

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Ю.М. ВАСЕЦКИЙ И.П. КОНДРАТЕНКО
А.П. РАЩЕПКИН И.Л. МАЗУРЕНКО

621.3.011
Э45

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОКОВЫХ КОНТУРОВ С ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ СРЕДОЙ

Киев 2019

UKRAINIAN NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
INSTITUTE OF ELECTRODYNAMICS

Y. M. VASETSKY
I. P. KONDRATENKO
A. P. RASHCHEPKIN
I. L. MAZURENKO

**ELECTROMAGNETIC INTERACTIONS
BETWEEN CURRENT CONTOURS
AND CONDUCTIVE MEDIUM**

Kyiv

2019

This book is devoted to the further development of the theory for solving of a certain class of three-dimensional electromagnetic field problems. The electromagnetic systems under examination include a.c. contour with arbitrary spatial configuration and magnetized conducting body with induced eddy currents. The theoretical studies on induction heating of non-ferrous and ferrous metal tapes are presented. The inverse problems are solved to determine the inductor configuration as flat and spatial current contours for providing of the necessary temperature distribution of moving metal tapes.

The book is intended for researchers, postgraduate students and students specialized in electrical engineering, particularly in electromagnetic field studies and induction heating installations.

Reviewers:

V. F. Reztsov, Corresponding Member, Ukrainian National Academy of Sciences

A. A. hcherba, Corresponding Member, Ukrainian National Academy of Sciences

ISBN 978-966-02-8804-1

© Y. M. Vasetsky, I. P. Kondratenko,

A. P. Rashchepkin, I. L. Mazurenko, 2019

© Institute of Electrodynamics, 2019

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Ю. М. ВАСЕЦКИЙ
И. П. КОНДРАТЕНКО
А. П. РАЩЕПКИН
И. Л. МАЗУРЕНКО

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОКОВЫХ
КОНТУРОВ
С ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ СРЕДОЙ**

Киев

2019

УДК 621.3.011; 621.365

В монографии представлены основные положения теории решения определенного класса задач трехмерного электромагнитного поля. Рассматриваемые электромагнитные системы включают контур переменного тока в общем случае произвольной пространственной конфигурации и электропроводное намагничивающееся тело, в котором индуцируются вихревые токи. Проведены теоретические исследования индукционного нагрева лент цветных и черных металлов. Представлены результаты решения обратных задач поиска геометрии индукторов в виде контуров плоской и пространственной конфигурации, которые обеспечивают необходимое распределение температуры движущихся металлических лент.

Для специалистов в области исследования электромагнитных полей, разработчиков устройств индукционного нагрева, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

У монографії представлено основні положення теорії рішення певного класу задач тривимірного електромагнітного поля. Електромагнітні системи, що розглядаються, включають контур змінного струму в загальному випадку довільної просторової конфігурації та електропровідне тіло, що намагнічується, в якому індукуються вихрові струми. Проведено теоретичні дослідження індукційного нагрівання стрічок кольорових і чорних металів. Представлено результати рішення обернених задач пошуку геометрії індукторів у вигляді контурів плоскої і просторової конфігурації, які забезпечують необхідний розподіл температури нагрівання металевих рухомих стрічок.

Для фахівців у галузі дослідження електромагнітних полів, розробників пристроїв індукційного нагрівання, аспірантів і студентів відповідних спеціальностей.

Рецензенти:

член-корреспондент НАН України *В. Ф. Резцов*

член-корреспондент НАН України *А. А. Щерба*

Утверждено к печати ученым советом Института электродинамики НАН Украины (протокол № 17 от 20 декабря 2018)

