

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова»

В.М. Рябенский, Л.В. Солобуто, А.И. Черевко, Е.В. Лимонникова

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Основы электротехники с использованием *MATLAB/Simulink*

Учебное пособие

*Рекомендовано УМО по образованию в области кораблестроения
и океанотехники для курсантов Военно-морского инженерного института
и студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям
подготовки дипломированных специалистов 180100 (652900)
«Кораблестроение и океанотехника» и направлению подготовки бакалавров
180100 (652600) «Кораблестроение и океанотехника»*

Архангельск
САФУ
2014

УДК 621.314.621+621.791
ББК 31.2
Р98

Рецензенты: И.В. Волков – доктор технических наук, профессор, чл.-кор. НАН Украины, профессор, зав. отделом систем стабилизированного тока Института электродинамики НАН Украины;
И.В. Пентегов – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института электросварки имени Е.О. Патона НАН Украины

Рябенский, В.М.

Р98 Практическая электротехника: Основы электротехники с использованием MATLAB/Simulink: учебное пособие / В.М. Рябенский, Л.В. Солобуто, А.И. Черевко, Е.В. Лимонникова; под ред. проф. В.М. Рябенского; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – Архангельск: САФУ им. М.В. Ломоносова, 2014. – 413 с.: ил.

ISBN 978-5-261-00970-2

Детально рассмотрена возможность использования программы моделирования динамических систем *Simulink*, которая входит в пакет прикладных программ *MATLAB*, для проведения лабораторных и практических работ по электротехнике. В разделах 1–8 рассмотрены цепи постоянного тока, однофазного и трехфазного переменного тока, основы теории четырехполюсников (в том числе длинные линии), цепи с нелинейными элементами (диодами и транзисторами), переходные процессы. В разделе 9 приведен пример моделирования узла системы электроснабжения с компенсатором реактивной мощности, а в разделе 10 – модель полупроводникового преобразователя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем.

Пособие будет полезно тем, кто впервые знакомится с мощной системой инженерных и научных расчетов *MATLAB* и ее приложением *Simulink*.

УДК 621.314.621+621.791
ББК 31.2

ISBN 978-5-261-00970-2

© Рябенский В.М., Солобуто Л.В.,
Черевко А.И., Лимонникова Е.В.,
2014
© Северный (Арктический)
федеральный университет,
им. М.В. Ломоносова, 2014

ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием информационных технологий возникла необходимость знакомить студентов с профессиональными программами уже на младших курсах. Широкие возможности дает программный комплекс, который предназначен для моделирования динамических систем и систем управления, *MATLAB/Simulink* фирмы *Math Works Inc.*

Система *MATLAB*, в состав которой входит пакет *Simulink*, предназначена для проектирования как несложных электрических цепей, так и для моделирования сложных аналоговых и цифровых систем. Особенностью программы является наличие контрольно-измерительных приборов в комплексе с мощным математическим инструментом.

Simulink имеет удобный интерфейс пользователя, большое число блоков компонентов, разнообразные способы регистрации результатов моделирования. Это открытая система, и пользователь может пополнять библиотеки блоков. Программа имеет много демонстрационных примеров, которые можно загрузить в среду *MATLAB/Simulink* и использовать как динамическую модель.

Моделирование в среде *MATLAB/Simulink* позволяет исследовать цепи постоянного, однофазного и трехфазного переменного тока, цепи с несинусоидальными токами и напряжениями, изучать особенности цепей с нелинейными элементами. Используя возможности программы можно изучать однофазные трансформаторы, частотные и временные характеристики четырехполосников, переходные процессы.

Пособие подготовлено на основе цикла лабораторных работ, которые проводятся для изучения основ электротехники по специальностям неэлектротехнического направления. Часть примеров, которые описывают работу отдельных элементов, можно загрузить с сайта www.exponenta.ru, что дает возможность более детально разобраться с программой.

Пособие содержит много справочной информации о параметрах и особенностях использования блоков, поэтому его можно рекомендовать как справочник по работе с программой *MATLAB/Simulink*.

Выполнение практических работ предусматривает предварительное изучение теоретического материала. Каждый последующий раздел предусматривает высокий уровень усвоения предыдущих разделов и умения использовать усвоенную информацию для получения новых знаний. Для формирования практических навыков каждый раздел содержит ряд задач, в том числе и с примерами решений. В каждом разделе приводятся типовые вопросы, на которые студент должен уметь давать правильные и обоснованные ответы.

