

**На правах рукописи**

**ГАЙНЕТДИНОВ Тимур Айратович**

**ИНДУКТОРНО-ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ  
КОМПЛЕКС ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ  
ТЕРМООБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ  
(РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ)**

**Специальность:**

**05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа - 2010**

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре электромеханики

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Рогинская Любовь Эммануиловна**  
проф. кафедры электромеханики  
Уфимского государственного авиационного  
технического университета

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Шапиро Семен Валентинович**  
проф., зав. кафедрой физики  
Уфимской государственной академии  
экономики и сервиса

кандидат технических наук, доцент  
**Конесев Сергей Геннадьевич**  
доц. кафедры электротехники и  
электрооборудования предприятий  
Уфимского государственного нефтяного  
технического университета

Ведущая организация: ФГУП НКТБ «Вихрь»

Защита диссертации состоится 14 мая 2010 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу:  
450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «        » апреля 2010 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., проф.

Г.Н. Утляков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** темы диссертационного исследования. Индукционный нагрев приобретает все большее распространение благодаря ряду его неоспоримых преимуществ. Высокая концентрация и точная локализация энергии при нагреве обеспечивают короткий цикл, высокую производительность, улучшают показатели использования оборудования и материалов и снижают риск деформации при нагреве. Индукционный нагрев позволяет с легкостью осуществить точное автоматическое управление процессом. Он идеально согласуется с автоматизированным производством и не требует специальной подготовки персонала. Индукционный нагрев позволяет избежать сложного технического обслуживания. В силу самого принципа индукционного нагрева формирование тепла происходит внутри детали, вследствие чего процесс более эффективен по затратам энергии, чем другие методы, и количество рассеиваемой энергии исключительно низко.

Индукционные установки, созданные на базе полупроводниковых преобразователей частоты, стали необходимой составной частью крупных механизированных агрегатов, автоматических линий, целых цехов и заводов. Эксплуатация подтверждает их высокие технико-экономические показатели, которые получены за счет применения в качестве источников высокочастотного питания полупроводниковых преобразователей частоты. Главные преимущества полупроводниковых преобразователей заключены в малом расходе электроэнергии за счет повышенного КПД и высоких регулировочных свойствах с глубиной регулирования 1:20. Используя резонансные свойства нагрузочного колебательного контура и изменяя частоту управления полупроводниковых вентилях, возможно осуществлять плавное регулирование мощности в ходе всего технологического процесса без переключений в силовых цепях и без громоздких коммутирующих устройств. Принципы регулирования, заложенные в полупроводниковых преобразователях частоты, позволяют использовать микропроцессоры, которые открывают широкие возможности оптимального программного управления самыми сложными технологическими процессами.

Вопросам теории и практики индукционного нагрева, расчету и проектированию элементов индукционных установок посвящено большое количество работ таких ученых, как А.В. Слухоцкий, С.Е. Рыскин, В.С. Немков, С.В. Шапиро, В.В. Демидович, А.С. Васильев, Л.Э. Рогинская, А.А. Шуляк, а также ряда российских и иностранных предприятий, таких, как ВНИИТВЧ-ЭСТЭЛ (г. С.-Петербург), НКТЬ «Вихрь», НПП «Курай», НПО «Параллель» (г. Уфа), АBB, INDUCTONEAT (США). Однако, существует ряд актуальных вопросов, исследованных недостаточно, например:

исследование добавочной проводящей среды системы индуктор – добавочная проводящая среда – деталь, исследование электротеплового поля системы специальный индуктор – деталь, исследование вопросов согласования выходных параметров инвертора с параметрами нагрузочного контура.

Наиболее рационально такие вопросы решать при помощи современной компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения, которые позволяют достаточно быстро, точно и эффективно моделировать электромагнитные и тепловые процессы.

Таким образом, разработка и проектирование основных элементов установок индукционного нагрева являются актуальными задачами современной электротехнологии, особенно в связи с расширением областей их применения.

**Основание для выполнения работы.** Диссертационная работа выполнена в Уфимском государственном авиационном техническом университете по плану госбюджетных научно-исследовательских работ по теме «Расчет трансформаторно-индукторных комплексов».

