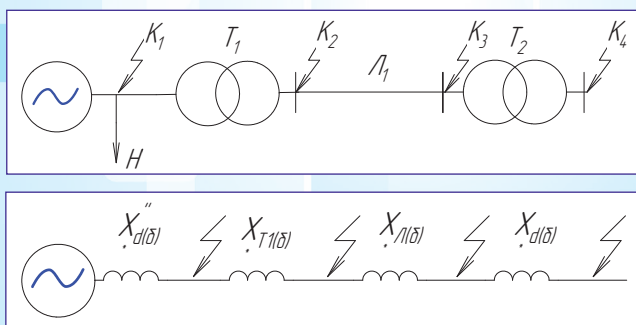


А.В. Бычков

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Лабораторный практикум



УДК 621.3.064.1(075.8)

ББК 31.27-018я73

Рецензенты:

канд. техн. наук, инженер отдела анализа и прогнозирования

ООО «ТольяттиЭнергоСбыт» *П.А. Шастин;*

канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение
и электротехника» Тольяттинского государственного
университета *О.В. Самолина.*

Бычков, А.В. Электромагнитные и электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах : лабораторный практикум / А.В. Бычков. – Тольятти : Издательство ТГУ, 2025. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1688-0.

В лабораторном практикуме изложены цель, программа выполнения лабораторных работ, требования к содержанию отчета; приведены контрольные вопросы, список использованных источников для углубленного изучения теоретического материала.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения высшего образования (в том числе с использованием дистанционной образовательной технологии).

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8/10; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader; интернет-браузер.

© Бычков А.В., 2025

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2025

Учебное издание

Бычков Александр Владимирович

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Редактор Е.В. Пилясова

Технический редактор Н.П. Крюкова

Компьютерная верстка: Л.В. Сызганцева

Художественное оформление,

компьютерное проектирование: И.И. Шишкина

В оформлении пособия использовано изображение
от [pinnacleanimates](https://pinnacleanimates.ru) на сайте ru.freepik.com

Дата подписания к использованию 10.04.2025.

Объем издания 1,8 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск,
первичная упаковка.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-02-24.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

Введение	5
Лабораторная работа 1. Расчет трехфазного КЗ на стороне ниже 1000 В	8
Лабораторная работа 2. Расчет трехфазного КЗ в цепи выше 1000 В	14
Лабораторная работа 3. Расчет несимметричных аварий в ЭЭС	20
Лабораторная работа 4. Моделирование и анализ переходных процессов для случая трехфазного КЗ на стороне ниже 1000 В	24
Лабораторная работа 5. Моделирование и анализ переходных процессов для случая несимметричных КЗ в ЭЭС	29
Заключение	35
Библиографический список	36
Приложение	38

Введение

Цель лабораторного практикума заключается в обеспечении студентов необходимыми знаниями и навыками для понимания, анализа и моделирования переходных электромагнитных и электромеханических процессов в электроэнергетических системах.

Задачи учебного курса:

- ознакомить студентов с основами теории электромагнитных процессов, возникающих при переключении электрических цепей, включая рассмотрение явлений индукции, зарядки и разрядки конденсаторов, а также электромагнитных колебаний;
- научить студентов рассчитывать переходные процессы в электрических цепях, включая анализ и расчет токов и напряжений в электроэнергетических системах в различных режимах работы;
- привить студентам навыки работы с соответствующими инструментами и программным обеспечением для моделирования и анализа электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

Лабораторные работы выполняются на стендах в лаборатории «Моделирование электрических систем. Внутривзаводское электроснабжение и режимы». На занятиях студенты изучают электрические схемы подключения синхронного генератора на параллельную работу с корпусом ТГУ, проводят монтаж-демонтаж электрической схемы, снимают электрические параметры с исследуемых объектов. В связи с этим цель лабораторных занятий – сформировать у студентов знания в области электромагнитных и электромеханических переходных процессов. Основные задачи: ознакомление обучающихся с назначением, основными параметрами, конструкцией и принципами работы синхронного генератора, ознакомление с методиками расчета коротких замыканий на стороне до и выше 1 кВ.

Студент, успешно прошедший курс «Электромагнитные и электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах», должен обладать следующими знаниями, умениями и навыками:

- переходные процессы: знания о переходных процессах в электроэнергетических системах, включая процессы зарядки и разрядки конденсаторов, работы электромагнитных катушек и генераторов;

— машины по производству и преобразованию энергии: знания о принципах работы и устройстве электромеханических машин, таких как двигатели и генераторы;

— измерения и испытания: навыки проведения измерений и испытаний электромеханических систем, а также интерпретации полученных данных;

— моделирование и анализ: умение использовать специализированные программы и инструменты для моделирования и анализа электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

В каждой лабораторной работе после определения цели и содержания даются методические указания по ее выполнению.

Требования к технике безопасности при выполнении работ

1. Запрещается приступать к работе в действующей электроустановке без оформления надлежащей документации в полном объеме.

2. Запрещается проводить монтаж и демонтаж электрической схемы без разрешения преподавателя или инженера (учебного мастера).

3. Запрещается включать вводный автомат без разрешения преподавателя или инженера (учебного мастера).

4. После сборки электрической схемы она должна быть представлена преподавателю или инженеру (учебному мастеру).

5. Запрещается самовольно подавать напряжение на действующую электроустановку.

6. После завершения лабораторной работы место проведения работы должно быть приведено в изначальный вид.

7. В течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах. Выходить из помещения лаборатории во время занятий можно только с разрешения преподавателя.

Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ в аудитории

Лабораторная работа в аудитории выполняется в три этапа: допуск к лабораторной работе; выполнение лабораторной работы; защита лабораторной работы.

Допуск

1. Для допуска к лабораторной работе необходимо подготовить отчет о лабораторной работе.

2. Отчет включает титульный лист (см. прил.), цель работы, краткие теоретические сведения, принципиальную или монтажную схему, таблицу для внесения результатов.

3. Допуск осуществляется посредством устных ответов на вопросы по лабораторной работе (например, цель работы, описание всех элементов на электрической схеме, порядок выполнения лабораторной работы).

4. Необходимо получить подпись преподавателя на титульном листе отчета о том, что студент допущен к проведению физического эксперимента.

5. При отсутствии отчета о лабораторной работе студент не допускается к ее выполнению.

Выполнение

1. Лабораторные работы проводятся в присутствии учебного мастера либо преподавателя.

2. После завершения лабораторной работы студенты должны получить отметку о ее завершении у преподавателя или учебного мастера. Выполнение работы без получения подтверждающей отметки не будет засчитано как за успешное прохождение экспериментальной части лабораторной работы.

