

621.3

П44

А.Д. Подольцев  
И.Н. Кучерявая

# Мультифизическое моделирование в электротехнике



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

**А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая**

**МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ**

---

Киев 2015

UKRAINIAN NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
INSTITUTE OF ELECTRODYNAMICS

**A. D. Podoltsev, L. N. Kucheryavaya**

**MULTIPHYSICS MODELING  
IN ELECTRICAL ENGINEERING**

---

Kiev 2015

УДК 621.3:004.94  
ББК31.2

Утверждено к печати  
ученым советом Института электродинамики НАН Украины.  
*Протокол № 7 от 04.06.2015 г.*

**Рецензенты:** Резцов В. Ф., чл.-корр. НАН Украины.  
Васецкий Ю. М., докт. техн. наук, профессор

**Мультифизическое моделирование в электротехнике. Монография /**  
А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины,  
2015. – 305 с.

Описаны современные подходы к моделированию процессов различной физической природы, одновременно протекающих в электротехническом устройстве и определяющих его рабочие характеристики, - мультифизических процессов. Приведена классификация мультифизических задач в электротехнике по двум признакам - в соответствии с характером связи между различными физическими процессами (сильно связанные и слабо связанные) и с точки зрения подходов к моделированию процессов (мультифизические полевые, мультифизические цепные и цепно-полевые задачи). Представлены примеры, иллюстрирующие построение мультифизических моделей и их применение для исследования процессов в силовых кабелях и кабельных линиях, силовых трансформаторах, системах индукционного нагрева и биологических.

Монография предназначена для студентов и аспирантов электротехнических специальностей, а также специалистов в области компьютерного моделирования процессов в электротехнических устройствах и электроэнергетических системах. Может быть полезной также для исследователей в области биомедицины, изучающих воздействие электромагнитного поля на биологические системы.

Описано сучасні підходи до моделювання процесів різної фізичної природи, що одночасно протікають в електротехнічному пристрої та визначають його робочі характеристики, - мультифізичних процесів. Представлено класифікацію мультифізичних задач в електротехніці за двома ознаками - відповідно до характеру зв'язку між різними фізичними процесами (сильнозв'язані та слабкозв'язані) і з точки зору підходів до моделювання процесів (мультифізичні польові, мультифізичні ланцюгові та коло-польові задачі). Наведено приклади, що ілюструють побудову мультифізичних моделей та їх застосування для дослідження процесів у силових кабелях і кабельних лініях, силових трансформаторах, системах індукційного нагріву і біологічних системах.

Монографія призначена для студентів і аспірантів електротехнічних спеціальностей, а також фахівців у галузі комп'ютерного моделювання процесів в електротехнічних пристроях і електроенергетичних системах. Може бути корисною також для дослідників у галузі біомедицини, які вивчають вплив електромагнітного поля на біологічні системи.

**ISBN 978-966-02-7671-0**

© А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая, 2015  
© Институт электродинамики НАН Украины, 2015

UDC 621.3 : 004.94  
BBK 31.2

**Reviewers:** V. F. Reztsov, Corresponding Member,  
Ukrainian National Academy of Sciences. Dr. Eng., Prof.;  
Yu.M. Vasetsky, Dr. Eng., Prof.

**Authors:** A. D. Podoltsev, I.N. Kucheryavaya

### **Multiphysics Modeling in Electrical Engineering**

The up-to-date approaches to modeling the coupled physical processes (multiphysics processes) in electrotechnical devices are described. The two-way classification of multiphysics problems in electrical engineering is presented. These are weakly coupled and strongly coupled problems depending on relation between the modeled physical processes of different nature. According to realization of the modeling the problems are subdivided into the multiphysics field, multiphysics circuit and field-circuit problems. A number of multiphysics problems of all classes are solved. They are related to studying the power cables and cable lines, power transformers, the induction heating and biological systems.

The book is intended for the students and postgraduate students specialized in electrical engineering as well as for specialists concerned with computer modeling of electrotechnical devices and power equipment. It may be of interest to the researchers in biomedicine who study the action of electromagnetic field on biological organisms.

