

Министерство образования и науки Российской Федерации
Вологодский государственный университет
Кафедра электроснабжения

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ по дисциплине

Переходные процессы в электроэнергетических системах

Факультет электроэнергетический
Направления 13.03.02, 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Вологда
2014

Анализ режимов короткого замыкания: лабораторный практикум по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах». – Вологда: ВоГУ, 2014. – 48 с.

В лабораторном практикуме рассматриваются методики подготовки исходных данных для моделирования и анализа режимов короткого замыкания в электроэнергетических системах. В приложениях даны справочные материалы, необходимые для выполнения лабораторных работ.

Для студентов электроэнергетического факультета, обучающихся по направлениям 13.03.02, 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника», выполняющих работы по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах».

Утверждено редакционно-издательским советом ВоГУ

Составители: А.Н. Алюнов, канд. техн. наук, доцент

В.А. Бабарушкин, канд. техн. наук, доцент

О.С. Вяткина, канд. техн. наук, доцент

Рецензент: В.В. Реутов, канд. техн. наук, доцент

ВВЕДЕНИЕ

Материал лабораторного практикума содержит методические указания по подготовке данных для расчета и анализа режимов короткого замыкания в

электроэнергетических системах, примеры составления схем замещения системы, а также список контрольных вопросов для самопроверки. Контрольные вопросы могут быть также применены для тестов, используемых при диагностике компетенций студентов по изучаемой дисциплине. В приложениях приведены справочные материалы, необходимые для определения параметров схем замещения элементов системы. Список литературы содержит основные учебные пособия, нормативные издания, которые могут быть использованы для углубленного изучения разделов дисциплины.

В описании каждой лабораторной работы содержатся цель и содержание работы, краткий теоретический материал, сформулированы задания на подготовительную работу, приведены порядок выполнения, методические указания по подготовке исходных данных и оформлению отчета.

Целью первой лабораторной работы является изучение математической модели, методики подготовки исходных данных для расчета и анализа режима трехфазного короткого замыкания. В процессе выполнения работы определяются параметры режима в именованных или относительных единицах.

Вторая лабораторная работа предусматривает изучение математических моделей и алгоритмов расчета токов несимметричных коротких замыканий. В процессе работы определяются параметры режимов однофазного, двухфазного и двухфазного на землю коротких замыканий в именованных или относительных единицах.

В третьей работе изучается методика определения фазных значений тока, напряжения и мощности по известным симметричным составляющим тока и напряжения. Результатом выполнения работы является приобретение навыков построения векторных диаграмм тока, напряжения и мощности и использования их при анализе режимов.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Лабораторная работа №1

1.1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью работы является изучение математической модели, алгоритма расчета токов трехфазного короткого замыкания в схеме электроэнергетической системы произвольной конфигурации и методики подготовки исходных данных для определения параметров режима. В процессе выполнения лабораторной работы определяются начальное значение периодической слагающей тока и ударный ток в месте повреждения, а также остаточные напряжения в узлах и распределение периодической слагающей тока по ветвям схемы. При выполнении работы параметры аварийного режима находятся двумя способами: в системе именованных единиц и в системе относительных единиц.

1.2. УРАВНЕНИЯ РЕЖИМА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Для расчета токов трехфазного короткого замыкания в схеме произвольной конфигурации целесообразно применить метод узловых напряжений. Уравнения узловых напряжений записывают для исходного и аварийного режимов рассматриваемой системы (принцип наложения двух режимов). Задается расчетная схема электроэнергетической системы. По расчетной схеме составляется схема замещения системы. Линии и трансформаторы представляются пассивными ветвями с комплексными сопротивлениями, источники электроэнергии и нагрузки потребителей – активными ветвями с электродвижущими силами (ЭДС), включенными за комплексными сопротивлениями. Пример расчетной схемы электроэнергетической системы и её схемы замещения приведен в приложении 1 на рис. 1.1, 1.2. В исходной схеме замещения системы активные ветви с сопротивлениями и ЭДС заменяются пассивными ветвями с теми же сопротивлениями и эквивалентными источниками тока (рис.1.1).

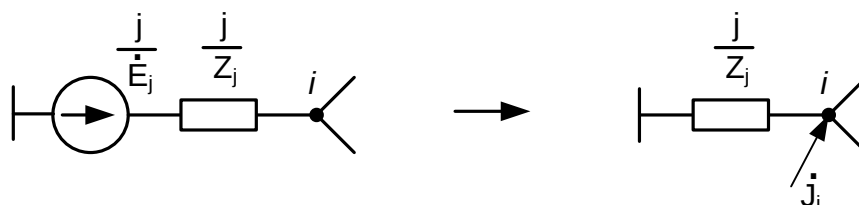


Рис. 1.1 – Замена активной ветви пассивной ветвью

Значение тока эквивалентного источника определяется выражением

$$\dot{J}_i = \frac{\dot{E}_j}{Z_j}, \quad (1.1)$$

где $\dot{E}_j$ - комплексная ЭДС ветви j , подключенной к узлу i ; Z_j - комплексное сопротивление ветви j ; i – номер узла, к которому подключена активная ветвь.

До возникновения короткого замыкания режим системы можно описать уравнениями узловых напряжений.

$$\mathbf{Y}_y \dot{\mathbf{U}} = \mathbf{J}, \quad (1.2)$$

где $\mathbf{Y}_y$ – матрица узловых проводимостей; $\dot{\mathbf{U}}$ - матрица напряжений узлов в исходном режиме системы; $\mathbf{J}$ - матрица узловых (задающих) токов.

Если за базисный узел выбрать узел нулевого потенциала, то решение этих уравнений методом обратной матрицы дает в явном виде формулу для определения напряжения в узлах схемы в исходном доаварийном режиме

$$\dot{\mathbf{U}} = \mathbf{Z}_y \mathbf{J}, \quad (1.3)$$

где $\mathbf{Z}_y$ - матрица узловых сопротивлений.

Матрица узловых сопротивлений может быть найдена обращением матрицы узловых проводимостей, составляемой по схеме замещения системы.

Для узлов подключения ЭДС J_i равен току эквивалентного источника, для остальных узлов схемы – равен нулю.

При возникновении трехфазного короткого замыкания в узле k схемы системы напряжение в этом узле $\dot{U}_k = 0$. В узле k появляется дополнительный узловой ток с направлением от узла и равный току в месте повреждения I_k . Режим системы при трехфазном коротком замыкании в узле k схемы по аналогии с (1.2) можно описать системой линейных алгебраических уравнений:

$$\dot{\mathbf{U}}_{\text{ост}} = \dot{\mathbf{U}} - \|\mathbf{Z}_{ik} I_k\|, \quad (1.4)$$

где $\dot{\mathbf{U}}_{\text{ост}}$ – матрица остаточных напряжений в узлах; $\mathbf{Z}_{ik}$ – взаимное сопротивление i - го и k - го узлов; $i=1, 2, \dots, n$; n – число независимых узлов.

Так как в узле k остаточное напряжение при металлическом трехфазном коротком замыкании равно нулю, то из последнего выражения следует, что

$$I_k = \frac{\dot{U}_k}{Z_{kk}}, \quad (1.5)$$

где $\dot{U}_k$ – напряжение в узле k в исходном режиме, предшествующем короткому замыканию; Z_{kk} – собственное сопротивление k -го узла.

Зная остаточные напряжения в узлах схемы, находят токи в ветвях в режиме короткого замыкания:

токи в пассивных ветвях

$$I_{ij} = (U_i - U_j) Y_{ij}, \quad (1.6)$$

где Y_{ij} – проводимость ветви, включенной между узлами i и j ;
ток, создаваемый источником

$$I_{0i} = (E_i - U_i) Y_{0i}, \quad (1.7)$$

где Y_{0i} – проводимость активной ветви, включенной между узлами 0 и i .

Данный подход реализован в учебной программе расчета токов трехфазного короткого замыкания (программа tk3).

1.3. ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВИТЕЛЬНУЮ РАБОТУ

1. Для заданного варианта схемы электрической системы составить ее схему замещения.
2. Подготовить каталожные данные элементов системы для определения параметров схемы замещения.
3. Ознакомиться с расчетными выражениями для определения параметров схем замещения в именованных и относительных единицах.
4. Ответить на контрольные вопросы, содержащиеся в описании работы.

1.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Определить параметры схемы замещения для заданного варианта электрической системы в относительных и именованных единицах.
2. Создать файл исходных данных для расчета токов трехфазного короткого замыкания, используя программу vtk.
3. Выполнить расчет режима трехфазного короткого замыкания, используя программу tk3, сначала в относительных, а затем в именованных единицах.
4. Вывести на печать таблицы результатов расчета и исходных данных.
5. Изобразить на диаграмме векторы токов и остаточных напряжений для одного из режимов короткого замыкания.
6. Определить значения действительных токов и остаточных напряжений, сравнить их значения, полученные при расчетах в относительных и в именованных единицах.
7. Исследовать влияние активных сопротивлений элементов схемы замещения на параметры режима короткого замыкания.
8. Выполнить анализ полученных результатов.

1.5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Пример схемы электроэнергетической системы дан в приложении 1.

В схеме замещения системы должны быть представлены все элементы расчетной схемы. Генераторы, синхронные компенсаторы, электродвигатели и обобщенные нагрузки узлов должны быть введены в схему замещения сверхпереходными ЭДС и сверхпереходными комплексными сопротивлениями. Все остальные элементы исходной расчетной схемы должны быть представлены в схеме замещения комплексными сопротивлениями прямой последовательности. Трехобмоточные трансформаторы, автотрансформаторы и трансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения, а также сдвоенные реакторы

должны быть представлены своими схемами замещения. Эти схемы, а также расчетные выражения для определения их параметров приведены в приложении 2. Исходные данные для определения параметров схемы замещения содержатся в [3], [5], а также приведены в приложениях 4-9. Потери мощности в стали трансформаторов и зарядные мощности линий номинальным напряжением до 220 кВ не учитывают.

Допустимо принять, что до короткого замыкания генераторы, синхронные компенсаторы и электродвигатели работали в номинальном режиме. Следовательно, значения тока и напряжения этих элементов расчетной схемы в относительных единицах при номинальных условиях равны единице (при определении ЭДС).

Сопротивления ветвей и электродвижущие силы приводятся к одной ступени напряжения, принятой за основную ступень, или выражаются в относительных единицах.

При определении параметров схемы замещения электроэнергетической системы в именованных единицах необходимо выбрать основную ступень напряжения. Приведенные к основной ступени напряжения значения ЭДС источников электроэнергии, токи и сопротивления элементов схемы, отделенных от основной ступени напряжения каскадно включенными трансформаторами с коэффициентами трансформации $n_1, n_2, \dots, n_m$, следует определять по формулам [1], [2]:

$$\overset{\circ}{E} = E n_1 n_2 \dots n_m; \quad (1.8)$$

$$\overset{\circ}{I} = I \frac{1}{n_1 n_2 \dots n_m}; \quad (1.9)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2, \quad (1.10)$$

где E , I и Z – действительные значения ЭДС источника энергии, тока и сопротивления элемента исходной расчетной схемы; $\overset{\circ}{E}$, $\overset{\circ}{I}$ и $\overset{\circ}{Z}$ – их приведенные значения.

Коэффициенты трансформации трансформаторов и автотрансформаторов определяются как отношение номинального напряжения обмотки, обращенной в сторону выбранной основной ступени напряжения к номинальному напряжению другой обмотки.

Если ЭДС источника энергии и сопротивление какого-либо элемента расчетной схемы выражено в относительных единицах при номинальных условиях (т.е. ЭДС при номинальном напряжении $U_{ном}$, а сопротивление при номинальном напряжении и номинальной мощности $S_{ном}$), то значения соответствующей ЭДС и сопротивления, приведенные к основной ступени напряжения сети, следует определять по формулам [1], [2]:

$$\overset{\circ}{E} = E_{* (H)} U_{НОМ} n_1 n_2 \dots n_m, \quad (1.11)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z_{* (H)} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2, \quad (1.12)$$

где $E_{* (H)}$ и $Z_{* (H)}$ – значения ЭДС и сопротивления элемента расчетной схемы в

относительных единицах при номинальных условиях.

Формулы приложения 2 справедливы для расчета параметров элементов, расположенных на основной ступени напряжения. Если элементы находятся не на основной ступени напряжения, то при использовании формул приложения 2 следует учитывать коэффициенты трансформации трансформаторов в соответствии с соотношениями (1.8)-(1.12).