Защита

1. Защита проводится устно по контрольным вопросам в данной лабораторной работе.

2. На защиту необходимо подготовить готовый отчет о лабораторной работе.

3. При отсутствии отчета о лабораторной работе студент не допускается к ее защите.

Лабораторная работа 1

Расчет трехфазного КЗ на стороне ниже 1000 В

Цель работы — получить практические навыки расчета тока трехфазного короткого замыкания в цепях ниже 1000 В.

План проведения занятия

1. Взять номер варианта у преподавателя. Выполнить задание согласно варианту (табл. 1.1).
2. Произвести расчет трехфазного КЗ на стороне ниже 1000 В.
3. Оформить отчет о лабораторной работе, используя текстовый редактор MS Word, для ввода формул использовать редактор формул, для схем — ПО «Компас».

Используемое оборудование и материалы

1. Методика расчета трехфазного КЗ на стороне ниже 1000 В (лекционный материал).
2. Инженерный калькулятор.
3. Компьютер с установленным программным обеспечением Mathcad (13-я версия и старше).

Примечание: работа может быть выполнена как вручную, так и в программном обеспечении Mathcad (пункт 3 является необязательным).

Порядок выполнения лабораторной работы

Расчет трехфазных КЗ в сетях до 1 кВ ведется в именованных единицах, приведенных к базисной ступени напряжения. При расчете учитываются как реактивные, так и активные сопротивления. Для расчета тока короткого замыкания используются типовые формулы, приведенные ниже.

1. Трансформатор:

$$z_{*T} = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_6^2}{S_H}; \quad (1.1)$$

$$r_{*T} = \Delta P_{KЗ} \cdot \frac{U_6^2}{S_H^2}, \quad (1.2)$$

где $u_{k\%}$ — напряжение КЗ трансформатора; $\Delta P_{\text{КЗ}}$ — активные потери холостого хода трансформатора; U_6 — базисное напряжение в кВ (средненоминальное напряжение ступени); $S_{\text{н}}$ — номинальная мощность трансформатора.

2. Линии воздушные, кабельные:

$$r_{*л} = r_0 \cdot l \cdot \frac{U_6^2}{U_{\text{н}}^2}; \quad (1.3)$$

$$x_{*л} = x_0 \cdot l \cdot \frac{U_6^2}{U_{\text{н}}^2}, \quad (1.4)$$

где r_0 , x_0 — соответственно удельные активное и реактивное сопротивления линии, Ом/км; l — длина линии, км; $U_{\text{н}}$ — ее средненоминальное напряжение.

3. Отдельные сопротивления:

$$r_* = r \cdot \frac{U_6^2}{U_{\text{н}}^2}; \quad (1.5)$$

$$x_* = x \cdot \frac{U_6^2}{U_{\text{н}}^2}, \quad (1.6)$$

где $U_{\text{н}}$ — средненоминальное напряжение ступени, где это сопротивление включено.

Порядок расчета трехфазных КЗ в сетях напряжением ниже 1 кВ

1. По исходной схеме составляется схема замещения (рис. 1.1), приведенная к одной ступени напряжения U_6 . В схеме замещения учитываются как индуктивные, так и активные сопротивления элементов сети.

2. По типовым формулам рассчитываются все сопротивления схемы в именованных единицах, приводятся к U_6 . При этом напряжение источника питания в ней будет определяться как

$$U_* = U \cdot \frac{U_6}{U_{\text{н}}}. \quad (1.7)$$

Расчетная схема приведена на рис. 1.1.

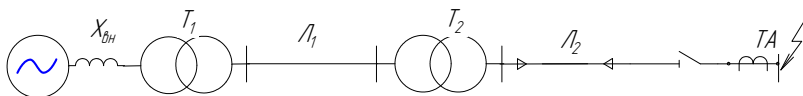


Рис. 1.1. Расчетная схема

3. Далее схема приводится к одной ступени напряжения (рис. 1.2).

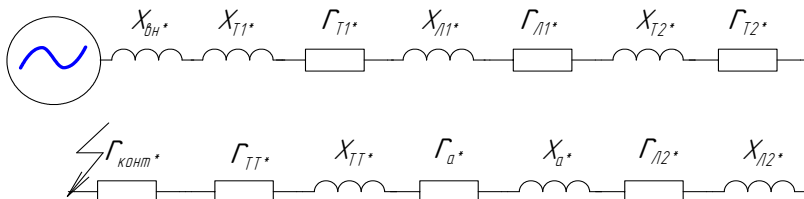


Рис. 1.2. Приведенная схема

4. Путем последовательных преобразований получают простейшую схему замещения (рис. 1.3).

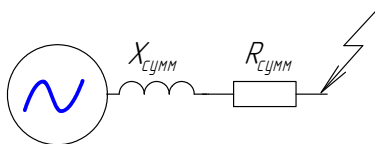


Рис. 1.3. Схема замещения

5. Затем рассчитывают приведенный ток КЗ по формулам:

$$I_{*k} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{*\Sigma}}; \quad (1.8)$$

$$Z_{*\Sigma} = \sqrt{R_{*\Sigma}^2 + X_{*\Sigma}^2}. \quad (1.9)$$

6. Последовательно разворачивая схему к исходному виду, можно найти приведенные значения напряжения и тока во всех нужных точках. По этим значениям вычисляем, применяя формулы обратного пересчета, их истинные значения:

$$I_k = I_{*k} \cdot \frac{U}{U_{\text{н}}}. \quad (1.10)$$

Этот ток протекает через линию L_2 , катушку автоматического выключателя, первичную обмотку трансформатора тока. Ток в линии L_1 равен:

$$I_{L_1} = I_k \cdot \frac{U_6}{U_n}, \quad (1.11)$$

где U_n — средненоминальное напряжение этой линии.

Вывод

В отчете о лабораторной работе студент должен представить основные результаты и выводы, сделанные на основе проведенных расчетов (численные данные, графики, таблицы, схемы и т. д.). Все графические материалы должны быть выполнены в соответствии с ЕСКД.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Расчет индивидуального задания по варианту (выдается преподавателем).
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как привести к базисной ступени сопротивление питающей сети?
2. Как привести к базисной ступени сопротивление линии?
3. Как рассчитать приведенное к базисной ступени реактивное сопротивление трансформатора?
4. Как рассчитать приведенное к базисной ступени активное сопротивление трансформатора?
5. Какие основные элементы аварийной цепи определяют величину тока КЗ?
6. Опишите порядок вывода типовых формул для расчета токов КЗ на стороне ниже 1000 В.
7. Приведите алгоритм расчета трехфазных токов КЗ на стороне ниже 1000 В.

