

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИнЭО

_____ С.И. Качин

«_____» _____ 2014 г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания и индивидуальные задания
для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению
140400 «Электроэнергетика и электротехника»,
профиль «Электроснабжение промышленных предприятий»

Составитель С.Г. Обухов

Семестр	7
Кредиты	4
Лекции, часов	4
Практические занятия, часов	2
Лабораторные работы, часов	6
Индивидуальные задания	1
Самостоятельная работа, часов	96
Формы контроля	экзамен

Издательство

Томского политехнического университета

2014

УДК 532.5(076.5)+62–135(076.5)

Математическое моделирование в системах электроснабжения: метод. указ. и индивид. задания для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение промышленных предприятий» / сост. С.Г.Обухов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 27 с.

Методические указания и индивидуальные задания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры электроснабжения промышленных предприятий «07» мая 2014 года, протокол № 2.

Зав. кафедрой ЭПП,
профессор, доктор техн. наук _____ Б.В. Лукутин

Аннотация

Методические указания и индивидуальные задания по дисциплине «Математическое моделирование в системах электроснабжения» предназначены для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электроснабжение промышленных предприятий». Данная дисциплина изучается в одном семестре.

Приведено содержание основных тем дисциплины, указаны темы практических занятий и лабораторных работ. Приведены варианты индивидуального домашнего задания. Даны методические указания по выполнению индивидуального домашнего задания.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	4
2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ	5
3. СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ	9
3.1. Тематика практических занятий	9
3.2. Перечень лабораторных работ	10
4. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ	12
4.1. Общие методические указания	12
4.1.1. Требования к оформлению ИДЗ	12
4.2. Варианты ИДЗ и методические указания	13
5. ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ	20
5.1. Вопросы для подготовки к экзамену	20
5.2. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме	21
5.3. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину дистанционно	23
6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	25
6.1. Литература обязательная	25
6.2. Литература дополнительная	25
6.3. Интернет-ресурсы	25

1. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина «Математическое моделирование в системах электроснабжения» входит в цикл математических и естественнонаучных дисциплин. При изучении дисциплины студенты знакомятся с современной идеологией моделирования и программными средствами, используемых для исследования переходных и установившихся режимов работы систем электроснабжения объектов техники и отраслей хозяйства, и приобретают навыки моделирования и использования прикладных программ для решения задач электроснабжения. Уровень освоения дисциплины должен позволять бакалаврам с использованием технической литературы решать типовые задачи расчета основных параметров установившихся и переходных режимов в системах электроснабжения предприятий, решать оптимизационные задачи проектирования схем электроснабжения объектов.

Для успешного освоения дисциплины студенты **должны знать:** основные законы электротехники; методы решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений; конструкцию и принцип действия основного электрооборудования систем электроснабжения;

уметь: составлять схемы замещения элементов энергосистемы и рассчитывать их параметры, составлять для простейших схем уравнения переходного процесса;

иметь опыт: расчета токов и напряжений для простейших схем в установившемся и переходном режимах.

Указанная дисциплина имеет как самостоятельное значение, так и является базой для ряда специальных дисциплин. Для полноценного усвоения дисциплины «Математическое моделирование в системах электроснабжения» большое значение имеют знания, умения, навыки и компетенции, приобретенные студентами, при изучении следующих дисциплин: «Физика», «Математический анализ», «Теоретические основы электротехники», «Теория вероятности и математическая статистика». В свою очередь, дисциплина «Математическое моделирование в системах электроснабжения» является пререквизитом для ряда дисциплин вариативной части профессионального цикла «Переходные процессы в системах электроснабжения», «Силовые преобразователи в электроснабжении», «Основы расчета и проектирования электроснабжения промышленных предприятий».

2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Общие вопросы моделирования

Предмет дисциплины и ее задачи. Основные термины теории подобия и моделирования. Геометрическое и аффинное подобие. Критерии подобия физических процессов и правила их определения. Индикаторы подобия. Классификация видов подобия и моделирования. История развития моделирования. Основные этапы разработки и создания математических моделей. Особенности инженерных расчетов в электроснабжении.

Рекомендуемая литература: [1, гл. 1, 2; 2, гл. 2].

Методические указания

При изучении общих вопросов моделирования требуется знать основные термины теории подобия и моделирования, освоить правила определения критериев и индикаторов подобия физических процессов. Знать основные этапы компьютерного моделирования и основные требования к математическим моделям, отличия между аналитическими и алгоритмическими математическими моделями, их достоинства и недостатки. Знать основные типы и особенности задач моделирования в электроснабжении, требования к точности выходных данных.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Необходимость применения моделирования при исследовании технических систем.
2. Нужно ли стремиться к абсолютному подобию модели и оригинала ?
3. Дайте определения понятиям «модель», «оригинал», «моделирование».
4. Приведите примеры объектов и их возможных моделей в электроснабжении.
5. Каковы основные цели моделирования технических объектов ?
6. Назовите и кратко охарактеризуйте основные этапы моделирования.
7. Назовите возможные классификационные признаки моделей.
8. Приведите классификацию и дайте примеры идеальных (абстрактных) моделей.