**ISBN 978-966-02-7671-0**

© A. D. Podoltsev, I. N. Kucheryavaya, 2015  
© Institute of Electrodynamics, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>Предисловие</b> .....	10
<b>1. Мультифизические процессы в электротехнике и классификация мультифизических задач</b> .....	14
1.1. Общая характеристика мультифизических процессов.....	14
1.2. Классификация мультифизических задач.....	18
1.3. Применение мультифизического моделирования.....	26
<b>ЧАСТЬ I. Мультифизические полевые задачи</b> .....	28
<b>2. Моделирование физических полей</b> .....	29
2.1. Общая характеристика мультифизических полевых задач .....	29
2.2. Электромагнитное поле.....	34
2.3. Тепловое поле.....	42
2.4. Гидродинамика и газодинамика.....	43
2.5. Механика деформируемого твердого тела.....	44
2.6. Основные подходы к решению мультифизических полевых задач в программе Comsol Multiphysics.....	47
<b>3. Связанные электрические, тепловые и механические процессы в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей</b> .....	51
3.1. Предварительные замечания.....	51
3.2. Полевые задачи и их решение.....	53
3.3. Результаты компьютерного моделирования.....	56
3.4. Экспериментальное подтверждение достоверности результатов компьютерных расчетов.....	60
<b>4. Электромагнитные, тепловые процессы и термомеханические напряжения при индукционном нагреве проводников</b> .....	64
4.1. Предварительные замечания.....	64
4.2. Описание установки индукционного нагрева.....	65
4.3. Математическая модель электрофизических процессов.....	66
4.4. Результаты компьютерных расчетов.....	69

<b>5.</b>	<b>Высокочастотный индукционный нагрев и плавление проводящих заготовок с использованием концентратора магнитного потока.....</b>	<b>75</b>
5.1.	Предварительные замечания.....	75
5.2.	Математическое описание физических процессов.....	76
5.3.	Результаты компьютерных расчетов.....	81
<b>6.</b>	<b>Магнитные и гидродинамические процессы в активной зоне магнитожидкостного герметизатора вращающегося вала.....</b>	<b>89</b>
6.1.	Предварительные замечания.....	89
6.2.	Магнитное поле в активной зоне магнитожидкостного герметизатора в статике.....	91
6.3.	Течение магнитной жидкости при вращении вала.....	97
<b>7.</b>	<b>Электротепловые процессы в светоизлучающей полупроводниковой структуре.....</b>	<b>102</b>
7.1.	Предварительные замечания.....	102
7.2.	Математическая модель электротепловых процессов в объеме светодиода.....	103
7.3.	Результаты компьютерного моделирования.....	109
<b>8.</b>	<b>Распределение импульсного электрического поля и температуры в объеме биологической клетки.....</b>	<b>117</b>
8.1.	Предварительные замечания .....	117
8.2.	Электрическая задача.....	119
8.3.	Тепловая задача.....	127
<b>9.</b>	<b>Электромагнитные и тепловые процессы при магнитно-жидкостной гипертермии биологических тканей.....</b>	<b>129</b>
9.1.	Предварительные замечания.....	129
9.2.	Описание электромагнитных процессов.....	131
9.3.	Модель тепловых процессов.....	137
9.4.	Результаты компьютерных расчетов.....	139
	<b>ЧАСТЬ II. Мультифизические цепные задачи.....</b>	<b>142</b>
<b>10.</b>	<b>Эквивалентные цепи для расчета процессов различной физической природы.....</b>	<b>143</b>