Таблица 1.1

Задания по вариантам

Параметры	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
1. Система: U_n , кВ	35	110	220	35	110	220
Внешнее сопротивление системы, Ом	10	50	100	15	60	120
2. Трансформатор T_1 ном S , МВА	10	15	20	25	30	35
Напряжение КЗ, %	7,5	8,0	8,5	8,5	8,0	7,5
Активные потери КЗ, кВт	100	125	150	175	200	225
3. Линия L_1 : U_n , кВ	10	35	10	10	10	35
Удельное активное сопротивление, Ом/км	0,08	0,07	0,06	0,08	0,07	0,06
Удельное реактивное сопротивление, Ом/км	0,4	0,42	0,44	0,44	0,42	0,4
Длина, км	1	2	3	4	1	2
4. Трансформатор T_2 ном S , МВА	4	3	2	1	4	3
Напряжение КЗ, %	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
Активные потери КЗ, кВт	25	20	15	10	30	25
5. Линия L_2 : U_n , кВ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Удельное активное сопротивление, Ом/км	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
Удельное реактивное сопротивление, Ом/км	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
Длина, км	0,10	0,10	0,15	0,15	0,20	0,20
6. Трансформатор тока R , Ом	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
Реактивное сопротивление, Ом	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
7. Катушка автомата R , Ом	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002
Реактивное сопротивление, Ом	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002
8. Сопротивление контактов R , Ом	0,030	0,035	0,040	0,045	0,050	0,055
9. U_n в точке КЗ , кВ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Параметры	Варианты					
	7	8	9	10	11	12
1. Система: U_n, кВ	35	110	220	35	110	220
Внешнее сопротивление системы, Ом	20	70	140	25	80	160
2. Трансформатор T_1 ном S, МВА	40	45	50	55	60	65
Напряжение КЗ, %	7,5	8,0	8,5	8,5	8,0	7,5
Активные потери КЗ, кВт	250	275	300	325	350	375
3. Линия L_1: U_n, кВ	10	35	10	35	10	35
Удельное активное сопротивление, Ом/км	0,08	0,07	0,06	0,08	0,07	0,06
Удельное реактивное сопротивление, Ом/км	0,4	0,42	0,44	0,44	0,42	0,4
Длина, км	3	4	1	2	3	4
4. Трансформатор T_2 ном S, МВА	2	1	4	3	2	1
Напряжение КЗ, %	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5	6,0
Активные потери КЗ, кВт	20	15	35	30	25	20
5. Линия L_2: U_n, кВ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Удельное активное сопротивление, Ом/км	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
Удельное реактивное сопротивление, Ом/км	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Длина, км	0,25	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35
6. Трансформатор тока R, Ом	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
Реактивное сопротивление, Ом	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
7. Катушка автомата R, Ом	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002
Реактивное сопротивление, Ом	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002
8. Сопротивление контактов R, Ом	0,055	0,050	0,045	0,040	0,035	0,030
9. U_n в точке КЗ, кВ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Лабораторная работа 2

Расчет трехфазного КЗ в цепи выше 1000 В

Цель работы — получить практические навыки расчета тока трехфазного короткого замыкания в сети выше 1000 В.

План проведения занятия

1. Взять номер варианта у преподавателя. Выполнить задание согласно варианту (табл. 2.1).
2. Произвести расчет трехфазного КЗ на стороне выше 1000 В.
3. Оформить отчет о лабораторной работе, используя текстовый редактор MS Word, для ввода формул использовать редактор формул, для схем — ПО «Компас».

Используемое оборудование и материалы

1. Методика расчета трехфазного КЗ на стороне выше 1000 В (лекционный материал).
2. Инженерный калькулятор.
3. Компьютер с установленным программным обеспечением Mathcad (13-я версия и старше).

Примечание: работа может быть выполнена как вручную, так и в программном обеспечении Mathcad (пункт 3 является необязательным).

Порядок выполнения лабораторной работы

Расчет трехфазных КЗ в сетях выше 1 кВ ведется в относительных единицах, приведенных к базисной мощности. Для этого используются следующие формулы.

1. Генератор:

$$x''_{*d(6)} = x''_d \cdot \frac{S_6}{S_n} = x''_d \cdot \frac{S_6 \cdot \cos \varphi_n}{P_n}, \quad (2.1)$$

где x''_d — паспортные значения сверхпереходного сопротивления генератора в относительных единицах (по отношению к номиналу); S_6 — произвольно выбранная базисная мощность, МВА; S_n — номинальная полная мощность генератора, МВА; $\cos \varphi_n$ — номинальный коэффициент мощности; P_n — номинальная активная мощность генератора, МВт.

2. Трансформатор (автотрансформатор):

$$x_{*T(6)} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H}, \quad (2.2)$$

где $u_{k\%}$ — номинальное напряжение короткого замыкания; S_H — номинальная полная мощность трансформатора, МВА.

3. Токоограничивающий реактор:

$$x_{*P(6)} = \frac{x_{p\%}}{100} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_H}, \quad (2.3)$$

где $x_{p\%}$ — сопротивление реактора (по отношению к номиналу); U_H — средненоминальное напряжение реактора, кВ; I_H — номинальный ток реактора, кА.

4. Линии электропередачи:

$$x_{*л(6)} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_H^2}, \quad (2.4)$$

где x_0 — удельное сопротивление линии, Ом/км; l — длина линии, км; U_H — средненоминальное напряжение линии.

5. Система:

$$x_{*C(6)} = \frac{S_6}{S_K}, \quad (2.5)$$

где S_K — мощность короткого замыкания на зажимах сети, МВА.

Расчетная схема приведена на рис. 2.1.

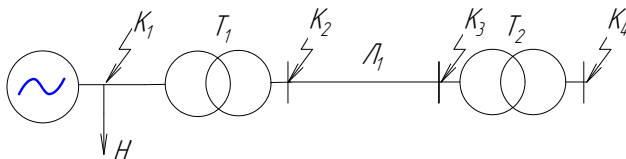


Рис.2.1. Расчетная схема

Методика расчета

1. Путем последовательных преобразований получают простейшую схему замещения (рис. 2.2).