9. Приведите классификацию и дайте примеры материальных моделей.
10. Охарактеризуйте особенности физического и натурного моделирования, приведите примеры их использования в задачах электроснабжения.
11. Дайте характеристику математических моделей; приведите их примеры.
12. Назовите достоинства и особенности математического моделирования.
13. Охарактеризуйте основные этапы компьютерного моделирования
14. Основные требования к математическим моделям.
15. Классификация математических моделей.
16. В чем состоит основное отличие между структурными и функциональными математическими моделями, их достоинства и недостатки ?
17. В чем состоит основное отличие между аналитическими и алгоритмическими математическими моделями, их достоинства и недостатки ?
18. Дайте характеристику имитационных математических моделей; назовите область их применения, объясните преимущества.
19. Назовите основные типы задач моделирования в электроснабжении, дайте им краткую характеристику.
20. Каковы особенности задач моделирования в электроснабжении, требования к точности выходных данных ?

Тема 2. Моделирование элементов и режимов работы систем электроснабжения промышленных предприятий

Математические модели простейших элементов электротехники. Схемы замещения источников питания в переходных и установившихся режимах работы. Схемы замещения элементов электрических сетей. Моделирование электроприемников по статическим и динамическим характеристикам Моделирование установившихся и переходных режимов работы систем электроснабжения промышленных предприятий.

Рекомендуемая литература: [1, гл. 3; 6, гл. 1, 3].

Методические указания

При изучении темы требуется знать математические модели простейших элементов электротехники: источников напряжения и тока, резистора, индуктивности и емкости. Уметь рассчитать и построить временные диаграммы напряжения, тока, мощности и энергии на элементах электротехнических устройств. Уметь составлять математические модели основных элементов систем электроснабжения: силовых трансформаторов, линий электропередач, реакторов, электрических нагрузок, и определять их параметры.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Математические модели простейших элементов электротехнических устройств.
2. Математическая модель резистора в цепи переменного тока, временные диаграммы напряжения, тока, мощности и энергии.
3. Математическая модель индуктивности в цепи переменного тока, временные диаграммы напряжения, тока, мощности и энергии.
4. Математическая модель емкости в цепи переменного тока, временные диаграммы напряжения, тока, мощности и энергии.
5. Математические модели источников питания систем электроснабжения и какие существуют особенности их моделирования.
6. Математическая модель двигателей для учета подпитки места короткого замыкания.
7. Как моделируются элементы электрических сетей при расчете рабочих режимов систем электроснабжения ?
8. Математическая модель силового трансформатора.
9. Математическая модель линии электропередач.
10. Основные методы моделирования электрических нагрузок, их достоинства и недостатки.

Тема 3. Оптимизационные задачи электроснабжения

Назначение и область применения оптимизационных задач. Методы решения оптимизационных задач. Графическое решение задач линейного программирования. Понятие критерия оптимальности. Математическая модель оптимизационной задачи. Транспортная задача и ее особенности применительно к задачам электроснабжения. Особенности транспортной задачи с учетом транзита мощности.

Рекомендуемая литература: [1, гл. 4; 5, гл. 1, 2, 3].

Методические указания

При изучении темы требуется знать назначение и область применения оптимизационных задач в электроснабжении. Уметь составить математическую модель оптимизационной задачи и записать в формализованной математической форме уравнения целевой функции, ограничений и граничных условий. Знать основные методы решения оптимизационных задач и уметь их использовать в прикладных математических пакетах.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что является графическим решением задачи линейного программирования ?
2. В чем заключается основная идея симплекс-метода решения задач линейного программирования ?
3. Какие оптимизационные задачи являются задачами линейного программирования ?
4. Математическая модель оптимизационной задачи.
5. Понятие критерия оптимальности.
6. Классификация оптимизационных математических моделей по типу исходной информации.
7. Методы решения оптимизационных задач.
8. Транспортная задача и ее особенности применительно к задачам электроснабжения.
9. Особенности транспортной задачи с учетом пропускной способности линий электропередач.
10. Особенности транспортной задачи с учетом транзита мощности.
11. Методы решения оптимизационных задач при случайной и неопределенной исходной информации.

3. СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Тематика практических занятий

В данном разделе приведены темы практических занятий по дисциплине «Математическое моделирование в системах электроснабжения».

При проведении занятий преподаватель выбирает одну тему на свое усмотрение.

Тема 1. Расчёт токов короткого замыкания в сети выше 1000 В (2 часа)

Допущения для расчета токов короткого замыкания в сети выше 1000 В. Составление расчетной схемы и схемы замещения с указанием контрольных точек расчета токов короткого замыкания. Выбор базисных напряжений и мощности. Расчеты сопротивлений элементов схемы замещения. Определение периодической составляющей токов короткого замыкания. Расчет ударного тока короткого замыкания.