---

10.1.	Определение и примеры мультифизических цепей.....	143
10.2.	Построение эквивалентных цепей для расчета процессов различной физической природы.....	148
<b>11.</b>	<b>Электрические и магнитные процессы в трехфазном силовом трансформаторе в переходных режимах.....</b>	<b>152</b>
11.1.	Предварительные замечания.....	152
11.2.	Магнитоэлектрические схемы замещения индуктора и их расчет.....	154
11.3.	Магнитоэлектрическая схема замещения трехфазного трансформатора и ее программная реализация.....	159
11.4.	Моделирование переходных процессов в электрической сети при наличии силового трансформатора с нелинейным магнитопроводом.....	163
11.5.	Влияние геомагнитных индуцированных в сети токов на работу трехфазного трансформатора.....	166
<b>12.</b>	<b>Связанные электромагнитные и тепловые процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ.....</b>	<b>171</b>
12.1.	Предварительные замечания.....	171
12.2.	Моделирование электромагнитных процессов в линии на основе теории электрических цепей.....	173
12.3.	Моделирование тепловых процессов в кабельной линии на основе тепловых схем замещения.....	179
12.4.	Совместный расчет электромагнитных и тепловых процессов в кабельной линии в режиме короткого замыкания.....	182
<b>ЧАСТЬ III.</b>	<b>Мультифизические цепно-полевые задачи.....</b>	<b>187</b>
<b>13.</b>	<b>Общая характеристика мультифизических цепно-полевых задач.....</b>	<b>188</b>
13.1.	Определение и классификация цепно-полевых задач.....	188
13.2.	Особенности связей между цепными и полевыми задачами .....	190
13.3.	Построение эквивалентных цепей на основе полевых задач .....	192
13.4.	Расчет электрического напряжения на катушках различного типа.....	196

<b>14.</b>	<b>Цепно-полевая модель для определения нагрузочной способности кабельных линий</b> .....	199
14.1.	Предварительные замечания.....	199
14.2.	Математическая модель электромагнитных процессов.....	201
14.3.	Моделирование электротепловых процессов в подземных кабельных линиях.....	203
14.4.	Процессы теплообмена в воздушных сооружениях с кабельными линиями.....	209
<b>15.</b>	<b>Расчет электрических токов и магнитного поля в трехфазном силовом трансформаторе</b> .....	221
15.1.	Предварительные замечания.....	221
15.2.	Моделирование аварийных режимов работы электрической сети с силовым трансформатором.....	223
15.3.	Магнитное поле и электродинамические силы в обмотках трансформатора в аварийных режимах.....	227
<b>16.</b>	<b>Моделирование электротепловых процессов в трансформаторе с учетом внешней цепи и анизотропии тепловых свойств активных элементов</b> .....	233
16.1.	Предварительные замечания.....	233
16.2.	Электромагнитная задача с учетом внешней электрической цепи.....	236
16.3.	Тепловая задача для случая свободной конвекции воздуха.....	238
16.4.	Связанные тепловая и газодинамическая задачи для случая принудительного охлаждения трансформатора.....	245
<b>17.</b>	<b>Совместный расчет магнитного поля и магнитной цепи в электромагните магнитодинамической установки</b> .....	250
17.1.	Предварительные замечания.....	250
17.2.	Расчет магнитного поля во всем объеме электромагнита (первый подход) .....	252
17.3.	Расчет магнитного поля электромагнита в области воздушного зазора (второй подход).....	254
<b>18.</b>	<b>Мультифизическое и многомасштабное моделирование электрофизических процессов в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей</b> .....	258
18.1.	Предварительные замечания.....	258

---

18.2. Схема решения мультифизических задач в рамках многомасштабного моделирования.....	260
18.3. Макроуровень - расчет электромагнитных процессов в кабельной линии на основе теории цепей.....	263
18.4. Средний пространственный уровень - электрическое поле в изоляции.....	265
18.5. Микроуровень - мультифизические процессы в неоднородной изоляции.....	269
Литература	
к разделу 1 .....	273
к разделу 2.....	277
к разделу 3 .....	280
к разделу 4.....	282
к разделу 5.....	283
к разделу 6.....	284
к разделу 7.....	285
к разделу 8.....	286
к разделу 9.....	288
к разделу 10.....	290
к разделу 11 .....	291
к разделу 12.....	293
к разделу 13.....	294
к разделу 14.....	297
к разделу 15.....	299
к разделу 16.....	300
к разделу 17.....	302
к разделу 18.....	303