

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.И. Готман, Ю.В. Хрущев, О.А. Мастерова

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 621.311
ББК 31 27
Г 73

Готман В.М.

Г 73

Переходные процессы в системах электроснабжения: учебное пособие / В.И. Готман, Ю.В. Хрущев, О.А. Мастерова.– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 49 с.

В пособии изложены наиболее важные положения курса: параметры тока КЗ, влияние двигательной нагрузки на токи КЗ, особенности несимметричных КЗ, влияние параметров схем на статическую устойчивость и пропускную способность электропередач, исследование статической устойчивости двигательной нагрузки. Детальное рассмотрение данных положений осуществляется посредством экспериментальных исследований на ПЭВМ, обработки результатов и их интерпретации.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 140201, 140211, 140610 очной формы обучения, и для студентов Института дистанционного образования.

УДК 621.311
ББК 31 27

Рецензенты

Начальник Диспетчерской службы ЦУС ОАО «ТРК»
М.Ю. Ишков

Доктор технических наук, профессор
Новосибирской государственной академии водного транспорта
В.П. Горелов

© Готман В.И., Хрущев Ю.В., Мастерова О.А., 2008
© Томский политехнический университет, 2008
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Переходные процессы в системах электроснабжения» является одной из профилирующих для электроэнергетических специальностей. Положения этой дисциплины широко используются как на стадии проектирования, так и управления функционированием электроэнергетических систем и систем электроснабжения предприятий.

Лабораторные работы являются логическим дополнением лекционного материала и практических занятий. В них более детально рассматривается ряд узловых положений курса посредством экспериментальных исследований на ПЭВМ, обработки результатов и их интерпретации. Это способствует приобретению навыков инженерного мышления.

Представленные работы затрагивают наиболее важные вопросы дисциплины: основные параметры тока короткого замыкания, влияние двигательной нагрузки на токи КЗ, особенности несимметричных КЗ, влияние параметров схем на статическую устойчивость и пропускную способность электропередач, исследование статической устойчивости двигательной нагрузки и ряд других.

В каждой работе сформулированы основные цели и приведены краткие теоретические сведения, необходимые для понимания сути поставленных задач. Ввод данных и получение результатов составляют около 25 – 30% времени, отведенного на лабораторную работу. Обработка и анализ результатов занимают основную часть времени и предполагают работу с первоисточниками и конспектом лекций. Последовательность расположения лабораторных работ согласуется с изложением материала на лекционных и практических занятиях.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ПРОСТЕЙШЕЙ ЦЕПИ

1. Цель работы

Исследовать влияние режима, предшествующего короткому замыканию (КЗ), и момента возникновения КЗ на слагаемые тока КЗ.

2. Основные расчетные выражения

Исследование переходного режима ведется на базе схемы рис.1, состоящей из активно-индуктивных сопротивлений Z_K , $Z_{наг.}$ и источника неограниченной мощности. Указанный источник характеризуется неизменным напряжением ($U_m = const$) в любых режимах внешней сети (нормальном или аварийном) и сопротивлением $x = 0$. Отсутствие в схеме емкостей исключает возникновение колебательных контуров и упрощает анализ переходного процесса.

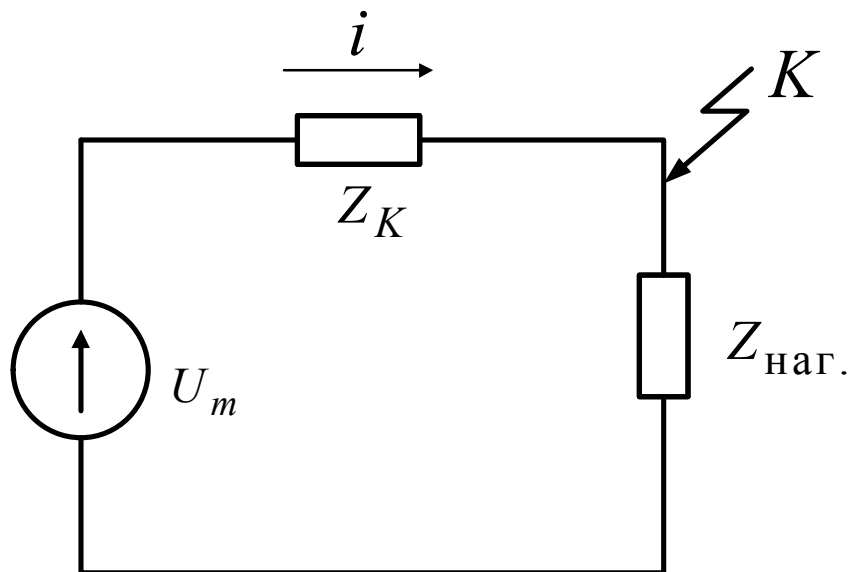


Рис.1. Принципиальная схема

В рассматриваемой схеме закон изменения тока 3-х фазного КЗ в точке K в функции времени (t) описывается выражением [1,2]:

$$i_{iK} = i_{ia(0)}e^{-t/\tau} + I_{nm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K + \psi_i), \quad (1)$$

где $i = A, B, C$ – индекс фазы;

$$i_{ia(0)} = \left[I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_n + \psi_i) - I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_K + \psi_i) \right] - \quad (2)$$

начальное значение апериодической слагаемой тока КЗ, которое вычисляется для $t=0$ и представляет собой разность мгновенных значений периодической слагаемой тока нормального режима и периодической слагаемой тока КЗ.

$I_{nm} = U_m / Z_\Sigma$ – амплитуда тока нагрузочного режима, предшествующего режиму КЗ;

U_m – амплитуда фазного напряжения источника питания;

$Z_\Sigma = Z_K + Z_{\text{наг.}} = Z_\Sigma e^{j\varphi_n}$ – комплексное сопротивление цепи нормального режима в соответствии со схемой рис.1;

$I_{nm} = U_m / Z_K$ – амплитуда периодической слагаемой тока КЗ;

$Z_K = Z_K e^{j\varphi_K}$ – комплексное сопротивление цепи в режиме КЗ;

ψ_i – угол сдвига напряжений фаз В и С относительно фазы А ($\psi = -120^\circ$ для фазы В и $\psi = 120^\circ$ для фазы С);

$\tau = \frac{X_K}{\omega R_K}$ – постоянная времени затухания апериодической слагаемой, которая определяется параметрами схемы (X_K и R_K) в режиме КЗ;

ω – угловая скорость трехфазной системы напряжений (токов);

α – «фаза включения», угол, определяющий положение вектора напряжения фазы А при $t=0$.

Для принятых условий амплитуда периодической слагаемой тока КЗ остается неизменной и определяется величиной напряжения и удаленностью КЗ.

Апериодическая слагаемая существенно зависит от двух факторов:

- режима предшествующего КЗ (I_{nm});
- момента возникновения КЗ (значения угла α).

Апериодическая составляющая является криволинейной осью симметрии полного тока КЗ. В трехфазной сети апериодическая слагаемая по фазам индивидуальна, при этом возможны условия, когда в одной из

фаз она вообще отсутствует. Таким образом, апериодический ток существенно влияет на полный ток КЗ. Скорость затухания апериодического тока определяется его постоянной времени τ . Существует несколько способов косвенного определения τ .

1. Подкасательная к любой точке экспоненты (рис. 2) в принятом для оси времени масштабе дает значение постоянной времени τ . Для большей точности точку, в которой проводят касательную, нужно брать в начальной (более крутой) части кривой.
2. Отрезок на оси времени, при котором отношение токов, соответствующие его началу и концу, составляет $e = 2,72$, равен постоянной времени τ (рис. 2).

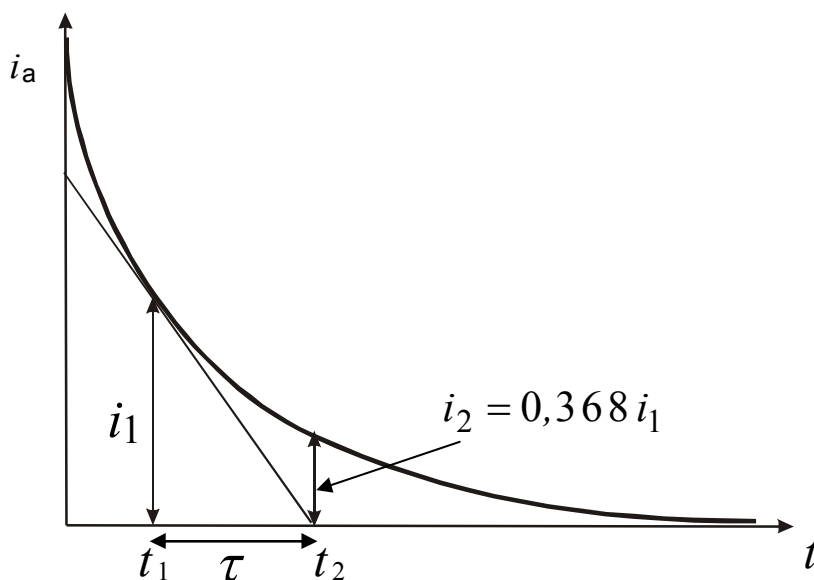


Рис. 2. Графическое определение τ затухающей экспоненты

Для практических расчетов важным является режим и условия, при которых мгновенное значение полного тока КЗ (пик тока) достигает максимального значения (i_y), которое называют ударным током короткого замыкания. Как известно [1,2], для активно-индуктивной цепи это достигается при следующих условиях:

- до КЗ цепь была ненагруженной (режим хх, $I_{nm} = 0$);
- в момент КЗ угол $\alpha = 0$ или 180° (имея в виду фазу А).

Как видно из (2), при этих условиях начальное значение апериодической слагаемой несколько меньше своего максимально возможного значения, равного $|I_{nm}|$, а время возникновения ударного тока зависит

от φ_K ($t_{y\partial} = (\pi/2 + \varphi_K)/\omega$), что создает определенные неудобства в расчете i_y по (1).