При определении параметров элементов схемы замещения в относительных единицах с приведением параметров различных элементов исходной расчетной схемы к базисным условиям необходимо:

1) задаться базисной мощностью S_B и для одной из ступеней напряжения расчетной схемы, принимаемой за основную, выбрать базисное напряжение $U_{Б.ОСН}$. В качестве базисной мощности выбирается полная трехфазная мощность в $МВ \cdot А$. В качестве базисного напряжения основной ступени обычно принимается линейное номинальное напряжение этой ступени;

2) определить базисное напряжение других ступеней напряжения расчетной схемы U_{Bi} , используя формулу [1], [2]

$$U_{Bi} = U_{Б.ОСН} \frac{1}{n_1 n_2 \dots n_m}, \quad (1.13)$$

где i – номер ступени напряжения;

3) найти искомое значение ЭДС источников энергии и сопротивлений всех элементов схемы замещения в относительных единицах при выбранных базисных условиях, используя формулы [1], [3]

$$E_{* (B)} = \frac{E}{U_{Bi}} \quad (1.14)$$

или

$$E_{* (B)} = E_{* (H)} \frac{U_{НОМi}}{U_{Bi}}; \quad (1.15)$$

$$Z_{* (B)} = Z \frac{S_B}{U_{Bi}^2} \quad (1.16)$$

или

$$Z_{* (Б)} = Z_{* (Н)} \frac{S_{Б}}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМi}}{U_{Bi}} \right)^2, \quad (1.17)$$

где $E_{* (Б)}$ – значение ЭДС в относительных единицах при произвольных базисных условиях; $Z_{* (Б)}$ – значение сопротивления в относительных единицах при произвольных базисных условиях; $U_{НОМi}$ – номинальное напряжение i -й ступени напряжения, на которой находится элемент, параметры которого подлежат приведению.

Формулы (1.14) и (1.16) следует использовать в тех случаях, когда значения ЭДС источника энергии и приводимое сопротивление заданы в именованных единицах, а формулы (1.15) и (1.17) – когда значения этих величин заданы в относительных единицах при номинальных условиях.

При определении параметров схем замещения системы и обобщенной нагрузки используется среднее напряжение согласно принятому в нашей стране ряду средних номинальных напряжений: 0,23; 0,4; 0,525; 0,69; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770 кВ.

Узлы схемы замещения системы обозначаются номерами $i=1, 2, \dots, n$ (включая номера средних точек схем замещения трехобмоточного трансформатора, автотрансформатора или сдвоенного реактора). Узлу нулевого потенциала присваивается номер 0. Ветви схемы замещения также обозначаются номерами $j=1, 2, \dots, m$. Схема замещения электрической системы, расчетная схема которой дана на рис.1.1, приведена на рис.1.2 (см. приложение 1).

Программа формирования файла данных вызывается командой `vtk`. Для работы программы необходимо ввести следующую информацию об электрической системе: признак варианта расчета; количество независимых узлов и количество ветвей схемы замещения; номера узлов начала и конца каждой ветви, действительную и мнимую части ее комплексного сопротивления и комплексной электродвижущей силы (если в ветви отсутствует ЭДС, то ее вещественная и мнимая части принимаются равными нулю); номера узлов, в которых рассматривается короткое замыкание. После выполнения программы данные помещаются в файл `dtk3`.

Программа расчета токов трехфазного короткого замыкания вызывается командой `tk3`. После выполнения программы данные помещаются в файл `gtk3`, который после проверки может быть выведен на печать.

Сравнительный анализ расчетов токов короткого замыкания и остаточных напряжений в относительных и именованных единицах выполнить, соответственно, по форме табл. 1.1 и табл. 1.2.

Таблица 1.1

Сравнительный анализ расчетов токов короткого замыкания

Элемент схемы	Обознач.	Результаты расчета				Расхождение результатов, %
		в системе относительных единиц		в системе именованных единиц		
		Ток, отн. ед.	Действительный ток $I_{Д(отн)}$, кА	Приведенный ток, кА	Действительный ток $I_{Д(им)}$, кА	
Генератор	G1					
Трансформатор двухобмоточный	T1					
обмотка ВН	-					
обмотка НН	-					
Трансформатор трехобмоточный	T3					
обмотка ВН	-					
обмотка СН	-					
обмотка НН	-					
Линия	W1					
Реактор	LR					
Нагрузка	H1					
...						
Место КЗ	K1					
периодическая слагающая тока	I					
ударный ток	i_v					

В системе относительных единиц действительный ток определяется умножением относительного значения тока на базисный ток соответствующей ступени напряжения.

В системе именованных единиц действительный ток определяется в соответствии с формулой (1.9).

Расхождение результатов при определении тока определяется по формуле

$$\Delta I = \frac{I_{Д(отн)} - I_{Д(им)}}{I_{Д(им)}} 100\%$$

Таблица 1.2

Сравнительный анализ расчетов остаточных напряжений

Номер узла	Результаты расчета				Расхождение результатов, %
	в системе относительных единиц		в системе именованных единиц		
	Напряжение, отн.ед.	Действительное напряжение $U_{Д(отн)}$, кВ	Приведенное напряжение, кВ	Действительное напряжение $U_{Д(им)}$, кВ	
1					
2					
...					
N					

В системе относительных единиц действительное напряжение определяется умножением относительного значения напряжения на базисное напряжение соответствующей ступени напряжения.

В системе именованных единиц действительное напряжение определяется в соответствии с формулой (1.8), заменив в ней ЭДС на напряжение.

Расхождение результатов при определении напряжения определяется по формуле

$$\Delta U = \frac{U_{\text{Д(отн)}} - U_{\text{Д(им)}}}{U_{\text{Д(им)}}} 100\%$$

В случае расхождения параметров, определяемых в относительных и именованных единицах, следует объяснить причины этих расхождений.

Рекомендуемые форма и содержание отчета приведены в приложении 10.

1.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как выбираются базисные условия для различных ступеней напряжения электрической системы?
2. Каким выражением определяется периодическая составляющая начального тока короткого замыкания в месте повреждения?
3. Как вводятся в схему замещения электрической системы источники энергии, электродвигатели и обобщенные нагрузки?
4. Как представляются в схеме замещения электрической системы линии электропередачи, трансформаторы и реакторы?
5. В каких системах единиц могут определяться параметры схемы замещения электрической системы?
6. Как определяется коэффициент трансформации трансформатора при определении базисных напряжений и приведении ЭДС и сопротивлений к основной ступени?
7. Какие технические характеристики асинхронного электродвигателя необходимы для определения его сверхпереходного сопротивления?
8. Какой параметр характеризует полное сопротивление трансформатора?
9. Какую ступень напряжения системы целесообразно принимать за основную?
10. Значения каких параметров синхронной машины можно использовать для определения активного сопротивления обмотки статора?
11. Как определяется периодическая слагающая тока в начальный момент трехфазного короткого замыкания в месте повреждения в схеме произвольной конфигурации?
12. При каком условии расчет периодической слагающей тока короткого замыкания можно вести без учета влияния активного сопротивления элементов расчетной схемы?
13. Каким напряжениям в электрической системе (то есть между какими её точками) соответствуют напряжения в схеме замещения относительно её точки нулевого потенциала?

14. Как определить действительные токи и напряжения в электрической системе, имея токи и напряжения в её схеме замещения, составленной в относительных единицах?
15. То же, что в предыдущем вопросе, только для случая, когда схема замещения составлена в именованных единицах.
16. Как следует вводить в схему замещения системы генераторы при расчёте начального момента короткого замыкания?
17. Как следует вводить в схему замещения системы обобщенную нагрузку при расчете начального момента короткого замыкания?
18. В каком случае ЭДС генератора больше: при активной нагрузке или при такой же по величине, но реактивной нагрузке?
19. Почему схемы замещения электрической системы при расчете коротких замыканий составляют для одной фазы?
20. Каковы численные значения сопротивления и ЭДС нагрузки промышленного характера могут быть приняты в схеме прямой последовательности для начального момента короткого замыкания?

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ НЕСИММЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Лабораторная работа №2

2.1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью работы является изучение математических моделей и алгоритмов расчета токов несимметричных коротких замыканий в схеме электроэнергетической системы произвольной конфигурации. В процессе выполнения лабораторной работы определяются начальные значения симметричных составляющих тока и напряжения в месте повреждения и их фазные значения, а также симметричные составляющие остаточных напряжений в узлах и распределение симметричных составляющих тока по ветвям схемы. При выполнении работы параметры аварийного режима находятся в системе именованных или в системе относительных единиц.

2.2. УРАВНЕНИЯ РЕЖИМА НЕСИММЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Для исследований режимов несимметричных коротких замыканий применяют метод симметричных составляющих, идея которого состоит в том, что любой несимметричный режим линейной системы может быть получен наложением симметричных составляющих режимов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Расчеты несимметричных режимов можно проводить при задании в узлах, где включены источники, комплексных ЭДС прямой последовательности, определяемых из предшествующего нормального симметричного

режима. Параметры несимметричного режима находятся совместным решением уравнений узловых напряжений, составляемых для схем прямой, обратной и нулевой последовательностей. Эти уравнения связаны в единую систему соотношениями между токами и напряжениями различных последовательностей, которые определяются уравнениями граничных условий в месте повреждения при конкретном виде несимметричного короткого замыкания.

Уравнения граничных условий в месте повреждения имеют вид: при двухфазном коротком замыкании фаз В и С

$$\dot{I}_A = 0; \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0; \dot{U}_B = \dot{U}_C; \quad (2.1)$$

при двухфазном коротком замыкании на землю фаз В и С

$$\dot{I}_A = 0; \dot{U}_B = 0; \dot{U}_C = 0; \quad (2.2)$$

при однофазном коротком замыкании фазы А

$$\dot{I}_A = 0; \dot{I}_B = 0; \dot{I}_C = 0; \dot{U}_A = 0, \quad (2.3)$$

где $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – фазные токи в месте повреждения; $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – фазные напряжения в месте повреждения.

В соответствии с методом симметричных составляющих

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{1A} + \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}, \\ \dot{I}_B &= a^2 \dot{I}_{1A} + a \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}, \\ \dot{I}_C &= a \dot{I}_{1A} + a^2 \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}; \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{1A} + \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}, \\ \dot{U}_B &= a^2 \dot{U}_{1A} + a \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}, \\ \dot{U}_C &= a \dot{U}_{1A} + a^2 \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где $\dot{I}_{1A}, \dot{I}_{2A}, \dot{I}_{0A}$ – симметричные составляющие тока фазы А в месте повреждения; $\dot{U}_{1A}, \dot{U}_{2A}, \dot{U}_{0A}$ – симметричные составляющие напряжения фазы А в месте повреждения; $a=e^{j120^\circ}$ – оператор поворота.

В аварийном режиме каждая из последовательностей описывается самостоятельной системой уравнений узловых напряжений, решение которых относительно симметричных составляющих напряжений в узлах имеет вид:

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U} - \mathbf{Z}_1 \mathbf{J}_1; \quad (2.6)$$

$$\dot{U}_2 = -Z_2 \dot{J}_2; \quad (2.7)$$

$$\dot{U}_0 = -Z_0 \dot{J}_0, \quad (2.8)$$

где $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$ – матрицы напряжений в узлах прямой, обратной и нулевой последовательностей; Z_1, Z_2, Z_0 – матрицы узловых сопротивлений, определяемые по схемам замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей; $\dot{J}_1, \dot{J}_2, \dot{J}_0$ – матрицы узловых (задающих) токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Матрицы узловых сопротивлений Z_1, Z_2, Z_0 рассчитываются путем обращения матриц узловых проводимостей. Взаимная индукция линий в схеме нулевой последовательности может быть учтена эквивалентными схемами замещения.

В матрицах $\dot{J}_1, \dot{J}_2, \dot{J}_0$ не равны нулю токи узла, в котором произошло короткое замыкание. Через этот узел осуществляется связь между схемами прямой, обратной и нулевой последовательностей.

При коротком замыкании в узле k напряжение в этом узле в схеме каждой из последовательностей находят из уравнений (2.6), (2.7) и (2.8):

$$\dot{U}_{1k} = \dot{U}_k - Z_{1kk} \dot{I}_{1A}; \quad (2.9)$$

$$\dot{U}_{2k} = -Z_{2kk} \dot{I}_{2A}; \quad (2.10)$$

$$\dot{U}_{0k} = -Z_{0kk} \dot{I}_{0A}, \quad (2.11)$$

где $\dot{U}_k$ – напряжение в узле k в исходном доаварийном режиме; $Z_{1kk}, Z_{2kk}, Z_{0kk}$ – собственные сопротивления узла k прямой, обратной и нулевой последовательностей; $\dot{I}_{1A}, \dot{I}_{2A}, \dot{I}_{0A}$ – симметричные составляющие тока фазы A в месте повреждения.

