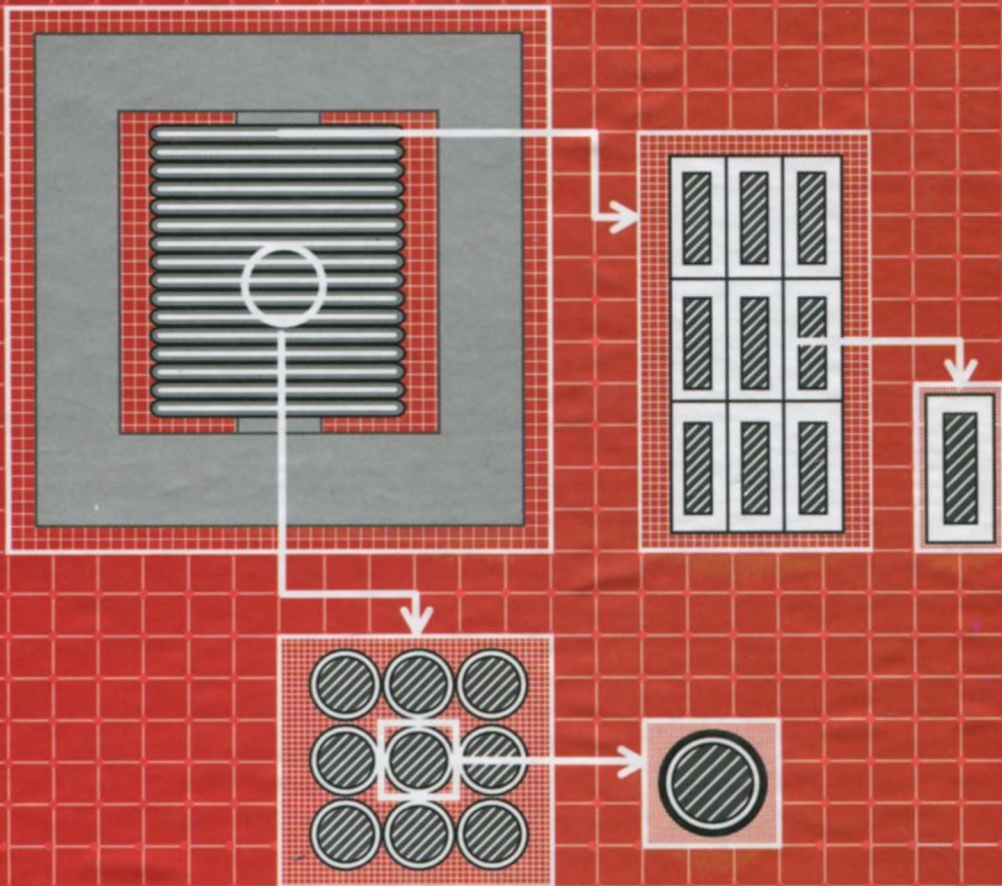


621.3
П44

А.Д. Подольцев
И.Н. Кучерявая

Многомасштабное моделирование в электротехнике



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

А. Д. ПОДОЛЬЦЕВ
И. Н. КУЧЕРЯВАЯ

**МНОГОМАСШТАБНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ**

КИЕВ 2011

**A. D. PODOLTSEV
I. N. KUCHERYAVAYA**

**MULTISCALE MODELING
IN ELECTRICAL ENGINEERING**

KIEV 2011

УДК 621.3:004.94

Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с применением метода многомасштабного моделирования для изучения электромагнитных процессов в электротехнических устройствах, композиционных материалах и биологических объектах с учетом их сложной внутренней иерархической структуры. Рассмотрено построение многоуровневых математических и компьютерных моделей для численного расчета электромагнитного поля и высокочастотных параметров обмоток силового трансформатора, эффективных характеристик композиционных диэлектрических материалов и электрических процессов в теле человека, находящегося под высоковольтной линией электропередачи.

Монография предназначена для студентов и аспирантов электротехнических специальностей, а также специалистов, занимающихся вопросами расчета электромагнитного поля в силовом электроэнергетическом оборудовании. Может также представлять интерес для специалистов в области биомедицины, изучающих воздействие электромагнитного поля на биологические объекты.

Розглянуто комплекс питань, пов'язаних із застосуванням методу багатомасштабного моделювання для вивчення електромагнітних процесів в електротехнічних пристроях, композиційних матеріалах і біологічних об'єктах з урахуванням їхньої складної внутрішньої ієрархічної структури. Розглянуто побудову багаторівневих математичних і комп'ютерних моделей для чисельного розрахунку електромагнітного поля та високочастотних параметрів обмоток силового трансформатора, ефективних характеристик композиційних діелектричних матеріалів й електричних процесів у тілі людини, яка перебуває під високовольтною лінією електропередачі.

Монографія призначена для студентів і аспірантів електротехнічних спеціальностей, а також спеціалістів, які займаються питаннями розрахунку електромагнітного поля у силовому електроенергетичному обладнанні. Може також зацікавити спеціалістів у галузі біомедицини, які вивчають вплив електромагнітного поля на біологічні об'єкти.

Рецензенты:

член-корреспондент НАН Украины *В. Ф. Резцов*
доктор технических наук, профессор *Ю. М. Васецкий*

*Утверждено к печати ученым советом
Института электродинамики НАН Украины.
Протокол № 1 от 3 февраля 2011 г.*

ISBN 978-966-02-5942-3

© А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая, 2011
© Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011

UDC 621/3 : 004.94

This book presents a number of problems related to using the multi-scale modeling for investigation of electromagnetic processes taking place in electric equipment, composite materials and biological organisms considering their complex internal hierarchical structure. The multilevel mathematical and computer models are developed to calculate numerically the electromagnetic field and high-frequency parameters of power transformer windings, to determine effective characteristics of dielectric composite materials and to analyze electric processes in human body being under high-voltage transmission line.