При отсутствии предшествующего тока начальное значение апериодической слагаемой (2) достигает максимума при $\alpha = \pm 90^\circ + \varphi_K$. Для цепей с преобладающей индуктивностью $\varphi_K \approx 90^\circ$, поэтому условие возникновения наибольшей апериодической слагающей и условие, при котором достигается максимум мгновенного значения полного тока, очень близки друг к другу. Поэтому в практических расчетах i_y находят при наибольшем значении периодической слагаемой, т.е. при $\alpha = \pm 90^\circ + \varphi_K$ и времени $t = 0,01$ с после возникновения КЗ:

$$i_y = I_{nm}K_y = \sqrt{2}I_nK_y, \quad (3)$$

где $K_y = 1 + e^{-0,01/\tau}$ – ударный коэффициент;

I_n – действующее значение периодической составляющей тока КЗ.

3. Ввод исходных данных

В табл. 1 представлены варианты исходных данных.

Таблица 1

Номера вар-тов	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U , кВ	3	3	3	6	6	6	10	10	10
L , км	1	2	3	4	5	6	9	10	11
Номера вар-тов	10	11	12	13	14	15	16	17	18
U , кВ	35	35	35	110	110	110	220	220	220
L , км	14	15	16	26	28	30	50	55	60

После запуска программы на экране появляется табл.1.

По запросу необходимо ввести:

- действующее значение междуфазного напряжения источника питания, кВ U ;
- длину линии, км L ;
- фазу включения, эл.град. $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ α .
(задается преподавателем)

4. Расчет режимов трехфазного замыкания

В соответствии с принятой схемой (рис.1) рассчитываются:

- амплитуда фазного напряжения источника питания, кВ $U_m = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{3}}$;
- сопротивление цепи в режиме КЗ, Ом $Z_K = (R_0 + jX_0)L = |Z_K| \cdot e^{j\varphi_K}$;
- сопротивление нагрузки, Ом $Z_{\text{наг.}} = 3|Z_K|(0,8 + j0,6)$;
- сопротивление цепи в нормальном режиме, Ом $Z_\Sigma = Z_K + Z_{\text{наг.}}$.

В данной лабораторной работе моделируются два режима КЗ.

1. На интервале времени $-0,006 \text{ с} \leq t \leq 0$ – нормальный режим. При $t = 0$ происходит КЗ с заданной фазой включения, режим КЗ рассчитывается по (1) на отрезке времени $0 \leq t \leq 0,022 \text{ с}$.
2. До КЗ – холостой ход. В момент КЗ ($t = 0$) начальное значение апериодической слагаемой имеет максимально возможное значение, равное $I_{нт}$ при фазе включения $\alpha = -90^\circ + \varphi_K$.

5. Результаты расчета

На печать выводятся исходные данные по принятому варианту и результаты экспериментов.

По первому эксперименту (табл.2) выводятся токи для фаз А, В, С в функции времени.

Таблица 2

Нагрузочный режим, токи фаз А, В, С

t, c	Фаза А			Фаза В	Фаза С
	$I_{пер},$ кА	$I_{анер},$ кА	$I_{КЗ},$ кА	$I_{пер},$ кА	$I_{пер},$ кА

Дополнительно вне табличной формы выводятся:

- амплитуда фазного напряжения , кВ $U_m ;$
- амплитуда тока нормального режима, кА $I_{нт} ;$
- угол сдвига тока нормального режима к напряжению, град. $\varphi_n ;$
- амплитуда периодической составляющей тока КЗ, кА $I_{пт} ;$
- угол сдвига периодической составляющей тока к напряжению, град. $\varphi_K .$

По второму эксперименту (табл. 3) выводятся слагаемые тока КЗ и полный ток КЗ для фазы А.

Таблица 3

До КЗ – режим холостого хода

t, c	$I_{пер}, кА$	$I_{анер}, кА$	$I_{КЗ}, кА$

- фаза включения, град. $\alpha .$

6. Задание по обработке экспериментов и оформлению отчета

К отчету приложить распечатку результатов экспериментов, изобразить на рис.1 принципиальную схему, принятую для исследования и привести основные расчетные выражения.

По данным эксперимента 1 (результатам табл.2):

- 6.1. На рис.2 «Осциллограмма токов фазы А» построить в координатах I, t составляющие токов фазы «А» и графическим путем определить постоянную времени затухания апериодического тока (τ).
- 6.2. Для фазы В или С (по заданию преподавателя), основываясь на первом законе коммутации, по выражению (2) определить начальное значение апериодической слагаемой тока КЗ.
- 6.3. Рассчитать зависимость $i_a = F(t)$ для заданной фазы, используя найденное в п.1 значение τ . Построить осциллограммы токов $i_n, i_a, i_K = F(t)$, (рис.3).

По данным эксперимента 2 (результаты табл. 3):

- 6.4. На рис. 4 построить векторную диаграмму тока и напряжения в координатах «ось времени»–«ось отсчета углов».

7. Контрольные вопросы

- 7.1. Как зависит скорость затухания i_a от τ ?
- 7.2. Из каких условий в активно-индуктивной цепи находится $i_{a(0)}$?
- 7.3. Назовите расчетные условия для практического расчета K_y .
- 7.4. Во сколько раз уменьшится i_a за время $t = 3\tau$?

Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. –М.:Энергия, 1970.
2. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах. – Новосибирск: Мир, 2003.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАГРУЗКИ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ТРЕХФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ

1. Цель работы

Исследовать влияние нагрузки, ее мощности и удаленности на начальный сверхпереходный и ударный токи при трехфазном коротком замыкании.

2. Общие положения и расчетные выражения

При расчете режимов короткого замыкания (КЗ) в электрических сетях под нагрузкой понимают: синхронные двигатели и компенсаторы, асинхронные двигатели и обобщенную нагрузку. Все указанные виды нагрузки оказывают влияние на ток КЗ, особенно в начальный момент нарушения режима. При этом, влияние каждого вида нагрузки индивидуально и зависит от ряда факторов, из которых основными являются: мощность нагрузки, ее режим до КЗ, электрическая удаленность до точки КЗ.

Как известно [1,2], любая из перечисленных нагрузок в переходном режиме характеризуется своими сверхпереходными (переходными) параметрами: E'' – сверхпереходная ЭДС, X'' – сверхпереходное сопротивление. Поскольку в большинстве практических расчетов пренебрегают сдвигом фаз ЭДС источников, то в конечном итоге влияние любой нагрузки (равно как и генератора) на ток КЗ определяется соотношением сверхпереходной ЭДС и остаточным напряжением на ее выводах в переходном режиме.

При $E''_{(0)} > U_{(0)}$ (где индекс (0) указывает на режим КЗ при $t=0$) нагрузка является дополнительным источником, посылая реактивный ток во внешнюю сеть, при $E''_{(0)} < U_{(0)}$ – нагрузка потребляет реактивный ток из сети.

Исследование режимов в настоящей работе ведется на основе простейшей схемы (рис.1), в которой генератор и нагрузка через общую реактивность X_K связаны с местом КЗ.

Начальное значение сверхпереходной ЭДС любой двигательной нагрузки (или генератора) определяется из предшествующего режима [1,2]:

$$E''_{(0)} = E''_0 = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 \pm I_0 X'')^2}, \quad (1)$$

где U_0, I_0, φ_0 – напряжение, ток и угол сдвига между ними в режиме, предшествующем КЗ.

Знак плюс перед падением напряжения в X'' соответствует синхронному генератору, синхронному двигателю или компенсатору в режиме перевозбуждения, знак минус – этим же элементам в режиме недо возбуждения и асинхронному двигателю.

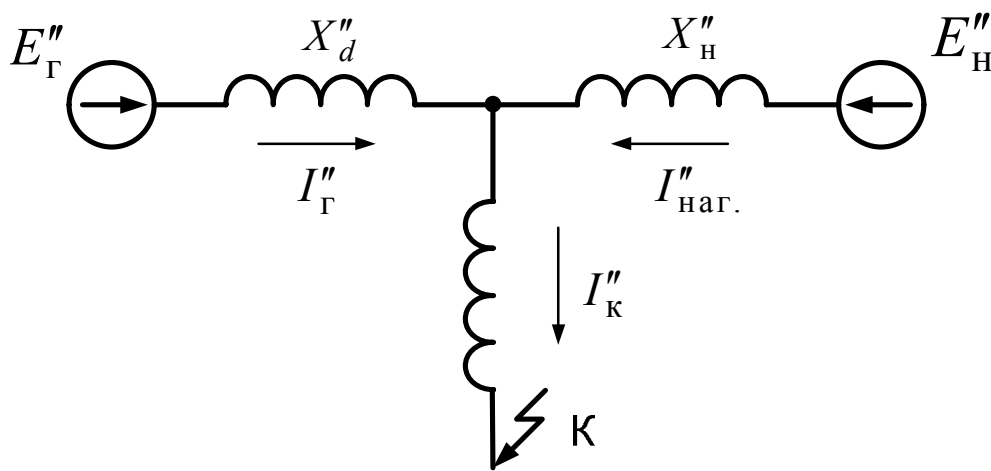


Рис. 1. Принципиальная схема

Для обобщенной нагрузки принимают $E''=0,85, X''=0,35$ в относительных единицах, приведенные к ее рабочей мощности (МВА) и номинальному напряжению (кВ) узла присоединения.

При расчете ударного тока КЗ (i_y) в схемах с нагрузкой есть особенность, обусловленная затуханием тока нагрузки. У синхронных двигателей (компенсаторов) величина ударного коэффициента примерно та же, что и у синхронных генераторов равновеликой мощности. У асинхронных двигателей затухание периодической и апериодической составляющих происходит примерно с одинаковыми постоянными времени. Поэтому в ударном коэффициенте учитывается затухание обеих составляющих тока. В расчетах можно ориентироваться на следующую связь ударного коэффициента от мощности асинхронного двигателя.

K_y	1,6	1,64	1,66	1,7	1,73	1,76	1,78	1,8
$P(\text{МВт})$	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0	2,0	3,0	5,0

Для мелких двигателей и обобщенной нагрузки $K_y \approx 1$.

Таким образом, при персональном учете двигательной нагрузки ударный ток в месте КЗ составит

$$i_y = \sqrt{2} \left(I''_{\Gamma} K_{y\Gamma} + I''_{\text{наг.}} K_{y\text{наг.}} \right), \quad (2)$$

где $I''_{\Gamma}, I''_{\text{наг.}}$ – действующие значения начального сверхпереходного тока генератора и нагрузки.