Рекомендуемая литература: [4, гл. 6].

Тема 2. Расчёт токов короткого замыкания в сети до 1000 В (2 часа)

Допущения для расчета токов короткого замыкания в сети до 1000 В. Составление расчетной схемы и схемы замещения с указанием контрольных точек расчета токов короткого замыкания. Расчеты сопротивлений элементов схемы замещения. Определение периодической составляющей токов для режимов трехфазного, двухфазного и однофазного короткого замыкания. Расчет ударного тока короткого замыкания.

Рекомендуемая литература: [4, гл. 6].

Тема 3. Расчет цеховой сети на потерю напряжения (2 часа)

Знакомство с методикой расчета потерь напряжения в электрической сети. Составление расчетной схемы электрической сети. Математические модели элементов электрической сети. Расчет потерь напряжения в элементах электрической сети. Построение эпюры отклонений напряжения. Максимальный и минимальный режим.

Рекомендуемая литература: [4, гл. 5].

3.2. Перечень лабораторных работ

Лабораторный практикум является составной частью учебного процесса по данной дисциплине. Целью лабораторных работ, является овладение методикой математического моделирования для решения практических задач электроснабжения. Лабораторные работы призваны закрепить теоретические знания по изучаемому курсу.

Студенты выполняют 3 лабораторные работы из 7 по заданию преподавателя:

ЛР1 - Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети выше 1000 В (2 часа).

ЛР2 - Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети до 1000 В (2 часа).

ЛР3 - Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети до 1000 В в среде Electronics Workbench(2 часа).

ЛР4 - Определение оптимального количества трансформаторов цеховых подстанций (2 часа).

ЛР5 - Оптимальное распределение компенсирующих устройств в радиальной схеме электроснабжения (2 часа).

ЛР6 - Оптимальное распределение компенсирующих устройств в магистральной схеме электроснабжения (2 часа).

ЛР7 - Оптимальное проектирование схемы электроснабжения (2 часа).

Подробное описание лабораторных работ, включающее цель выполняемой работы, теоретическую часть, порядок выполнения и требования к оформлению работы, вопросы для самоконтроля и варианты заданий, приведены в методических указаниях к выполнению лабораторных работ. С методическими указаниями к лабораторным работам можно ознакомиться на сайте кафедре [9].

Требования к выполнению лабораторных работ для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме

К выполнению лабораторной работы студент может приступить только после того, как получит у преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы. Допуск к выполнению лабораторной работы студент получает по результатам устного ответа на контрольные вопросы, с которыми он должен ознакомиться при изучении методических указаний по данной лабораторной работе. Если лабораторные работы не сделаны, то студент не допускается до сдачи экзамена.

Требования к выполнению лабораторных работ для студентов, изучающих дисциплину с применением ДОТ

Количество лабораторных работ, последовательность их выполнения задаются преподавателем. Студент должен проделать лабораторную работу, а полученные результаты в электронном виде отправить преподавателю, который его курирует. Оформление работы должно соответствовать требованиям, которые представлены в методических указаниях к лабораторной работе. Преподаватель в течение трех дней предоставляет студенту рецензию на проделанную работу. Все лабораторные работы студентам необходимо проделать до сессии. Если лабораторные работы не сделаны, нет положительной рецензии преподавателя, то студент не допускается до сдачи экзамена.

4. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ

4.1. Общие методические указания

В соответствии с учебным графиком предусмотрено выполнение одного индивидуального домашнего задания (ИДЗ) на тему «Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети выше 1000 В».

Студенты, независимо от их формы обучения, выполняют ИДЗ в течение семестра и отсылают его на проверку преподавателю.

При выполнении индивидуального задания студентам необходимо:

- провести анализ технического задания;
- составить схему замещения для расчета токов короткого замыкания;
- определить сопротивления элементов схемы электроснабжения;
- наметить и обозначить на расчетной схеме и схеме замещения точки для расчета токов короткого замыкания;
- определить токи короткого замыкания и составить «сводную ведомость токов КЗ».

Номер варианта ИДЗ определяется по последней цифре номера зачетной книжки. Например, если номер зачетной книжки Д-11Г10/12, то номер варианта задания равен 2. Если номер зачетной книжки оканчивается на 0 (например, 3-3Б10/30), то номер варианта задания равен 10.

Индивидуальные домашние задания, выполненные не по варианту, на проверку не принимаются.

4.1.1. Требования к оформлению ИДЗ

При оформлении индивидуального домашнего задания необходимо соблюдать следующие требования.

1. Индивидуальное задание должно иметь титульный лист, оформленный в соответствии со стандартами ТПУ [8]. На титульном листе указываются номер индивидуального задания, номер варианта, название дисциплины; фамилия, имя, отчество студента; номер группы, шифр. **Образец оформления и шаблон титульного листа** размещены на сайте ИнЭО в разделе СТУДЕНТУ → ДОКУМЕНТЫ (<http://portal.tpu.ru/ido-tpu>).