Совместное решение уравнений (2.1), (2.2) или (2.3) с уравнениями (2.4), (2.5), (2.9), (2.10) и (2.11) дает формулы для определения симметричных составляющих тока в месте повреждения:

при двухфазном коротком замыкании фаз B и C

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1A} &= \frac{\dot{U}_k}{Z_{1kk} + Z_{2kk}}; \\ \dot{I}_{2A} &= -\dot{I}_{1A}; \\ \dot{I}_{0A} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

при двухфазном коротком замыкании на землю фаз B и C

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1A} &= \frac{\dot{U}_k}{Z_{1kk} + Z_{2kk} Z_{0kk} / (Z_{2kk} + Z_{0kk})}; \\ \dot{I}_{2A} &= -\frac{Z_{0kk}}{Z_{2kk} + Z_{0kk}} \dot{I}_{1A}; \\ \dot{I}_{0A} &= -\frac{Z_{2kk}}{Z_{2kk} + Z_{0kk}} \dot{I}_{1A}; \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

при однофазном коротком замыкании фазы А

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1A} &= \frac{\dot{U}_k}{Z_{1kk} + Z_{2kk} + Z_{0kk}}; \\ \dot{I}_{2A} &= \dot{I}_{1A}; \\ \dot{I}_{0A} &= \dot{I}_{1A}. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Фазные значения тока и напряжения в месте повреждения по известным симметричным составляющим находят по уравнениям (2.4), (2.5). Симметричные составляющие остаточных напряжений узлов схемы при коротком замыкании в узле k определяются по уравнениям (2.6), (2.7) и (2.8).

Расчет токов ветвей каждой из последовательностей выполняется по остаточным напряжениям и сопротивлениям ветвей этой последовательности в соответствии с законом Ома.

Фазные значения токов в ветвях и остаточные напряжения в узлах при коротком замыкании в узле k находят по выражениям, аналогичным (2.4) и (2.5).

Данный подход реализован в учебных программах расчета токов несимметричных коротких замыканий в схеме электрической системы (программы tk1, tk2 и tk21).

2.3. ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВИТЕЛЬНУЮ РАБОТУ

1. Для заданного варианта схемы электрической системы составить ее схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.
2. Подготовить каталожные данные элементов системы для определения параметров схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.
3. Ознакомиться с расчетными выражениями для определения параметров схем замещения в именованных и относительных единицах.
4. Ответить на контрольные вопросы, содержащиеся в описании работы.

2.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Определить параметры схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей для заданного варианта электроэнергетической системы в относительных или именованных единицах.
2. Создать файлы исходных данных для расчета токов двухфазного, однофазного и двухфазного на землю коротких замыканий, используя программу vtk.

3. Выполнить расчет режимов двухфазного, однофазного и двухфазного на землю коротких замыканий в узле k в относительных или в именованных единицах, используя соответственно программы tk2, tk1, tk21.
4. Вывести на печать таблицы результатов расчета.
5. Изобразить на диаграмме векторы симметричных составляющих токов и напряжений.
6. Определить фазные значения токов и остаточных напряжений путем графического сложения векторов симметричных составляющих.
7. Сравнить фазные значения токов и остаточных напряжений, полученных расчетным и графическим путем.
8. Определить фазные значения действительных токов и остаточных напряжений.
9. Выполнить анализ полученных результатов.

2.5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Расчет любого несимметричного режима начинают с составления схем замещения всех трех последовательностей. Исходные данные для определения параметров схем замещения содержатся в [3], [5], а также приведены в приложениях 4-9.

Схема прямой последовательности содержит электродвижущие силы генераторов, синхронных компенсаторов, электродвигателей и обобщенных нагрузок узлов. Токи прямой последовательности обусловлены действием этих ЭДС и напряжения прямой последовательности, приложенного в месте повреждения. Для расчета двухфазного короткого замыкания кроме схемы замещения прямой последовательности необходимо составить схему замещения обратной последовательности, а для расчета однофазного и двухфазного короткого замыкания на землю – также схему замещения нулевой последовательности.

Схема замещения обратной последовательности по конфигурации аналогична схеме замещения прямой последовательности, т.е. в ней должны быть представлены все элементы расчетной схемы. При этом электрические машины с вращающимся ротором, обобщенные нагрузки и система должны быть учтены соответствующими сопротивлениями обратной последовательности, а их ЭДС приняты равными нулю. Токи обратной последовательности обусловлены действием источника напряжения, включенного в месте повреждения. Индуктивное сопротивление обратной последовательности синхронных машин принимается по каталожным данным или приближенно исходя из соотношений:

для неявнополюсных машин

$$x_2 \approx 1,22x_d'' ;$$

для явнополюсных машин

$$x_2 \approx 1,45x_d'' .$$

Сопротивления обратной последовательности асинхронных двигателей допустимо принимать численно равными их пусковым сопротивлениям. Сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки в относительных единицах, отнесенное к полной мощности и среднему номинальному

напряжению той ступени напряжения сети, где эта нагрузка присоединена, следует принимать равным:

относительно узлов сети 6...10 кВ $Z_2=0,18+j0,24$;

относительно узлов 35 кВ и выше $Z_2=0,19+j0,36$.

Полное сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки обычно заменяют эквивалентной реактивностью, значения которой в относительных единицах принимают следующими:

относительно узлов сети 6...10 кВ $X_2=0,35$;

относительно узлов 35 кВ и выше $X_2=0,45$.

Сопротивления обратной последовательности трансформаторов, автотрансформаторов, линий и реакторов принимают равными их сопротивлениям прямой последовательности.

Схема замещения нулевой последовательности соответствует путям замыкания токов нулевой последовательности и также не содержит ЭДС. Ее конфигурация определяется положением расчетной точки короткого замыкания и схемами соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов исходной расчетной схемы. Для циркуляции токов нулевой последовательности на данной ступени напряжения должно быть не менее двух соединений с землей.

Для составления схемы замещения нулевой последовательности предварительно следует выявить возможные пути циркуляции токов нулевой последовательности на каждой ступени напряжения, начиная от точки короткого замыкания. Токи нулевой последовательности обусловлены действием источника напряжения, включенного в месте повреждения.

Схемы замещения нулевой последовательности трансформаторов зависят от схем соединения обмоток, а значения параметров зависят от конструктивного исполнения трансформаторов. Возможные схемы соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов и их схемы замещения нулевой последовательности приведены в [2], [4]. Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со стороны обмотки с заземленной нейтралью, имеющих хотя бы одну обмотку, соединенную в треугольник, допустимо принимать равными сопротивлениям прямой последовательности.

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности воздушных одноцепных линий приближенно можно принять $X_{0W} = kX_{1W}$, активное сопротивление нулевой последовательности линий $R_{0W} = R_{1W} + 0,15$ Ом. Здесь X_{1W} – индуктивное сопротивление прямой последовательности воздушных одноцепных линий; R_{1W} – активное сопротивление прямой последовательности провода линии; k – коэффициент, зависящий от наличия заземляющего троса и его материала, принимаемый по табл. 2.1 [4].

Таблица 2.1

Средние значения отношения X_0/X_1 для воздушных линий электропередачи

Характеристика линии	k
Одноцепная линия без заземленных тросов	3,5
То же, со стальными заземленными тросами	3,0
То же, с заземленными тросами из хорошо проводящих материалов	2,0
Двухцепная линия без заземленных тросов	5,5
То же, со стальными заземленными тросами	4,7
То же, с заземленными тросами из хорошо проводящих материалов	3,0

Сопротивление нулевой последовательности кабелей зависит от характера их прокладки, наличия или отсутствия проводящей оболочки, заземлений проводящей оболочки (если она имеется) и других факторов. При приближенных расчетах токов несимметричных КЗ допустимо принимать по [4]

$$X_0 = (3.5 \div 4.5)X_1 \text{ и } R_0 = 10R_1.$$

После выполнения расчетов необходимо схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей изобразить графически. Примеры схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей для варианта расчетной схемы приложения 1 (см. рис.1.1) приведены в приложении 3.

Сравнительный анализ токов короткого замыкания и остаточных напряжений, полученных расчетным и графическим путем в несимметричном режиме, выполнить по форме табл. 2.2.

Таблица 2.2

Сравнительный анализ токов короткого замыкания и остаточных напряжений

Параметр фазы	Приведенное значение параметра, полученное расчетом	Приведенное значение параметра, полученное графически	Расхождение результатов, %
I_A, A I_B, A I_C, A			
U_A, kV U_B, kV U_C, kV			

Рекомендуемые форма и содержание отчета приведены в приложении 10.

2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем идея основных положений метода симметричных составляющих?
2. К чему сводится расчет несимметричных режимов по методу симметричных составляющих?
3. Как составляются схемы замещения различных последовательностей по расчетной схеме электрической системы при несимметричных коротких замыканиях?

4. Каковы особенности составления схемы замещения нулевой последовательности электрической системы?
5. Что такое симметричная трехфазная система ЭДС, напряжений или токов прямой последовательности? Обратной последовательности? Нулевой последовательности?
6. Как следует представлять место короткого замыкания в схеме прямой последовательности при трехфазном коротком замыкании? При несимметричном коротком замыкании?
7. Как следует представлять место короткого замыкания в схеме обратной последовательности? Нулевой последовательности?
8. Чем отличается схема прямой последовательности для несимметричного короткого замыкания от схемы замещения для трехфазного короткого замыкания?
9. Чем отличается схема обратной последовательности от схемы прямой последовательности?
10. Под действием какой ЭДС протекают токи обратной последовательности? Нулевой последовательности?
11. В каких сетях могут протекать токи нулевой последовательности?
12. Куда должна быть присоединена в схеме нулевой последовательности точка, соответствующая выводам соединенной в треугольник обмотки трансформатора? И почему так?
13. Каково соотношение между фазным током и током прямой последовательности в месте короткого замыкания при двухфазном коротком замыкании? При однофазном коротком замыкании? При двухфазном коротком замыкании на землю?
14. Как изменяется при несимметричном коротком замыкании по мере удаления от места повреждения величина напряжения прямой последовательности? Напряжения обратной последовательности? Напряжения нулевой последовательности?
15. В каких местах электрической системы при коротких замыканиях протекают лишь токи нулевой последовательности, а токи прямой и обратной последовательностей не протекают?
16. Какова величина сопротивления для токов нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ в случаях, когда система напряжений нулевой последовательности приложена к трансформатору:
 - а) со стороны обмотки, соединенной в треугольник;
 - б) со стороны обмотки, соединенной в звезду, нейтраль этой обмотки не заземлена;
 - в) со стороны обмотки, соединенной в звезду, нейтраль этой обмотки заземлена?
17. Как вводится в схему замещения при расчете несимметричных коротких замыканий сопротивление, включенное в нейтраль трансформатора?
18. У каких элементов электрической системы:

- а) сопротивления всех последовательностей одинаковы?
 - б) сопротивления всех последовательностей различны?
 - в) сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы?
19. Какое значение принимают для реактивности обратной последовательности обобщенной нагрузки?

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ ПО ИЗВЕСТНЫМ СИММЕТРИЧНЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ

Лабораторная работа №3

3.1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью работы является изучение методики определения фазных значений тока, напряжения и мощности в схеме электроэнергетической системы произвольной конфигурации по известным симметричным составляющим тока и напряжения, а также методики построения векторных диаграмм с помощью ЭВМ.

3.2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МЕТОДА СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

В соответствии с методом симметричных составляющих для любой ветви схемы замещения электрической системы можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{1A} + \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}; \\ \dot{I}_B &= a^2 \dot{I}_{1A} + a \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}; \\ \dot{I}_C &= a \dot{I}_{1A} + a^2 \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Для любого узла схемы можно записать следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{1A} + \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}; \\ \dot{U}_B &= a^2 \dot{U}_{1A} + a \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}; \\ \dot{U}_C &= a \dot{U}_{1A} + a^2 \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Здесь обозначения переменных соответствуют принятым в лабораторной работе №2.

При определении фазных величин за трансформаторами нужно иметь в виду, что токи и напряжения при переходе через трансформатор изменяются не только по величине, но и по фазе в зависимости от соединения его обмоток. При переходе со стороны звезды на сторону треугольника трансформатора, об-

мотки которого соединены по группе Y/Δ-11, векторы прямой последовательности поворачиваются на угол $N \times 30^\circ$ по часовой стрелке, а векторы обратной последовательности – на такой же угол против часовой стрелки. Здесь N – номер группы. Так, например, для линейного тока $\dot{I}_A$ получим

$$\dot{I}_A = (\dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ}) k, \quad (3.3)$$

где k – коэффициент трансформации трансформатора.

В формуле (3.3) отсутствует ток нулевой последовательности, так как этот ток не выходит за пределы обмотки, соединенной в треугольник.

Зная распределение фазных токов по ветвям схемы и напряжения в каждом узле схемы можно определить фазные значения полной мощности

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_A &= \dot{U}_A \dot{I}_A^* \\ \dot{S}_B &= \dot{U}_B \dot{I}_B^* \\ \dot{S}_C &= \dot{U}_C \dot{I}_C^* \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

где $\dot{I}_A^*, \dot{I}_B^*, \dot{I}_C^*$ – сопряженные комплексы токов фаз A, B и C.