$K_{y\Gamma}, K_{y\text{наг.}}$ – значения ударных коэффициентов для генератора и нагрузки.

Наряду с ударным током КЗ важной характеристикой тока КЗ является наибольшее действующее значение (I_y). Наибольшее действующее значение тока КЗ имеет место за первый период переходного процесса и рассчитывается для времени $t=0,01$ с., т.е. момента возникновения ударного тока и в общем случае для I_y справедливо выражение

$$I_y = \sqrt{I''_{nt}{}^2 + I''_{at}{}^2}, \quad (3)$$

где I''_{nt} – действующее значение периодической слагающей тока КЗ при $t=0,01$ с и в практических расчетах принимается равной для $t=0$;

I''_{at} – значение аperiodической слагаемой тока КЗ при $t=0,01$ с.

При отсутствии данных о постоянной времени (τ) затухания аperiodической слагаемой значение аperiodической слагаемой (I''_{at}) может быть косвенно учтено посредством ударного коэффициента, т.е.

$$I_y = I''_{n(0)} \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}. \quad (4)$$

Применительно к нашим условиям, когда имеются два источника питания, характеризующиеся разными значениями K_y , величину I_y можно рассчитать по выражению:

$$I_y = \sqrt{(I''_{\Gamma} + I''_{\text{наг.}})^2 + 2 \left[I''_{\Gamma} (K_y - 1) + I''_{\text{наг.}} (K_{y\text{наг.}} - 1) \right]^2}. \quad (5)$$

3. Ввод исходных данных

В табл.1 представлены варианты исходных данных

Таблица 1

Номера вар-тов	1	2	3	4	5	6	7
S_{Γ} (МВА)	37,5	50	66	77	85	90	100
$\cos\varphi_{\Gamma}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
X''_{Γ} (о.е.)	0,15	0,145	0,14	0,135	0,13	0,125	0,12
$S_{с.к.}$ (МВА)	37,5	50	66	77	85	90	100
$\cos\varphi_{с.к.}$	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$X''_{с.к.}$ (о.е.)	0,22	0,2	0,22	0,23	0,25	0,2	0,2
$U_{ном}$ (кВ)	6,3	6,3	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$S_{с.к.}/S_{\Gamma}$	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,2	0,3

После запуска программы на экране появляется табл.1. В соответствии с принятым вариантом по запросу необходимо последовательно ввести численные значения параметров схемы.

4. Расчет режимов трехфазного короткого замыкания

В соответствии с принятой схемой (рис.1) рассчитываются четыре режима трехфазных замыканий. Результаты расчета представляются в относительных единицах, в качестве базисных условий приняты номинальные параметры генератора. Мощность генератора во всех опытах неизменна, а его режим – перевозбуждение.

В экспериментах осуществляется расчет начального сверхпереходного тока трехфазного КЗ в функции удаленности точки КЗ (X_K) при различных условиях.

1. В качестве нагрузки принята обобщенная нагрузка, равная мощности генератора.
2. В качестве нагрузки принят синхронный компенсатор (двигатель) в режиме перевозбуждения равный мощности генератора.
3. В качестве нагрузки принят синхронный компенсатор (двигатель) в режиме недовозбуждения равный мощности генератора.
4. В качестве нагрузки принят синхронный двигатель (компенсатор) в режиме недовозбуждения при $S_{с.к.}/S_{Г} = K$.

5. Результаты расчета

На печать выводятся исходные данные по принятому варианту в соответствии со списком:

номинальная мощность генератора (МВА)	$S_{Г} =$;
$\cos\varphi$ генератора (о.е.)	$\cos\varphi_{Г} =$;
сверхпереходное сопротивление генератора (о.е.)	$X_{Г}'' =$;
номинальная мощность с.к. (МВА)	$S_{с.к.} =$;
$\cos\varphi$ синхронного компенсатора (о.е.)	$\cos\varphi_{с.к.} =$;
сверхпереходное сопротивление с.к. (о.е.)	$X_{с.к.}'' =$;
номинальное напряжение генератора (кВ)	$U_{Н} =$;
отношение $S_{с.к.}/S_{Г} = K$ (о.е.)	$K =$.

По первому эксперименту рассчитываются $I''_{Г}$, $I''_{наг.}$ и остаточное напряжение на их шинах ($U_{ост.}$) в функции удаленности точки КЗ (табл.2).

Таблица 2

Источники: генератор – обобщенная нагрузка $S_{Г} = S_{об.н.}$

$X_{К}$, о.е.	$I''_{Г}$, о.е.	$I''_{наг.}$, о.е.	$U_{ост.}$, о.е.
0,00			
0,1			
0,2			
.			
.			
.			
1,6			
1,8			

По второму и третьему экспериментам рассчитываются результирующий ток в месте КЗ и его составляющая, обусловленная двигательной нагрузкой (табл.3).

Таблица 3

Источники: генератор – синхронный компенсатор $S_{Г} = S_{с.к.}$

$X_{К}$, о.е.	Режим с.к. – перевозбуждение		Режим с.к. – недовозбуждение	
	$I''_{К}$, о.е.	$I''_{с.к.}$, о.е.	$I''_{К}$, о.е.	$I''_{с.к.}$, о.е.
0,00				
0,1				
0,2				
.				
.				
.				
1,6				
1,8				

В четвертом эксперименте источниками являются генератор и синхронный компенсатор, работающий в режиме недовозбуждения при $S_{с.к.}/S_{\Gamma} = K$ ($K < 1$). Результаты выводятся в табл.4.

Таблица 4

X_K , о.е.	Источники: генератор – синхронный компенсатор при $S_{с.к.}/S_{\Gamma} = K$	
	I''_K , о.е.	$I''_{с.к.}$, о.е.
0,00		
0,1		
0,2		
.		
.		
.		
1,6		
1,8		

6. Задание по обработке экспериментов и оформлению отчета

К отчету приложить распечатку результатов экспериментов, изобразить на рис.1 принципиальную схему, принятую для исследования, и привести основные расчетные выражения.

По данным эксперимента 1 (табл.2):

- 6.1. На рис.2 представить зависимости I''_{Γ} , $I''_{наг.}$, I''_K в функции X_K .
- 6.2. На рис.3 отразить зависимость $(I''_{наг.}/I''_K)100\% = f(X_K)$.
- 6.3. Определить диапазон X_K , при котором обобщенная нагрузка является дополнительным источником подпитки места КЗ.
- 6.4. Рассчитать по выражению (2) ударный ток КЗ и по выражению (5) наибольшее действующее значение тока КЗ при $X_K = 0,2$.

По заданию преподавателя выполнить п.6.5 – 6.7 или п.6.9 – 6.11.

По данным эксперимента 2 (первая часть табл.3):

- 6.5. На рис. 4 представить зависимости I''_{Γ} , $I''_{\text{наг.}}$, $I''_{\text{с.к.}}$ в функции X_K .
- 6.6. Рассчитать по выражению (2) ударный ток КЗ и по (5) наибольшее действующее значение тока КЗ при $X_K=0,2$.
- 6.7. Объяснить разницу в значениях i_y по экспериментам 1 и 2.

По данным эксперимента 3 (вторая часть табл.3):

- 6.8. На рис.6 построить зависимости I''_{Γ} , $I''_{\text{наг.}}$, $I''_{\text{к}}$ в функции X_K .
- 6.9. Рассчитать по выражению (2) ударный ток КЗ и по (5) наибольшее действующее значение тока КЗ при $X_K=0,2$. Объяснить разницу в значениях i_y по экспериментам 1 и 3.
- 6.10. На рис.7 построить зависимость $U_{\text{ост.}} = f(X_K)$ и определить графически $E''_{\text{с.к.}}$ в о.е. и пересчитать в именованных единицах; объяснить подоплеку в нахождении $E''_{\text{с.к.}}$.

7. Контрольные вопросы

- 7.1. Как изменяется U_{Γ} и E'' в момент КЗ?
- 7.2. Пользуясь результатами расчетов, обосновать условия неучета нагрузки при расчете токов КЗ.

Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. –М.:Энергия, 1964. –518 с., 1970. –518 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

1. Цель работы

Исследовать закономерности распределения симметричных составляющих остаточных напряжений в узлах схемы при несимметричных коротких замыканиях (КЗ).

2. Общие положения и расчетные выражения

Несимметричные КЗ в электрических системах приводят к нарушению симметрии фазных и линейных величин токов и напряжений. Моделирование несимметричных режимов можно осуществить методом симметричных составляющих – прямой, обратной и нулевой последовательностей. Тогда интересующие несимметричные величины фазных токов и напряжений будут представлены геометрической суммой соответственно токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей. Согласно принципу независимости действия симметричных составляющих каждая из трех последовательностей может рассматриваться автономно.

Для симметричных составляющих остаточных напряжений двух соседних узлов i и j , связанных между собой в схеме прямой последовательности через X_1 и в схеме обратной и нулевой последовательностей соответственно через X_2 и X_0 , справедливы уравнения Кирхгофа (в относительных единицах):

$$\begin{aligned}\underline{U}_{1(j)} &= \underline{U}_{1(i)} + \underline{I}_1 \cdot jX_1; \\ \underline{U}_{2(j)} &= \underline{U}_{2(i)} + \underline{I}_2 \cdot jX_2; \\ \underline{U}_{0(j)} &= \underline{U}_{0(i)} + \underline{I}_0 \cdot jX_0.\end{aligned}\tag{1}$$

Положительное направление тока принято от узла j к узлу i .

Эти уравнения (1) и определяют характер распределения симметричных составляющих напряжений в схеме в зависимости от величины и направлений симметричных составляющих токов и соответствующих значений сопротивлений элементов для различных последовательностей токов.

Фазные значения напряжений определяются геометрической суммой ее симметричных составляющих:

$$\underline{U}_i = \underline{U}_{1(i)} + \underline{U}_{2(i)} + \underline{U}_0,$$

где $i = A, B, C$ – индекс фазы.

Для перевода фазных величин напряжения (равно как и симметричных составляющих) из относительных единиц в именованные используют коэффициент $U_{\Delta} / \sqrt{3}$, где U_{Δ} (кВ) – междуфазное (линейное) базисное напряжение соответствующей ступени трансформации.