**Целью диссертационной работы** является параметрический синтез индукторно-полупроводниковых компонентов электротехнологических установок.

Для реализации указанной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

1. Создание математической модели системы индуктор – добавочная проводящая среда – деталь.

2. Определение электротепловых параметров системы индуктор – нагреваемое тело для современных электротехнологических установок.

3. Согласование выходных параметров инвертора с параметрами нагрузочного контура с помощью высокочастотного трансформатора на основе информации, полученной в результате имитационного моделирования в среде MATLAB.

4. Выбор параметров и создание методики расчета одновентильных преобразователей частоты совместно с индукторно-трансформаторным модулем.

**Методы исследований.** В работе использованы основные положения теории электромагнитного и теплового полей. Поставленные задачи решены с помощью численно-аналитических (MATHEMATICA) и численных методов решения нелинейных уравнений (Delphi). Решение уравнений сложных электротехнических систем осуществлено на базе пакетов прикладных программ (MATLAB, ELCUT).

**На защиту выносятся:**

1. Математическая модель системы индуктор – добавочная проводящая среда – деталь.

2. Методика определения на базе программного пакета ELCUT электротепловых параметров системы индуктор – нагреваемое тело для современных электротехнологических установок.

3. Методика расчета и выбора наиболее рациональных параметров одновентильных инверторов, созданная на базе математического пакета MATHEMATICA.

4. Электромагнитные и геометрические соотношения трансформатора согласующего выходные параметры инвертора с параметрами нагрузки.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые предложена математическая модель системы индуктор – добавочная проводящая среда – деталь и определены ее основные параметры. Доказано, что напряженность магнитного поля на внешней и внутренней поверхностях добавочной проводящей среды одинакова, что позволяет рассматривать добавочную среду в качестве вторичной обмотки индуктора.

2. С помощью моделей трех типов современных электротехнологических установок определена связь между температурой и электромагнитными свойствами системы индуктор – нагреваемое тело.

3. Предложена имитационная модель полупроводникового преобразователя частоты, содержащего согласующие взаимоиндуктивные модули с магнитопроводом, которая позволяет исследовать динамические режимы в системе с полупроводниковыми и ферромагнитными нелинейными модулями.

4. Разработана методика проектирования одновентильных инверторов, которая позволяет выбрать параметры, при которых достигаются максимальные частота управления и мощность в нагрузке.

5. Разработана поверочная методика расчета высокочастотного трансформатора, которая в отличие от существующих методик объединяет тепловой, гидродинамический, гидравлический и электромагнитный расчеты.

#### **Практическую ценность имеют:**

1. Методика расчета электромагнитных параметров системы индуктор – добавочная проводящая среда – деталь, созданная на базе пакета MATHEMATICA.

2. Комплекс моделей современных электротехнологических установок в пакете ELCUT для определения электротепловых параметров системы индуктор – нагреваемое тело.

3. Модели инвертора в пакете MATLAB с согласующим трансформатором с различными видами емкостной компенсации.

4. Созданная на базе пакета MATHEMATICA методика расчета параметров одновентильных инверторов, нагруженных на индукторно-конденсаторный модуль.

5. Методика расчета согласующего высокочастотного трансформатора.

**Реализация результатов работы.** Материалы диссертационной работы внедрены в производственный процесс ООО «НПО Параллель» и в учебный процесс на кафедре электромеханики ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских, республиканских научно-технических конференциях «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий» (Уфа, 2007), «Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ 2007»» (Астрахань 2007), «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий» (Уфа, 2009).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 11 печатных работ, в том числе 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК РФ, получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения – 6 стр., четырех глав основного текста – 111 стр., заключения – 2 стр, списка литературы, включающего 104 наименования – 11 стр. и приложений – 17 стр.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы выбранного направления исследований, дана общая характеристика, сформулированы цель и задачи научной работы.

**В первой** главе рассмотрены традиционные и новые области применения индукционного нагрева. Указаны его специфика и преимущества перед другими видами термообработки. Приведены современные конструкции индукторов, отмечены особенности и принцип действия некоторых специальных видов индукторов. Дан обзор одновентильных схем инверторов, в том числе схемы одноключевого транзисторного инвертора, схемы одноячейкового несимметричного инвертора и схемы однотактных генераторов затухающих и незатухающих колебаний. Показаны диаграммы токов и напряжений для этих инверторов. Произведен анализ современных методов расчета и проектирования сложных электротехнологических систем, а также отмечены особенности их применения.

**Во второй** главе приведена область применения, конструкции и принцип работы индукторов с добавочными проводящими средами (рис. 1). Предложена математическая модель электромагнитных процессов индукторов с добавочными проводящими средами.

При создании математической модели для индукторов с добавочными проводящими средами приняты следующие допущения: поле двумерное; ток и

напряжение в системе синусоидальные; ширина прорези принята равной нулю; ширина концентратора намного меньше его длины.

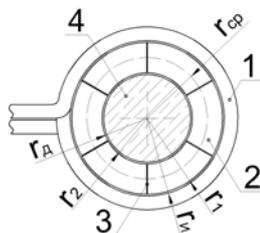


Рисунок 1 – Схема индуктора с добавочной проводящей средой  
1 – индуктор; 2 – добавочная проводящая среда; 3 – прорезь; 4 –  
нагреваемая деталь.

Решение уравнения Максвелла в цилиндрических координатах для напряженности магнитного поля

$$\frac{\partial^2 H_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_m}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_m}{\partial \varphi^2} - j\gamma\omega\mu H_m = 0 \quad (1)$$

Уравнение (1) проанализировано по методу разделения переменных, то есть  $H_m = \Phi(\varphi)R(r)$ . Найдены следующие решения

$$\frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} + k^2 \Phi = 0; \quad (2)$$

$$p_{1,2} = \pm jk; \quad (3)$$

$$\Phi = A_1 \cos k\varphi, \quad k = 1, 2, 3 \text{ (т.е. } k \neq 0); \quad (4)$$

$$\frac{d^2 R}{d(\sqrt{-jm})^2} + \frac{1}{\sqrt{-jm}} \frac{dR}{d(\sqrt{-jm})} - R \left[ 1 + \frac{k^2}{(\sqrt{-jm})^2} \right] = 0, \quad (5)$$

Относительный радиус

$$m = (r\sqrt{2}) / \Delta, \quad (6)$$

где  $r$  – радиус проводящей среды;

$\Delta$  – глубина проникновения тока.

В общем случае выражение для  $\bar{H}_m$  имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{H}_m = c_1 J_0(x) + c_2 N_0(x) + \sum_{k=1}^{\infty} [B_1 I_k(x) + B_2 K_k(x)] \cos kN\varphi \\ + \sum_{\frac{2k+1}{2}}^{\infty} \left[ B_3 I_{\frac{2k+1}{2}}(x) + B_4 K_{\frac{2k+1}{2}}(x) \right] \cos \left[ \frac{2k+1}{2} N\varphi \right] \end{aligned} \quad (7)$$

где  $c_1, c_2$  – постоянные, определяемые из граничных условий;

$J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка первого рода;

$N_0$  – функция Бесселя нулевого порядка второго рода;

$B_1 \div B_4$  – коэффициенты ряда Фурье;

$I_k, K_k$  – функции Бесселя половинного аргумента  $k$ -порядка

Принято  $x = \sqrt{-jm}$ .

При наличии прорезей суммарный ток через проводящую среду равен нулю

$$\int_S \bar{\delta} d\bar{s} = a \int \delta dr = 0. \quad (8)$$

Согласно (8) ток, понизывающий контур, определяемый силовой линией магнитного поля, проходящей внутри полого цилиндра, тот же, что и ток, понизывающий контур, определяемый силовой линией проходящей вне цилиндра. Поэтому при  $m = m_2 = \frac{(r_2 \sqrt{2})}{\Delta}$  напряженность магнитного поля та же, что и при  $m = m_1 = \frac{(r_1 \sqrt{2})}{\Delta}$ , то есть  $H_m = H_{me}$ .

Далее обозначено следующее

$$\begin{aligned} B_{1k} I_k(x_1) + B_{2k} K_k(x_1) &= D_{1k} \\ B_{1k} I_k(x_2) + B_{2k} K_k(x_2) &= D_{2k}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $x_1 = \sqrt{-jm_1}$ ,  $x_2 = \sqrt{-jm_2}$ .

Эти коэффициенты (9) равны соответственно

$$D_{1,2k} = \frac{H_{me}}{\pi N} \int_{-\pi/N}^{\pi/N} \cos kN\varphi, \quad (10)$$

Из (10) следует, что оба коэффициента  $D_{1,2k}$  равны нулю, откуда

$$\begin{aligned} B_{1k} I_k(x_1) + B_{2k} K_k(x_1) &= 0; \\ B_{1k} I_k(x_2) + B_{2k} K_k(x_2) &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Определитель этой системы не равен нулю и, следовательно,  $B_{1k} = 0$ ,  $B_{2k} = 0$ .

Для выяснения значений  $B_{3k}$  и  $B_{4k}$  вновь учтено, что напряженность  $H_m$  при любом угле  $\varphi$  постоянна, в том числе и при  $\varphi = \pm \frac{2k+1}{2} N\pi$ . При  $N$ ,

равном нечетному числу,  $\varphi \approx \pi/2$  и сумма  $\sum_{\frac{2k+1}{2}}^{\infty}$  равняется нулю. Если  $N$  –

четное число, данная сумма является частным случаем предыдущей, поэтому коэффициенты  $B_{3k}$  и  $B_{4k}$  равны нулю. Таким образом, напряженность магнитного поля равна

$$H_m = c_1 J_0(x) + c_2 N_0(x), \quad (12)$$

Для определения постоянных  $c_1$  и  $c_2$  необходимо еще одно уравнение

$$-\frac{\partial \bar{H}_z}{\partial r} = \gamma \bar{E}_m = \bar{\delta}_m; \quad (13)$$

Плотность тока по сечению заготовки равна

$$\delta_m = \frac{\sqrt{-2j}}{\Delta} [c_1 J_1(x) + c_2 N_1(x)] \quad (14)$$

Уравнений (12), (14) достаточно для определения параметров системы индуктор – деталь.

При расчете индукторов с добавочной проводящей средой постоянные  $c_1$  и  $c_2$  определяются из следующей системы уравнений

$$\begin{cases} H_{me} = c_1 J_0(m_2 \sqrt{-j}) + c_2 N_0(m_2 \sqrt{-j}) \\ H_{me} = c_1 J_0(m_1 \sqrt{-j}) + c_2 N_0(m_1 \sqrt{-j}) \end{cases}, \quad (15)$$

За базовую величину напряженности магнитного поля принята  $H_{me}$ . В относительных единицах (15) имеет вид

$$\begin{cases} 1 = c'_1 J_0(m_2 \sqrt{-j}) + c'_2 N_0(m_2 \sqrt{-j}) \\ 1 = c'_1 J_0(m_1 \sqrt{-j}) + c'_2 N_0(m_1 \sqrt{-j}) \end{cases} \quad (16)$$

Данная система уравнений решена для частного случая значений относительного радиуса  $m_1$  и  $m_2$ . В результате решения получены постоянные  $c'_1$  и  $c'_2$ .

Тогда относительное значение напряженности магнитного поля

$$H'_m = c'_1 J_0(m \sqrt{-j}) + c'_2 N_0(m \sqrt{-j}) \quad (17)$$

Относительное значение плотности тока

$$\delta'_m = \frac{dH'_m}{dm} \quad (18)$$

Уравнения (17) и (18) решены с помощью пакета МАТНЕМАТИСА на интервале  $m_1 \leq m \leq m_2$  для заданных значений  $m_{1,2}$  (рис. 2)

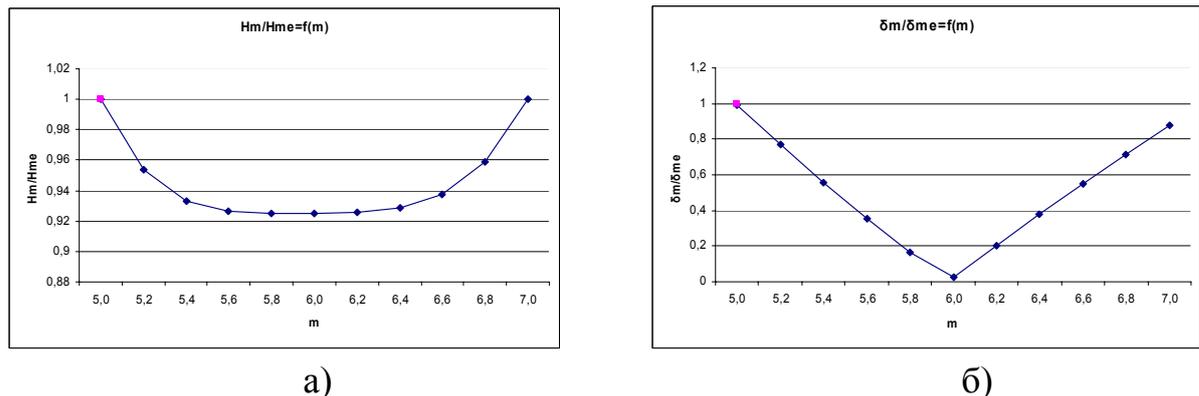


Рисунок 2 - Графики изменения модуля относительных значений по толщине проводящей среды: а) напряженности магнитного поля; б) плотности тока.

В результате расчетов получена картина распределения параметров магнитного поля по радиусу системы индуктор – добавочная проводящая среда – деталь (рис. 3)

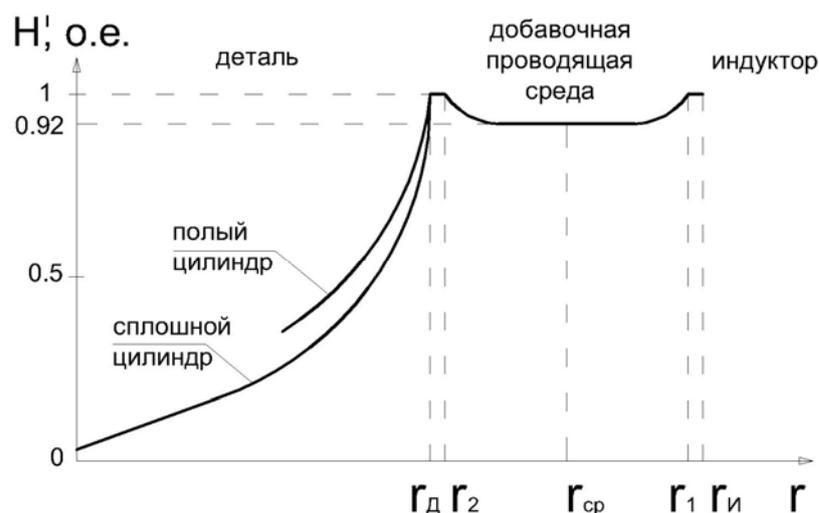


Рисунок 3 – Картина распределения относительного значения напряженности магнитного поля по радиусу системы индуктор – добавочная проводящая среда – деталь ( $r_D$  – наружный радиус детали;  $r_{1,2}$  – наружный (внутренний) радиус добавочной проводящей среды;  $r_{ср}$  – средний радиус добавочной проводящей среды;  $r_{и}$  – внутренний радиус индуктора)

Зная плотность тока и напряженность магнитного поля в проводящей среде, по известным формулам определяются поток, напряжение и ток.

Так как напряженность магнитного поля на наружной и внутренней поверхностях проводящей среды одинакова, то дальнейший расчет нагрева сплошного и полого цилиндра производится так же, как и при отсутствии добавочной среды.