При известных симметричных составляющих тока и напряжения симметричные составляющие фазных значений мощности могут быть определены по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{1A} &= 3 \dot{U}_{1A} \dot{I}_{1A}^* \\ \dot{S}_{2A} &= 3 \dot{U}_{2A} \dot{I}_{2A}^* \\ \dot{S}_{0A} &= 3 \dot{U}_{0A} \dot{I}_{0A}^* \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

где $\dot{S}_{1A}, \dot{S}_{2A}, \dot{S}_{0A}$ – мощности прямой, обратной и нулевой последовательностей фазы A; $\dot{I}_{1A}^*, \dot{I}_{2A}^*, \dot{I}_{0A}^*$ – сопряженные комплексы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей фазы A.

В выражениях (3.4), (3.5) вещественная часть комплексов полной мощности представляет собой активную мощность, а мнимая часть – реактивную мощность.

3.3. ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВИТЕЛЬНУЮ РАБОТУ

1. Ознакомиться с основными уравнениями метода симметричных составляющих.
2. Для заданного варианта схемы электрической системы определить значения симметричных составляющих токов в ветвях и напряжений в узлах схемы.

3. Установить изменение фазовых углов токов и напряжений прямой и обратной последовательностей при переходе через трансформаторы.
4. Ответить на контрольные вопросы, содержащиеся в описании работы.

3.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Прежде всего необходимо определить действительные фазные значения тока для указанной ветви и напряжения для заданного узла. Если расчет симметричных составляющих тока и напряжения был выполнен в именованных единицах, то необходимо от приведенных значений тока и напряжения перейти к реальным величинам. Если симметричные составляющие тока и напряжения определены в относительных единицах, то относительные значения следует умножить на соответствующие базисные единицы измерения. Далее следует установить изменение фазовых углов токов и напряжений прямой и обратной последовательностей при переходе через трансформаторы.
2. Выполнить расчет фазных значений тока для указанных ветвей и напряжения для заданных узлов и построить векторные диаграммы этих величин с помощью программы *imf*.
3. Дать анализ полученных результатов.

3.5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторная работа выполняется на ЭВМ с помощью программы *imf*. Программа позволяет по заданным токам и напряжениям симметричных составляющих рассчитать фазные токи и напряжения, определить мощности полную S , активную P и реактивную Q в этих фазах, а также построить векторную диаграмму. Интерфейс программы состоит из главного меню и двух окон "Исходные данные" и "Переменные", в котором содержатся результаты расчета. Переключение между окнами осуществляется клавишами F5 или Tab, между главным меню и окнами – клавишей F10 или Esc. При новом расчете необходимо запустить программу, выбрать в меню "Файл" опцию "Новый". В меню "Сервис" выбрать опцию "Параметры расчета/Расчет по заданным последовательностям". При этом в появившихся полях необходимо задать симметричные составляющие токов и напряжений, а также их фазовые углы относительно одного направления. Введение каждого нового числа необходимо подтверждать клавишей Enter. Предлагаемые программой значения полей "Точность по модулю" – 4, "Точность по фазе" – 2 и "Оценка случая" – 5 изменять не рекомендуется. Расчет величин производится после ввода последней строки исходных данных после заполнения поля "Информация о месте повреждения", которое состоит из 4 строк. Результаты расчета можно пролистать в левом окне, если оно является активным (клавиши F5, Tab), однако их нельзя редактировать. Перед просмотром векторной диаграммы необходимо задать масштабы для векторов в меню "Сервис/Параметры диаграммы". Имеется возможность просмотра векторов всех величин как исходных, так и результатов расчета. Вектор не будет показан, если его модуль равен 0 или его масштаб равен 0. Каждое новое значение масштаба необходимо подтверждать клавишей Enter. Исходные дан-

ные и результаты расчета можно сохранить ("Файл/Сохранить файл" или F2) в текстовом файле, который можно редактировать в любой текстовой программе и выводить на печать. Открыть ранее сохраненный файл можно с помощью команды "Файл/Загрузить". Вывод на печать диаграммы производится с помощью опции "Файл/Печать/Диаграмма" или с помощью клавиши F4.

3.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для трансформатора с соединением обмоток по группе 11 известны фазные токи в относительных единицах на стороне звезды: $\dot{I}_A = 5$, $\dot{I}_B = -5$; $\dot{I}_C = 0$. Определить фазные токи на стороне треугольника.
2. Для трансформатора с соединением обмоток по группе 11 известны фазные токи в относительных единицах на стороне треугольника: $\dot{I}_A = 5$, $\dot{I}_B = -5$; $\dot{I}_C = 0$. Определить фазные токи на стороне звезды.
3. Определить значения фазных токов, если известны симметричные составляющие тока фазы A: $\dot{I}_{A1} = 300$ A; $\dot{I}_{A2} = -100$ A; $\dot{I}_{A0} = -200$ A.
4. Как изменятся векторные диаграммы токов и напряжений на стороне треугольника, если обмотки трансформатора соединить по группе 3 вместо 11?
5. Как принято направлять векторы ЭДС и напряжения особой фазы при расчете несимметричных коротких замыканий? Как при этом оказываются направленными найденные из схем замещения векторы токов особой фазы, если пренебречь активными сопротивлениями?
6. Как определить направление векторов симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей на участках системы, отделенных от места короткого замыкания трансформаторами?
7. Как определить графическим и аналитическим способами сверхпереходную ЭДС генератора, зная напряжение на его выводах U , ток в статоре I и разность фаз φ ?
8. Как изменяется при трехфазном коротком замыкании величина напряжения по мере удаления от места короткого замыкания?
9. Каково соотношение между токами на разных сторонах трансформатора или автотрансформатора?
10. Какая ЭДС генератора приложена за его сверхпереходным сопротивлением x_d'' ?
11. Каким свойством обладает сверхпереходная ЭДС вращающейся электрической машины?
12. Что такое начальный сверхпереходный ток?
13. Каково соотношение между токами прямой и обратной последовательностей особой фазы в месте двухфазного короткого замыкания?

14. Каково соотношение между напряжениями прямой и обратной последовательностей особой фазы в месте двухфазного короткого замыкания на землю?
15. Каково соотношение между токами прямой, обратной и нулевой последовательностей особой фазы в месте однофазного короткого замыкания?
16. Каково соотношение между напряжениями прямой, обратной и нулевой последовательностей особой фазы в месте двухфазного короткого замыкания на землю?
17. При каких видах коротких замыканий в системе протекают токи нулевой последовательности?
18. Каково соотношение между действующими значениями фазного тока и тока прямой последовательности в месте двухфазного короткого замыкания? Однофазного короткого замыкания? Двухфазного короткого замыкания на землю?

БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН

δ – аргумент комплекса напряжения (фазовый угол), рад;
 $\eta_{\text{ном}}$ – коэффициент полезного действия, отн.ед.;
 ω – угловая частота системы, с^{-1} ;
 $b_{\text{уд}}$ – удельная емкостная проводимость линии электропередачи, См/км ;
 $\dot{E}_{\text{сист}}$ – ЭДС электрической системы, кВ;
 $E''_{(\text{н})}$ – сверхпереходная ЭДС в относительных единицах при номинальных условиях, отн.ед.;
 $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток элемента электрической системы, А;
 $I_{\text{х}}$ – номинальный ток холостого хода трансформатора, %;
 $k_{\text{п}}$ – кратность пускового тока;
 $K_{\text{св}}$ – коэффициент связи сдвоенного реактора, отн.ед.;
 L – длина линии электропередачи, км;
 $m_{\text{п}}$ – кратность пускового момента;
 $u_{\text{к}}$ – номинальное напряжение короткого замыкания силового трансформатора, %;
 $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение элемента электрической системы, кВ;
 $\dot{U}_{\text{ср}}$ – комплекс среднего напряжения, кВ;
 $U_{\text{ср}}$ – модуль среднего напряжения, кВ;
 $P_{\text{Г}}$ – активная мощность генератора, МВт;
 $P_{\text{М}}$ – активная мощность асинхронного электродвигателя, МВт;
 $P_{\text{МГ}}$ – активная мощность синхронного электродвигателя, МВт;
 $P_{\text{к}}$ – активная мощность потерь короткого замыкания трансформатора, кВт;
 $P_{\text{н}}$ – активная мощность нагрузки, МВт;
 $P_{\text{сист}}$ – активная мощность электрической системы, МВт;
 $P_{\text{ф}}$ – потери мощности на фазу реактора;
 $P_{\text{х}}$ – активная мощность потерь холостого хода трансформатора, МВт;
 $Q_{\text{с}}$ – зарядная мощность линии электропередачи, кВар;
 $Q_{\text{св}}$ – реактивная мощность конденсаторной батареи, $\text{МВ} \cdot \text{А}$;
 $Q_{\text{Г}}$ – реактивная мощность генератора, МВар;
 $Q_{\text{ГС}}$ – реактивная мощность синхронного компенсатора, МВар;
 $Q_{\text{М}}$ – реактивная мощность асинхронного электродвигателя, МВар;
 $Q_{\text{МГ}}$ – реактивная мощность синхронного электродвигателя, МВар;
 $Q_{\text{н}}$ – реактивная мощность нагрузки, МВар;
 $Q_{\text{сист}}$ – реактивная мощность электрической системы, МВар;
 $Q_{\text{х}}$ – реактивная мощность потерь холостого хода трансформатора, Мвар;
 R_{LR} – активное сопротивление реактора, Ом;

$R_{\Pi(n)*}$ – пусковое активное сопротивление асинхронного электродвигателя в относительных единицах при номинальных условиях, отн.ед;
 R_T – активное сопротивление силового трансформатора, Ом;
 R_w – активное сопротивление линии электропередачи, Ом;
 $r_{уд}$ – удельное активное сопротивление линии электропередачи, Ом/км;
 S_{CB} – полная мощность конденсаторной батареи, МВ·А;
 $\dot{S}_G$ – полная мощность генератора, МВ·А;
 $\dot{S}_{GC}$ – полная мощность синхронного компенсатора, МВ·А;
 $\dot{S}_M$ – полная мощность асинхронного электродвигателя, МВ·А;
 $\dot{S}_{MG}$ – полная мощность синхронного электродвигателя, МВ·А;
 $s_{НОМ, \%}$ – номинальное скольжение асинхронного электродвигателя, %;
 $\dot{S}_H$ – полная мощность нагрузки, МВ·А;
 $S_{НОМ}$ – номинальная полная мощность элемента электрической системы, МВ·А;
 $\dot{S}_{СИСТ}$ – полная мощность электрической системы, МВ·А;
 S_X – полная мощность потерь холостого хода, МВ·А;
 $T_a^{(3)}$ – постоянная времени затухания апериодической слагающей тока статора;
 $x_{2(n)*}$ – индуктивное сопротивление обратной последовательности синхронной машины в относительных единицах при номинальных условиях, отн.ед.;
 $x''_{d(n)*}$ – индуктивное сверхпереходное сопротивление по продольной оси синхронной машины в относительных единицах при номинальных условиях, отн.ед.;
 X_{LR} – индуктивное сопротивление реактора, Ом;
 $X_{LR\%}$ – индуктивное сопротивление реактора, %;
 $X_{\Pi(n)*}$ – пусковое индуктивное сопротивление асинхронного электродвигателя в относительных единицах при номинальных условиях, отн.ед;
 X_T – реактивное сопротивление силового трансформатора, Ом;
 X_w – индуктивное сопротивление линии электропередачи, Ом;
 $x_{уд}$ – удельное реактивное сопротивление линии электропередачи, Ом/км;
 Z_{LR} – полное сопротивление реактора, Ом;
 Z_T – полное сопротивление силового трансформатора, Ом;
 Z_w – полное сопротивление линии электропередачи, Ом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов, Ю. А. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. / Ю. А. Куликов. – М.: Омега-Л, 2013. – 384 с.: ил.
2. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев, В.А. Старшинов и др.; под ред. проф. Н.П. Крюčkова и проф. В.А. Старшинова.– М.: Академия, 2005.- 416 с.
3. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справ. материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие для вузов / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. - 5-е изд., стер. - М.: БХВ-Петербург, 2013. - 608 с.: ил.
4. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования/под ред. Б.Н. Неклепаева. - М.: НЦ ЭНАС, 2006 -142 с.
5. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича.– 4-е изд., перераб. и доп.– М.: ЭНАС, 2012.– 392 с.: ил.
6. Методические рекомендации по оформлению выпускных квалификационных работ, курсовых проектов/работ для очной, очно-заочной (вечерней) и заочной форм обучения/сост. А.Н. Тритенко, В.Н. Бриш, А.В. Прыганова и др. – Вологда: ВоГТУ, 2012. – 57 с.
7. СТО ВоГТУ 2.12 – 2007. Стандарт организации. Иллюстрации: общие требования к оформлению и размещению в текстовой документации/ ГОУ ВПО Вологодский государственный технический университет. - Взамен СТП ВПИ 2.12-89; введ. 18.10.2007. - Вологда: ВоГТУ, 2007. - 15 с.: черт.
8. РММ ВоГТУ 20.02-2008. Руководящие методические материалы организации. Список использованных источников информации: основные правила и порядок заполнения областей описания источников/ ГОУ ВПО ВоГТУ. - Взамен прил. "К" в составе СТО ВоГТУ 2.7-2006; введ. 01-09-2008. - Вологда: ВоГТУ, 2008. - 15 с.