2. Каждое индивидуальное задание оформляется отдельно.

Студенты, изучающие дисциплину **по классической заочной форме**, оформляют индивидуальные задания в отдельных тетрадах.

Студенты, изучающие дисциплину **с применением дистанционных технологий**, оформляют индивидуальные задания в отдельных файлах.

3. Текст индивидуального задания набирается в текстовом процессоре Microsoft Word. Шрифт – Times New Roman, размер 12–14 pt, для набора формул рекомендуется использовать редактор формул Microsoft Equation или MathType.

4. Страницы задания должны иметь сквозную нумерацию.

5. В задание включается список использованной литературы.

Если работа не соответствует требованиям, студент получает оценку «не зачтено». В этом случае работа должна быть исправлена и повторно предоставлена преподавателю. При доработке необходимо включить в текст дополнительные вопросы, полученные после проверки работы преподавателем, и ответы на эти вопросы.

Студент, не получивший положительной аттестации по индивидуальному заданию, не допускается к сдаче экзамена по данной дисциплине.

4.2. Варианты ИДЗ и методические указания

Исходными данными для выполнения ИДЗ являются расчетная схема распределительной сети, изображенная на рис.4.1, и основные технические параметры элементов схемы электроснабжения, приведенные в табл.41.

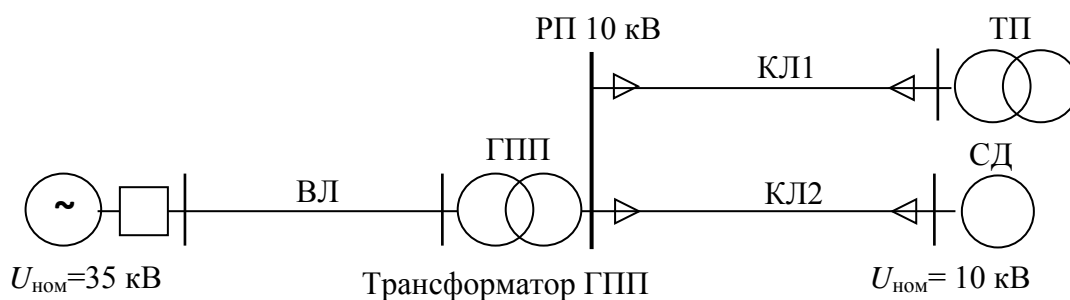


Рис.4.1. Расчетная схема распределительной сети

Таблица 4.1

Варианты заданий

№ вар	Система	ВЛ		Трансформатор ГПП		КЛ1		КЛ2	
	$S_{кз}$, МВА	S , мм ²	l , км	S , МВА	$u_{кз}$, %	S , мм ²	l , км	S , мм ²	l , км
1	5000	АС-240	5,6	40	11	150	1,2	95	0,5
2	4000	АС-185	10,2	32	10,5	120	0,6	70	1,2
3	3000	АС-150	5,4	25	10,5	120	0,8	95	0,6
4	2000	АС-120	6,8	16	10,5	95	1,2	50	0,8
5	2000	АС-150	10,5	25	11	95	1,2	120	0,3
6	3000	АС-120	4,1	32	11	70	0,4	70	0,2
7	1000	АС-95	2,2	16	10,5	50	0,2	70	0,5
8	1000	АС-70	3,4	10	10,5	35	0,4	50	0,2
9	2000	АС-240	12,5	32	11	120	2,2	95	1,1
10	3000	АС-185	5	25	10,5	70	3,5	50	0,4

При расчете токов КЗ в сетях выше 1000 В обязателен учет индуктивных сопротивлений элементов сети: электродвигателей, трансформаторов, реакторов, воздушных и кабельных линий, токопроводов. Активное сопротивление учитывается для воздушных ЛЭП с малым сечением проводов и со стальными проводами, а также для кабельных линий большой протяженности с малым сечением жил. Целесообразно учитывать активное сопротивление, если $r_{\Sigma} \geq x_{\Sigma} / 3$, где r_{Σ} , x_{Σ} – суммарные активное и реактивное сопротивления сети от источника питания до места КЗ.



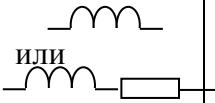
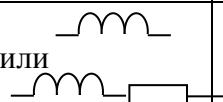
Активное сопротивление трансформаторов также необходимо учитывать в расчетах токов КЗ, если $r_{тр} \geq 0,3x_{тр}$. Кроме этого, на сопротивление влияет изменение числа витков обмоток устройствами регулирования напряжения. Учесть действительное положение ответвлений каждого трансформатора в распределительных сетях практически невозможно, поскольку их положение изменяется в зависимости от значения нагрузки, схемы и режима работы сети. Поэтому при расчетах принимается, что все трансформаторы включены на основное ответвление, соответствующее их номинальному напряжению.