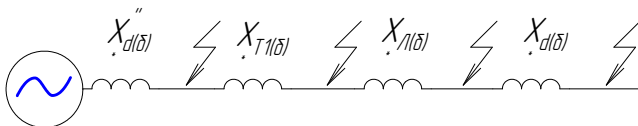


Рис. 2.2. Схема замещения сети

2. Тогда в зависимости от точки короткого замыкания:

K1:

$$x_{*\Sigma(6)}'' = x_{*d(6)}''; \quad (2.6)$$

K2:

$$x_{*\Sigma(6)}'' = x_{*d(6)}'' + x_{*T1(6)}; \quad (2.7)$$

K3:

$$x_{*\Sigma(6)}'' = x_{*d(6)}'' + x_{*T1(6)} + x_{*Л(6)}; \quad (2.8)$$

K4:

$$x_{*\Sigma(6)}'' = x_{*d(6)}'' + x_{*T1(6)} + x_{*Л(6)} + x_{*T2(6)}, \quad (2.9)$$

где $x_{*\Sigma(6)}''$ — результирующее сверхпереходное сопротивление по продольной оси расчетной схемы до точки короткого замыкания при выбранной величине базисной мощности S_6 .

3. Для метода расчетных кривых рассчитывают расчетные значения сопротивлений для каждой точки КЗ:

$$x_{\text{расч}} = x_{*\Sigma(6)} \cdot \frac{S_{\text{н}\Sigma}}{S_6}; \quad (2.10)$$

$$S_{\text{н}\Sigma} = \frac{P_{\text{н}} \cdot n}{\cos \phi_{\text{н}}}. \quad (2.11)$$

4. Используя расчетные кривые для конкретного вида генератора (по варианту), находят периодическую слагающую тока КЗ для заданных моментов времени. Затем пересчитывают их на новый базис.

5. Пересчитывают полученный ток в именованных единицах, используя базисный ток аварийной ступени:

$$I_{\text{к,кА}} = I_{\text{к}} \cdot I_6; \quad (2.12)$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}}}. \quad (2.13)$$

6. Сводят в сводную таблицу результаты расчетов и строят зависимость периодической слагающей тока трехфазного КЗ от времени.

7. Рассчитывают ударный ток трехфазного (в именованных единицах) КЗ для всех точек КЗ:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I'' , \quad (2.14)$$

где k_y — ударный коэффициент.

Вывод

В отчете о лабораторной работе студент должен представить основные результаты и выводы, сделанные на основе проведенных расчетов (численные данные, графики, таблицы, схемы и т. д.). Все графические материалы должны быть выполнены в соответствии с ЕСКД.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Расчет индивидуального задания по варианту (выдается преподавателем).
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Сверхпереходный ток КЗ — что это такое? Какими параметрами он определяется?
2. Переходный ток КЗ — что это такое? Какими параметрами он определяется?
3. Установившийся ток КЗ — что это такое? Какими параметрами он определяется?
4. Какие паспортные параметры описывают синхронный генератор?
5. Почему генератор замещается сопротивлением по продольной оси?
6. Как влияет АРВ генератора на характер переходного процесса при КЗ?
7. Как изменяется $I_{nk} = f(T)$ по мере удаления точки КЗ от источника питания?

Таблица 2.1

Задания по вариантам

Параметры	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
1. Станция						
Тип	ГЭС	ГЭС	ГЭС	ГРЭС	ГРЭС	ГРЭС
Номинальная мощность, МВт	1 · 50	2 · 100	4 · 200	1 · 50	2 · 100	4 · 200
Cos φ	0,8	0,85	0,92	0,8	0,85	0,92
Номинальное напряжение, кВ	6	10	10	6	10	10
Сверхпереходное сопротивление, о. е.	0,2	0,2	0,2	0,125	0,125	0,125
Соединение фазных обмоток	Звезда					
2. Нагрузка						
Соединение фазных обмоток	Треугольник					
3. Трансформатор Т ₁						
Номинальная мощность	1 · 60	2 · 120	4 · 250	1 · 60	2 · 120	4 · 250
Напряжение КЗ, %	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
Соединение фазных обмоток						
Конструкция магнитопровода	3 одн.	3 ф. 4 ст.	3 ф. 3 ст.	3 ф. 3 ст.	3 ф. 5 ст.	3 одн.
4. Линия						
Номинальное напряжение, кВ	110	220	500	110	220	500
Длина, км	30	50	100	40	60	90
Число цепей	2	2	1	2	1	1
Удельное реактивное сопротивление прямой последовательности, Ом/км	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
Удельное реактивное сопротивление обратной последовательности, Ом/км	1,88	1,97	1,32	2,07	1,26	1,2
5. Трансформатор Т ₂						
Номинальное напряжение	1 · 60	2 · 120	4 · 250	1 · 60	2 · 120	4 · 250
Напряжение КЗ, %	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
Соединение фазных обмоток						
Номинальное напряжение в точке КЗ, кВ	10	35	110	10	35	110

Параметры	Варианты					
	7	8	9	10	11	12
1. Станция						
Тип	ГЭС	ГЭС	ГЭС	ГРЭС	ГРЭС	ГРЭС
Номинальная мощность, МВт	1 · 50	2 · 100	4 · 200	1 · 50	2 · 100	4 · 200
Cos φ	0,8	0,85	0,92	0,8	0,85	0,92
Номинальное напряжение, кВ	6	10	10	6	10	10
Сверхпереходное сопротивление, о. е.	0,2	0,2	0,2	0,125	0,125	0,125
Соединение фазных обмоток						
2. Нагрузка						
Соединение фазных обмоток						
3. Трансформатор Т ₁						
Номинальная мощность	1 · 60	2 · 120	4 · 250	1 · 60	2 · 120	4 · 250
Напряжение КЗ, %	9,5	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0
Соединение фазных обмоток						
Конструкция магнитопровода	3 ф. 4 ст.	3 одн.	3 ф. 3 ст.	3 ф. 3 ст.	3 ф. 5 ст.	3 одн.
4. Линия						
Номинальное напряжение, кВ	110	220	500	110	220	500
Длина, км	50	70	110	60	80	120
Число цепей	2	2	1	2	1	1
Удельное реактивное сопротивление прямой последовательности, Ом/км	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,4
Удельное реактивное сопротивление обратной последовательности, Ом/км	2,1	2,12	1,25	2,0	1,3	1,28
5. Трансформатор Т ₂						
Номинальное напряжение	1 · 60	2 · 120	4 · 250	1 · 60	2 · 120	4 · 250
Напряжение КЗ, %	9,5	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0
Соединение фазных обмоток						
Номинальное напряжение в точке КЗ, кВ	10	35	110	10	35	110

Лабораторная работа 3

Расчет несимметричных аварий в ЭЭС

Цель работы — получить практические навыки расчета несимметричного короткого замыкания в цепях выше 1000 В.