При переходе через трансформатор симметричные составляющие напряжения прямой и обратной последовательностей изменяются не только по величине, но и по фазе в зависимости от группы (N) соединения его обмоток. Уравнения связи симметричных составляющих напряжений на выводах трансформатора с соединением обмоток звезда-треугольник в системе относительных единиц запишутся так

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1\Delta} &= \underline{U}_{1Y} \cdot e^{-j30^\circ N}, \\ \underline{U}_{2\Delta} &= \underline{U}_{2Y} \cdot e^{+j30^\circ N}. \end{aligned} \quad (3)$$

При этом имеется в виду, что \underline{U}_{1Y} , \underline{U}_{2Y} включают падение напряжения в трансформаторе.

Уравнения (3) справедливы и при переходе со стороны треугольника на сторону звезды, при этом угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

Исследование режимов КЗ в настоящей работе ведется на основе схемы (рис.1), в которой последовательно соединены генератор, трансформатор и высоковольтная ЛЭП.

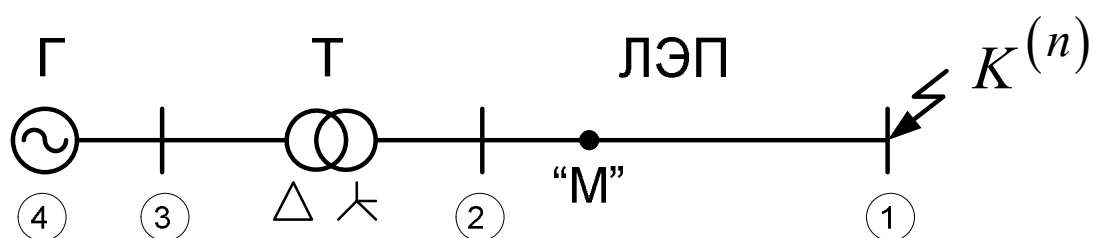


Рис. 1. Принципиальная схема электропередачи:

1, 2, 3, 4 – номера узлов схемы

3. Ввод исходных данных

В табл. 1 представлены варианты исходных данных.

Таблица 1

Номера вариантов	1	2	3	4	5	6
$S_{НГ}$, (МВА)	21,5	26,3	30	37,5	40	50
X''_d , (о.е.)	0,225	0,227	0,2	0,24	0,225	0,232
$U_{НГ}$, (кВ)	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$S_{Тр}$, (МВА)	25	25	40	40	40	63
$U_{к}$, (%)	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	14
$U_{НВ}$, (кВ)	115	115	115	115	115	37,5
$U_{НН}$, (кВ)	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
L , (км)	50	50	80	80	80	30
Номера вариантов	7	8	9	10	11	12
$S_{НГ}$, (МВА)	56,3	65,5	71,5	77,5	80	100
X''_d , (о.е.)	0,2	0,16	0,21	0,28	0,24	0,19
$U_{НГ}$, (кВ)	10,5	15,75	13,8	13,8	13,8	15,75
$S_{Тр}$, (МВА)	63	63	100	100	100	100
$U_{к}$, (%)	14	14	12	12	12	12
$U_{НВ}$, (кВ)	37,5	38,5	230	230	230	230
$U_{НН}$, (кВ)	10,5	15,75	13,8	13,8	13,8	15,75
L , (км)	30	30	100	100	100	120

После запуска программы на экране появляется табл. 1. В соответствии с заданным вариантом по запросу необходимо последовательно ввести численные значения параметров схемы. Разделительным знаком для дробных величин необходимо использовать точку.

4. Расчет симметричных составляющих напряжений

При расчетах режимов КЗ приняты следующие условия по параметрам схемы:

$E_G'' = 1,1$ (о.е.) – значение сверхпереходной ЭДС для всех вариантов;

$X_{G1} = X_{G2} = X_d''$ (о.е.);

$S_{\bar{o}} = S_{HG}$;

$R = 0$ – для всех элементов схемы;

$X_{1(л)} = 0,4$ (Ом/км) – погонная реактивность ЛЭП в схеме прямой последовательности;

$X_{0(л)} = 3X_{1(л)}$ – погонная реактивность ЛЭП в схеме нулевой последовательности.

В данной работе моделируются три несимметричных режима КЗ в точке $K^{(n)}$ схемы (рис. 1):

- двухфазное;
- двухфазное на землю;
- однофазное.

Расчет осуществляется аналитическим методом в системе относительных единиц, при $S_{\bar{o}} = S_{HG}$; $U_{\bar{o}i} = U_{HV}$; U_{HH} трансформатора. В качестве “особой” фазы принята фаза «А».

5. Результаты расчета

На печать выводятся исходные данные по принятому варианту согласно следующему списку:

- | | | |
|---|--------|------------|
| • мощность генератора, | (мВА) | S_{HG} ; |
| • сверхпереходное сопротивление генератора, | (о.е.) | X_d'' ; |
| • напряжение генератора, | (кВ) | U_{HG} ; |
| • мощность трансформатора, | (мВА) | S_{Tr} ; |
| • напряжение КЗ трансформатора, | (%) | U_K ; |
| • напряжение трансформатора на стороне ВН, | (кВ) | U_{HV} ; |
| • напряжение трансформатора на стороне НН, | (кВ) | U_{HH} ; |
| • длина линии электропередачи, | (км) | L . |

Симметричные составляющие фазных напряжений в узлах схемы в о.е. (табл.2).

Таблица 2

Результаты расчета симметричных составляющих напряжений

номер узла	1	2	3	4
двухфазное КЗ				
U_1 , о.е.				
U_2 , о.е.				
двухфазное КЗ на землю				
U_1 , о.е.				
U_2 , о.е.				
U_0 , о.е.				
однофазное КЗ				
U_1 , о.е.				
U_2 , о.е.				
U_0 , о.е.				

6. Задание по обработке экспериментов

- 6.1. На рис. 1 изобразить принципиальную схему электропередачи и по данным табл. 2 построить эпюры распределения симметричных составляющих напряжения в о.е. для всех видов КЗ (в масштабе).
- 6.2. Для узла “М” ЛЭП, расположенного на удалении mL от места КЗ (m – относительная удаленность узла “М”), по данным табл. 2 рассчитать симметричные составляющие напряжений в относительных и именованных единицах для вида КЗ и значения “ m ”, указанных в табл. 3.

Таблица 3

Данные для выполнения п. 2. задания

Номера вар-тов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m , о.е.	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,3	0,4	0,5	0,6
вид КЗ	1	2	1,1	1	2	1,1	1	2	1,1	1	2	1,1

7. Контрольные вопросы

- 7.1. Почему соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте КЗ отличаются от аналогичных соотношений в прочих узлах схемы?
- 7.2. Что является источником токов обратной и нулевой последовательностей?
- 7.3. При каких условиях справедлив принцип независимости действия симметричных составляющих?

Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.–М.:Энергия, 1970. –518 с.
2. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах. – Новосибирск: Мир, 2003.
3. Готман В.И. Примеры анализа и решения задач по управлению переходными процессами электрических систем. – Томск: Изд.ТПУ, 1986.–90 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОДНОМАШИННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

1. Цель работы

Изучить влияние параметров внешней электрической сети и промежуточной нагрузки на статическую устойчивость одномашинной энергосистемы.

2. Основные соотношения и задачи расчетов

Статической устойчивостью называют способность электрической системы восстанавливать исходное состояние после малых возмущений [1]. Одномашинной (простейшей) электрической системой называется энергосистема, представленная эквивалентным генератором, объединенным через пассивную электрическую сеть с мощной концентрированной энергосистемой, приемные шины которой принимаются в качестве шин бесконечной мощности (ШБМ). Напряжение и частота на шинах бесконечной считаются неизменными (рис. 1,а).

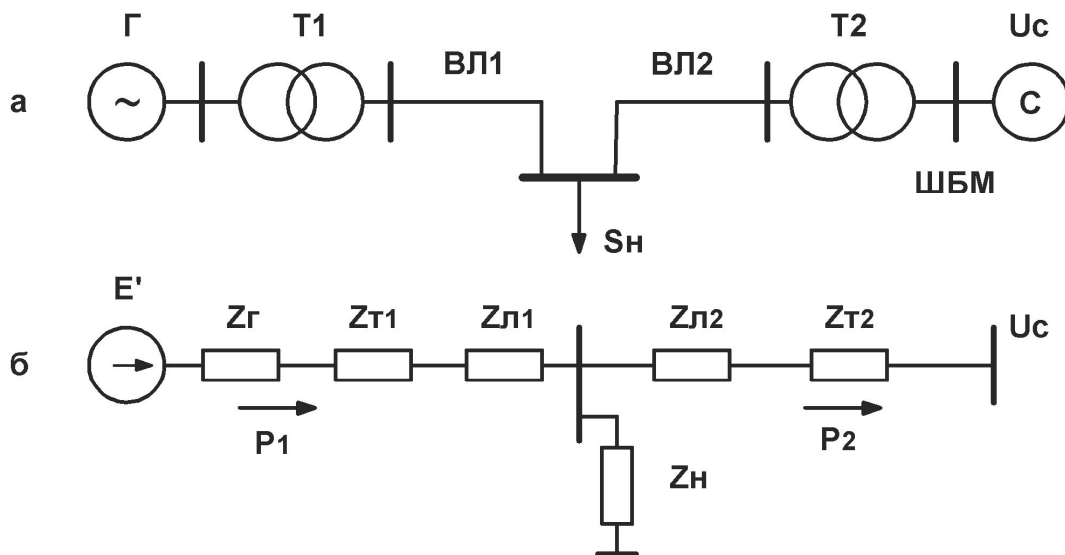


Рис.1. Электрическая схема (а) и схема замещения (б) одномашинной энергосистемы

При упрощенном учете системы автоматического регулирования возбуждения пропорционального действия (АРВ ПД) генератор замещается переходным реактивным сопротивлением в продольной оси и переходной ЭДС (модель E' , x'_d). Трансформаторы Т1, Т2 и воздушные линии электропередачи ВЛ1, ВЛ2 в работе учитываются полными сопротивлениями Z_{T1} , Z_{T2} , $Z_{Л1}$, $Z_{Л2}$, либо упрощенно только реактивными сопротивлениями (рис.1,а, б). Сопротивлением Z_H моделируются активная, реактивная, либо комплексная нагрузка (рис.1,б). Угловые характеристики со стороны генератора $P_1(\delta)$ и со стороны шин приемной подстанции $P_2(\delta)$ вычисляются по известным выражения [1]:

$$P_1 = \frac{E'^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E'U_C}{Z_{12}} \sin(\delta - \alpha_{12}); \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{-U_C^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} + \frac{E'U_C}{Z_{12}} \sin(\delta + \alpha_{12}), \quad (2)$$

где Z_{11} , Z_{22} – модули собственных сопротивлений в начале и конце электропередачи;

Z_{12} – модуль взаимного сопротивления;

α_{11} , α_{22} , α_{12} – дополняющие углы сопротивлений.