Все сопротивления схемы замещения подсчитывают в именованных (Ом) или в относительных единицах. При расчете в относительных единицах задаются базовыми величинами: напряжением $U_б$ и мощностью $S_б$.

Расчетные формулы для моделирования элементов системы электроснабжения приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Расчетные формулы для определения сопротивлений

Элемент ЭУ, его схема и исходный параметр	Схема замещения	Расчетные формулы	
		Именованные единицы, Ом	относительные единицы
Генератор, X_d , %		$x = \frac{X_d\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x = \frac{X_d\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}$
Энергосистема $I_{\text{откл.ном.}}$ $S_{\text{кз.сист}}$ $x_{\text{сист}}$		$x = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} I_{\text{откл.ном.}}}$ или $x = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{кз.сист}}}$	$x = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} I_{\text{откл.ном.}} U_{\text{ср.ном}}}$ или $x = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{кз.сист}}}$
Двухобмоточный трансформатор $u_{\text{кз}}$, %		$x = \frac{u_{\text{кз}}\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{НОМ.тр}}}$	$x = \frac{u_{\text{кз}}\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ.тр}}}$
Реактор x_p , Ом		$x = x_p \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{U_{\text{ср}}^2}$	$x = x_p \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U_{\text{ср}}^2}$
Линия r_0 , x_0		$x = x_0 l$ $r = r_0 l$	$x = x_0 l \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2}$ $r = r_0 l \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2}$

$S_{\text{НОМ}}$ – номинальные мощности элементов, МВА;

$S_{\text{б}}$ – базовая мощность, МВА;

$S_{\text{кз.сист}}$ – мощность КЗ энергосистемы, МВА;

$I_{\text{откл.ном.}}$ – номинальный ток отключения выключателя, кА;

$u_{\text{кз}}$ – напряжение КЗ трансформатора, %;

x_p – сопротивление реактора, Ом;

r_0 , x_0 – активное и индуктивное сопротивления линии на 1 км длины;

l – длина линии, км;

X_d – сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора;

$U_{\text{ср}}$ – среднее напряжение в месте установки данного элемента, кВ.

Пример расчета

Для схемы электроснабжения цеховой подстанции (рис. 4.2) требуется составить схему замещения для расчета токов КЗ; определить сопротивления элементов схемы электроснабжения; наметить и обозначить на расчетной схеме и схеме замещения точки расчета токов КЗ; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

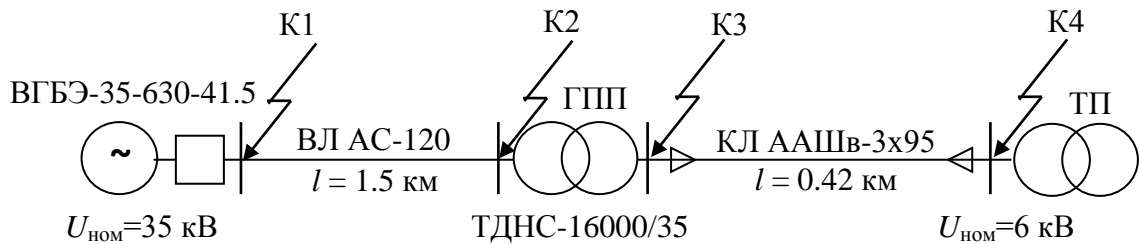


Рис. 4.2. Расчетная схема распределительной сети

Определение сопротивлений

На подстанции энергосистемы установлен выключатель высокого напряжения ВГБЭ-35-630-41,5 с номинальным током отключения КЗ $I_{откл.ном} = 41,5$ кА.

Принимаем $U_{ср.ном} = 37$ кВ.

Определяем мощность КЗ системы;

$$S_{кз.сист} = \sqrt{3} \cdot U_{ср.ном} \cdot I_{откл.ном} = \sqrt{3} \cdot 37 \cdot 41,5 = 2660 \text{ МВА.}$$

Расчет ведем в относительных единицах. Производим расчёт сопротивлений сети, принимая базисную мощность $S_б = 100$ МВА.

1. Сопротивление энергосистемы:

$$x_{сист} = \frac{S_б}{S_{кз.сист}} = \frac{100}{2660} = 0.038$$

2. Сопротивление воздушной линии 35 кВ:

$$r_{вл} = \frac{r_0 \cdot l \cdot S_б}{U_{ср.ном}^2} = \frac{0.27 \cdot 1.5 \cdot 100}{37^2} = 0.03$$

$$x_{вл} = \frac{x_0 \cdot l \cdot S_б}{U_{ср.ном}^2} = \frac{0.309 \cdot 1.5 \cdot 100}{37^2} = 0.034$$

где: $l = 1.5$ км - длина воздушной линии;

$U_{ср.ном}$ - базисное напряжение данной ступени трансформации, кВ;

$r_0 = 0.27$ Ом/км - активное сопротивление провода АС-120 (табл.1.6, [9]);

$x_0 = 0.309$ Ом/км - индуктивное сопротивление провода АС-120 (табл.1.11, [9]).