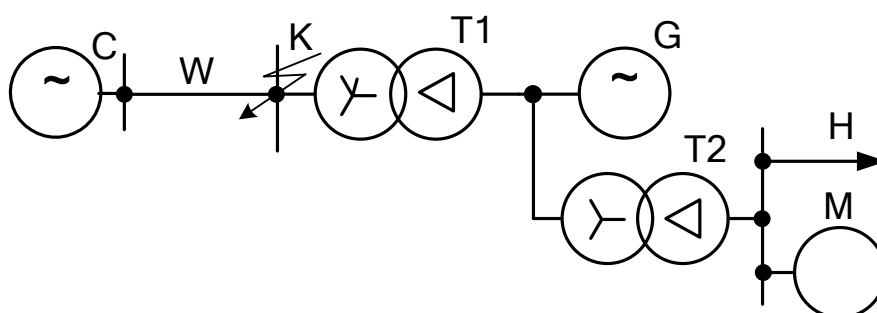


Рис.1.1. Расчетная схема электроэнергетической системы

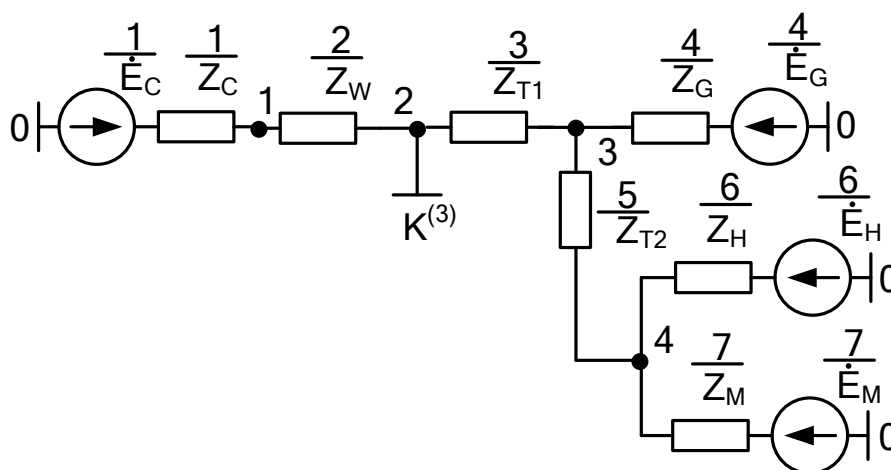
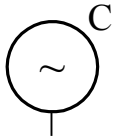
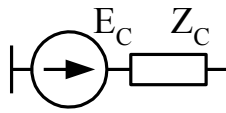
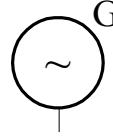
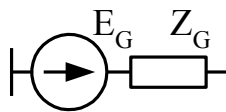
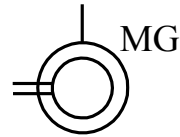
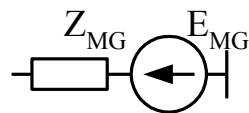
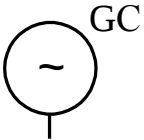
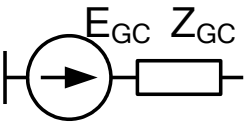
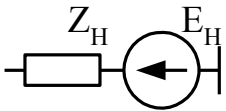
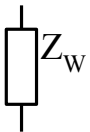


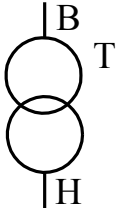
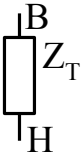
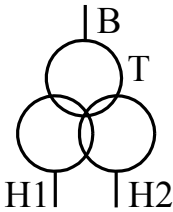
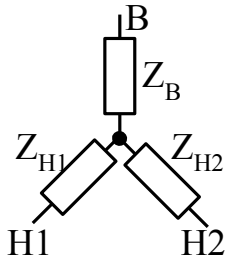
Рис.1.2. Схема замещения электроэнергетической системы для расчета токов трехфазного короткого замыкания

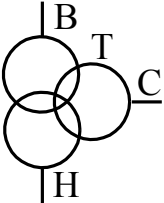
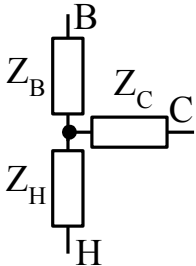
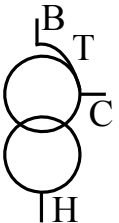
Приложение 2

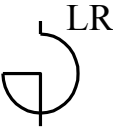
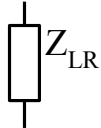
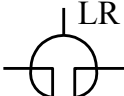
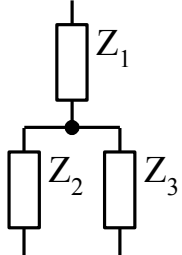
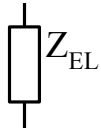
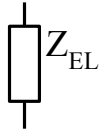
Параметры прямой последовательности элементов электрической системы

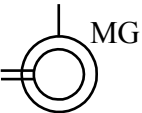
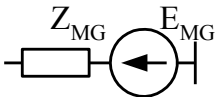
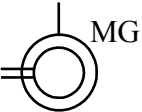
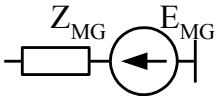
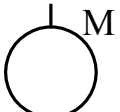
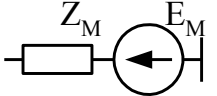
Элемент электроэнергетической системы	Условное обозначение	Схема замещения	Формулы для определения сопротивлений и ЭДС в схеме замещения	
			Относительные единицы	Именованные единицы
Система			$E_{C(6)}^* = \frac{U_{CP}}{U_B}$ $X_{C(6)}^* = X_C \frac{S_B}{U_B^2}$ $X_{C(6)}^* = \frac{U_{CP}}{\sqrt{3}I_K^{(3)}} \frac{S_B}{U_B^2} \quad X_{C(6)}^* = \frac{U_{CP}^2}{S_K^{(3)}} \frac{S_B}{U_B^2}$ $R_{C(6)}^* = \frac{X_{C(6)}^*}{k}$	$E_C = \frac{U_{CP}}{\sqrt{3}}$ $X_C = \frac{U_{CP}}{\sqrt{3}I_K^{(3)}}$ $X_C = \frac{U_{CP}^2}{S_K^{(3)}}$ $R_C = \frac{X_C}{k}$
Генератор синхронный			$R_{G(6)}^* = \frac{X_{2(H)}^*}{\omega T_a^{(3)}} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $X_{G(6)}^* = x_{d(H)}'' \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $E_{G(6)}^* = \frac{U_{HOM}}{U_B} E_{(H)}''$	$R_G = \frac{X_{2(H)}^*}{\omega T_a^{(3)}} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $X_G = x_{d(H)}'' \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $E_G = \frac{U_{HOM}}{\sqrt{3}} E_{(H)}''$
Двигатель синхронный одиночный			$E_{(H)}'' = \sqrt{\left(U_{(H)}^* \pm I_{(H)}^* x_{d(H)}'' \sin \varphi \right)^2 + \left(I_{(H)}^* x_{d(H)}'' \cos \varphi \right)^2}$	

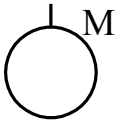
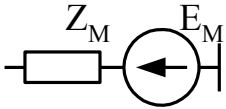
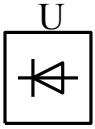
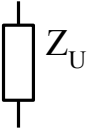
Элемент системы	Условное обозначение	Схема замещения	Формулы для определения сопротивлений и ЭДС в схеме замещения	
			Относительные единицы	Именованные единицы
Компенсатор синхронный			$R_{GC(6)} = \frac{x_{2(h)}^*}{\omega T_a^{(3)}} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $x_{GC} = x_{d(h)}'' \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $E_{GC(6)} = \frac{U_{HOM}}{U_B} (U_{(h)} \pm I_{(h)} x_{d(h)}'')$	$R_{GC} = \frac{x_{2(h)}^*}{\omega T_a^{(3)}} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $x_{GC} = x_{d(h)}'' \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $E_{GC} = \frac{U_{HOM}}{\sqrt{3}} (U_{(h)} \pm I_{(h)} x_{d(h)}'')$
Нагрузка обобщенная			$R_{H(6)} = R_{H(h)} \frac{S_B}{S_H} \left(\frac{U_{CP}}{U_B} \right)^2$ $X_{H(6)} = X_{H(h)} \frac{S_B}{S_H} \left(\frac{U_{CP}}{U_B} \right)^2$ $E_H = 0,85 \frac{U_{CP}}{U_B}$	$R_H = R_{H(h)} \frac{U_{CP}^2}{S_H}$ $X_H = X_{H(h)} \frac{U_{CP}^2}{S_H}$ $E_H = 0,85 \frac{U_{CP}}{\sqrt{3}}$
Линия электропередачи воздушная и кабельная			$R_{W(6)} = r_{yD} L \frac{S_B}{U_B^2}$ $X_{W(6)} = x_{yD} L \frac{S_B}{U_B^2}$	$R_W = r_{yD} L$ $X_W = x_{yD} L$

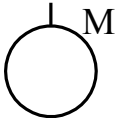
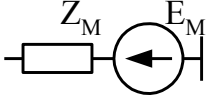
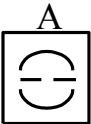
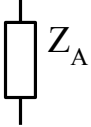
Элемент системы	Условное обозначение	Схема замещения	Формулы для определения сопротивлений и ЭДС в схеме замещения	
			Относительные единицы	Именованные единицы
Трансформатор двухобмоточный			$R_{T(6)}^* = \frac{P_K}{S_{НОМ}} \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ,i}}{U_{Б,i}} \right)^2$ $Z_{T(6)}^* = \frac{u_K}{100} \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ,i}}{U_{Б,i}} \right)^2$ $X_{T(6)}^* = \sqrt{Z_{T(6)}^2 - R_{T(6)}^2}$	$R_T = \frac{P_K}{S_{НОМ}} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $Z_T = \frac{u_K}{100} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$
Трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения			$X_{B(6)}^* = 0,125 \frac{u_{К.В-Н}}{100} \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ,i}}{U_{Б,i}} \right)^2$ $X_{H1(6)}^* = 1,75 \frac{u_{К.В-Н}}{100} \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ,i}}{U_{Б,i}} \right)^2$ $X_{H1(6)}^* = X_{H2(6)}^*$ $R_{B(6)}^* = X_{B(6)}^* \frac{R_{Б-Н}}{X_{Б-Н}}$ $R_{H1(6)}^* = R_{H2(6)}^* = X_{H1(6)}^* \frac{R_{Б-Н}}{X_{Б-Н}}$	$X_B = 0,125 \frac{u_{К.В-Н}}{100} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_{H1} = 1,75 \frac{u_{К.В-Н}}{100} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_{H1} = X_{H2}$ $R_B = X_B \frac{R_{Б-Н}}{X_{Б-Н}}$ $R_{H1} = R_{H2} = X_{H1} \frac{R_{Б-Н}}{X_{Б-Н}}$
			$\frac{R_{Б-Н}}{X_{Б-Н}} = \frac{100}{u_{К.В-Н}} \frac{P_K}{S_{НОМ}}$	

Элемент системы	Условное обозначение	Схема замещения	Формулы для определения сопротивлений и ЭДС в схеме замещения	
			Относительные единицы	Именованные единицы
Трансформатор трехобмоточный			$X_{B(6)}^* = \frac{u_{K.B}}{100} \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ,i}}{U_{B,i}} \right)^2$ $X_{C(6)}^* = \frac{u_{K.C}}{100} \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ,i}}{U_{B,i}} \right)^2$ $X_{H(6)}^* = \frac{u_{K.H}}{100} \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ,i}}{U_{B,i}} \right)^2$ $R_{B(6)}^* = X_{B(6)}^* \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $R_{C(6)}^* = X_{C(6)}^* \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $R_{H(6)}^* = X_{H(6)}^* \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $\frac{R_{B-C}}{X_{B-C}} = \frac{100}{u_{K.B-C}} \frac{P_{K.B-C}}{S_{НОМ}}$	$X_B = \frac{u_{K.B}}{100} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_C = \frac{u_{K.C}}{100} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_H = \frac{u_{K.H}}{100} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $R_B = X_B \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $R_C = X_C \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $R_H = X_H \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $\frac{R_{B-C}}{X_{B-C}} = \frac{100}{u_{K.B-C}} \frac{P_{K.B-C}}{S_{НОМ}}$
Автотрансформатор			$u_{K.B} = 0,5(u_{K.B-C} + u_{K.B-H} - u_{K.C-H}), \%$ $u_{K.C} = 0,5(u_{K.B-C} + u_{K.C-H} - u_{K.B-H}), \%$ $u_{K.H} = 0,5(u_{K.B-H} + u_{K.C-H} - u_{K.B-C}), \%$	