В комплексной форме собственные и взаимные сопротивления вычисляются по выражениям:

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = Z_{11} e^{j\psi_{11}}; \quad (3)$$

$$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3} = Z_{22} e^{j\psi_{22}}; \quad (4)$$

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} = Z_{12} e^{j\psi_{12}}, \quad (5)$$

где в соответствии со схемой замещения (рис.1,б) сопротивления \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_3 определены как

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_Г + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{Л1} ; \quad (6)$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_Г + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{Л1} ; \quad (7)$$

$$\underline{Z}_3 = \underline{Z}_H . \quad (8)$$

Дополняющие углы α_{11} , α_{22} , α_{12} вычисляются по формулам:

$$\alpha_{11} = 90^0 - \psi_{11} ; \quad (9)$$

$$\alpha_{22} = 90^0 - \psi_{22} ; \quad (10)$$

$$\alpha_{12} = 90^0 - \psi_{12} . \quad (11)$$

Предельные по статической устойчивости значения мощности $P_{1ПР}$ определяются как экстремальные точки угловых характеристик генератора (1) по выражению:

$$P_{1ПР} = \max P_1(\delta) = \frac{E'^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E'U_C}{Z_{12}} . \quad (12)$$

Предельные по статической устойчивости углы соответствуют точкам максимума в выражении (1) и определяются как

$$\delta_{ПР} = 90^0 + \alpha_{12} . \quad (13)$$

Коэффициенты запаса статической устойчивости энергосистемы в процентах вычисляются по формуле:

$$k_{СТ} = \frac{P_{1ПР} - P_{10}}{P_{10}} 100 , \quad (14)$$

где P_{10} – отдаваемая генератором мощность в исследуемом на устойчивость режиме.

Математическая модель энергосистемы, в которой не учитываются активные сопротивления трансформаторов и линий электропередачи далее называется *идеализированной*.

При учете активных сопротивлений этих элементов модель будет называться *уточненной*. Более полная модель, когда учитываются поперечные проводимости трансформаторов и линий, в работе не рассматривается.

При выполнении работы требуется провести расчеты угловых характеристик энергосистемы и проанализировать полученные результаты для следующих исходных условий:

- 1) Идеализированная модель энергосистемы без промежуточной нагрузки: $P_H = 0$; $Q_H = 0$; $R = 0$ для всех элементов схемы замещения.
- 2) Уточненная модель энергосистемы без промежуточной нагрузки: $P_H = 0$; $Q_H = 0$; $R \neq 0$ для всех элементов схемы замещения.
- 3) Идеализированная модель энергосистемы при подключении реактора: $\underline{S}_H = jQ_P$.
- 4) Идеализированная модель энергосистемы при подключении конденсаторной батареи: $\underline{S}_H = -jQ_{KB}$.
- 5) Идеализированная модель энергосистемы при подключении активной нагрузки: $\underline{S}_H = P_H$.
- 6) Уточненная модель энергосистемы при подключении активно-индуктивной нагрузки с параметрами, принятыми из пунктов 3 и 5: $\underline{S}_H = P_H + jQ_P$.
- 7) Уточненная модель энергосистемы при подключении активно-емкостной нагрузки с параметрами, принятыми из пунктов 4 и 5: $\underline{S}_H = P_H - jQ_{KB}$.

3. Подготовка и ввод исходных данных

Перед началом расчета в качестве исходных данных в компьютер вводятся следующие параметры схемы замещения:

– базисная мощность, мВА	S_{σ} ;
– активное сопротивление эквивалентного генератора, отнесенное к его суммарной номинальной мощности, о.е.	R_A ;
– реактивное сопротивление эквивалентного генератора, отнесенное к его суммарной номинальной мощности, о.е.	X'_d ;
– активное сопротивление эквивалентного трансформатора T1, Ом	R_{T1} ;
– реактивное сопротивление эквивалентного трансформатора T1, Ом	X_{T1} ;
– активное сопротивление эквивалентного трансформатора T2, Ом	R_{T2} ;
– реактивное сопротивление эквивалентного трансформатора T1, Ом	X_{T2} ;
– активное сопротивление линии ВЛ1, Ом	$R_{Л1}$;
– реактивное сопротивление линии ВЛ1, Ом	$X_{Л1}$;
– активное сопротивление линии ВЛ2, Ом	$R_{Л2}$;
– реактивное сопротивление линии ВЛ1, Ом	$X_{Л1}$;
– активная мощность нагрузки, МВт	P_H ;
– реактивная мощность нагрузки, МВАр	Q_H ;
– емкостная мощность нагрузки, МВАр	$Q_{КБ}$;
– переходная ЭДС эквивалентного генератора, кВ	E' ;
– напряжение ШБМ, кВ	U_C .

Вычисление сопротивлений и ЭДС схемы замещения проводится по следующим паспортным и другим исходным данным элементов энергосистемы.

СИСТЕМА С: $U_C = 118$ кВ.

ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ГЕНЕРАТОР Г представляет собой пять турбогенераторов типа ТВФ-120-2У3 с параметрами каждого из них:

$P_{HG} = 100$ МВт; $U_{HG} = 10,5$ кВ; $\cos\psi_{HG} = 0,8$; $R_A = 0,00186$ о.е.; $X'_d = 0,278$ о.е.; $E' = 12,5$ кВ.

ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР Т1 представляет пять трансформаторов типа ТДЦ-125000 с параметрами каждого из них:

$S_{HT} = 125$ МВА; $U_{HB} = 242$ кВ; $U_{HH} = 10,5$ кВ;
 $R_T = 1,42$ Ом; $X_T = 51,6$ Ом.

ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР Т2 представляет пять автотрансформаторов типа АДЦТН-200000 с параметрами каждого из них:

$S_{HT} = 200$ МВА; $U_{HB} = 230$ кВ; $U_{HC} = 121$ кВ; $U_{HH} = 11$ кВ;
 $R_T = 0,57$ Ом; $X_T = 29,1$ Ом.

ВОЗДУШНАЯ ЛИНИЯ ВЛ1:

АС-300/39: $R_0 = 0,098$ Ом/км; $X_0 = 0,429$ Ом/км; $L = 110$ км.

ВОЗДУШНАЯ ЛИНИЯ ВЛ2:

АС-400/51: $R_0 = 0,075$ Ом/км; $X_0 = 0,420$ Ом/км; $L = 140$ км.

Мощности нагрузки задаются повариантно в форме табл. 1

Таблица 1

Номера вариантов	1	2	3	4	5	6
$Q_P,$ МВАр	70	80	90	100	110	120
$Q_{KB},$ МВАр	120	110	100	90	80	70
$P_H,$	50	60	70	80	90	100

МВт						
-----	--	--	--	--	--	--

4. Результаты расчета

На начальной стадии расчета программа осуществляет приближенное приведение исходных данных к базисным условиям при принятой величине базисной мощности и выводит на экран параметры эквивалентной схемы замещения в системе относительных единиц.

Вывод угловых характеристик энергосистемы

Таблица 2

Угол град	Код задания и мощность, МВт													
	1		2		3		4		5		6		7	
	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2

5. Обработка результатов расчета

В отчете по лабораторной работе следует привести схему электропередачи, схему замещения, исходные данные для расчета, результаты расчета, пункты задания по обработке результатов расчета.

5.1. По данным численных экспериментов (расчетов) построить угловые характеристики эквивалентного генератора в следующих сочетаниях:

- по экспериментам 1,2;
- по экспериментам 1,3,4;
- по экспериментам 1,5;
- по экспериментам 1,6 или 1,7 (по заданию преподавателя).

5.2. По результатам эксперимента 1 определить и показать на всех рисунках передаваемую мощность P_{10} в нормальном режиме энергосистемы, приняв коэффициент запаса статической устойчивости $K_{CT} = 25\%$.

- 5.3. По величине P_{10} из пункта 2 задания определить коэффициенты запаса статической устойчивости энергосистемы для экспериментов 2 ...6 или 7.
- 5.4. Определить по графикам и показать на рисунках численные значения собственных мощностей P_{11} и P_{22} для экспериментов 4...6 или 7.
- 5.5. Определить по графикам численные значения максимума взаимной мощности P_{1max} эквивалентного генератора для экспериментов 4...6 или 7.
- 5.6. Определить по графикам и показать на рисунках численные значения дополняющих углов α_{12} для экспериментов 4...6 или 7.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. По какому практическому критерию определяется статическая устойчивость одномашинной энергосистемы?
- 6.2. Почему уменьшается предел статической устойчивости одномашинной энергосистемы при подключении шунтирующего реактора?
- 6.3. Почему повышается предел статической устойчивости одномашинной энергосистемы при подключении конденсаторной батареи?
- 6.4. Почему в уточненной модели энергосистемы угловые характеристики $P_1(\delta)$ и $P_2(\delta)$ не совпадают?
- 6.5. Почему дополняющий угол α_{12} может принимать как положительные, так и отрицательные значения?
- 6.6. Почему дополняющие углы α_{11} и α_{22} не имеют отрицательных значений?

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.:Высшая школа, 1985. – 536 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ПОСТРОЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

1. Цель работы

Изучить особенности построения статических характеристик и расчета предельных по статической устойчивости режимов асинхронного электродвигателя.