3. Сопротивление трансформатора ТДНС-16000/35 кВА:

$$x_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{кз}}\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном.тр}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0.656$$

Активным сопротивлением пренебрегаем, так как трансформатор большой мощности.

где $S_{\text{ном.тр}} = 16$ МВА- номинальная мощность трансформатора;

$u_{\text{кз}} = 10.5\%$ – напряжение короткого замыкания трансформатора;

4. Сопротивление кабельной линии:

$$r_{\text{кл}} = \frac{r_0 \cdot l \cdot S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{0.329 \cdot 0.42 \cdot 100}{6.3^2} = 0.348;$$

$$x_{\text{кл}} = \frac{x_0 \cdot l \cdot S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{0.0602 \cdot 0.42 \cdot 100}{6.3^2} = 0.064,$$

где: $l = 0.42$ км – длина кабельной линии;

$U_{\text{ср.ном}} = 6.3$ кВ – базисное напряжение данной ступени трансформации;

$r_0 = 0.329$ Ом/км – активное сопротивление кабеля ААШв–(3х95) (табл.1.6, [9]);

$x_0 = 0.0602$ Ом/км – индуктивное сопротивление кабеля ААШв–(3х95) (табл.1.5, [9])

Составляем схему замещения – рис. 4.3.

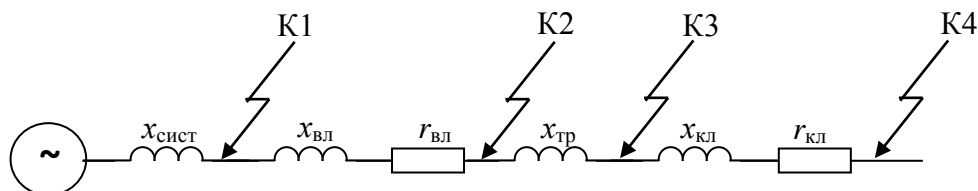


Рис. 4.3. Схема замещения участка распределительной сети

Расчет токов КЗ

В сетях среднего напряжения (6-35 кВ) в России применяют изолированную нейтрль. Ток однофазного замыкания на землю в таких сетях невелик, его величина определяется емкостью линии (зависит от напряжения, длины и типа линии), и этот режим не является аварийным. Соответственно, рассчитывать токи однофазного КЗ в сетях среднего напряжения нет необходимости.

Ток двухфазного КЗ легко определяется по рассчитанному току трехфазного:

$$I_{\text{КЗ}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{КЗ}}^{(3)} = 0.87 I_{\text{КЗ}}^{(3)}$$

Ток трехфазного КЗ определяется по формуле:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} Z_{\text{рез}}}, \text{ кА}$$

где $Z_{\text{рез}}$ – полное сопротивление до точки КЗ, Ом.

При расчете в системе относительных единиц сначала находят базисный ток КЗ на рассматриваемой ступени трансформации:

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} U_{\text{ср.ном}}}, \text{ кА}$$

а затем определяют реальное значение периодической составляющей тока КЗ:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{I_{\text{б}}}{Z_{\text{рез}}}, \text{ кА}$$

Будем определять токи трехфазного КЗ по намеченным точкам.

Точка К1:

$$I_{\text{б}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1.56 \text{ кА}$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{1.56}{0.038} = 41.05 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{рез}} = x_{\text{сист}} = 0.038$$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1.8 \cdot 41.05 = 104.5 \text{ кА}$$

$$k_{\text{уд}} = 1.8 \text{ по таблице 1.1 [9].}$$

Точка К2:

$$I_{\text{б}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1.56 \text{ кА}$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{1.56}{0.078} = 20 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{вл}})^2 + (r_{\text{вл}})^2} = \sqrt{(0.038 + 0.034)^2 + (0.03)^2} = 0.078$$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1.8 \cdot 20 = 50.91 \text{ кА}$$

$k_{уд} = 1.8$ по таблице 1.1 [9].

Точка К3:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6.3} = 9.16 \text{ кА}$$

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{9.16}{0.729} = 12.57 \text{ кА}$$

$$Z_{рез} = \sqrt{\left(x_{сист} + x_{вл} + x_{тр}\right)^2 + \left(r_{вл}\right)^2} = \sqrt{(0.038 + 0.034 + 0.656)^2 + (0.03)^2} = 0.729$$

Ударный ток КЗ

$$i_{уд} = \sqrt{2} k_{уд} I_{кз}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1.8 \cdot 12.57 = 31.99 \text{ кА}$$

$k_{уд} = 1.8$ по таблице 1.1 [9].