Элемент системы	Условное обозначение	Схема замещения	Формулы для определения сопротивлений и ЭДС в схеме замещения	
			Относительные единицы	Именованные единицы
Реактор			$R_{LR(6)} = \frac{P_{\Phi}}{I_{HOM}^2} \frac{S_B}{U_B^2}$ $X_{LR(6)} = X_{LR} \frac{S_B}{U_B^2} \quad X_{LR(6)} = X_{LR} \frac{S_B}{U_B^2}$ $X_{LR(6)} = \frac{X_{LR\%}}{100} \frac{I_6}{I_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$	$R_{LR} = \frac{P_{\Phi}}{I_{HOM}^2}$ X_{LR} $X_{LR(6)} = \frac{X_{LR\%}}{100} \frac{U_{HOM}}{\sqrt{3} I_{HOM}}$
Реактор сдвоенный			$R_{1(6)} = R_{2(6)} = R_{3(6)} = \frac{P_{\Phi}}{2 I_{HOM}^2} \frac{S_B}{U_B^2}$ $X_{1(6)} = -K_{CB} X_{LR} \frac{S_B}{U_B^2}$ $X_{2(6)} = X_{3(6)} = (1 + K_{CB}) X_{LR} \frac{S_B}{U_B^2}$	$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{P_{\Phi}}{2 I_{HOM}^2}$ $X_1 = -K_{CB} X_{LR}$ $X_2 = X_3 = (1 + K_{CB}) X_{LR}$
Лампы накаливания			$R_{EL(6)} = \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $X_{EL(6)} = 0$	$R_{EL} = \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $X_{EL} = 0$
Газоразрядные источники света			$R_{EL(6)} = 0,85 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $X_{EL(6)} = 0,53 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$	$R_{EL} = 0,85 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $X_{EL} = 0,53 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$

Элемент системы	Условное обозначение	Схема замещения	Формулы для определения сопротивлений и ЭДС в схеме замещения	
			Относительные единицы	Именованные единицы
Группа синхронных двигателей напряжением свыше 1 кВ			$R_{MG(6)}^* = 0,04 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$ $X_{MG(6)}^* = 0,15 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$ $E_{MG(6)}^* = 1,074 \frac{U_{НОМ}}{U_B}$	$R_{MG} = 0,04 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_{MG} = 0,15 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $E_{MG} = 1,074 \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}}$
Группа синхронных двигателей напряжением до 1 кВ			$R_{MG(6)}^* = 0,03 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$ $X_{MG(6)}^* = 0,16 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$ $E_{MG(6)}^* = 1,079 \frac{U_{НОМ}}{U_B}$	$R_{MG} = 0,03 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_{MG} = 0,16 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $E_{MG} = 1,079 \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}}$
Группа асинхронных двигателей напряжением свыше 1 кВ			$R_{M(6)}^* = 0,01 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$ $X_{M(6)}^* = 0,17 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_{B2}} \right)^2$ $E_{M(6)}^* = 0,93 \frac{U_{НОМ}}{U_B}$	$R_M = 0,01 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_M = 0,17 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $E_M = 0,93 \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}}$

Элемент системы	Условное обозначение	Схема замещения	Формулы для определения сопротивлений и ЭДС в схеме замещения	
			Относительные единицы	Именованные единицы
Двигатель асинхронный одиночный			$R_{M(6)}^* = R_{\Pi(н)}^* \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$ $X_{M(6)}^* = X_{\Pi(н)}^* \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_{Б2}} \right)^2$ $E_{M(6)}^* = \frac{U_{НОМ}}{U_B} E_{*}''_{(н)}$ $R_{\Pi(н)}^* = \frac{m_{\Pi} \eta_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ}}{k_{\Pi}}$ $R_{\Pi(н)}^* \approx \frac{s_{НОМ, \%}}{100}$ $X_{\Pi(н)}^* = \frac{1}{k_{\Pi}} \sqrt{1 - \frac{(m_{\Pi} \eta_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ})^2}{k_{\Pi}^2}}$ $E_{*}''_{(н)} = \sqrt{\left(U_{(н)}^* - I_{(н)}^* X_{\Pi(н)}^* \sin \varphi \right)^2 + \left(I_{(н)}^* X_{\Pi(н)}^* \cos \varphi \right)^2}$	$R_M = R_{\Pi(н)}^* \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_M = X_{\Pi(н)}^* \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $E_M = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} E_{*}''_{(н)}$
Преобразователи			$R_{U(6)}^* = 0,9 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$ $X_{U(6)}^* = 0,45 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$	$R_U = 0,9 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_U = 0,45 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$

Элемент системы	Условное обозначение	Схема замещения	Формулы для определения сопротивлений и ЭДС в схеме замещения	
			Относительные единицы	Именованные единицы
Группа асинхронных двигателей напряжением до 1 кВ			$R_{M(6)}^* = 0,07 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$ $X_{M(6)}^* = 0,18 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_{Б2}} \right)^2$ $E_{M(6)}^* = 0,9 \frac{U_{НОМ}}{U_B}$	$R_M = 0,07 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_M = 0,18 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $E_M = 0,9 \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}}$
Электротермические установки			$R_{A(6)}^* = \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$ $X_{A(6)}^* = 0,49 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$	$R_A = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_A = 0,49 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$

Примечания: 1. Коэффициент k при определении активного сопротивления системы по умолчанию принимается равным 15.

2. В формулах для определения ЭДС знак "+" относится к синхронным машинам, которые к моменту короткого замыкания работали в режиме перевозбуждения, а знак "-" – к работавшим с недовозбуждением.

3. $R_{H(н)}^* = 0,18$; $X_{H(н)}^* = 0,24$, если нагрузка обобщена на напряжении (6...10) кВ. $R_{H(н)}^* = 0,19$; $X_{H(н)}^* = 0,36$, если нагрузка обобщена на напряжении 35 кВ и выше.

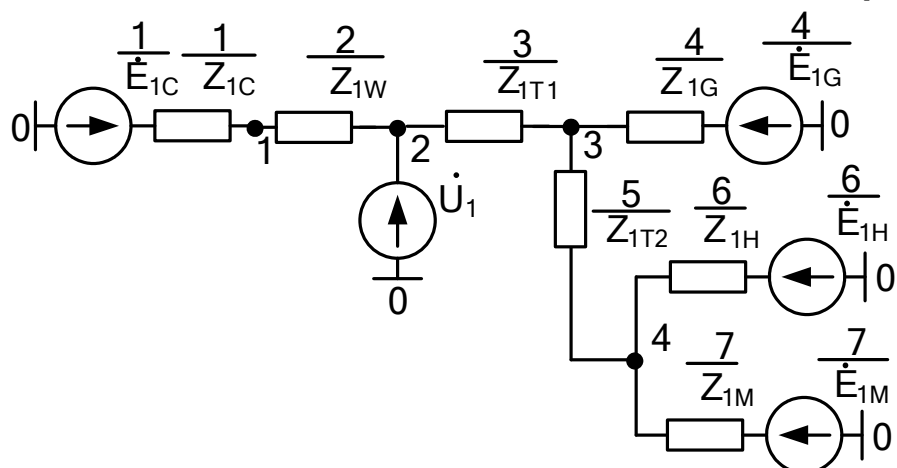


Рис.3.1. Схема замещения прямой последовательности

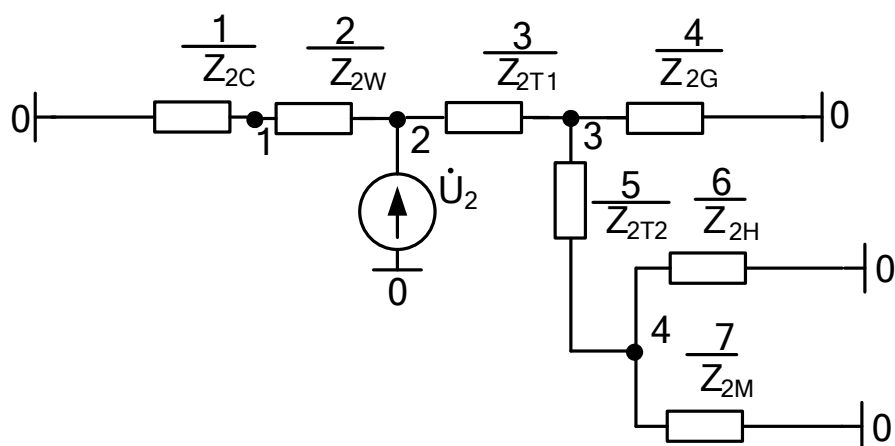


Рис.3.2. Схема замещения обратной последовательности

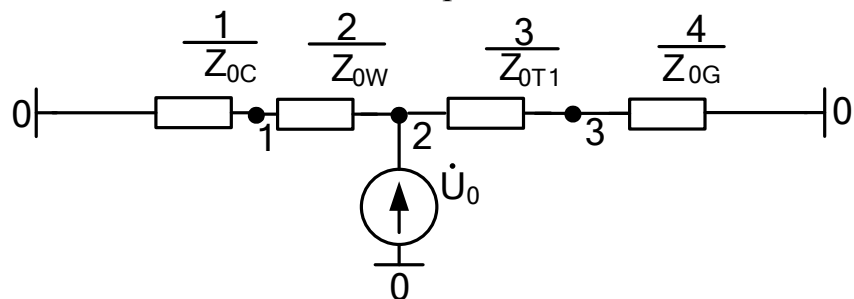


Рис.3.3. Схема замещения нулевой последовательности

Приложение 4

Параметры двухобмоточных силовых трансформаторов 35, 110 и 220 кВ

Тип трансформатора	Номинальная мощность $S_{\text{ном}}$, МВ·А	Номинальные напряжения обмоток, кВ		Потери, кВт		Предел регулирования, %	U _к , %			I _х , %
		U _{ном вн}	U _{ном нн}	P _х	P _к		min	ср	max	
ТМ-1000/35	1	35	3,15; 6,30; 10,50	2	11,6	± 2х2,5%	-	6,5	-	1,4
ТМН-1000/35	1	35	0,40; 0,69; 6,30; 11,00	2,1	11,6	± 4х2,5% ± 6х1,5%	- 6,85	6,5	- 6	1,4
ТМ-1600/35	1,6	35	0,40; 0,69; 3,15; 6,30; 10,50	2,75	16,5	± 2х2,5%	-	6,5	-	1,3
ТМН-1600/35	1,6	35	0,40; 0,69; 6,30; 11,00	2,9	16,5	± 4х2,5% ± 6х1,5%	- 6,85	6,5	- 6	1,3
ТМ-2500/35	2,5	35	3,15; 6,30; 10,50	3,9	23,5	± 2х2,5%	-	6,5	-	1
ТМН-2500/35	2,5	35	0,69; 6,30; 11,00	4,1	23,5	± 4х2,5% ± 6х1,5%	- 6,85	6,5	- 6	1
ТМ-4000/35	4	35	3,15; 6,30; 10,50	5,3	33,5	± 2х2,5%	-	7,5	-	0,9
ТМН-4000/35	4	35	11	5,6	33,5	± 2х2,5%	-	7,5	-	0,9
ТМН-4000/35	4	35	6,30; 11,00	5,6	33,5	± 4х2,5% ± 6х1,5%	- 8,6	7,5	- 7	0,9
ТМ-6300/35	6,3	35	3,15; 6,30; 10,50	7,6	46,5	± 2х2,5%	-	7,5	-	0,8
ТМН-6300/35	6,3	35	6,30; 11,00	8	46,5	± 4х2,5% ± 6х1,5%	- 8,6	7,5	- 7	0,8
ТД-10000/35	10	38,5	6,30; 10,50	-	-	± 2х2,5%	-	-	-	-
ТД-16000/35	16	38,5	6,30; 10,50	-	-	± 2х2,5%	-	-	-	-
ТДНС-10000/35	10	36,75	3,15; 6,30; 10,50	12	81 60	± 8х1,5%	12,95 7,3	14 8	14,9 8,8	0,75
ТДНС-16000/35	16	36,75	6,30; 10,50	17	85	± 8х1,5%	9,1	10	11	0,7
ТМ-2500/110	2,5	121	6,30; 10,50	-	-	±2х2,5	-	-	-	-
ТМН-2500/110	2,5	110	6,6; 11,0	5,0	22	-8х1,5 +10х1,5	10,26	10,5	10,85	1,20
ТМ-4000/110	4	121	6,30; 10,50	-	-	±2х2,5	-	-	-	-
ТМ-6300/110	6,3	121	6,30; 10,50	-	-	±2х2,5	-	-	-	-
ТМН-6300/110	6,3	110	6,6; 11,0; 16,5	10,0	44	±9х1,78	10,58	10,5	11,78	1,00
ТД-10000/110	10	121	6,30; 10,50	-	-	±2х2,5	-	-	-	-
ТДН-10000/110	10	110	6,6; 11,0; 16,5; 22,0; 34,5	14,0	58	±9х1,78	10,49	10,5	11,73	0,90
ТД-16000/110	16	121	6,30; 10,50	-	-	±2х2,5	-	-	-	-

