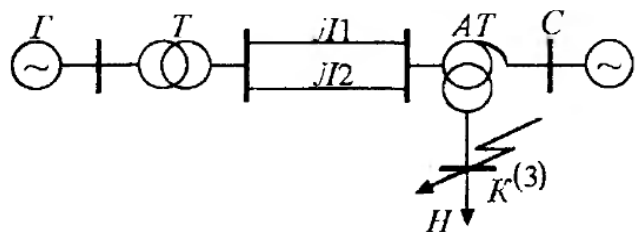


Рис 4 Принципиальная схема ЭС.

Таблица 3

		Варианты									
Генератор	S_H МВ А	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	U_H кВ	75	80	90	95	70	65	85	75	80	65
	I_H кА	4.125	4.4	4.2	4.3	5.5	4.01	4.35	4.2	4.3	4
	x''_d Ом	0.215	0.24	0.3	0.5	0.4	0.155	0.34	0.51	0.35	0.26
	cos	0.8	0.8	0.8	0.85	0.85	0.85	0.85	0.8	0.8	0.8
С	U_C кВ	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
Тр-р	S_H МВ А	80	90	105	105	77	71	92	82	90	70
	u_k	10.5									
	U_{BH}/U_{HH} кВ	121/10.5									
Автотр-р	S_H МВ А	200	230	221.5	150	190	210	220	215	230	190
	U_{KBH} %	34									
	$U_{KBС}$ %	10									
	U_{KBH} %	22.5									
	$U_H/U_{CH}/U_{HH}$	230/121/11									

Л Э П	L км	120	115	80	90	70	55	180	110	95	85	
	x'_o Ом/км	0,4										
Нагр.	x''_H	0.35	0.5	0.45	0.33	0.35	0.37	0.44	0.57	0.77	0.5	
	S_H МВ А	60	65	70	75	55	50	63	55	60	50	
	E''_H	0.85										
	U_H кВ	11										

Задания вариантов контрольных работ

В электрической системе (рисунок 5) в точке К (дается одна из точек КЗ согласно варианту) произошло трехфазное короткое замыкание. Система-С характеризуется как источник неизменного напряжения. На шинах системы значение напряжения принять равным среднему поминальному. Исходные данные для расчета схемы приведены в таблицах 1-5.

Требуется определить:

1. Периодическую составляющую тока КЗ в начальный момент короткого замыкания $I_{по}$.
2. Ударный ток короткого замыкания $I_{уд}$.
3. Аперiodическую составляющую тока КЗ в момент t расхождения контактов выключателя $I_{ат}$ (принять $t = 0.08$ с).

Расчет провести в системе относительных единиц при точном приведении. Рекомендации для определения активных сопротивлений элементов сети:

1. Для определения активных сопротивлений трансформаторов и автотрансформаторов использовать зависимости $X_i/R_t = f(S_H, U_H)$. Для трансформаторов, мощностью 25 МВ*А и менее принять $X_i/R_t = 10$.
2. Для обобщенной нагрузки принять $X_H/R_H = 4-5$.
3. Для генераторов, синхронных компенсаторов и двигателей принять режим работы до короткого замыкания с номинальным коэффициентом мощности и с номинальным напряжением при заданной нагрузке.

Результаты расчета оформить в виде таблицы. Начертить осциллограмму полного тока КЗ.

Таблица 1 Исходные данные для генераторов Г1, Г2, Г3 и комплексной нагрузки МП и ИГ2

№ вар	Генераторы							Нагрузка НГ	
	$P_{ном}$ МВт	cos	$x''d$	X_2	$R \cdot 10^{-3}$	U_H кВ	P_o/P_H	$S_{нг}$ МВ А	$S_{нг2}$ МВ А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100	0.85	0.18	0.22	2.2	10.5	0.8	100	100
2	150	0.85	0.21	0.26	2.0	18	0.85	100	200
3	200	0.85	0.19	0.23	2.0	15.75	1	150	200
4	300	0.85	0.2	0.24	2.6	20	0.7	1300	300
5	500	0.85	0.24	0.29	2.8	20	0.8	300	200
6	800	0.85	0.27	0.33	2.4	25	1	300	300

Таблица 2 Исходные данные для трансформаторов Т1 Т2 Т3 и автотрансформатора АТ

№ вар	Трансформатор Т1 Т2 Т3					Автотрансформатора		
	$S_{нг}$ МВА	K_{T1}	K_{T2}	$U_K \%$		$S_{нг}$ МВА	K_{B-C} кВ	U_{KB-C} %
				T1, T2	T3			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	120	254/10.5	127/10.5	11	10.5	125	230/135.5	11
2	150	248/18	124/18	11	10.5	200	230/135.5	11
3	220	317/15.75	121/15.75	11	11	250	330/128.8	10
4	200	347/20	118/20	11	11	400	330/121.9	10
5	300	525/20	242/20	14	11	500	500/257.6	9.5
6	400	525/24	253/24	14	11	500	500/243.8	9.5

Таблица 3 Исходные данные для линий Л1, Л2.