2. Схема замещения

Для построения статических характеристик асинхронного электродвигателя обычно используется Г-образная схема замещения, приведенная на рис.1,е. К этой схеме приводит ряд последовательных преобразований исходной двухконтурной схемы замещения (рис.1,а), из которой следует, что при установившихся значениях круговой частоты сети W_C , частоте вращения ротора двигателя W_D и скольжении

$$s = \frac{W_C - W_D}{W_C} \quad (1)$$

асинхронный электродвигатель представляет собой вращающийся трансформатор [1]. Первый и второй контуры трансформатора составляют индуктивно связанную статорную и роторную обмотки двигателя.

ЭДС sE во втором контуре наводится лишь при наличии скольжения, когда поле статора пересекает витки обмотки ротора, и имеет частоту sW_C , пропорциональную скольжению. Соответственно, индуктивное сопротивление рассеяния sX_2 второго контура находится в прямой пропорциональной зависимости от скольжения. Сопротивления рассеяния X_1 и X_2 измерены при номинальной частоте.

Коэффициент трансформации E_1/sE_2 определяется витковыми данными машины. В обмотках статора и ротора протекают токи I_1 , I_2 , соответственно, с частотами W_C и sW_C .

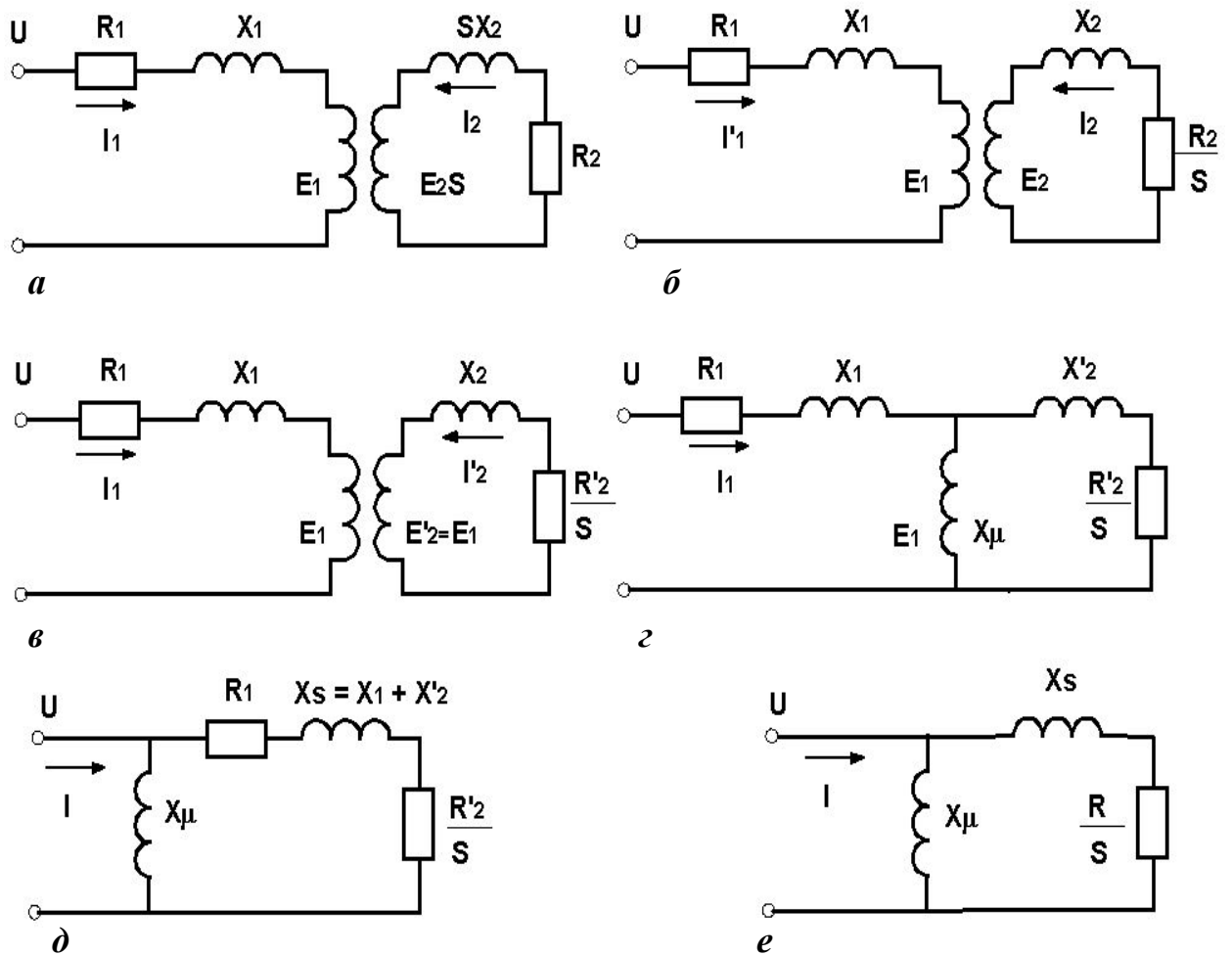


Рис.1. Схема замещения асинхронного электродвигателя

При упрощении исходной схемы замещения выполняются следующие операции:

- ЭДС sE_2 и сопротивления sX_2, R_2 делят на скольжение (рис.1,б), в результате чего ток I_2 остается неизменным;
- исходя из условий сохранения режима статора, параметры второго контура преобразуют так, что количество витков обмоток статора и ротора становятся численно одинаковыми. Соответственно, равными становятся ЭДС $E'_2 = E_1$, индуктивно связанных элементов (рис. 1,в). При этом сопротивления второго контура приобретают новые значения R'_2/s и X'_2 ;
- взаимно индуктирующие элементы замещают электрической связью с сопротивлением намагничивания X_μ (рис.1,г);

– сопротивление X_μ выносят на вход первого контура и получают суммарное сопротивление рассеяния машины $X_S = X_1 + X'_2$ (рис.1,д).

Получаемая в результате последней некорректной операции погрешность незначительна, так как сопротивление намагничивания в десятки раз превышает активное и реактивное сопротивления первого контура. При расчетах устойчивости сопротивлением R_1 обычно пренебрегают, используя упрощенную схему замещения, показанную на рис. 1,е.

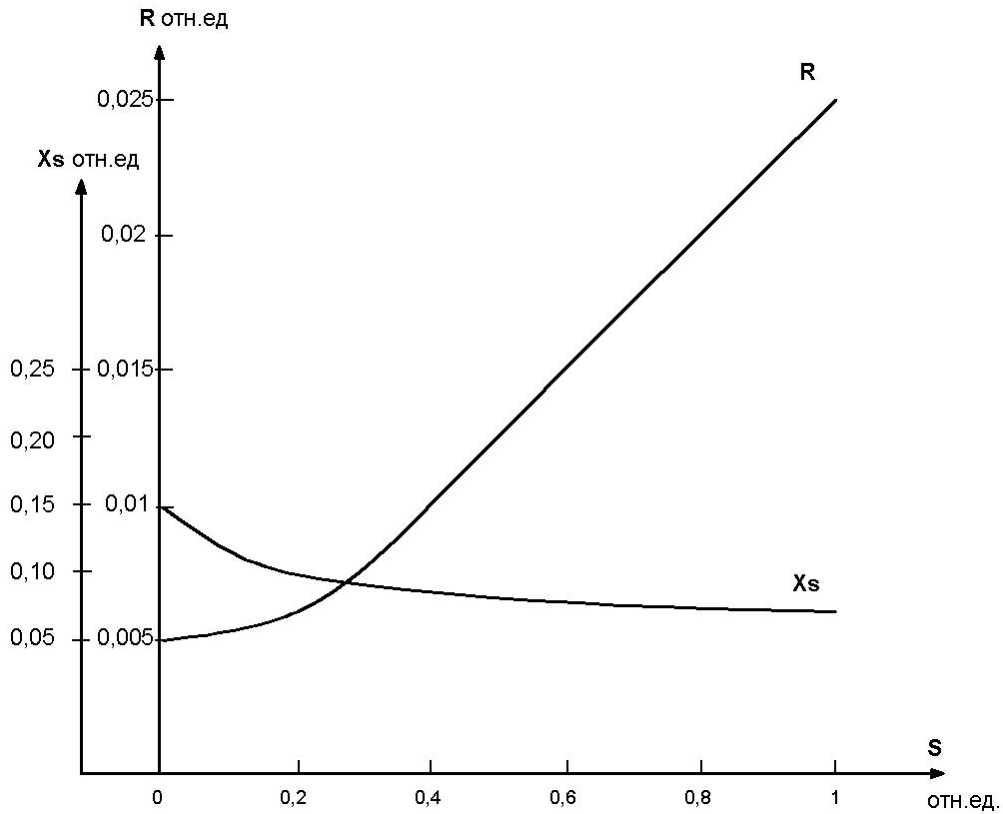


Рис.2. Зависимости активного и индуктивного сопротивлений от скольжения

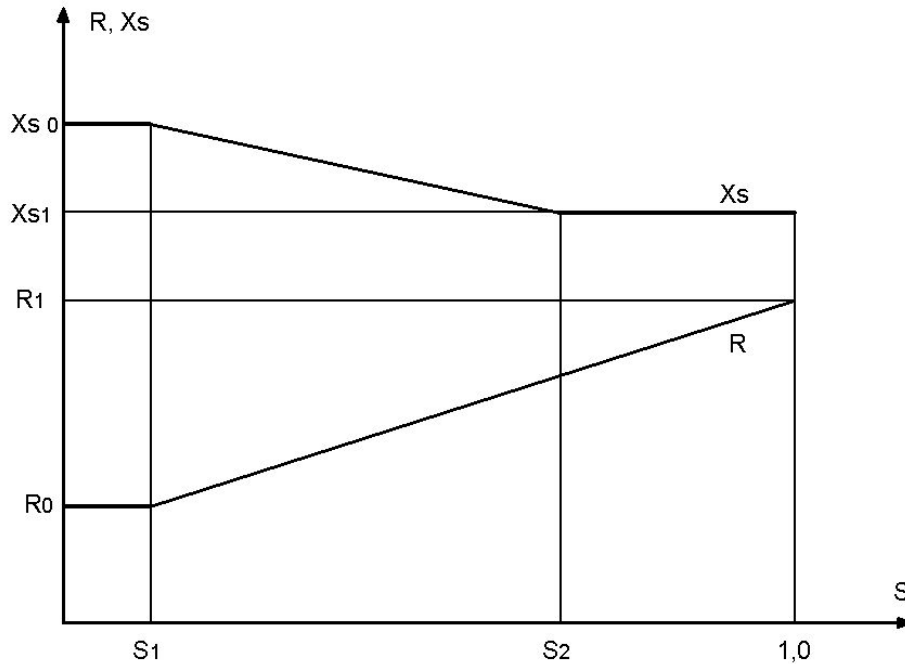


Рис.3. Кусочно-линейные зависимости $R(s)$, $X_s(s)$

Известно [1,2], что сопротивления X_s и R схемы замещения зависят от режима работы электродвигателя. При увеличении sW_C усиливается эффект вытеснения тока из проводников ротора, что приводит к возрастанию активного сопротивления. Индуктивное сопротивление рассеяния, напротив, убывает вследствие вытеснения магнитного потока рассеяния в воздушный зазор между ротором и статором и соответствующего уменьшения индуктивности рассеяния роторной обмотки.