Окончание приложения 4

Тип трансформатора	Номинальная мощность $S_{ном}$, МВ·А	Номинальные напряжения обмоток, кВ		Потери, кВт		Предел регулирования, %	U _к , %			I _х , %
		U _{ном вн}	U _{ном нн}	P _х	P _к		min	ср	max	
ТДН-16000/110	16	110	6,6; 11,0; 16,5; 22,0; 34,5	18,0	85	±9х1,78	10,09	10,5	11,05	0,45
ТД-25000/110	25	121	6,30; 10,50	-	-	±2х2,5	-	-	-	-
ТДН-25000/110	25	110	38,5	25,0	120	±9х1,78	10,44	10,5	11,34	0,45
ТД-32000/110	32	121	6,30; 10,50	-	-	±2х2,5	-	-	-	-
ТД-40000/110	40	121	6,30; 10,50	-	-	±2х2,5	-	-	-	-
ТДН-40000/110	40	110	38,5	34,0	170	±9х1,78	10,35	10,5	11,02	0,55
ТДН-63000/110	63	115	38,5	50,0	245	±9х1,78	10,05	10,5	10,66	0,50
ТДН-80000/110	80	115	38,5	58,0	310	±9х1,78	10,44	10,5	10,91	0,45
ТДЦ-80000/110	80	121	6,30; 10,50	85	310	±2х2,5	-	11	-	0,60
ТДЦ-125000/110	125	121	6,30; 10,50	92	420	±2х2,5	-	10,5	-	0,40
ТДЦ-200000/110	200	121	6,30; 10,50	170	550	±2х2,5	-	10,5	-	0,50
ТДЦ-250000/110	250	121	6,30; 10,50	200	640	±2х2,5	-	10,5	-	0,50
ТДЦ-400000/110	400	121	6,30; 10,50	320	900	±2х2,5	-	10,5	-	0,45
ТД-80000/220	80	242	6,30; 10,50; 13,80	79	315	±2х2,5	-	11	-	0,45
ТДЦ-125000/220	125	242	10,50; 13,80	120	380	±2х2,5	-	11	-	0,55
ТЦ-160000/220	160	242	13,80; 15,75	-	-	Без рег.	-	-	-	-
ТДЦ-200000/220	200	242	13,80; 15,75; 18,00	130	660	±2х2,5	-	11	-	0,40
ТЦ-200000/220	200	242	13,80; 15,75; 18,00	130	660	±2х2,5	-	11	-	0,40
ТДЦ-250000/220	250	242	13,80; 15,75	207	600	±2х2,5	-	11	-	0,50
ТЦ-250000/220	250	242	13,80; 15,75	207	600	±2х2,5	-	11	-	0,50
ТДЦ-400000/220	400	242	15,75; 20,00	280	870	±2х2,5	-	11	-	0,45
ТЦ-400000/220	400	242	15,75; 20,00	280	870	±2х2,5	-	11	-	0,45
ТНЦ-630000/220	630	242	15,75; 20,00; 24,00	400	1200	±2х2,5	-	12,5	-	0,35
ТНЦ-1000000/220	1000	242	24,00	480	2200	±2х2,5	-	11,5	-	0,40

Приложение 5

Параметры силовых трансформаторов с расщепленной обмоткой, силовых трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов 35, 110 и 220 кВ

Тип трансформатора	Номинальная мощность S _{НОМ} , МВ·А	Номинальные напряжения обмоток, кВ			Потери, кВт		Предел регулиру- рования, %	U _к , %									I _х , %
		U _{НОМ ВН}	U _{НОМ СН}	U _{НОМ НН}	P _х	P _к		ВН-НН			СН-НН			ВН-СН			
								min	ср	max	min	ср	max	min	ср	max	
ТМТН-6300/35	6,3	35	10,50; 13,80 15,75	6,3	—	55	± 6х1,5%	8,15	7,5	7,18	—	16	—	7,85	7,5	6,96	—
ТДТН-10000/35	10	36,5	10,50; 13,80 15,75	6,3	—	75	± 8х1,5%	16,16	16,5	16,96	—	7	—	7,15	8	8,05	—
ТДТН-16000/35	16	36,5	10,50; 13,80 15,75	6,3	—	115	± 8х1,5%	16,26	16,5	16,91	—	7	—	7,28	8	7,99	—
ТРДНС-25000/35	25	36,75	6,3 10,5 10,5	6,3 6,3 10,5	25	115	± 8х1,5%	9,8	10,5	11,45	—	30	—	17,28	19	20,24	0,65
ТРДНС-40000/35	40	36,75	6,3 10,5 10,5	6,3 6,3 10,5	36	170	± 8х1,5%	11,73	12,7	13,9	—	40	—	21,12	23	24,76	0,5
ТРДНС-63000/35	63	36,75	6,3 10,5 10,5	6,3 6,3 10,5	50	250	± 8х1,5%	12,43	12,7	13,18	—	40	—	22,24	23	23,75	0,45
ТМТН-6300/110	6,3	115	16,5; 22,0; 38,5	6,6; 11,0	12,5	52	±9х1,78	17,08	17	18,28	-	6	-	9,94	10,5	11,07	0,6
ТДТН-10000/110	10	115	16,5; 22,0; 34,5; 38,5	6,6; 11,0	17,0	76	±9х1,78	17,68	17	19,04	-	6	-	10,75	10,5	11,77	0,75
ТДТНШ-10000/110	10	115	11,0; 6,3	11,0; 6,6	17,0	76	±9х1,78	17,68	17	19,04	-	6	-	10,75	10,5	11,77	0,75
ТДТН-16000/110	16	115	22,0; 34,5; 38,5	6,6; 11,0	21,0	100	±9х1,78	17,14	17,5	18,57	-	6,5	-	10,11	10,5	11,28	0,66

Продолжение приложения 5

Тип трансформатора	Номинальная мощность S _{НОМ} , МВ·А	Номинальные напряжения обмоток, кВ			Потери, кВт		Предел регулиру- рования, %	U _к , %									I _х , %
		U _{НОМ ВН}	U _{НОМ СН}	U _{НОМ НН}	P _х	P _к		ВН-НН			СН-НН			ВН-СН			
								min	ср	max	min	ср	max	min	ср	max	
ТДТНШ-16000/110	16	115	11,0; 6,3	11,0; 6,6	21,0	100	±9х1,78	17,14	17,5	18,57	-	6,5	-	10,11	10,5	11,28	0,66
ТДТН-25000/110	25	115	11,0; 22,0; 34,5; 38,5	6,6; 6,6; 11,0	28,5	140	±9х1,78	17,49	17,5	18,30	-	6,5	-	9,95	10,5	10,78	0,62
ТДТНШ-25000/110	25	115	11,0; 6,3	11,0; 6,6	28,5	140	±9х1,78	17,49	17,5	18,30	-	6,5	-	9,95	10,5	10,78	0,62
ТРДН-25000/110	25	115	11,0; 6,6	11,0; 6,6	25,0	120	±9х1,78	10,44	10,5	11,34	-	30	-	19,40	20	20,40	0,45
ТРДНС-25000/110	25	115	10,5; 6,3	10,5; 6,3	25,0	120	±9х1,78	10,44	10,5	11,34	-	30	-	19,40	20	20,40	0,45
ТДТН-40000/110	40	115	11,0; 22,0; 34,5; 38,5	6,6; 11,0	39,0	200	±9х1,78	18,22	17,5	18,85	-	6,5	-	9,95	10,5	11,05	0,46
ТДТНШ-40000/110	40	115	11,0; 6,3	11,0; 6,6	39,0	200	±9х1,78	18,22	17,5	18,85	-	6,5	-	9,95	10,5	11,05	0,46
ТРДН-40000/110	40	115	11,0; 6,6	11,0; 6,6	34,0	170	±9х1,78	10,35	10,5	11,02	-	30	-	18,84	20	20,12	0,55
ТРДНС-40000/110	40	115	10,5; 6,3	10,5; 6,3	34,0	170	±9х1,78	10,35	10,5	11,02	-	30	-	18,84	20	20,12	0,55
ТДТН-63000/110	63	115	11,0;38,5	6,6; 11,0	53,0	290	±9х1,78	18,49	18	18,91	-	7	-	9,83	10,5	10,57	0,55
ТРДН-63000/110	63	115	11; 6,6	11; 6,6	50,0	245	±9х1,78	10,05	10,5	10,66	-	30	-	19,02	20	20,30	0,5
ТРДНС-63000/110	63	115	10,5; 6,3	10,5; 6,3	50,0	245	±9х1,78	10,05	10,5	10,66	-	30	-	19,02	20	20,30	0,5
ТРДН-80000/110	80	115	11; 6,6	11; 6,6	58,0	310	±9х1,78	10,44	10,5	10,91	-	30	-	18,40	20	19,64	0,45
ТРДЦН-125000/110	125	115	10,5	10,5	105,0	400	±9х1,78	10,50	11	11,90	-	30	-	20,0	21	21,18	0,55
ТДТН-25000/220	25	230	38,5	6,6; 11,0	45	130	±12х1	19,5	20	20,5	-	6,5	-	12,5	12,5	13,5	0,90
ТРДН-32000/220	32	230	11; 6,6; 6,3	11; 6,6; 6,3	45	150	±8х1,5	11	11,5	12	-	28	-	21	21	19	0,65

Окончание приложения 5

Тип трансформатора	Номинальная мощность S _{НОМ} , МВ·А	Номинальные напряжения обмоток, кВ			Потери, кВт		Предел регулиру- рования, %	U _к , %									I _х , %
		U _{НОМ ВН}	U _{НОМ СН}	U _{НОМ НН}	P _х	P _к		ВН-НН			СН-НН			ВН-СН			
								min	ср	max	min	ср	max	min	ср	max	
ТРДНС-32000/220	32	230	6,3	6,3	-	-	±8х1,5	11	11,5	12	-	28	-	21	21	19	-
ТДТН-40000/220	40	230	38,5	6,6; 11,0	54	220	±12х1	27,3	22	19,3	-	9,5	-	16,9	12,5	10,1	0,55
ТРДНС-40000/220	40	230	6,6; 6,3	6,6; 6,3	50	170	±8х1,5	11,8	11,5	12,3	-	28	-	21	21	19	0,60
ТДТН-63000/220	63	230	38,5	6,6; 11,0	-	-	±12х1	29,6	24	20	-	10,5	-	17,7	12,5	10,4	-
АТДЦТН-63000/220/110	63	230	121	6,60; 11,00; 38,50	37	200	±6х2	-	35,0	-	24,5	22	25	21	11	7	0,45
ТРДН-63000/220	63	230	11	11; 6,6	70	265	±8х1,5	11	11,5	12	-	28	-	21	21	19	0,5
ТРДЦН-63000/220	63	230	11	11; 6,6	70	265	±8х1,5	11	11,5	12	-	28	-	21	21	19	0,5
ТРДНС-63000/220	63	230	6,3	6,3	-	-	±8х1,5	11	12,5	12	-	28	-	21	21	19	-
ТРДЦН-100000/220	100	230	6,3	6,3	102	340	±8х1,5	12,5	12,5	13	-	28	-	21	23	19	0,65
АТДЦТН-125000/220/110	125	230	121	6,30; 6,60; 10,50; 11,00; 38,50	65	315	±6х2	-	45,0	-	30	28	31	21	11	7	0,40
ТРДЦН-160000/220	160	230	11	11	155	500	±8х1,5	12,5	12,5	13	-	28	-	21	23	21,6	0,6
АТДЦТН-200000/220/110	200	230	121	6,30; 6,60; 38,50; 10,50; 11,00	105	430	±6х2	-	32,0	-	22	20	21	20	11	6,8	0,24
ТРДЦН-200000/220	200	230	11	11	-	-	±8х1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АТДЦТН-250000/220/110	250	230	121	10,50; 11,00; 38,50	120	500	±6х2	-	32,0	-	23	20	22	21	11	7	0,24

Примечание: для трансформаторов с расщепленной обмоткой в графе U_K СН-НН даны U_K НН1-НН2, напряжения короткого замыкания этих трансформаторов U_K ВН-НН и U_K НН1-НН2 отнесены к номинальной мощности трансформатора.