ISBN 978-966-02-8804-1

© Ю. М. Васецкий, И. П. Кондратенко,
А. П. Ращепкин, И. Л. Мазуренко, 2019

© Институт электродинамики, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВЕДЕНИЕ.....	9
ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО КОНТУРА ТОКА, РАСПОЛОЖЕННОГО ВБЛИЗИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО ТЕЛА С ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.....	13
1.1. Общее решение трехмерной квазистационарной задачи.....	15
1.2. Метод асимптотического разложения для приближенного расчета электромагнитного поля, создаваемого замкнутым токовым контуром.....	25
1.2.1. Формулировка задачи асимптотического разложения: представление функции G_e в виде ограниченного асимптотического ряда.....	27
1.2.2. Решение для потенциалов и векторов электромагнитного поля в диэлектрическом полупространстве в виде асимптотического ряда.....	41
1.2.3. Примеры оценки величины малого параметра и числа членов асимптотического ряда.....	44
1.3. Математическая модель локально двумерного электромагнитного поля вблизи контура с током.....	48
1.3.1. Малые параметры в модели локально двумерного поля.....	49
1.3.2. Векторный потенциал, индукция магнитного поля и плотность потока электромагнитной энергии в проводящую среду в модели локально двумерного электромагнитного поля.....	54
1.3.3. Оценка погрешности членов асимптотического ряда для криволинейного контура с током.....	58
1.4. Выводы к главе 1.....	64

Содержание

ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ С ТОКОВЫМИ КОНТУРАМИ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО И СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДВИЖУЩУЮСЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНУЮ ПОЛОСУ.....	66
2.1. Основные уравнения.....	68
2.2. Однофазные индукторы поперечного магнитного потока для нагрева лент.....	75
2.2.1. Индукторы поперечного магнитного потока с ферромагнитным сердечником.....	75
2.2.1.1. Энергетические характеристики и электромагнитные силы в многополюсном однофазном индукторе.....	84
2.2.1.2. Индукционный нагрев лент в однофазном индукторе.....	92
2.2.2. Индукционный нагрев движущейся полосы токовыми контурами.....	97
2.2.2.1. Электромагнитные и температурные поля при термообработке движущейся полосы токовыми контурами канонических форм.....	98
2.2.2.2. Влияние конечной высоты сечения токового контура на энергетические характеристики индуктора.....	122
2.2.3. Электромагнитное поле пространственно распределенного токового контура.....	133
2.3. Выводы к главе 2.....	145
ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АСИМПТОТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ ЛЕНТ.....	146
3.1. Электромагнитные и тепловые характеристики высокочастотного индукционного нагрева электропроводных лент.....	146

Содержание

3.1.1. Математическая модель электромагнитной системы высокочастотного нагрева металлических лент.....	149
3.1.2. Поверхностная плотность потока энергии электромагнитного поля в нагреваемую металлическую ленту.....	153
3.1.2.1. Линейная плотность потока энергии поля, переданной металлическому листу вдали от края контура.....	156
3.1.2.2. Линейная плотность потока энергии поля вблизи края контура.....	157
3.1.3. Оценка основных параметров процесса нагрева.....	160
3.1.3.1. Выравнивание температуры по толщине металлической ленты.....	160
3.1.3.2. Теплопередача теплопроводностью вдоль поверхности металлической ленты.....	163
3.1.4. Примеры расчета распределения температуры по ширине металлической ленты.....	169
3.2. Влияние геометрических параметров контуров пространственной конфигурации на распределение джоулевых тепловыделений в проводящем полупространстве.....	172
3.3. Геометрические параметры контуров с током для обеспечения определенного характера нагрева металлических лент.....	180
3.3.1. Пространственные контуры с круглой формой проекции на поверхность раздела сред ($h=\text{var}$, $R=\text{const}$).....	181
3.3.1.1. Температура не меньше заданного значения.....	183
3.3.1.2. Температура не выше заданного максимального значения.....	186
3.3.1.3. Геометрические параметры контура при минимальном отклонении температуры на заданной ширине.....	188
3.3.2. Плоские контуры эллиптической формы ($h=\text{const}$, $R=\text{var}$).....	193

Содержание

3.4. Особенности применения асимптотического метода для исследования индукционного нагрева электропроводных лент с учетом их ограниченной ширины.....	196
3.4.1. Математическая модель для расчета электромагнитного поля токового контура над проводящей поверхностью ограниченной ширины.....	196
3.4.2. Геометрические параметры электромагнитной системы индукционного нагрева металлической ленты ограниченной ширины при минимальной неравномерности температуры по ее ширине.....	202
3.5. Выводы к главе 3.....	207
Список использованных источников.....	209