Точка К4:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6.3} = 9.16 \text{ кА}$$

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{9.16}{0.876} = 10.46 \text{ кА}$$

$$Z_{рез} = \sqrt{\left(x_{сист} + x_{вл} + x_{тр} + x_{кл}\right)^2 + \left(r_{вл} + r_{кл}\right)^2} = \sqrt{(0.038 + 0.034 + 0.656 + 0.064)^2 + (0.03 + 0.348)^2} = 0.876$$

Ударный ток КЗ

$$i_{уд} = \sqrt{2} k_{уд} I_{кз}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1.8 \cdot 10.46 = 26.83 \text{ кА}$$

$k_{уд} = 1.8$ по таблице 1.1 [9].

Сводная ведомость токов КЗ

Расчетные точки	К1	К2	К3	К4	
Токи КЗ, кА	$I_{кз}^{(3)}$	41.05	20.0	12.57	10.46
	$i_{уд}$	104.5	50.91	31.99	26.83

5. ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ

После завершения изучения дисциплины студенты сдают экзамен.

К экзамену допускаются только те студенты, у которых зачтено индивидуальное домашнее задание и лабораторные работы.

Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме, приведен в разделе 5.2.

Образец билета для студентов, изучающих дисциплину с применением дистанционных технологий, приведен в разделе 5.3.

При определении результата экзамена учитываются результаты выполненного индивидуального домашнего задания.

5.1. Вопросы для подготовки к экзамену

1. Напряжения электрических сетей и область их применения
2. Режимы нейтралей электрических сетей
3. Влияние токов КЗ на элементы системы электроснабжения
4. Понятие ударного тока КЗ и особенности его определения
5. Физический смысл и особенности расчета периодической и апериодической составляющей тока КЗ
6. Условия выбора аппаратов защиты для защиты электрических сетей от токов КЗ
7. Особенности режимов 3-х и однофазного КЗ в зависимости от режима нейтрали сети
8. Дайте определение обыкновенного дифференциального уравнения
9. Для решения каких задач электроснабжения применяются алгебраические и дифференциальные уравнения
10. Какова необходимость применения методов моделирования при исследовании систем электроснабжения
11. Каковы основные отличия между физическим и математическим моделированием
12. Какой практический смысл применения математического моделирования при проектировании систем электроснабжения
13. Классификация видов моделирования
14. Область применения аналитических и численных методов решения дифференциальных уравнений
15. Основные достоинства и недостатки численных методов решения дифференциальных уравнений
16. Основные требования к математическим моделям
17. Уравнения простейших математических моделей элементов электротехники

18. Сформулируйте основные достоинства математического моделирования
19. Характер принужденной составляющей дифференциального уравнения и природа ее появления
20. Характер свободной составляющей дифференциального уравнения и природа ее появления
21. Что такое моделирование ?
22. Что является решением дифференциального уравнения
23. Математическая модель источника питания систем электроснабжения и какие существуют особенности их моделирования
24. Как моделируются элементы электрических сетей при расчете рабочих режимов систем электроснабжения
25. Основные методы моделирования электрических нагрузок, их достоинства и недостатки
26. Что является графическим решением задачи линейного программирования
27. В чем заключается основная идея симплекс-метода решения задач линейного программирования
28. Какие оптимизационные задачи являются задачами линейного программирования
29. Математическая модель оптимизационной задачи
30. Понятие критерия оптимальности
31. Методы решения оптимизационных задач
32. Транспортная задача и ее особенности применительно к задачам электроснабжения
33. Особенности транспортной задачи с учетом пропускной способности линий электропередач
34. Особенности транспортной задачи с учетом транзита мощности
35. Методы решения оптимизационных задач при случайной и неопределенной исходной информации

5.2. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме

На рисунке 5.1 приведен образец экзаменационного билета для студентов, сдающих экзамен в очной форме, во время сессии в Томске. Билет содержит два теоретических вопроса и одну задачу.



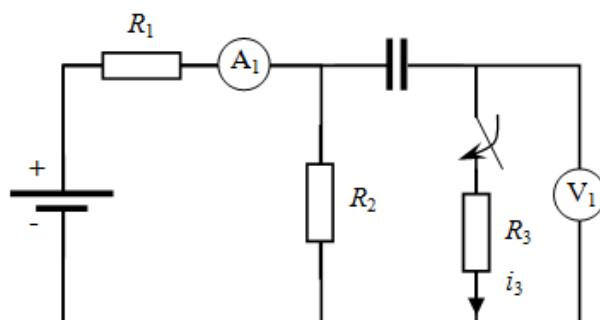
Экзаменационный билет № 1

по дисциплине:

«Математическое моделирование в системах электроснабжения»

1. Понятие ударного тока КЗ и особенности его определения
2. Классификация оптимизационных математических моделей по типу исходной информации

3.