План проведения занятия

1. Взять номер варианта у преподавателя. Выполнить задание согласно варианту (табл. 3.1).
2. Произвести расчет несимметричных аварий в ЭЭС.
3. Оформить отчет о лабораторной работе, используя текстовый редактор MS Word, для ввода формул использовать редактор формул, для схем — ПО «Компас».

Используемое оборудование и материалы

1. Методика расчета несимметричных аварий в ЭЭС (лекционный материал).
2. Инженерный калькулятор.
3. Компьютер с установленным программным обеспечением Mathcad (13-я версия и старше).

Примечание: работа может быть выполнена как вручную, так и в программном обеспечении Mathcad (пункт 3 является необязательным).

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Составляют схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей. Определяют приведенные значения сопротивлений этих схем в о. е.
2. Свертывая схемы различных последовательностей, находят z_{Σ} и $z_{0\Sigma}$, а также $z_{\text{Д}}^{(n)}$ — добавочное сопротивление включают в точку КЗ. Получившуюся схему преобразуют к простейшему виду и находят $I_{k1}^{(n)}$.
3. Через $I_{k1}^{(n)}$ определяют остальные симметричные составляющие, а также фазные значения токов и напряжений в этой точке. Умножая их на базисный ток, определяют эти токи и напряжения в этой точке в именованных единицах.

4. Для остальных точек схемы поступают аналогично, предварительно развернув схемы отдельных последовательностей и найдя значения симметричных составляющих в нужных точках.

Фазные токи и напряжения:

$$\left. \begin{aligned} U_{KA} &= U_{KA1} + U_{KA2} + U_{K0} \\ U_{KB} &= a^2 \cdot U_{KA1} + a \cdot U_{KA2} + U_{K0} \\ U_{KC} &= a \cdot U_{KA1} + a^2 \cdot U_{KA2} + U_{K0} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} I_{KA} &= I_{KA1} + I_{KA2} + I_{K0} \\ I_{KB} &= a^2 \cdot I_{KA1} + a \cdot I_{KA2} + I_{K0} \\ I_{KC} &= a \cdot I_{KA1} + a^2 \cdot I_{KA2} + I_{K0} \end{aligned} \right\}$$

Все симметричные составляющие тока и напряжения в точке КЗ однозначно выражаются через ток прямой последовательности (табл. 3.1). Фазные величины токов и напряжений определяются геометрическим суммированием симметричных составляющих.

Методика расчета

1. Выполнить предварительный расчет по вариантам (возможно применение программного комплекса Mathcad). Рассчитать практическим методом:

- сверхпереходный и установившийся токи НКЗ для всех видов несимметричных КЗ;
- коэффициенты тяжести аварии k_T для всех видов НКЗ;
- ударный ток самого опасного НКЗ.

2. Методом расчетных кривых рассчитать и построить $I_{nk} = f(t)$ для вида НКЗ, заданного в варианте.

3. Для одного из рассчитанных случаев НКЗ (по варианту) рассчитать симметричные составляющие тока и напряжения в точке КЗ.

4. Построить векторные диаграммы токов и напряжений всех видов НКЗ.

Таблица 3.1

Токи и напряжения различных последовательностей при НКЗ

Определяемые величины и их обозначения	Вид короткого замыкания		
	Однофазное	Двухфазное	Двухфазное на землю
Ток обратной последовательности	$\dot{I}_{KA1}$	$-\dot{I}_{KA1}$	$-\frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \cdot \dot{I}_{KA1}$
Ток нулевой последовательности	$\dot{I}_{KA1}$	0	$-\frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \cdot \dot{I}_{KA1}$
Напряжение прямой последовательности	$j \cdot (x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) \cdot \dot{I}_{KA1}$	$-j \cdot x_{2\Sigma} \cdot \dot{I}_{KA1}$	$j \cdot \frac{x_{0\Sigma} \cdot x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \cdot \dot{I}_{KA1}$
Напряжение обратной последовательности	$-j \cdot x_{2\Sigma} \cdot \dot{I}_{KA1}$	$-j \cdot x_{2\Sigma} \cdot \dot{I}_{KA1}$	$j \cdot \frac{x_{0\Sigma} \cdot x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \cdot \dot{I}_{KA1}$
Напряжение нулевой последовательности	$-j \cdot x_{0\Sigma} \cdot \dot{I}_{KA1}$	0	$j \cdot \frac{x_{0\Sigma} \cdot x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \cdot \dot{I}_{KA1}$

Вывод

В отчете о лабораторной работе студент должен представить основные результаты и выводы, сделанные на основе проведенных расчетов (численные данные, графики, таблицы, схемы и т. д.). Все графические материалы должны быть выполнены в соответствии с ЕСКД.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Расчет индивидуального задания по варианту (выдается преподавателем).
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. В чем суть метода симметричных составляющих? Какой порядок чередования фаз в системах прямой, обратной и нулевой последовательностей?
2. Как по известным симметричным составляющим фазы «А» построить векторные диаграммы токов и напряжения во всех фазах при НКЗ?
3. Как строятся схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей при НКЗ?
4. Какими параметрами замещается генератор для схем различных последовательностей?

Лабораторная работа 4

Моделирование и анализ переходных процессов для случая трехфазного КЗ на стороне ниже 1000 В

Цель работы — получить практические навыки моделирования симметричного короткого замыкания на стороне ниже 1 кВ на стенде «Модель электрической системы».

План проведения занятия

1. Изучить теоретический материал об объекте исследования, ознакомиться с целью работы, порядком выполнения эксперимента.
2. Подготовить отчет о лабораторной работе (см. раздел «Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ в аудитории»).
3. Получить отметку у преподавателя о допуске к выполнению лабораторной работы (см. раздел «Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ в аудитории»).
4. Выполнить физический эксперимент согласно порядку выполнения лабораторной работы.
5. Оформить отчет о лабораторной работе, используя текстовый редактор MS Word, для ввода формул использовать редактор формул, для схем — ПО «Компас».

