

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.И. ИНКИН, А.И. АЛИФЕРОВ, А.В. БЛАНК

ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОНАГРЕВА НА ОСНОВЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КАСКАДНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Монография

НОВОСИБИРСК
2013

УДК 621.365.5.001.24
И 653

Рецензенты:

Д.Л. Калужский, д-р техн. наук, профессор
В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, профессор
А.Ф. Серов, д-р техн. наук, профессор

Инкин А.И.

И 653 Электротепловые расчеты установок электронагрева на основе универсальных каскадных схем замещения : монография / А.И. Инкин, А.И. Алиферов, А.В. Бланк. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 202 с. (Серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-2304-2

На основании теоретических исследований, выполненных авторами, рассматриваются электромагнитные и тепловые процессы в проводящих телах при электроконтактном и индукционном нагреве. Описываются физические основы электромагнитных процессов при электроконтактном и индукционном нагреве и доказываются необходимость развития аналитических методов исследования электромагнитных и температурных полей в электротехнологических установках на базе каскадных схем замещения. Рассмотрена разработка нелинейных каскадных схем замещения для расчета электромагнитного поля и активно-реактивных сопротивлений ферромагнитных проводников прямоугольного и круглого сечений. Представлены каскадные схемы для расчета электромагнитного поля и параметров установок индукционного нагрева с постоянными магнитами. На примере одномерных плоских и осесимметричных температурных полей в средах с внутренними источниками тепла излагаются принципы синтеза типовых активных $T-Q$ -четырёхполюсников. Также приводятся примеры формирования температурных каскадных схем замещения и конкретные расчеты устройств электроконтактного нагрева.

УДК 621.365.5.001.24

ISBN 978-5-7782-2304-2

© Инкин А.И., Алиферов А.И.,
Бланк А.В., 2013
© Новосибирский государственный
технический университет, 2013

Ministry of Education and Science of the Russian Federation
NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

A.I. INKIN, A.I. ALIFEROV, A.V. BLANC

ELECTROTHERMAL CALCULATIONS OF ELECTROHEATING INSTALLATIONS BASED ON UNIVERSAL CASCADE EQUIVALENT CIRCUITS

Monograph

NOVOSIBIRSK
2013

UDC 621.365.5.001.24
I 653

Review:

D.L. Kaluzhsky, Dr. Sc., prof.
V.J. Neyman, Dr. Sc., prof.
A.F. Serov, Dr. Sc., prof.

Inkin A.I.

I 653 Electrothermal calculations of electroheating installations based on universal cascade equivalent circuits : monograph / A.I. Inkin, A.I. Aliferov, A.V. Blank. – Novosibirsk : NSTU Publisher, 2013. – 202 pp. («NSTU Monographs» series).

ISBN 978-5-7782-2304-2

Based on theoretical studies performed by the authors, the electromagnetic and thermal processes in conducting bodies at electrocontact and induction heating are discussed. The first chapter describes the physical basis of electromagnetic processes and electro-contact induction heating, and proves the need for development of analytical methods for study of electromagnetic and thermal fields in electro-technological installations based on the cascade equivalent circuits.

Second chapter is devoted to the development of non-linear cascade equivalent circuits for computing the electromagnetic field and the active-reactive resistances of ferromagnetic conductors of rectangular and circular cross-section.

Third chapter contains the cascade circuits for the computation of electromagnetic fields and parameters of induction heating by permanent magnets.

In the fourth chapter the principles of synthesis of typical active T - Q -quadruple are described with help of examples of one-dimensional planar and axisymmetric temperature fields in a medium with internal heat sources. Also there are given examples of formation of temperature cascade equivalent circuits, and concrete calculations electrocontact heating devices.

UDC 621.365.5.001.24

ISBN 978-5-7782-2304-2

© Inkin A.I., Aliferov A.I., Blank A.V., 2013
© Novosibirsk State
Technical University, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	7
ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КАСКАДНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.....	11
1.1. Уравнения классической электродинамики.....	11
1.2. Теорема и вектор Пойнтинга в синусоидальном электромагнитном поле	19
ГЛАВА 2. ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗА НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КАСКАДНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ТОКОНЕСУЩИХ ПРОВОДНИКОВ В УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА.....	23
2.1. Электромагнитные поля в кусочно-однородных средах	24
2.2. Типовое нелинейное $E-H$ -звено и каскадная схема замещения проводника прямоугольного сечения в устройствах электроконтактного нагрева	27
2.2.1. Постановка задачи и алгоритм ее решения.....	27
2.2.2. Реализация алгоритма решения	29
2.2.3. Сравнительный анализ численного и аналитического расчетов поля	37
2.3. Типовое нелинейное $E-H$ -звено и каскадная схема замещения проводника прямоугольного сечения в устройствах индукционного нагрева.....	42
2.3.1. Постановка задачи	42
2.3.2. Реализация алгоритма решения	43
2.3.3. Сравнительный анализ численного и аналитического расчетов поля	48
2.4. Типовые нелинейные $E-H$ -звенья и каскадная схема замещения проводника круглого сечения в устройствах электроконтактного нагрева	52

2.4.1. Постановка задачи и алгоритм ее решения.....	52
2.4.2. Решение уравнения Гельмгольца и параметры схемы замещения на базе функций Бесселя	56
2.4.3. Решение уравнения Гельмгольца и параметры схемы замещения на базе функций Ганкеля.....	60
2.4.4. Параметры схемы замещения проводника круглого сечения на базе плоской развертки в декартовой системе координат	62
2.4.5. Каскадная схема замещения проводника круглого сечения и система уравнений Кирхгофа.....	64
2.4.6. Сравнительный анализ численного и аналитического расчетов поля	67
2.5. Типовое нелинейное $E-H$ -звено и каскадная схема замещения проводника круглого сечения в устройствах индукционного нагрева	71
2.5.1. Постановка задачи	71
2.5.2. Реализация алгоритма решения	72
2.5.3. Сравнительный анализ численного и аналитического расчетов поля	78
2.6. Исследование коэффициентов поверхностного эффекта при электроконтактном нагреве проводников круглого сечения.....	82
ГЛАВА 3. КАСКАДНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....	87
3.1. Типовое активное $E-H$ -звено на базе плоской развертки в декартовой системе координат.....	89
3.1.1. Постановка задачи	89
3.1.2. Типовое $E-H$ -звено при усреднении магнитных свойств дискретно-однородной полосы	93
3.1.3. Параметры $E-H$ -звена на базе кусочно-непрерывной собственной функции.....	97
3.2. Расчет электромагнитного поля системы постоянные магниты–немагнитная садка на базе плоской развертки.....	107
3.2.1. Каскадная схема.....	107

3.2.2. Численный расчет системы постоянные магниты– немагнитная садка	110
3.2.3. Сравнительный анализ аналитического и численного расчетов системы постоянные магниты–немагнитная садка.....	113
3.3. Каскадная $A-H$ -схема замещения системы постоянные магниты–садка на базе плоской развертки	116
3.3.1. Постановка задачи	116
3.3.2. Типовое активное $A-H$ -звено при усреднении магнитных свойств дискретно-однородной полосы	117
3.3.3. Параметры активного $A-H$ -звена на базе кусочно-непрерывной собственной функции	120
3.3.4. Каскадная схема.....	123
3.4. Цилиндрическая слоистая модель и каскадная $A-H$ -схема замещения системы постоянные магниты–садка	127
3.4.1. Постановка задачи	127
3.4.2. Параметры активного $A-H$ -звена на базе кусочно-непрерывной собственной функции	130
3.4.3. Параметры активного $A-H$ -звена при усреднении магнитных свойств дискретно-однородной подобласти паз–клиновидный магнит	136
3.4.4. Параметры $A-H$ -схемы замещения немагнитной садки	138
3.4.5. Каскадная схема.....	141
3.4.6. Сравнительный анализ аналитического и численного расчета системы постоянные магниты–немагнитная садка в цилиндрической системе координат.....	143
ГЛАВА 4. ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗА КАСКАДНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПРОВОДНИКАХ С ВНУТРЕННИМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ.....	147
4.1. Стационарное температурное поле в неограниченной пластине с внутренним тепловыделением.....	148
4.1.1. Постановка задачи и алгоритм ее решения.....	148
4.1.2. Реализация алгоритма решения	150

4.1.3. Сравнительный анализ численного и аналитического расчетов поля	157
4.2. Нестационарное температурное поле в неограниченной пластине с внутренним тепловыделением	159
4.2.1. Постановка задачи и ее решение.....	159
4.2.2. Расчет нестационарного температурного поля неограниченной пластины при граничных условиях третьего рода.....	163
4.3. Температурное поле в стержне круглого сечения с внутренним тепловыделением.....	171
4.3.1. Постановка задачи и ее решение.....	171
4.3.2. Сравнительный анализ численного и аналитического расчетов поля	181
4.4. Решение связанной электромагнитно-тепловой задачи для ферромагнитного проводника круглого сечения.....	186
Заключение	191
Библиографический список.....	193