$U = 24 \text{ В}$
 $C = 2 \text{ мкФ}$
 $R_1 = 4 \text{ Ом}$
 $R_2 = 4 \text{ Ом}$
 $R_3 = 4 \text{ Ом}$

1. Для изображенной на рисунке схемы определите показания измерительных приборов в установившихся режимах до и после коммутации.
2. Изобразите графически изменение тока i_3 в переходном процессе

Составил:
доцент кафедры ЭПП _____ С.Г.Обухов

Рис. 5.1. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме

5.3. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину дистанционно

В данном разделе приведены примеры вопросов из экзаменационного билета для студентов, сдающих экзамен в онлайн-режиме (через Интернет на сайте ИДО). Экзаменационный билет включает в себя 20 заданий: задания на выбор единственного ответа (8); задания на выбор множественных ответов (4); задания на установление последовательности (4); задания на установление соответствия (2); задания для краткого ответа (2).

1. Задание на выбор единственного ответа

Выберите из приведенных ниже формулировок наиболее точное определение «метода моделирования»:

- 1) это метод исследования свойств определенного объекта посредством изучения свойств другого объекта, более удобного для решения задач исследования
- 2) это метод решения систем дифференциальных уравнений, описывающих изучаемый процесс
- 3) это метод определения критериев подобия изучаемого процесса (явления)
- 4) это метод представления параметров и характеристик изучаемого объекта в математической форме

2. Задание на выбор множественных ответов

Выберите из предложенных вариантов необходимые условия существования модели:

- 1) возможность отображения объективно реально, либо потенциально существующей ситуации
- 2) наличие определенных правил взаимно-однозначного соответствия между моделью и оригиналом
- 3) возможность составления математического описания процесса
- 4) возможность создания экспериментальной установки
- 5) простота и наглядность

3. Задание на установление последовательности

Укажите верную логическую последовательность основных этапов моделирования

- 1) постановка задачи – формализация – моделирование - интерпретация результатов
- 2) постановка задачи – моделирование - формализация – интерпретация результатов
- 3) постановка задачи – интерпретация результатов - формализация – моделирование
- 4) постановка задачи – формализация – моделирование - интерпретация результатов

4. Задание на установление соответствия

Установите соответствие между терминами и определениями:

1) Потеря напряжения	1) Алгебраическая разность между фактическим (действительным) напряжением сети и номинальном напряжением электроприёмника, отнесенная к номинальному напряжению
2) Падение напряжения	2) Алгебраическая разность между напряжением источника питания и напряжением в месте подключения электроприёмника к сети
3) Отклонение напряжения	3) Геометрическая разность векторов напряжений переменного тока в начале и в конце рассматриваемого участка электрической сети

5. Задание для краткого ответа

Запишите математическую модель, описывающую свойства индуктивного сопротивления в электрической цепи.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Литература обязательная

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирование / В.А. Веников, Г.В.Веников. – М.: Высш. шк., 1984. – 243 с.: ил.
2. Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.
3. Советов Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов / Б.Я.Советов, С.А.Яковлев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.: ил.
4. Кабышев А.В., Обухов С.Г. Расчет и проектирование систем электроснабжения объектов и установок: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – 248 с.

6.2. Литература дополнительная

5. Даценко В.А. Математическое моделирование в системах электроснабжения: учеб. пособие / В.А. Даценко, В.Т. Гетманов, А.Н. Выблов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2003. – 120 с.
6. Костин В.Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики: учеб. пособие. – СПб.: СЗТУ, 2008. – 123 с.
7. Математическая статистика: учеб. для вузов / В.Б. Горяинов, И.В. Павлов, Г.М. Цветкова и др.; под ред. В.С. Зарубина, А.П. Кршченко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 424 с. (сер. Математика в техническом университете; Вып. XVII).

6.3. Интернет-ресурсы

8. СТО ТПУ 2.5.01–2006. Система образовательных стандартов. Работы выпускные, квалификационные, проекты и работы курсовые. Структура и правила оформления / ТПУ [Электронный ресурс]. – Томск, 2006. – Режим доступа <http://standard.tpu.ru/standart.html>, свободный.
9. Обухов С.Г. Математическое моделирование в системах электроснабжения: метод. указ. к выполнению лабораторных работ / ТПУ [Электронный ресурс]. – Томск, 2014. – Режим доступа // <http://portal.tpu.ru/SHARED/s/SEROB/ucheberab3>

10. Официальный сайт компании National Instruments / [Электронный ресурс]. – Режим доступа // <http://www.ni.com/company/>
11. Официальный сайт компании Microsoft / [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://office.microsoft.com/>
12. Model.Exponenta.Ru – сайт о моделировании и исследовании: систем, объектов, технических процессов и физических явлений / [Электронный ресурс]. – Режим доступа // <http://model.exponenta.ru/>

Учебное издание

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания и индивидуальные задания

Составитель: С.Г.Обухов

Рецензент: И.А.Плотников


Компьютерная верстка *С.Г.Обухов*



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru