

УДК 004+537.8  
ББК 32.973.26-018.1  
С28

Р е ц е н з е н т ы:

*Шайдулов В. В.*, директор Института вычислительного моделирования СО РАН, член-корреспондент РАН;  
*Юрков Н. К.*, зав. кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензинского государственного университета, доктор технических наук, профессор

Дектерев М. Л., Комаров В. А., Преснякова Г. О., Сарафанов А. В., Суковатый А. Г., Худогонов Д. Ю., Володина Д. Н., Трухин А. А.  
C28 Исследования физических явлений в электрических цепях с применением интернет-технологий: учеб. пособие / М. Л. Дектерев, В. А. Комаров, А. Г. Суковатый, Д. Ю. Худогонов и др.; под ред. А. В. Сарафанова. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 432 с.

ISBN 978-5-94074-153-2

В книге рассмотрены основные задачи и особенности организации лабораторных исследований с удаленным доступом в электрических цепях; приведено описание специализированного сетевого учебно-исследовательского аппаратно-программного комплекса «Физика. Электродинамика», разработанного с применением технологий National Instruments, на базе которого выполняются лабораторные исследования; разобраны методики математического моделирования физических процессов в электрических цепях с применением системы OrCAD; даны задания и методические указания к циклу лабораторных работ по экспериментальному исследованию и математическому моделированию физических явлений в электрических цепях (однородный участок цепи, RC- и RL-цепи; последовательный колебательный контур; цепи с германиевым и кремниевым полупроводниковыми диодами).

Издание предназначено для студентов технических и естественнонаучных направлений вузов, учащихся профтехучилищ и колледжей.

УДК 004+537.8  
ББК 32.973.26-018.1

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-5-94074-153-2  
© Коллектив авторов, 2015  
© Издание, оформление, ДМК Пресс, 2015



<b>Введение .....</b>	<b>13</b>
<b>Список сокращений .....</b>	<b>19</b>

## ▼ ГЛАВА 1

### **Интернет-технологии в производственной, научной и образовательной сферах деятельности..... 21**

1.1. Распределенные измерительно-управляющие системы .....	21
1.2. Примеры применения распределенных измерительно-управляющих систем .....	23
1.3. Многопользовательские распределенные измерительно-управляющие системы .....	32

## ▼ ГЛАВА 2

### **Сетевой учебно-исследовательский аппаратно-программный комплекс «Физика. Электродинамика» ..... 35**

2.1. Схема организации лабораторных исследований .....	35
2.2. Автоматизированный лабораторный макет .....	37
2.3. Инструментальное обеспечение .....	40
2.4. Клиентское программное обеспечение .....	42
2.4.1. Виртуальные приборы .....	43
2.4.2. Виртуальные лабораторные стенды .....	44

## ▼ ГЛАВА 3

### **Сетевая лаборатория «Физика. Электродинамика» ..... 47**

3.1. Основные характеристики сетевой лаборатории «Физика. Электродинамика» .....	47
3.2. Виртуальный рабочий стол администратора .....	51
3.3. Ресурсы рабочего стола преподавателя .....	52
3.4. Ресурсы рабочего стола студента .....	55
3.4.1. Рабочий стол студента. Структура .....	55
3.4.2. Рабочий стол студента. Интерфейс «Мои лабораторные работы» .....	56
3.4.3. Рабочий стол студента. Уровень выполнения лабораторных исследований .....	61
3.4.4. Рабочий стол студента. Компьютерная проверка знаний тестированием .....	65
3.4.5. Рабочий стол студента. Интерфейс «Коммуникации» .....	68
3.5. Выполнение лабораторных исследований на базе сетевой лаборатории «Физика. Электродинамика» .....	70

## ▼ ГЛАВА 4

### **Лабораторные работы, выполняемые на базе СУИАПК**

### **«Физика. Электродинамика» ..... 77**

Лабораторная работа 1. Изучение принципов обработки данных физического эксперимента .....	77
4.1.1. Цель лабораторной работы .....	77
4.1.2. Задачи лабораторной работы .....	77
4.1.3. Краткие теоретические сведения .....	77
4.1.3.1. Классификация погрешностей измерений .....	77
4.1.3.2. Некоторые элементарные представления из теории случайных величин .....	79
4.1.3.3. Обработка результатов прямых измерений .....	84
4.1.3.4. Обработка результатов косвенных измерений .....	86
4.1.3.5. Метод наименьших квадратов .....	87
4.1.4. Описание ВЛС «Изучение принципов обработки данных физического эксперимента» .....	90
4.1.5. Задания на выполнение лабораторной работы .....	92
4.1.5.1. Задания для проведения измерений в ручном режиме .....	92
4.1.6. Порядок выполнения работы .....	93
4.1.6.1. Проведение измерений в ручном режиме .....	93
4.1.6.2. Обработка результатов ручных измерений .....	96
4.1.7. Контрольные вопросы .....	98
4.1.8. Требования к оформлению отчета .....	98

4.1.8.1. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в ручном режиме .....	98
4.1.9. Список литературы и интернет-ресурсов .....	99
Лабораторная работа 2. Закон Ома. Однородный участок цепи .....	100
4.2.1. Цель лабораторной работы .....	100
4.2.2. Задачи лабораторной работы .....	100
4.2.3. Краткие теоретические сведения. Закон Ома для однородного участка цепи .....	100
4.2.4. Описание ВЛС «Закон Ома. Однородный участок цепи» .....	104
4.2.5. Задания на выполнение лабораторной работы .....	109
4.2.5.1. Задания для проведения измерений в ручном режиме .....	109
4.2.5.2. Задания для проведения измерений в автоматическом режиме ..	109
4.2.5.3. Математическое моделирование .....	110
4.2.6. Порядок выполнения работы .....	110
4.2.6.1. Проведение измерений в ручном режиме .....	110
4.2.6.2. Порядок обработки результатов ручных измерений .....	112
4.2.6.3. Порядок проведения измерений в автоматическом режиме .....	112
4.2.6.4. Порядок обработки результатов автоматических измерений .....	118
4.2.7. Контрольные вопросы .....	118
4.2.8. Требования к оформлению отчета .....	118
4.2.8.1. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в ручном режиме .....	118
4.2.8.2. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в автоматическом режиме .....	119
4.2.8.3. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении исследований средствами математического моделирования .....	120
4.2.9. Список литературы и интернет-ресурсов .....	120
Лабораторная работа 3. Обобщенный закон Ома. Измерение мощности и КПД источника тока в зависимости от величины внешнего сопротивления (сопротивления нагрузки) .....	121
4.3.1. Цель лабораторной работы .....	121
4.3.2. Задачи лабораторной работы .....	121
4.3.3. Краткие теоретические сведения .....	121
4.3.4. Описание ВЛС «Исследование мощности и КПД источника тока» .....	126
4.3.5. Задания на выполнение лабораторной работы .....	130
4.3.5.1. Задания для проведения измерений в ручном режиме .....	130
4.3.5.2. Задания для проведения измерений в автоматическом режиме ..	132
4.3.5.3. Математическое моделирование .....	132
4.3.6. Порядок выполнения работы .....	133
4.3.6.1. Проведение измерений в ручном режиме .....	133
4.3.6.2. Обработка результатов ручных измерений .....	135
4.3.6.3. Проведение измерений в автоматическом режиме .....	136
4.3.6.4. Обработка результатов автоматических измерений .....	141
4.3.7. Контрольные вопросы .....	142

4.3.8. Требования к оформлению отчета .....	142
4.3.8.1. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в ручном режиме .....	142
4.3.8.2. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в автоматическом режиме .....	143
4.3.8.3. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении исследований средствами математического моделирования .....	143
4.3.9. Список литературы и интернет-ресурсов .....	144
Лабораторная работа 4. Переходные процессы. Изучение процессов в цепи с конденсатором .....	144
4.4.1. Цель лабораторной работы .....	144
4.4.2. Задачи лабораторной работы .....	144
4.4.3. Краткие теоретические сведения .....	145
4.4.3.1. Переходные процессы. Квazистационарные токи .....	145
4.4.3.2. Переходные процессы. Разрядка конденсатора .....	145
4.4.3.3. Переходные процессы. Заряд конденсатора .....	147
4.4.4. Описание ВЛС «Переходные процессы в цепи с конденсатором» .....	150
4.4.5. Задания на выполнение лабораторной работы .....	153
4.4.5.1. Задания для проведения измерений в автоматическом режиме .....	153
4.4.5.2. Математическое моделирование .....	154
4.4.6. Порядок выполнения работы .....	154
4.4.6.1. Проведение измерений в автоматическом режиме .....	154
4.4.5.2. Обработка результатов автоматических измерений .....	158
4.4.6. Контрольные вопросы .....	159
4.4.7. Требования к оформлению отчета .....	159
4.4.7.1. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в автоматическом режиме .....	159
4.4.7.2. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении исследований средствами математического моделирования .....	160
4.4.8. Список литературы и интернет-ресурсов .....	160
Лабораторная работа 5. Переходные процессы. Изучение процессов в $RL$ -цепи с индуктивностью .....	161
4.5.1. Цель лабораторной работы .....	161
4.5.2. Задачи лабораторной работы .....	161
4.5.3. Краткие теоретические сведения .....	161
4.5.3.1. Переходные процессы. Квazистационарные токи .....	161
4.5.3.2. Переходные процессы. Токи при замыкании цепи .....	162
4.5.3.3. Переходные процессы. Размыкание цепи .....	164
4.5.4. Описание ВЛС «Переходные процессы в цепи с индуктивностью» .....	166
4.5.5. Задания на выполнение лабораторной работы .....	170
4.5.5.1. Задания для проведения измерений в автоматическом режиме .....	170
4.5.5.2. Математическое моделирование .....	171
4.5.6. Порядок выполнения работы .....	171
4.5.6.1. Проведение измерений в автоматическом режиме .....	171

4.5.6.2. Обработка результатов автоматических измерений .....	175
4.5.7. Контрольные вопросы .....	176
4.5.8. Требования к оформлению отчета .....	176
4.5.8.1. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в автоматическом режиме .....	176
4.5.8.2. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении исследований средствами математического моделирования .....	177
4.5.9. Список литературы и интернет-ресурсов .....	177
Лабораторная работа 6. Полупроводниковые приборы. Изучение диода .....	178
4.6.1. Цель лабораторной работы .....	178
4.6.2. Задачи лабораторной работы .....	178
4.6.3. Краткие теоретические сведения .....	178
4.6.3.1. Строение полупроводников. Зонная теория .....	178
4.6.3.2. Собственная проводимость .....	181
4.6.3.3. Примесная проводимость .....	183
4.6.3.4. Р-п-переход в полупроводниках .....	186
4.6.3.5. Вольт-амперная характеристика р-п-перехода .....	187
4.6.3.6. Сопротивление диода .....	191
4.6.4. Описание ВЛС «Изучение полупроводникового диода» .....	193
4.6.5. Задания на выполнение лабораторной работы .....	197
4.6.5.1. Задания для проведения ручных измерений .....	197
4.6.5.2. Математическое моделирование .....	198
4.6.5.3. Задания для проведения измерений в автоматическом режиме .....	198
4.6.6. Порядок выполнения работы .....	198
4.6.6.1. Проведение измерений в ручном режиме .....	198
4.6.6.2. Обработка результатов ручных измерений .....	200
4.6.6.3. Проведение измерений в автоматическом режиме .....	201
4.6.6.4. Обработка результатов автоматических измерений .....	205
4.6.7. Контрольные вопросы .....	205
4.6.8. Требования к оформлению отчета .....	206
4.6.8.1. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в ручном режиме .....	206
4.6.8.2. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в автоматическом режиме .....	206
4.6.8.3. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении исследований средствами математического моделирования .....	207
4.6.9. Список литературы и интернет-ресурсов .....	208
Лабораторная работа 7. Электрические колебания. Свободные затухающие колебания в RLC-контуре .....	208
4.7.1. Цель лабораторной работы .....	208
4.7.2. Задачи лабораторной работы .....	208
4.7.3. Краткие теоретические сведения .....	209
4.7.3.1. Колебательный контур. Квазистационарные токи .....	209
4.7.3.2. Свободные колебания в LC-контуре .....	209

4.7.3.2. Свободные затухающие колебания в $RLC$ -контуре .....	214
4.7.4. Описание ВЛС «Изучение затухающих электрических колебаний» .....	219
4.7.5. Задание на выполнение лабораторной работы .....	224
4.7.5.1. Задания для проведения измерений в ручном режиме .....	224
4.7.5.2. Задания для проведения измерений в автоматическом режиме .....	224
4.7.5.3. Математическое моделирование .....	225
4.7.6. Порядок выполнения работы .....	225
4.7.6.1. Проведение измерений в ручном режиме .....	225
4.7.6.2. Обработка результатов ручных измерений .....	229
4.7.6.3. Проведение измерений в автоматическом режиме .....	230
4.7.6.4. Обработка результатов автоматических измерений .....	240
4.7.7. Контрольные вопросы .....	242
4.7.8. Требования к оформлению отчета .....	242
4.7.8.1. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в ручном режиме .....	242
4.7.8.2. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в автоматическом режиме .....	244
4.7.8.3. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении исследований средствами математического моделирования .....	246
4.7.9. Список литературы и интернет-ресурсов .....	246
Лабораторная работа 8. Электрические колебания. Последовательный $RLC$ -контур .....	247
4.8.1. Цель лабораторной работы .....	247
4.8.2. Задачи лабораторной работы .....	247
4.8.3. Краткие теоретические сведения .....	247
4.8.3.1. Метод векторных диаграмм .....	247
4.8.3.2. Вынужденные электрические колебания в колебательном контуре .....	249
4.8.3.3. Определение добротности $RLC$ -контура .....	257
4.8.4. Описание ВЛС «Изучение последовательного $RLC$ -контура» .....	260
4.8.5. Задания на выполнение лабораторной работы .....	265
4.8.5.1. Задания для проведения измерений в ручном режиме .....	265
4.8.5.2. Задания для проведения измерений в автоматическом режиме .....	267
4.8.5.3. Математическое моделирование .....	267
4.8.6. Порядок выполнения работы .....	268
4.8.6.1. Проведение измерений в ручном режиме .....	268
4.8.6.2. Обработка результатов ручных измерений .....	269
4.8.6.3. Проведение измерений в автоматическом режиме .....	271
4.8.6.4. Обработка результатов автоматических измерений .....	279
4.8.7. Контрольные вопросы .....	282
4.8.8. Требования к оформлению отчета .....	282

4.8.8.1. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в ручном режиме .....	282
4.8.8.2. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в автоматическом режиме .....	284
4.8.8.3. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении исследований средствами математического моделирования .....	286
4.8.9. Список литературы и интернет-ресурсов .....	286
Лабораторная работа 9. Переменный ток. Определение реактивного и полного сопротивлений цепи переменного тока .....	287
4.9.1. Цель лабораторной работы .....	287
4.9.2. Задачи лабораторной работы .....	287
4.9.3. Краткие теоретические сведения .....	287
4.9.3.1. Переменный ток. Квазистационарные токи .....	287
4.9.3.2. Активное сопротивление в цепи переменного тока .....	288
4.9.3.3. Конденсатор в цепи переменного тока .....	291
4.9.3.4. Катушка индуктивности в цепи переменного тока .....	294
4.9.3.5. Последовательное соединение резистора, конденсатора и катушки индуктивности в цепи переменного тока .....	297
4.9.3.6. Применение метода векторных диаграмм .....	298
4.9.3.7. Резонанс напряжений .....	301
4.9.4. Описание ВЛС «Определение сопротивлений цепи переменного тока» .....	304
4.9.5. Задания на выполнение лабораторной работы .....	308
4.9.5.1. Задания для проведения измерений в ручном режиме .....	308
4.9.5.2. Задания для проведения измерений в автоматическом режиме .....	310
4.9.5.3. Математическое моделирование .....	311
4.9.6. Порядок выполнения работы .....	311
4.9.6.1. Проведение измерений в ручном режиме .....	311
4.9.6.2. Обработка результатов ручных измерений .....	314
4.9.6.3. Проведение измерений в автоматическом режиме .....	315
4.9.6.4. Обработка результатов автоматических измерений .....	322
4.9.7. Контрольные вопросы .....	324
4.9.8. Требования к оформлению отчета .....	325
4.9.8.1. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в ручном режиме .....	325
4.9.8.2. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении измерений в автоматическом режиме .....	326
4.9.8.3. Содержание отчета по лабораторной работе при проведении исследований средствами математического моделирования .....	328
4.9.9. Список литературы и интернет-ресурсов .....	328



## ▼ ГЛАВА 5

### Программное и методическое обеспечение

#### для исследования физических явлений

#### в электрических цепях с применением методов

#### математического моделирования на ПЭВМ ..... 330

5.1. Программное обеспечение для математического моделирования.....330

5.2. Виды анализа, применяемые при математическом моделировании  
физических явлений в электрических цепях .....334

5.2.1. Анализ режима работы схемы по постоянному току .....334

5.2.2. Анализ режима по постоянному току при вариации источника  
постоянного напряжения или тока .....334

5.2.3. Анализ режима работы схемы во временной области .....337

5.2.4. Анализ режима работы схемы в частотной области .....339

5.2.5. Параметрический анализ.....341

5.3. Методики исследования физических явлений в электрических цепях  
при помощи методов математического моделирования на ПЭВМ.....345

5.3.1. Закон Ома. Обобщенная методика исследования на ПЭВМ  
зависимости тока от напряжения .....345

5.3.1.1. Измерение зависимости силы тока от разности потенциалов  
участка цепи .....346

5.3.1.2. Измерение зависимости силы тока от сопротивления участка  
цепи.....346

5.3.2. Обобщенный Закон Ома. Методика моделирования на ПЭВМ  
измерения мощности и КПД источника тока .....348

5.3.2.1. Измерение зависимости силы тока, полной мощности,  
мощности, выделенной во внешней цепи, КПД источника тока  
от сопротивления на внешнем участке цепи при постоянном  
значении внутреннего сопротивления.....348

5.3.2.2. Измерение зависимости силы тока, полной мощности,  
мощности, выделенной во внешней цепи, КПД источника тока  
от сопротивления на внешнем участке цепи при постоянном  
значении ЭДС .....349

5.3.2.3. Измерение зависимости силы тока, полной мощности,  
полезной мощности от внешнего сопротивления для различных  
значений ЭДС .....349

5.3.2.4. Измерение зависимости КПД от внешнего сопротивления .....349

5.3.3. Переходные процессы. Методика моделирования на ПЭВМ  
переходных процессов в цепи с конденсатором.....350

5.3.3.1. Измерение временной зависимости силы тока при постоянном  
значении сопротивления.....351

5.3.3.2. Измерение временной зависимости силы тока при постоянной  
емкости .....351

5.3.4. Переходные процессы. Методика моделирования на ПЭВМ переходных процессов в цепи с индуктивностью .....	352
5.3.4.1. Измерение временной зависимости силы тока при постоянном значении сопротивления.....	352
5.3.4.2. Измерение временной зависимости силы тока при постоянной индуктивности .....	354
5.3.5. Полупроводниковые приборы. Методика исследования диода средствами математического моделирования на ПЭВМ.....	354
5.3.5.1. Измерение вольт-амперной характеристики полупроводникового диода .....	354
5.3.6. Электрические колебания. Свободные затухающие колебания в $RLC$ -контуре .....	356
5.3.6.1. Измерение зависимостей силы тока от времени при различных параметрах $RLC$ -контура.....	357
5.3.7. Электрические колебания. Методика моделирования на ПЭВМ вынужденных электрических колебаний в $RLC$ -контуре .....	358
5.3.7.1. Измерение зависимостей амплитудных значений тока, напряжений на емкости, индуктивности и сопротивлении при различных параметрах $RLC$ -контура.....	359
5.3.7.2. Измерение семейства резонансных кривых амплитудных значений силы тока при параметрах $RLC$ -контура.....	360
5.3.7.3. Измерение семейства резонансных кривых амплитудных значений напряжений на емкости, индуктивности и сопротивлении при различных параметрах $RLC$ -контура.....	361
5.3.8. Переменный ток. Методика исследования активного индуктивного и емкостного сопротивления средствами моделирования на ПЭВМ.....	362
5.3.8.1. Измерение амплитудных значений силы тока, фазы и полного сопротивления цепи переменного тока .....	362
5.3.8.2. Измерение частотных зависимостей фазы и полного сопротивления цепи переменного тока .....	364

## **Заключение ..... 366**

## **▼ ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

### **Основные термины и определения ..... 368**

## **▼ ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

### **Компьютерные измерительные технологии ..... 373**

DataSocket .....	373
Система LABVIEW .....	373
Компьютерные измерительные технологии National Instruments.....	376

## ▼ ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### **Примеры обработки экспериментальных данных ..... 383**

ПЗ.1. Пример обработки результатов прямых измерений .....	383
ПЗ.2. Пример нахождения частных производных .....	385
ПЗ.3. Пример обработки результатов косвенных измерений .....	386
ПЗ.4. Пример использования метода наименьших квадратов .....	388
ПЗ.5. Пример определения сопротивления участка цепи на основании экспериментальной вольт-амперной характеристики .....	390
ПЗ.6. Пример определения полной, полезной мощности и мощности, выделенной на внутреннем участке цепи .....	393
ПЗ.6.1. Полная мощность источника тока .....	393
ПЗ.6.2. Полезная мощность источника тока .....	395
ПЗ.6.3. Мощность, выделенная на внутреннем участке цепи .....	395
ПЗ.7. Пример определения внутреннего сопротивления источника на основании экспериментальной зависимости полезной мощности от сопротивления нагрузки $P_R(R)$ .....	397
ПЗ.8. Пример определения внутреннего сопротивления источника на основании экспериментальной зависимости КПД от сопротивления нагрузки $\eta(R)$ .....	400
ПЗ.9. Пример определения времени релаксации для $RC$ -цепи .....	403
ПЗ.10. Пример определения времени релаксации $RL$ -цепи на основе экспериментальной зависимости $I(t)$ .....	405
ПЗ.11. Пример определения внутреннего сопротивления диода .....	407
ПЗ.12. Пример определения параметров затухающих колебаний .....	411
ПЗ.13. Пример определения добротности последовательного $RLC$ -контура по экспериментальной резонансной кривой $U_{co}(\omega)$ .....	413
ПЗ.14. Пример определения резонансной частоты по экспериментальным АЧХ силы тока $I(\omega)$ и частной зависимости полного сопротивления цепи переменного тока $Z(\omega)$ .....	415

## ▼ ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### **Международная система единиц СИ**

**(ОТ SI, фр. Systeme International D'unites – система  
интернациональная) ..... 419**

**Библиографический список ..... 426**