Оглавление

Введение	3
Раздел I. ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ	
<i>MATLAB</i> / <i>Simulink</i>	4
1.1. Общие сведения о пакете программ <i>MATLAB</i>	4
1.1.1. Основы работы в <i>MATLAB</i>	4
1.1.2. Вычисления в пакете <i>MATLAB</i>	10
1.1.3. Построение графиков в <i>MATLAB</i>	13
1.2. Использование пакета <i>MATLAB</i> / <i>Simulink</i> для моделирования процес- сов в электрических цепях	20
1.2.1. Краткие сведения о пакете <i>Simulink</i>	20
1.2.2. Начало работы с пакетом <i>Simulink</i>	21
1.2.3. Создание новой модели	24
1.2.4. Работа с блоками	31
1.2.5. Создание комментариев и подсистем	33
1.2.6. Сохранение модели	34
1.2.7. Установление параметров моделирования	34
1.3. Последовательность проведения исследований	37
1.4. Примеры решения задач	38
1.5. Контрольные вопросы и задачи	40
Раздел II. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	
2.1. Основные теоретические положения	41
2.2. Использование пакета <i>MATLAB/Simulink</i> для исследования характери- стик и параметров электрических компонентов	44
2.3. Последовательность проведения исследований	48
2.4. Примеры решения задач	48
2.5. Контрольные вопросы и задачи	51
Раздел III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	
3.1. Основные теоретические положения	54
3.1.1. Законы Кирхгофа	54
3.1.2. Метод контурных токов	55
3.1.3. Метод узловых потенциалов	55
3.1.4. Метод суперпозиции	56
3.1.5. Метод эквивалентного активного двухполюсника	56
3.2. Использование пакета <i>MATLAB/Simulink</i> для моделирования электри- ческих цепей постоянного тока	57

3.2.1. Расчет параметров цепей с использованием законов Кирхгофа ...	57
3.2.2. Расчет методом контурных токов	61
3.2.3. Расчет методом узловых потенциалов	61
3.3. Последовательность проведения исследований	62
3.3.1. Использование законов Кирхгофа	62
3.3.2. Использование метода контурных токов	63
3.3.3. Использование метода узловых потенциалов	63
3.3.4. Использование метода суперпозиции	64
3.3.5. Использование активного двухполюсника	64
3.4. Примеры использования методов расчета электрических цепей постоянного тока.....	65
3.5. Контрольные вопросы и задачи	72
Раздел IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	74
4.1. Основы теории электрических цепей переменного тока	74
4.1.1. Способы изображения сигналов переменного тока	74
4.1.2. Пассивные компоненты в электрических цепях переменного тока	76
4.1.3. Расчеты электрических цепей переменного тока	79
4.1.4. Разветвленные электрические цепи переменного тока	83
4.1.5. Электрические цепи с взаимной индуктивностью	85
4.1.6. Мощность в электрических цепях синусоидального тока	93
4.1.7. Периодические несинусоидальные токи в электрических цепях ..	96
4.2. Исследование однофазных электрических цепей переменного тока в среде <i>MATLAB / Simulink</i>	98
4.2.1. Измерение параметров электрических сигналов	98
4.2.2. Исследование свойств электрических цепей переменного тока с последовательно соединенными элементами.....	101
4.2.3. Исследование свойств электрических цепей переменного тока с параллельно соединенными элементами.....	104
4.2.4. Исследование характеристик однофазного трансформатора	106
4.2.5. Использование <i>MATLAB/Simulink</i> для построения векторных диаграмм	109
4.3. Примеры решения задач	113
4.4. Контрольные вопросы и задачи	126
Раздел V. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ..	137
5.1. Основные теоретические положения	137
5.2. Использование пакета <i>MATLAB/Simulink</i> для исследования электрических цепей трехфазного тока	140
5.3. Последовательность проведения исследований	151
5.3.1. Исследование симметричных электрических цепей трехфазного тока	151
5.3.2. Исследование несимметричных электрических цепей трехфазного тока	153
5.4. Примеры решения задач	156
5.5. Контрольные вопросы и задачи	159