Как видно из рис.2, зависимости $R(s)$ и $X_s(s)$ весьма существенны и при больших скольжениях их следует учитывать. Для упрощения расчетов производится кусочно-линейная аппроксимация этих зависимостей. При простейшей аппроксимации (рис.3) можно принимать [1]:

$$R = \begin{cases} R_0 & \text{при } s \leq s_1; \\ \frac{R_0(s_2 - s) + R_{s1}(s - s_1)}{1 - s_1} & \text{при } s > s_1; \end{cases} \quad (2)$$

$$X_S = \begin{cases} X_{S0} & \text{при } s \leq s_1; \\ \frac{X_{S0}(s_2 - s) + X_{S1}(s - s_1)}{s_2 - s_1} & \text{при } s_1 < s < s_2; \\ X_{S1} & \text{при } s \geq s_2. \end{cases} \quad (3)$$

Опорные значения скольжения s_1 и s_2 , соответствующие точкам излома кусочно-линейных зависимостей (рис.3), можно принимать из равенств:

$$s_1 = s_{KP}; \quad s_2 = 0,5 \dots 0,9,$$

где $s_{KP} = R_0/X_{S0}$ – критическое скольжение электродвигателя при номинальной частоте в системе.

Численные значения параметров R_0, R_1, X_{S0}, X_{S1} и сопротивление намагничивания X_μ в собственных относительных единицах (при номинальных базисных условиях) определяются по каталожным данным электродвигателей с помощью следующих выражений [1]:

$$X_{S0} = \frac{1}{2m_{max} \cos \varphi_{ном}}; \quad (4)$$

$$X_\mu = \frac{1}{\sin \varphi_{ном} - \frac{1 - \sqrt{1 - 4X_{S0}^2 \cos^2 \varphi_{ном}}}{2X_{S0}}}; \quad (5)$$

$$X_{S1} = \frac{X_\mu}{I_{II*} X_\mu - 1}; \quad (6)$$

$$R_0 = \frac{S_{ном}}{2 \cos \varphi_{ном}} \left(1 + \sqrt{1 - 4X_{S0}^2 \cos^2 \varphi_{ном}} \right); \quad (7)$$

$$R_1 = \frac{1 - \sqrt{1 - 4X_{S1}^2 m_{\Pi}^2 \cos^2 \varphi_{ном}}}{2m_{\Pi} \cos \varphi_{ном}}, \quad (8)$$

где $s_{ном}$ – номинальное напряжение;

$\cos \varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности;

$m_{\Pi} = M_{\Pi} / M_{ном}$ – кратность пускового момента;

$m_{max} = M_{max} / M_{ном}$ – кратность максимального момента;

$I_{\Pi^*} = I_{\Pi} / I_{ном}$ – кратность пускового тока (пусковой ток в собственных относительных единицах).

В качестве базисных величин мощности и напряжения в собственной системе относительных единиц принимается $S_{\bar{o}} = S_{ном}$ и $U_{\bar{o}} = U_{ном}$ электродвигателя.

3. Статические характеристики

Под статическими характеристиками понимаются графически или аналитически представленные связи каких-либо параметров режима с другими его параметрами и параметрами системы. Эти связи выявляются при достаточно медленных изменениях режима, позволяющих считать их не зависящими от времени [3].

Для элементарных и комплексных нагрузок наибольшее применение в расчетах находят статические характеристики активной и реактивной мощностей по частоте и напряжению. При этом, как правило, статические характеристики определяют:

$$P(U), Q(U) \quad \text{при} \quad f = const;$$

$$P(f), Q(f) \quad \text{при} \quad U = const,$$

где $f = W_C / 2\pi$ – частота в сети;

U – напряжение узла подключения нагрузки.

По статическим характеристикам асинхронного электродвигателя определяющее влияние оказывают момент сопротивления приводимого в движение механизма (механический момент $M_{мех}(W_D)$) и зависимости индуктивных сопротивлений от частоты. При учете только основных моментов, действующих на вал электродвигателя, его устано-

вившийся режим будет характеризоваться равенством электромагнитного (ускоряющего) и механического (тормозящего) моментов:

$$M_{эм}(U, W_C, s) = M_{мех}(W_D). \quad (9)$$

В соответствии с принятой Г-схемой замещения (Рис.1,в) электромагнитный момент двигателя в собственных относительных единицах имеет вид:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}^*}{W_{C^*}} = \frac{U_*^2 R s}{W_{C^*} (W_{C^*}^2 X_{S^*}^2 s^2 + R^2)}. \quad (10)$$

Величина момента сопротивления определяется выражением:

$$M_{мех} = k_3 \Theta(W_{D^*}) \cos \varphi_{ном}, \quad (11)$$

где k_3 – коэффициент загрузки;

$\Theta(W_{D^*})$ – функция, определяющая вид моментно-скоростной характеристики приводимого механизма.

Коэффициент загрузки определяется при номинальных значениях частоты и напряжения как отношение потребляемой P_0 к номинальной $P_{ном}$ активной мощности электродвигателя:

$$k_3 = P_0 / P_{ном}.$$

Моментно-скоростные характеристики реальных механизмов представляют собой сложные зависимости, однако часто их аппроксимируют с помощью двучлена вида [1]:

$$\Theta(W_{D^*}) = m_{СТ} + (1 - m_{СТ}) \left\{ \frac{W_{D^*}}{W_{Dном^*}} \right\}^p, \quad (12)$$

где $m_{СТ} = \Theta(0)$ – статический момент сопротивления;

p – некоторый коэффициент – показатель степени нелинейной части моментно-скоростной характеристики.

Ориентировочно для шаровых мельниц, дробилок, поршневых компрессоров, металлорежущих станков $m_{СТ} \approx 1$, $p \approx 0$;

для воздуходувок $m_{CT} \approx 1$, $p \approx 2$;

для центробежных насосов $m_{CT} \approx 0,3 \dots 0,7$, $p \approx 2$.

Из (1) следует

$$\begin{aligned} W_D &= W_C(1-s); \\ W_{D^*} &= W_D/W_{C_{НОМ}} = W_{C^*}(1-s). \end{aligned} \quad (13)$$

Номинальное скольжение определяется при номинальной частоте в сети, поэтому

$$\begin{aligned} W_{D_{НОМ}} &= W_{C_{НОМ}}(1-s_{НОМ}); \\ W_{D_{НОМ}^*} &= W_{D_{НОМ}}/W_{C_{НОМ}} = 1-s_{НОМ}. \end{aligned} \quad (14)$$

С учетом этих замечаний выражение момента сопротивления приводимого механизма (11) приобретает вид:

$$M_{мех^*} = k_3 \left[m_{CT} + (1-m_{CT})W_{C^*}^P \left(\frac{1-s}{1-s_{НОМ}} \right)^P \right] \cos \varphi_{НОМ}. \quad (15)$$

Соответственно, из (9,10,15) следует:

$$\frac{U_*^2 R s}{W_{C^*}^2 X_S^2 s^2 + R^2} = W_{C^*} k_3 \left[m_{CT} + (1-m_{CT})W_{C^*}^P \left(\frac{1-s}{1-s_{НОМ}} \right)^P \right] \cos \varphi_{НОМ}; \quad (16)$$

$$P_{эм^*} = \frac{U_*^2 R s}{W_{C^*}^2 X_S^2 s^2 + R^2}; \quad (17)$$

$$P_{мех^*} = W_{C^*} k_3 \left[m_{CT} + (1-m_{CT})W_{C^*}^P \left(\frac{1-s}{1-s_{НОМ}} \right)^P \right] \cos \varphi_{НОМ}. \quad (18)$$

где $P_{эм^*}$, $P_{мех^*}$ – соответственно, электромагнитная мощность и мощность приводимого механизма, выраженные в собственных относительных единицах.

Уравнение (16) полностью определяет установившиеся режимы работы электродвигателя. При заданных значениях напряжения и частоты по этому уравнению определяются скольжение и соответствующие значения электромагнитной и механической мощностей. Варьируя значениями напряжения либо частоты, по этому алгоритму можно определить точки на статических характеристиках $P(U)$ или $P(f)$.

Согласно принятой Г-схеме замещения реактивная мощность электродвигателя Q складывается из составляющих намагничивания Q_μ и рассеяния Q_S :

$$Q = Q_\mu + Q_S, \quad (19)$$

или в собственных относительных единицах:

$$Q_* = \frac{U_*^2}{W_{C^*} X_\mu} + \frac{U_*^2 W_{C^*} X_S s^2}{W_{C^*}^2 X_S^2 s^2 + R^2}. \quad (20)$$

Реактивная мощность является сопровождающей мощностью двигателя и не определяет режим его работы в целом. Поэтому при построении статических характеристик $Q(U)$, $Q(f)$ двигателя используется скольжение, определенное путем итерационного решения уравнения (16). Однако для лучшего усвоения взаимосвязи между параметрами режима двигателя более пригоден графоаналитический способ решения этого уравнения. В этом случае проводится построение на одном рисунке зависимостей (17,18) и по их пересечению определяются искомые значения скольжения и соответствующих мощностей. При вариации значений напряжения или частоты в системе таким способом можно построить статические характеристики $P_*(U_*)$, $P_*(f_*)$ и далее по выражению (20) $Q_*(U_*)$, $Q_*(f_*)$.