Используемое оборудование и материалы

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	0...250 В —; 3 А (якорь); 200 В —; 1 А (возбуждение)
G3	Возбудитель машины переменного тока	209.2	0...40 В —; 3,5 А
G4	Машина переменного тока (синхронный генератор)	102.1	50 Вт; 230 В ~; $\cos \varphi = 1$; 1500 мин ⁻¹
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
M1	Двигатель постоянного тока	101.1	90 Вт; 220 В; 0,76 А (якорь); 220 В; 0,2 А (возбуждение)
A1	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1	600 В / 3 В (тр-р напряж.); 0,3 А / 3 В (тр-р тока)
A2	Коннектор	330	8 аналоговых диф. входа; 2 аналоговых выхода; 8 цифр. входов/выходов
A3	Блок синхронизации	319	220 В ~; 16 А; синхроскоп; 3 индикаторные лампы
A4	Трехфазная трансформаторная группа	347.2	$3 \times 80 \text{ В} \cdot \text{А}$; 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 / 230 В (треугольник)
A5	Персональный компьютер	310	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата PCI 6024E
A6, A8	Трехполюсный выключатель	301	400 В ~; 10 А
A7	Модель линии электропередачи	313.2	400 В ~; $3 \times 0,5 \text{ А}$
P1	Указатель частоты вращения	506.2	$0 \dots 2000 \text{ мин}^{-1}$
P2	Измеритель напряжений и частот	504.1	$0 \dots 500 \text{ В} \sim$; 45...55 Гц, 220 В ~

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.
3. Соедините гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 4.1), используя дополнение к схеме (рис. 4.2).

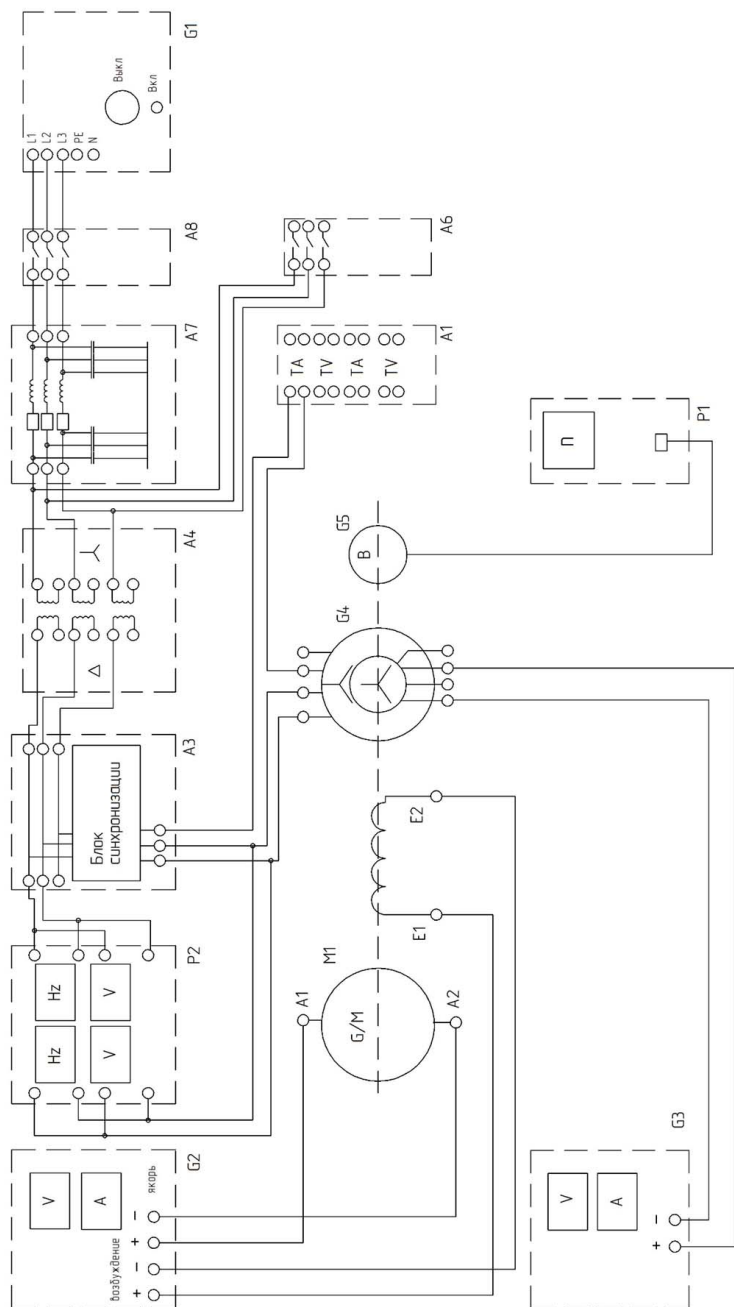


Рис. 4.1. Электрическая схема соединений (часть 1)

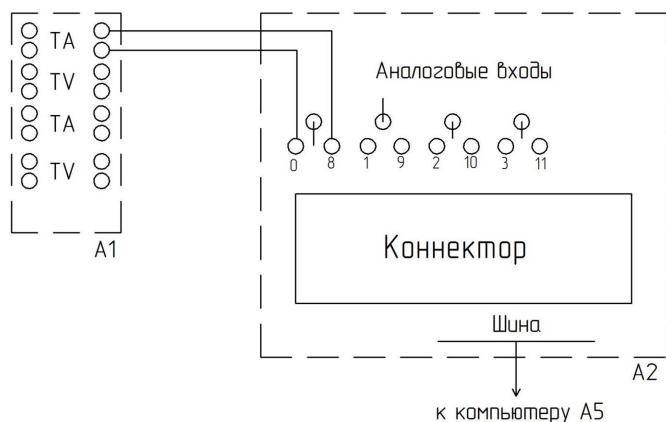


Рис. 4.2. Электрическая схема соединений (часть 2)

5. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5, войдите в каталог «Программное обеспечение учебного лабораторного комплекса „Модель электрической системы“», вызовите прикладную программу «Многоканальный записывающий осциллограф».

6. Осуществите ручное подключение к сети синхронного генератора G4 методом точной синхронизации.

7. Используя возможности прикладной программы, установите продолжительность переходного процесса при коротком замыкании.

8. Переключатель режима работы выключателя А6 установите в положение «РУЧН».

9. Запустите прикладную программу и сразу после этого нажмите кнопку «ВКЛ» выключателя А6.

10. Через 1–2 секунды нажмите кнопку «ОТКЛ» выключателя А6.

11. Изменение тока статорной обмотки генератора G4 при коротком замыкании в сети наблюдайте на экране монитора компьютера.

12. По завершении эксперимента поверните регулировочные рукоятки сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 против часовой стрелки до упора, отключите выключатели «СЕТЬ» возбудителя G3, источника G2, указателя Р1 и выключателей А6, А8, отключите источник G1 нажатием на красную кнопку-гриб и последующим отключением ключа-выключателя.

Вывод

В отчете о лабораторной работе студент должен представить основные результаты и выводы, сделанные на основе проведенных расчетов (численные данные, графики, таблицы, схемы и т. д.). Все графические материалы должны быть выполнены в соответствии с ЕСКД.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Электрическая схема соединений.
4. Порядок выполнения лабораторной работы.
5. Анализ полученных результатов и выводы.