Раздел VI. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА	166
6.1. Основные теоретические положения	166
6.1.1. Заряд конденсатора от источника постоянного напряжения	167
6.1.2. Заряд конденсатора от источника тока	168
6.1.3. Разряд конденсатора на активное сопротивление	168
6.1.4. Накопление энергии в индуктивности от источника напряжения	168
6.1.5. Отключение индуктивной нагрузки от источников питания	169
6.2. Использование <i>MATLAB/Simulink</i> для исследования переходных процессов.....	170
6.3. Последовательность проведения исследований	173
6.3.1. Процесс зарядки конденсатора от источника постоянного напряжения.....	173
6.3.2. Опыт по заряду конденсатора от источника тока.....	174
6.3.3. Опыт по разряду конденсатора на активное сопротивление	175
6.3.4. Включение источника ЭДС на активно-индуктивную нагрузку .	175
6.3.5. Исследование явления накопления энергии в индуктивности.....	176
6.3.6. Использование редактора дифференциальных уравнений	177
6.4. Примеры решения задач	177
6.5. Контрольные вопросы и задачи.....	179
Раздел VII. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ	182
7.1. Основные теоретические положения.....	182
7.1.1. Четырехполюсник и его уравнения.....	182
7.1.2. Входящие сопротивления четырехполюсника. Параметры холостого хода и короткого замыкания	185
7.1.3. Характеристические параметры четырехполюсника	185
7.1.4. Электрические фильтры. Частотные свойства двухполюсников .	187
7.1.5. Временные характеристики <i>RLC</i> -цепей	196
7.1.6. Кабельные линии связи как пассивные четырехполюсники	198
7.2. Использование <i>MATLAB/Simulink</i> для исследования четырехполюсников	200
7.2.1. Изучение основных параметров четырехполюсника.....	201
7.2.2. Исследование трансформатора как пассивного четырехполюсника	203
7.2.3. Изучение частотных свойств четырехполюсников	203
7.2.4. Исследования временных характеристик четырехполюсников....	209
7.2.5. Исследования длинных линий	216
7.3. Примеры решения задач	218
7.4. Контрольные вопросы и задачи.....	225
Раздел VIII. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	228
8.1. Основные теоретические положения	228
8.1.1. Расчеты цепей постоянного тока с нелинейными элементами	229
8.1.2. Цепи постоянного тока с регулируемыми нелинейными элементами	234
8.1.3. Цепи переменного тока с нелинейными элементами	236
8.2. Использование <i>MATLAB/Simulink</i> для исследования нелинейных электрических цепей	238

8.2.1. Нелинейные устройства в составе <i>MATLAB/Simulink</i>	238
8.2.2. Фурье-анализ	244
8.2.3. Нахождение рабочей точки и аппроксимация ВАХ нелинейного элемента	246
8.3. Последовательность проведения исследований	250
8.4. Примеры расчета электрических цепей с нелинейными элементами ...	251
8.5. Контрольные вопросы и задачи	256
Раздел IX. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ НЕСИММЕТРИИ НА БАЗЕ ТВМП В <i>MATLAB/Simulink</i>	263
9.1. Исследование узла питающей сети с электромагнитным компенсато- ром несимметрии в <i>MATLAB/Simulink</i>	263
9.1.1. Основные аналитические соотношения узла питающей сети с электромагнитным компенсатором несимметрии	263
9.1.2. Описание математической модели узла питающей сети с электро- магнитным компенсатором несимметрии в <i>MATLAB/Simulink</i>	266
9.1.3. Оценка эффективности математической модели узла питающей сети с электромагнитным компенсатором несимметрии	269
9.2. Исследование трансформаторной подстанции судоремонтного предприя- тия с электромагнитным компенсатором несимметрии в <i>MATLAB/Simulink</i>	270
9.2.1. Основные аналитические соотношения трансформаторной под- станции судоремонтного предприятия с электромагнитным компен- сатором несимметрии	270
9.2.2. Описание математической модели трансформаторной подстан- ции судоремонтного предприятия с электромагнитным компенсато- ром несимметрии в <i>MATLAB/ Simulink</i>	275
9.2.3. Оценка эффективности математической модели трансформатор- ной подстанции судоремонтного предприятия с электромагнитным компенсатором несимметрии в <i>MATLAB/Simulink</i>	288
9.3. Контрольные вопросы и задачи	289
Раздел X. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ТРАНЗИСТОРНЫМ КОММУТАТОРОМ НА 8 ПАР СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ НА БАЗЕ ТВМП В <i>MATLAB/Simulink</i>	291
10.1. Аналитическое описание управляемого выпрямителя с транзистор- ным коммутатором на 8 пар силовых ключей	291
10.2. Модель управляемого выпрямителя на 8 пар силовых ключей в сре- де <i>MATLAB/Simulink</i>	316
10.3. Качество выходного напряжения и тока УВ с ТВМП	335
10.3. Контрольные вопросы и задачи	336
Список рекомендованной литературы	338
ПРИЛОЖЕНИЯ	340
Приложение 1. Библиотеки основного пакета <i>Simulink</i> и примеры исполь- зования блоков	341
Приложение 2. Библиотеки пакета <i>SimPower Systems</i> и примеры исполь- зования блоков	371
Приложение 3. Варианты заданий для проведения исследований	399