The book is intended for the students and postgraduate students specialized in electrical engineering as well as for specialists concerned with computations of electromagnetic field in electrical power equipment. It may also be of interest for specialists in the field of biomedicine who study the influence of electromagnetic field on biological organisms.

Reviewers:

V. F. Reztsov, Corresponding Member, Ukrainian National Academy of Sciences,
Yu. M. Vasetsky, Dr. Sc. (Eng.), Prof.

ISBN 978-966-02-5942-3

© A. D. Podoltsev, I. N. Kucheryavaya. 2011
© Institute of Electrodynamics, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	8
Глава 1	
МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОГОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ (обзор)	11
1.1. Многоуровневые модели.....	11
1.2. Метод многомасштабного моделирования.....	16
1.3. Мультифизические задачи.....	22
1.4. Применение метода к задачам электродинамики и электротехники.....	23
Глава 2	
МНОГОУРОВНЕВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ	26
2.1. Введение.....	26
2.2. Общие сведения из теории композиционных материалов.....	27
2.3. Многоуровневые модели при анализе электромагнитных процессов в материале со сложной структурой.....	32
2.4. Осредненная система дифференциальных уравнений Максвелла.....	37
2.5. Полевая задача на элементарной ячейке и расчет эффективных характеристик композита.....	42
2.6. Полевая задача на представительном элементе объема.....	46
2.7. Анализ электромагнитных процессов в магнитно-проводящем композиционном материале с регулярной структурой.....	50
2.8. Численное моделирование электротепловых процессов при протекании электрического тока в пористом проводнике.....	62
Глава 3	
МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ	76
3.1. Введение.....	76
3.2. Структура композиционного материала и результаты эксперимента.....	77
3.3. Использование классических моделей композита.....	80
3.4. Математические модели на двух разномасштабных уровнях.....	83
3.5. Результаты компьютерного моделирования.....	86

Глава 4

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА СО СТОХАСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ..... 91

4.1. Введение..... 91

4.2. Структура композиционного материала и результаты эксперимента..... 92

4.3. Двухуровневая математическая модель композиционного материала..... 95

4.4. Результаты компьютерного моделирования..... 101

Глава 5

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОГОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОВИТКОВОЙ ОБМОТКИ НА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ..... 106

5.1. Введение..... 106

5.2. Эквивалентное сопротивление многовитковой обмотки с массивными проводниками на различной частоте..... 109

5.2.1. Эквивалентное сопротивление единичного проводника с переменным током..... 110

5.2.2. Эквивалентное сопротивление единичного проводника при заданном внешнем магнитном поле..... 115

5.2.3. Эквивалентное сопротивление многовитковой обмотки трансформатора..... 119

5.3. Эквивалентное сопротивление многовитковой обмотки из провода типа литцендрат..... 122

5.4. Результаты экспериментальных исследований и сравнение их с расчетными данными..... 123

Глава 6

РАСЧЕТ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТОК СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ МЕТОДОМ МНОГОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ..... 130

6.1. Введение..... 130

6.2. Эквивалентное сопротивление и эффективные диамагнитные свойства обмоток трансформатора на высокой частоте..... 133

6.3. Эффективные характеристики шихтованного магнитопровода..... 144

6.4. Расчет трехмерного магнитного поля силового трансформатора при различной частоте..... 146

Глава 7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В УСТАНОВКЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НА ДВУХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ УРОВНЯХ..... 155

7.1. Введение..... 155

7.2. Компьютерный анализ электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве стального реактора с сыпучим материалом.....	159	
7.2.1. Постановка электротепловой задачи и метод решения.....	159	
7.2.2. Анализ результатов расчета.....	164	
7.3. Компьютерное моделирование процессов в индукционной установке на двух пространственных уровнях.....	172	
7.3.1. Математическая модель электротепловой задачи.....	172	
7.3.2. Решение электромагнитной задачи на двух пространственных уровнях.....	177	
7.3.3. Результаты компьютерного моделирования.....	181	
Глава 8		
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ.....		186
8.1. Применение магнитных наночастиц в биомедицине.....	186	
8.2. Расчет величины магнитной силы, действующей на нано частицы.....	192	
8.3. Магнитное поле и магнитная силовая функция для различных типов магнитных систем.....	195	
8.4. Магнитофоретическое движение магнитных наночастиц в потоке жидкости.....	201	
8.4.1. Расчет изменяющейся во времени концентрации магнитных частиц.....	201	
8.4.2. Расчет траектории движения магнитных частиц в потоке жидкости во внешнем магнитном поле.....	207	
Глава 9		
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВНЕШНЕГО ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТЕЛЕ ЧЕЛОВЕКА МЕТОДОМ МНОГОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....		216
9.1. Введение.....	216	
9.2. Переменное электрическое поле высоковольтной воздушной линии электропередачи на пространственном уровне человека.....	219	
9.2.1. Двумерное квазиэлектростатическое поле воздушной линии электропередачи напряжением 110 кВ.....	220	
9.2.2. Трехмерное электрическое поле в теле человека.....	222	
9.3. Переменное электрическое поле на уровне биологической клетки.....	225	
9.3.1. Постановка задачи и ее решение.....	226	
9.3.2. Анализ результатов расчета.....	229	
9.4. Переменное электрическое поле на уровне поры.....	232	
9.4.1. Электрические диполи в неоднородном электрическом поле.....	235	
Литература.....	240	