	Линия Л1			Линия Л2		
	L км	X_0 Ом/км	R_0 Ом/км	L км	X_0 Ом/км	R_0 Ом/км
1	2	3	4	7	8	9
1	125	0.43	0.13	40	0.41	0.17
2	200	0.42	0.11	50	0.41	0.21
3	250	0.33	0.065	60	0.41	0.13
4	400	0.33	0.065	80	0.42	0.13
5	630	0.29	0.026	100	0.43	0.13
6	1000	0.29	0.026	120	0.43	0.13

Таблица 4 Исходные данные для трансформаторов собственных нужд ТСН и асинхронного двигателя

	Асинхронный двигатель АД						Трансформатор ТСН		
	$P_{ном}$ МВт	Cos	U_H кВ	I_H/I_H	P_o/P_H	M_H/M_H	$S_{ТСН}$	K_{B-C}	U_K %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2.5	0.9	6	5.6	0.8	0.9	63	10.5/ (3.3-3.3)	8
2	3.2	0.9	6	6.4	0.9	0.7	10	18/(6.3-6.3)	8
3	5	0.91	6	5.6	1	0.7	16	15.75/ (6.3-6.3)	10
4	8	0.91	6	5.6	0.75	0.7	25	20/(6.3-6.3)	9.5
5	8	0.91	6	5.6	0.8	0.8	32	20/ (6.33-6.3)	11.5
6	8	0.91	6	5.6	0.8	0.8	63	24/(6.3-6.3)	11.5

Таблица 5 Варианты заданий

№ вар.	Задание		№ вар.	Задание	
	Точка КЗ	Включенные выключатели		Точка КЗ	Включенные выключатели
1	К-1	В1, В6, В7	4	К-4	В5, В9, В10
2	К-2	В1, В6, В7	5	К-5	В5, В9, В10
3	К-3	В1, В6, В7, В12	6	К-6	В5, В9, В10, В13

3 Задания к выполнению курсовой работы.

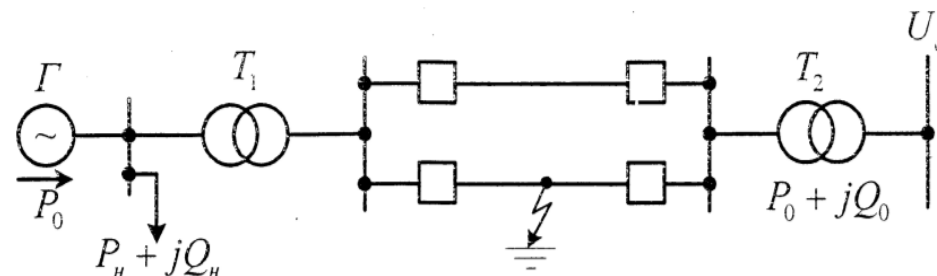


Рис 5

В электропередаче показанной на рисунке на одной из цепей происходит двухфазное короткое замыкание (КЗ) на землю. В исходном режиме в систему передается мощность P_c , МВт, $\cos \phi_c$. Напряжение на шинах системы U_c (кВ), поддерживается неизменным. Нейтрали повышающего и понижающего трансформатора глухо заземлены.

Определить предельное время отключения КЗ, проведя расчет приближенно, без учета активного сопротивления и зарядной мощности линий. Принято, что-переходная ЭДС при нарушении режима остается неизменной.

Параметры элементов системы приведены в таблице.

Примечание. Номер варианта для двух групп одного курса принимать с 1 по 30 для первой группы и с 31 по 60 для второй группы.

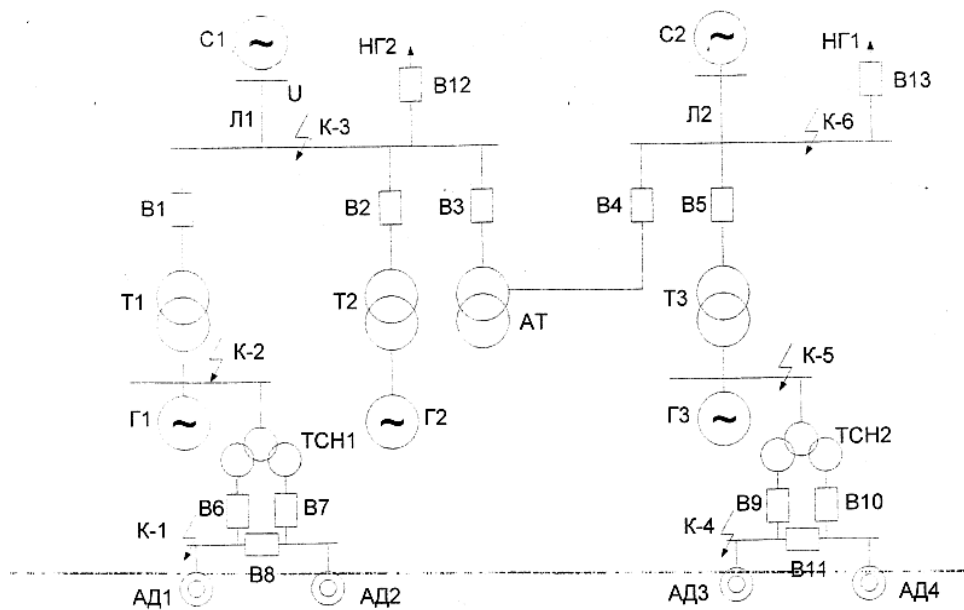


Рис 5

Список литературы

1. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость. – М.: Энергия, 1980.-568 с.
2. Авербух А.М. Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий.-Л.: Энергия, 1979.-184с.
3. Буслова Н.В. и др. Электрические системы и сети.-К.: Высшая шк. Головное изд-во, 1986.-584с.
4. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока.-Л.: Энергия,1980.-256с.
5. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем.-М.: Энергия, 1979.-456с.
6. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.-М.: Энергия, 1970.-520с.
7. Ульянов С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах.-М.: Энергия, 1968.-456с.