Приложение 6

Параметры турбогенераторов

Тип турбогенератора	$P_{\text{НОМ}}$, МВт	$\cos\varphi$	$U_{\text{НОМ}}$, кВ	x_d''	x_d'	x_d	x_2	GD^2 , т·м ²	T_a , с
ТВФ-60-2	60	0,8	6,3	19,5	28	161	23,8	8,85	-
ТВФ-60-2	60	0,8	10,5	19,5	28	161	23,8	8,85	-
ТВФ-63-2	63	0,8	10,5	13,9	22,4	220	22	9,7	0,39
ТВФ-63-2	63	0,8	6,3	18	27,5	192	17	9,7	0,247
ТВФ-100-2	100	0,85	10,5	19,1	27,8	192	23,4	13	-
ВДАХ 9-450	113	0,8	15	13,2	19,0	182	16,0	3,915	-
ТВФ-160-2	160	0,85	18	22,1	32,9	230	26,9	13	-
ТГВ-200М	200	0,85	15,75	20,4	31	186,2	24,9	25	0,311
ТВВ-200-2а	200	0,85	15,75	18	27,2	210,6	22	21,1	0,307
ТВВ-220-2	220	0,85	15,75	20	29	197	24	21,1	0,307
ТГВ-300	300	0,85	20	19,5	30	219,5	23,8	31	0,54
ТГВ-320-2	320	0,85	20	17,3	25,8	169,8	21,1	29,8	-
ТГВ-500	500	0,85	20	24,3	37,3	241,3	29,6	36	0,468
ТГВ-500-4	500	0,85	20	26,8	39,8	215,8	32,7	190	0,374
ТВМ-500	500	0,85	36,75	27,3	38	243	33	36,5	-
ТВВ-500-2Е	500	0,85	20	22,2	31,8	231	27,4	38,6	0,34
ТВВ-800-2	800	0,9	24	21,9	30,7	233	26,7	56	0,33
ТВВ-1000-2	1000	0,9	24	26,9	38,2	282	32,8	56	0,33
ТВВ-1000-4	1000	0,9	24	31,8	45,2	235	38,8	245	0,34
ТВВ-1200-2	1200	0,9	24	24,8	35,8	242	30,2	-	0,38

Приложение 7

Параметры гидрогенераторов

Тип гидрогенератора	$P_{НОМ}$, МВт	$\cos\varphi$	$U_{НОМ}$, кВ	x_d''	x_d'	x_d	x_2	J , $\text{т} \cdot \text{м}^2 \cdot 0,25$
ВГС 525/150-20	46	0,9	10,5	0,16	0,25	1	-	0,15
ВГС 525/150-20	40	0,8	10,5	0,16	0,25	1	-	0,15
ВГС 710/180-30ТС4	80	0,89	13,8	0,2	0,3	1,15	-	0,5
ВГС 650/130-32	36	0,8	10,5	0,19	0,3	1,1	-	0,32
ГСВ 1230-140-48	117	0,85	13,8	0,2	0,32	1,16	-	44
ВГС 850/135-56	35	0,8	10,5	0,19	0,3	0,86	-	0,86
ВГС 1260/200-60	150	0,85	15,75	0,25	0,35	1,03	-	5,8
ВГС 1260/147-68	82,5	0,85	13,8	0,21	0,28	0,76	-	3,7
ВГС 1525/135-120	60	0,85	10,5	0,28	0,32	0,66	-	2,2
СВ-595/100-30УХЛ5	33	0,9	10,5	0,25	0,35	1,1	-	490
СВ-570/145-32	30	0,8	10,5	0,24	0,31	1,05	-	2250
СВ-850/120-60	32	0,8	10,5	0,23	0,31	0,82	-	8000
СВ-425/135-14	32,5	0,8	10,5	0,17	0,28	1	-	470
СВ-695/155-40	35	0,8	10,5	0,21	0,28	1	-	5000
СВ-655/110-32	37,5	0,87	10,5	0,3	0,3	1,13	-	3000
СВО-733/130-36	40	0,9	10	0,33	0,37	1,15	-	5100
СВ-375/195-12УХЛ4	38	0,8	10,5	0,12	0,23	1	-	400
СВ-840/130-52	40	0,8	10,5	0,2	0,3	0,89	-	8600
СВ-1100/145-88	40	0,8	15,75	0,23	0,31	0,64	-	28000
СВ-1030/120-68	41,6	0,8	10,5	0,2	0,28	0,74	-	15000
СВ-1500/110-116	44	0,8	10,5	0,23	0,28	0,61	-	52000
СВ-845/140-44Т	50,4	0,9	11	0,18	0,26	0,77	-	11500
СВ-840/150-52	45	0,8	10,5	0,2	0,28	0,8	-	9000
СВ-808/130-40У4	55	0,85	10,5	0,22	0,35	0,93	0,222	7500
СВ-465/210-16	56	0,85	10,5	0,21	0,21	0,91	-	1200
СВ-505/190-16Т	60	0,9	11	0,14	0,23	0,88	-	1520
СВ-660/165-32	57	0,85	10,5	0,2	0,29	1,04	-	4500
СВ-430/210-14	55	0,8	10,5	0,18	0,28	1,14	-	750

Окончание приложения 7

CB-1250/170-96	55	0,8	13,8	-	0,32	0,77	0,3	50000
CBK-1340/150-96	57,2	0,8	13,8	0,21	0,3	0,65	-	47000
CBH-1340/150-96	57,2	0,8	13,8	0,21	0,3	0,65	-	47000
CBKP-1340/150-96	57,2	0,8	13,8	0,21	0,3	0,65	-	47000
CB-1510/120-108	64	0,85	13,8	0,21	0,285	0,7	-	57000
CB-640/170-24	67	0,85	13,8	0,2	0,26	1,06	-	4000
CB-850/190-48	72,5	0,85	13,8	0,23	0,32	0,87	-	12800
CB-1470/149-10YXJI4	78	0,85	13,8	-	0,285	0,7	-	15500
CB-850/190-40	90	0,9	16,5	0,19	0,27	0,75	-	16000
CB-1070/145-52	80	0,8	13,8	0,22	0,34	1,1	-	24000
CB-1160/180-72	83	0,8	13,8	0,26	0,35	0,89	-	39000
CB-835/180-36	100	0,9	13,8	0,22	0,3	0,94	-	13000
CB-915/165-40Y4	100	0,9	15,75	0,21	0,35	0,96	-	14400
CBO-1500/170-96	100	0,85	13,8	0,21	0,29	0,65	-	80000
CB-1130/140-48TC4	100	0,85	13,8	0,21	0,26	0,91	0,22	29000
CB-1490/170-96YXJI4	107	0,85	13,8	0,22	0,35	0,8	-	20000
CB-1500/200-88	115	0,85	13,8	0,15	0,2	0,52	0,147	100000
CB-1160/135-60	103	0,8	13,8	0,22	0,32	1,05	-	32000
CB-1230/140-56	104,5	0,8	13,8	0,2	0,3	0,96	-	35000
CB-795/230-32T	120	0,895	11	0,18	0,29	0,97	-	14000
CB-1130/140-48YXJI4	120	0,85	13,8	0,205	0,332	1,084	-	7250
CB-800/230-32YXJI4	130	0,9	10,5	0,22	0,35	1,16	-	3500
CBΦ-1500/130-88	128	0,8	13,8	0,4	0,56	1,75	-	100000
CB-855/235-32	150	0,85	13,8	0,17	0,28	1	-	18000
CB-1260/185-60YXJI4	150	0,85	15,75	0,24	0,33	1,01	-	16250
CB-1430/175-72T	160	0,9	14,4	0,22	0,3	0,85	-	73000
CB-1500/175-84	171	0,9	15,75	0,27	0,38	1,1	-	82000
CB-1260/235-60T	175	0,85	15,75	0,22	0,33	1,02	-	73000
CTK-535/250-52	38	0,9	6,3	0,4	0,55	1,57	-	1900
CTKB-720/140-80	45	0,98	6,3	0,39	0,52	1,6	-	3000

Приложение 8

Параметры синхронных компенсаторов

Тип компенсатора	$S_{\text{НОМ}}$, МВ·А (при опережающем токе)	$S_{\text{МАКС}}$, МВ·А (при отстающем токе)	$U_{\text{НОМ}}$, кВ	$I_{\text{НОМ}}$, кА	x_d''	x_d'	x_d	T_a , с	J , т·м ² ·0,25
КС 5-6У3	5	2.5	6.3	-	0.16	0.25	1.57	-	-
КС 10-6У3	10	5.5	6.3	0.87	0.22	0.32	1.85	0.142	10
КС 10-10У3	10	5.5	10.5	-	-	-	-	-	10
КС 16-6У3	16	9	6.3	-	0.2	0.3	1.76	0.145	15
КСВ 32-10У1	32	17	10.5	1.65	0.22	0.36	1.6	0.246	58.5
КСВБ 50-11У1	50	20	11	2.62	0.28	0.47	2.7	0.187	125
КСВБО 50-11У1	50	33	11	2.62	0.23	0.47	2.7	0.187	125
КСВБО 50-11У1	50	33	11	2.62	0.23	0.47	2.7	0.187	125
КСВ 75-11У1	75	-	11	3.94	0.23	0.36	2.3	0.2	230
КСВБ 100-11У1	100	50	11	5.25	0.2	0.4	2.1	0.248	210
КСВБОИ 100-11У1	100	82.5	11	5.25	0.2	0.4	2.1	0.248	210
КСВБОИ 100-11У1	100	82.5	11	5.25	0.2	0.4	2.1	0.248	210
КСВБ 160-15У1	160	80	15.75	5.25	0.205	0.43	2	0.26	300
КСВБО 160-15У1	160	132	15.75	5.25	0.205	0.43	2	0.26	300
КСВБО 160-15У1	160	132	15.75	5.25	0.205	0.43	2	0.26	300

Приложение 9

Параметры воздушных линий напряжением 0,4; 6; 10 и 35 кВ

Сечение провода марки А(АС), мм ²	Допустимый ток, А	Диаметр провода, мм	Гуд, Ом/км, при +20° С	х _{уд} , Ом/км при напряжении, кВ			
				0,38	6	10	35
16(16/2,7)	105(105)	5,1(5,6)	1,108 (1,782)	—	—	—	—
25(25/4,2)	135(145)	6,4(6,9)	1,150 (1,152)	0,319	0,319 (0,392)	0,402 (0,401)	—
35(35/6,2)	170(175)	7,5(8,4)	0,835 (0,777)	0,308	0,380 (0,376)	0,391 (0,386)	—
50(50/8)	215(210)	9,0(9,6)	0,578 (0,595)	0,297	0,369 (0,368)	0,380 (0,378)	—
70(70/11)	265(265)	10,7(11,4)	0,413 (0,422)	0,283	0,355 (0,357)	0,366 (0,367)	0,420 (0,432)
95(95/16)	320(330)	12,3(13,5)	0,311 (0,301)	0,274	0,346 (0,347)	0,357 (0,356)	0,411 (0,421)
120(120/19)	375(390)	14,0(15,2)	0,246 (0,244)	—	0,338	0,349	0,403 (0,414)
150(150/24)	440(450)	15,8(17,1)	0,194 (0,204)	—	—	—	0,398 (0,406)

Параметры воздушных линий напряжением 110 и 220 кВ

Сечение провода марки, мм ²	Допустимый ток, А	Диаметр провода, мм	Гуд, Ом/км, при +20° С	110 кВ		220 кВ	
				х _{уд} , Ом/км	б _{уд} , 10 ⁻⁶ См/км	х _{уд} , Ом/км	б _{уд} , 10 ⁻⁶ См/км
70/11	265	10,87	0,422	0,444	2,55	—	—
95/16	330	12,3	0,301	0,434	2,61	—	—
120/19	390	14,0	0,244	0,427	2,66	—	—
150/24	450	15,8	0,204	0,420	2,70	—	—
185/29	510	18,8	0,159	0,413	2,75	—	—
240/32	605	21,6	0,118	0,405	2,81	0,435	2,6
300/39	710	24	0,096	—	—	0,429	2,64
400/51	825	27,5	0,073	—	—	0,420	2,70
500/64	945	30,6	0,059	—	—	0,413	2,74

Рекомендуемое содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Задание на лабораторную работу и порядок ее выполнения.
3. Расчетная схема электроэнергетической системы и технические характеристики электрооборудования.
4. Расчет параметров схем замещения системы.
5. Схемы замещения системы с указанием параметров и результирующих мощностей в узлах.
6. Таблицы результатов моделирования режимов системы с помощью ЭВМ.
7. Анализ результатов.
8. Список использованных источников.

При оформлении отчета следует выполнять требования к оформлению текстового материала, иллюстраций, таблиц и списка литературы в соответствии со стандартами по организации учебного процесса и контроля его качества [6]-[8]. При разработке отчета необходимо делать ссылки на иллюстрации, таблицы и библиографические источники.

Подписано в печать 6.03.2014.	Усл. печ. л. 3,0	Тираж	экз.
Печать офсетная.	Бумага писчая.	Заказ № ____.	
Отпечатано: РИО ВоГУ, г. Вологда, ул. Ленина, 15			