**В третьей** главе с помощью пакетов прикладных программ произведено исследование электромагнитных и тепловых режимов индукторно-трансформаторных модулей для современной электротехнологии.

Были рассмотрены три индуктора: индуктор для косвенного индукционного нагрева кварца в нагреваемом тигле (рис. 4); индуктор с магнитопроводом для напайки алмазных сегментов к зубьям отрезных кругов (рис. 9) и индуктор для поверхностной закалки шеек валов (рис. 14).

С помощью программы ELCUT были определены и связаны задачи определения вихревых токов и теплопередачи, построена геометрия установки и сетка конечных элементов (рис. 5). Решением стали картины электромагнитного и теплового полей системы индуктор-деталь (рис. 6, 7, 10, 11, 13, 15), а также графики изменения исследуемых электротепловых параметров от геометрии установки (рис. 8, 12, 16, 17, 18, 19). Разработанные модели позволяют выбрать необходимый режим нагрева заготовки, определить связь между температурой и электромагнитными свойствами системы индуктор – нагреваемое тело, а также усовершенствовать конструкции исследуемых установок.

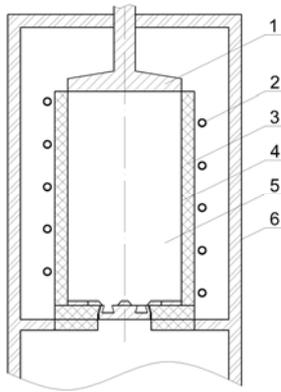


Рисунок 4 – Схема установки для косвенного индукционного нагрева кварца. 1 – поршень; 2 – индуктор; 3 – графитовый тигель; 4 – слой молибдена; 5 – кварц; 6 – камера.

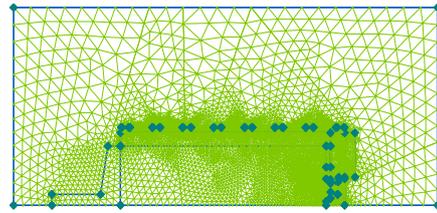


Рисунок 5 – Сетка конечных элементов

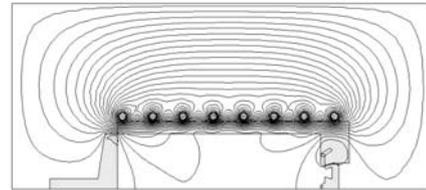


Рисунок 6 – Картина электромагнитного поля

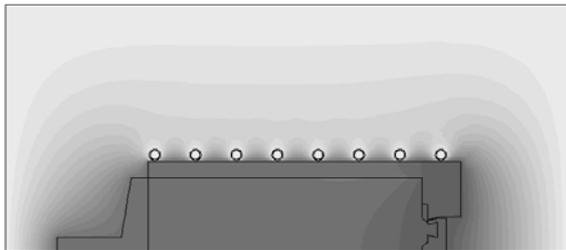


Рисунок 7 – Картина теплового поля

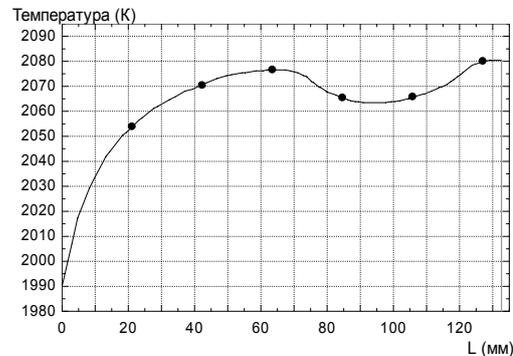


Рисунок 8 – Изменение температуры нагрева в нижней части кварца

Как можно увидеть из рис. 8, температура нагрева кварца не является однородной и зависит от геометрии и свойств материалов. Перепад температуры по радиусу равен  $90^{\circ}\text{C}$ . Необходимая температура нагрева  $1800^{\circ}\text{C}$  ( $2073\text{ K}$ ) с допустимой погрешностью, при заданной конструкции и параметрах индуктора достигается на промежутке 20 мм.