Контрольные вопросы

1. Как изменяются во времени слагающие тока КЗ при питании аварийной схемы источником бесконечной мощности?
2. Какие основные элементы аварийной цепи определяют величину тока КЗ на стороне ниже 1000 В?
3. Дайте определения амплитудного, мгновенного и действующего токов КЗ.
4. Чем отличаются расчетные условия от допущений при анализе аварий системы электроснабжения (СЭС)?
5. Чем обусловлено затухание периодической составляющей тока КЗ во времени (тепловой спад тока)?
6. Опишите понятие «источник бесконечной мощности (неизменного питания)».

Лабораторная работа 5

Моделирование и анализ переходных процессов для случая несимметричных КЗ в ЭЭС

Цель работы — получить практические навыки моделирования несимметричного короткого замыкания в четырехпроводной сети на стороне ниже 1000 В на стенде «Модель электрической системы».

План проведения занятия

1. Изучить теоретический материал об объекте исследования, ознакомиться с целью работы, порядком выполнения эксперимента.
2. Подготовить отчет о лабораторной работе (см. раздел «Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ в аудитории»).
3. Получить отметку у преподавателя о допуске к выполнению лабораторной работы (см. раздел «Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ в аудитории»).
4. Выполнить физический эксперимент согласно порядку выполнения лабораторной работы.
5. Оформить отчет о лабораторной работе, используя текстовый редактор MS Word, для ввода формул использовать редактор формул, для схем — ПО «Компас».

Используемое оборудование и материалы

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	0...250 В —; 3 А (якорь) 200 В —; 1 А (возбуждение)
G3	Возбудитель машины переменного тока	209.2	0...40 В —; 3,5 А
G4	Машина переменного тока (синхронный генератор)	102.1	50 Вт; 230 В ~; $\cos \varphi = 1$; 1500 мин ⁻¹
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
M1	Двигатель постоянного тока	101.1	90 Вт; 220 В; 0,76 А (якорь); 220 В; 0,2 А (возбуждение)
A1	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1	600 В / 3 В (тр-р напряж.); 0,3 А / 3 В (тр-р тока)
A2	Коннектор	330	8 аналоговых диф. входа; 2 аналоговых выхода; 8 цифр. входов/выходов
A3	Блок синхронизации	319	220 В ~; 16 А; синхроскоп; 3 индикаторные лампы
A4	Трехфазная трансформаторная группа	347.2	$3 \times 80 \text{ В} \cdot \text{А}$; 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 / 230 В (треугольник)
A5	Персональный компьютер	310	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата PCI 6024E
A6, A8	Трехполюсный выключатель	301	400 В ~; 10 А
A7	Модель линии электропередачи	313.2	400 В ~; $3 \times 0,5 \text{ А}$
P1	Указатель частоты вращения	506.2	$0 \dots 2000 \text{ мин}^{-1}$
P2	Измеритель напряжений и частот	504.1	$0 \dots 500 \text{ В} \sim$; $45 \dots 55 \text{ Гц}$, $220 \text{ В} \sim$

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.
3. Соедините гнезда защитного заземления «⊕» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
4. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 5.1, 5.2).

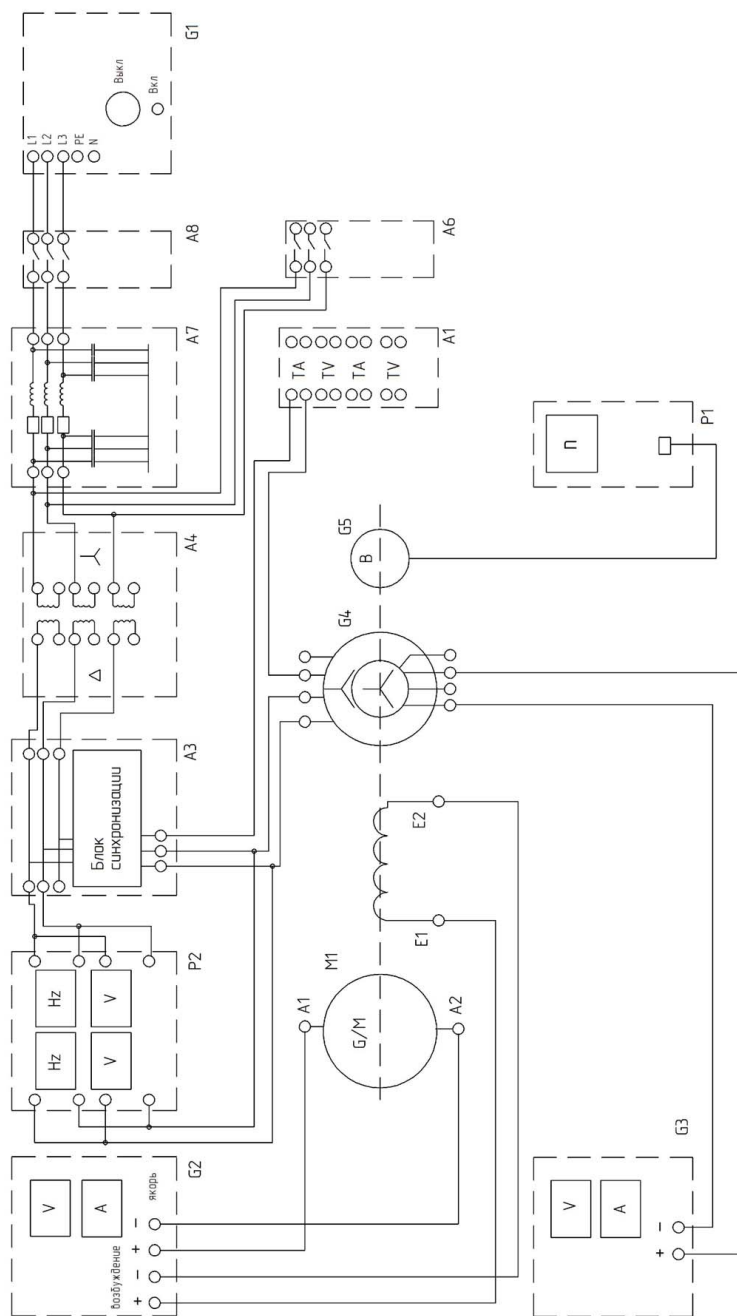


Рис. 5.1. Электрическая схема соединений (часть 1)

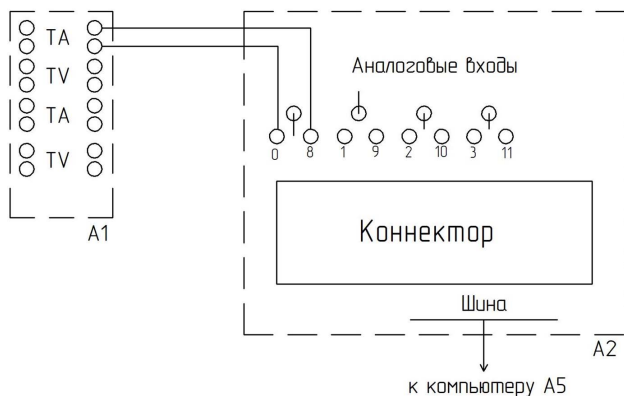


Рис. 5.2. Электрическая схема соединений (часть 2)

5. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5, войдите в каталог «Программное обеспечение учебного лабораторного комплекса „Модель электрической системы“», вызовите прикладную программу «Многоканальный записывающий осциллограф».