Важными показателями статических характеристик являются коэффициенты крутизны и регулирующие эффекты.

Коэффициентами крутизны статических характеристик называют численные значения частных производных мощностей по соответствующим параметрам в именованных или относительных единицах:

$$k_{PU} = \frac{dP}{dU}; \quad k_{Pf} = \frac{dP}{df}; \quad k_{qu} = \frac{dQ}{dU}; \quad k_{qf} = \frac{dQ}{df}. \quad (21)$$

Регулирующие эффекты определяются через эти же частные производные, выражая их в относительных единицах с той особенностью, что в качестве базисных величин принимаются значения параметров

режима P_0 , Q_0 , U_0 , f_0 в рассматриваемых точках статических характеристик:

$$H_{pu} = \frac{dP}{dU} \frac{U_0}{P_0}; \quad H_{pf} = \frac{dP}{df} \frac{f_0}{P_0};$$

$$H_{qu} = \frac{dQ}{dU} \frac{U_0}{Q_0}; \quad H_{qf} = \frac{dQ}{df} \frac{f_0}{Q_0}.$$
(22)

Понятия коэффициентов крутизны и регулирующих эффектов широко используются при решении задач устойчивости энергосистем.

4. Статическая устойчивость

При глубоком снижении напряжения питания электродвигателя может быть получен режим, когда зависимости (17,18) имеют всего одну общую точку. Дальнейшее снижение напряжения приводит к останову двигателя вследствие нарушения статической устойчивости его работы. Очевидно, что построение статической характеристики $P(U)$ для работающего двигателя возможно лишь при напряжениях, более высоких, чем предельное значение ($U > U_{np}$), так как при ($U < U_{np}$) потребляемая из сети активная мощность расходуется лишь на потери в обмотках остановленного двигателя. При расчетах статической устойчивости энергосистем эту часть статической характеристики $P(U)$ обычно не учитывают. Учитывается часть статической характеристики $Q(U)$ для остановленного электродвигателя как более существенная. В диапазоне напряжений $0 < U < U_{np}$ эту часть можно рассчитывать по (20) при скольжении $s = 1$.

Следует отметить, что нарушение статической устойчивости электродвигателя возможно также при повышении частоты в системе сверх предельного значения. Однако на практике такие случаи редки в силу жестких требований ГОСТа на отклонение частоты в энергосистемах.

Предельному по статической устойчивости режиму электродвигателя с параметрами U_{np} , f_{np} , s_{np} соответствует известное условие

$$\frac{d(P_{эм} - P_{мех})}{ds} = 0. \quad (23)$$

Критическое скольжение $s_{кр}$ соответствует максимуму зависимости $P_{эм}(s)$ и определяется из условия

$$\frac{dP_{эм}}{ds} = 0. \quad (24)$$

Критическое скольжение часто рассматривают как некоторое приближение к предельному, более удобное для анализа и расчетов.

При $P_{мех} = const$ предельное и критическое скольжения совпадают.

5. Задачи расчета и анализа

Для построения статических характеристик электродвигателя на компьютере выполняются следующие работы:

- расчет по (2...8) параметров схем замещения с учетом зависимости сопротивлений от скольжения;
- расчет по (17) серии зависимостей $P_{эм}(s)$ для заданного ряда значений напряжения при номинальной частоте;
- расчет по (17) серии зависимостей $P_{эм}(s)$ для заданного ряда значений частоты при номинальном напряжении;
- расчет по (18) серии зависимостей $P_{мех*}(s)$ для заданного ряда значений частоты.

Построение статической характеристики $P(U)$ производится по точкам пересечения кривых $P_{эм*}(s)$ с кривой $P_{мех*}(s)$ при номинальной частоте. Для построения статической характеристики $P(f)$ используются точки пересечения кривых $P_{эм*}(s)$ с соответствующими кривыми $P_{мех*}(s)$.

Статические характеристики $Q(U)$ и $Q(f)$ для работающего электродвигателя рассчитываются по (20) при скольжениях, полученных в точках пересечения зависимостей $P_{эм*}(s)$ и $P_{мех*}(s)$.

Статические характеристики $Q(U)$ и $Q(f)$ для остановленного электродвигателя рассчитываются по (20) при скольжении $s = 1$.

При анализе результатов расчета и построений для заданных точек статических характеристик определяются коэффициенты крутизны, регулирующие эффекты, предельные по статической устойчивости параметры режима. Оценивается влияние напряжения и частоты на статическую устойчивость электродвигателя.

6. Ввод исходных данных

Для расчета и построения статических характеристик в компьютер вводятся его исходные данные по списку:

- номинальная активная мощность, кВт $P_{ном}$;
- номинальное напряжение, кВ $U_{ном}$;
- номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном}$;
- номинальное скольжение $s_{ном}$;
- кратность пускового тока $I_{П*}$;
- кратность пускового момента $m_{П}$;
- кратность максимального момента m_{max} ;
- второе опорное значение напряжения скольжения s_2 ;
- статический момент сопротивления моментно-скоростной характеристики $m_{СТ}$;
- показатель степени нелинейной части моментно-скоростной характеристики p ;
- коэффициент загрузки k_3 .

Первое опорное значение скольжения s_1 вычисляется программой. Второе принимается студентом из диапазона $s_2 = 0,5 \dots 0,9$. Во всех

случаях следует принимать $p = 2$. Остальные параметры задаются по-вариантно из табл. 1, 2, 3.

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Таблица 1

Параметры	Номера вариантов					
	1	2	3	4	5	6
$P_{НОМ}, \text{кВт}$	2800	630	640	3300	5600	1600
$U_{НОМ}, \text{кВ}$	6	6	6	0,38	0,38	0,38
$\cos \varphi_{НОМ}$	0,89	0,72	0,8	0,88	0,82	0,83
$s_{НОМ}$	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04
$I_{П*}$	6,2	3,9	4,9	7,0	6,5	6,5
$m_{П}$	1,15	0,92	1,3	1,1	1,8	1,1
m_{max}	2,4	1,8	2,1	2,2	2,2	2,2

СТАТИЧЕСКИЕ МОМЕНТЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Таблица 2

Номера вар-тов	1	2	3	4	5	6
$m_{СТ}$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗАГРУЗКИ ДВИГАТЕЛЕЙ

Таблица 3

Номера вар-тов	1	2	3	4	5	6
k_3	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95

7. Результаты расчета

На печать выводятся результаты расчета зависимостей электромагнитной и механической мощностей от скольжения и распечатываются в форме табл. 4, 5.

Зависимости $P_{эм*}(s)$, $P_{мех*}(s)$ при $f = f_{ном}$

Таблица 4

Скольжение	$P_{мех*}$	$P_{эм*}(s)$ при $U/U_{ном}$						
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
0,00								
...								
0,35								

Зависимости $P_{эм*}(s)$, $P_{мех*}(s)$ при $U = U_{ном}$

Таблица 5

Скольжение	$f_* = 0,96$		$f_* = 0,98$		$f_* = 1,02$		$f_* = 1,04$	
	$P_{эм*}$	$P_{мех*}$	$P_{эм*}$	$P_{мех*}$	$P_{эм*}$	$P_{мех*}$	$P_{эм*}$	$P_{мех*}$
0,00								
...								
0,35								

8. Обработка результатов расчета

8.1. По данным табл. 4 построить зависимости $P_{мех*}(s)$, $P_{эм*}(s)$, найти точки их пересечения и построить статическую характеристику $P_*(U_*)$.

8.2. По данным табл. 5 (и табл. 4 для $f_* = 1$) построить зависимости $P_{мех*}(s)$, $P_{эм*}(s)$, найти их точки пересечения и построить статическую характеристику $P_*(f_*)$.

8.3. По значениям напряжения и скольжения в точках пересечения зависимостей из п.1 построить по выражению (20) ветвь стати-

ческой характеристики $Q'_*(U_*)$ для работающего электродвигателя. При $s = 1$ в диапазоне $0 < U_* < 0,7$ построить по (20) ветвь статической характеристики $Q''_*(U_*)$ остановленного двигателя. Определить напряжение U_{np} в точке пересечения кривой $Q''_*(U_*)$ с касательной ветви $Q'_*(U_*)$ в точке, соответствующей значению производной $dQ'_*/dU_* \rightarrow \infty$.

8.4. По статической характеристике $Q_*(U_*)$ при $U_* = 1,1$ определить коэффициент крутизны и регулирующий эффект.

8. Контрольные вопросы

- 8.1. Почему при увеличении скольжения возрастает активное и уменьшается индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки электродвигателя?
- 8.2. Какие факторы определяют вид статических характеристик активной мощности двигателя по напряжению и частоте?
- 8.3. Как определяются численные значения коэффициентов крутизны и регулирующих эффектов по статическим характеристикам электродвигателей?
- 8.4. Как влияет на статическую устойчивость двигателя понижение напряжения при постоянной частоте и понижение частоты при неизменном напряжении?
- 8.5. Какие условия принимаются в качестве критериев статической устойчивости асинхронного электродвигателя?

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич Ю.В., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины, ч.2. – М.;Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 651 с.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
1. Исследование режима трехфазного короткого замыкания в простейшей цепи.....	4
2. Исследование влияния нагрузки в начальный момент трехфазного замыкания	11
3. Распределение симметричных составляющих при несимметричных коротких замыканиях.....	19
4. Исследование статической устойчивости одномашинной энергосистемы	25
5. Построение статических характеристик и исследование статической устойчивости асинхронного электродвигателя.....	33

Учебное издание

ГОТМАН Владимир Иванович
ХРУЩЕВ Юрий Васильевич
МАСТЕРОВА Ольга Альбертовна

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учебное пособие

Редактор	<i>Р.Д. Игнатова</i>
Верстка	<i>О.А. Мастерова</i>
Дизайн обложки	<i>Т.А. Фатеева</i>

Подписано к печати 03.12.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл.печ.л. 2,79. Уч.-изд.л. 2,53.

Заказ . Тираж 50 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