6. Осуществите ручное подключение к сети синхронного генератора G4 методом точной синхронизации.

7. Используя возможности прикладной программы, установите продолжительность переходного процесса при коротком замыкании.

8. Переключатель режима работы выключателя А6 установите в положение «РУЧН».

9. Запустите прикладную программу и сразу после этого нажмите кнопку «ВКЛ» выключателя А6.

10. Через 1–2 секунды нажмите кнопку «ОТКЛ» выключателя А6.

11. Изменение тока однофазного короткого замыкания в статорной обмотке генератора G4 наблюдайте на экране монитора компьютера.

12. Постройте для отчета график изменения тока однофазного короткого замыкания в статорной обмотке генератора.

13. Отключите сеть на блоке А6, соберите двухфазное короткое замыкание и повторите эксперимент.

14. Постройте для отчета график изменения тока двухфазного короткого замыкания в статорной обмотке генератора.

15. Отключите сеть на блоке А6, соберите двухфазное короткое замыкание на землю и повторите эксперимент.

16. Постройте для отчета график изменения тока двухфазного короткого замыкания на землю в статорной обмотке генератора.

17. Отключите электрооборудование в обратном порядке.

Вывод

В отчете о лабораторной работе студент должен представить основные результаты и выводы, сделанные на основе проведенных расчетов (численные данные, графики, таблицы, схемы и т. д.). Все графические материалы должны быть выполнены в соответствии с ЕСКД.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Электрическая схема соединений.
4. Порядок выполнения лабораторной работы.
5. Анализ полученных результатов и выводы.

Контрольные вопросы

1. Основные виды несимметричных нарушений нормальной работы СЭС и особенности их расчета.
2. Отличия расчетов несимметричного КЗ в сети напряжением выше 1000 В от несимметричного КЗ в сети напряжением ниже 1000 В.
3. Как по известным симметричным составляющим фазы «А» построить векторные диаграммы токов и напряжения во всех фазах при НКЗ?
4. Как влияет режим нейтрали двухобмоточных трансформаторов на сопротивления схемы нулевой последовательности?
5. Токи простых КЗ. В чем опасность токов простых КЗ? Порядок расчета и методы ограничения.

6. Продольная несимметрия. Как ее моделируют и рассчитывают?
7. Почему сопротивление линии электропередачи для тока нулевой последовательности больше, чем для прямой? Что оказывает влияние на него?
8. Как влияют автотрансформаторы на суммарное сопротивление схемы нулевой последовательности?

Заключение

В ходе лабораторного практикума по дисциплине «Электромагнитные и электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах» студенты успешно овладевают рядом важных навыков и знаний в области электромагнитных и электромеханических явлений в электроэнергетических системах. Практические занятия в лаборатории позволяют студентам более глубоко понять ключевые аспекты моделирования установившихся и аварийных режимов работы ЭЭС.

По итогам практикума студенты получают глубокие знания о фундаментальных принципах электромагнитных явлений и переходных процессов, а также о методах их моделирования и анализа; приобретают практические навыки, позволяющие проводить экспериментальные исследования, измерения и анализ переходных процессов в различных электроэнергетических системах.

Библиографический список

1. Булат, В. А. Электромагнитные переходные процессы : пособие для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» и 1-43 01 09 «Релейная защита и автоматика» / В. А. Булат, А. Г. Губанович, С. М. Силук ; Белорусский национальный технический университет. — Минск : БНТУ, 2020. — 213, [1] с. — ISBN 978-985-550-958-6.
2. Электротехнический справочник. В 4 томах. Том 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / [Е. А. Волкова, В. П. Герих, Э. Н. Зуев и др.] ; под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. — 9-е изд., стер. — Москва : Издательство МЭИ, 2004. — 963 с. — ISBN 5-7046-0.
3. Сазыкин, В. Г. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : учебник / В. Г. Сазыкин, А. Г. Кудряков ; Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. — Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2018. — 263 с. — URL: www.iprbookshop.ru/70289.html (дата обращения: 30.03.2024). — Режим доступа: по подписке. — ISBN 978-5-4486-0027-2.
4. Переходные процессы в электроэнергетических системах : учебник для студентов вузов / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев, М. В. Пираторов ; под ред. И. П. Крюčkова. — 2-е изд., стер. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2021. — 411 с. — URL: www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383014509.html (дата обращения: 30.03.2024). — Режим доступа: по подписке. — ISBN 978-5-383-01450-9.
5. Короткие замыкания и несимметричные режимы электроустановок : учеб. пособие для студентов вузов / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев, М. В. Пираторов ; под ред. И. П. Крюčkова. — 2-е изд., стер. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2021. — 471 с. — URL: www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383014493.html (дата обращения: 30.03.2024). — Режим доступа : по подписке. — ISBN 978-5-383-01449-3.

6. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования : РД 153-34.0-20.527–98 / Российское акционерное общество энергетики и электрификации «ЕЭС России» ; исполнители: Б. Н. Наклепаев [и др.] ; науч. ред. Б. Н. Наклепаев. — Москва : ЭНАС, 2011. — 142, [1] с. — (Правила и инструкции). — ISBN 978-5-4248-0023-8.
7. Щедрин, В. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учеб. пособие / В. А. Щедрин ; Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова. — Чебоксары : Издательство Чувашского университета, 2007. — 421 с. — ISBN 978-5-7677-1111-6.

***Образец титульного листа отчета
о лабораторной работе***

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт химии и энергетики
Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

**ОТЧЕТ
О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

« _____ »

Обучающийся: _____

Группа: _____

Преподаватель: _____

Отметка о допуске _____ Дата _____

Отметка о выполнении _____ Дата _____

Отметка о защите _____ Дата _____

Тольятти, 20__