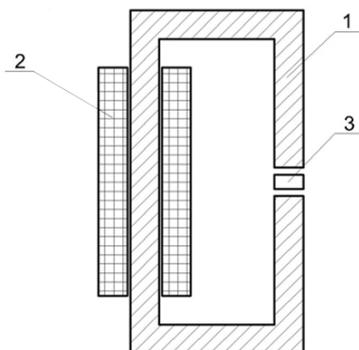


Рисунок 9 – Схема индуктора с магнитопроводом: 1 – магнитопровод; 2 – индуктор; 3 – нагреваемая деталь

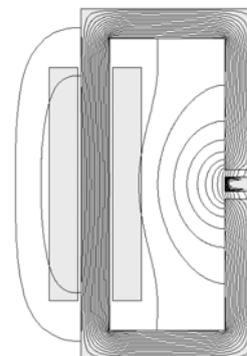


Рисунок 10 – Картина электромагнитного поля



Рисунок 11 – Картина распределения плотности тока в детали



Рисунок 13 – Картина распределения температуры нагрева детали

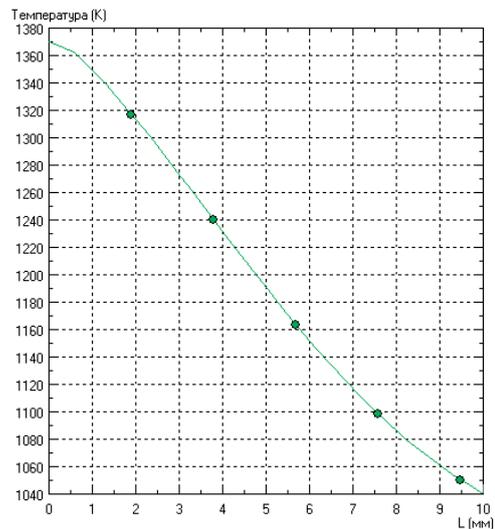


Рисунок 12 – Изменение температуры нагрева по ширине детали

Как видно из рис. 11-13 наибольшая концентрация поля, плотность тока и интенсивный нагрев происходят на внутренней стороне детали.

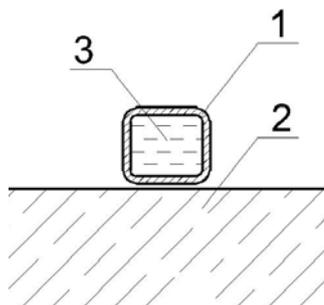


Рисунок 14 – Схема одновиткового индуктора

1 – индуктор; 2 – нагреваемая деталь;  
3 – охлаждающая вода.

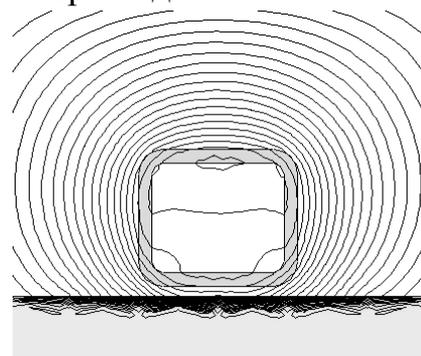


Рисунок 15 – Картина электромагнитного поля

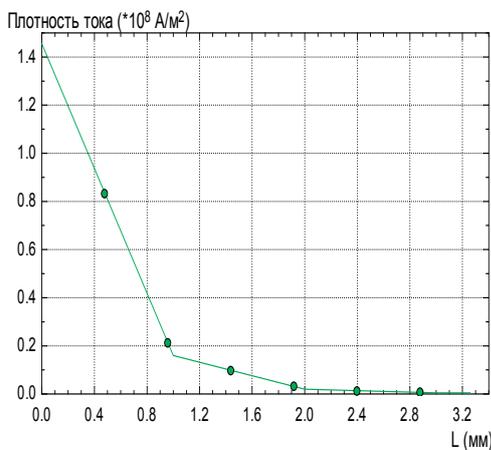


Рисунок 16 – Изменение плотности тока по радиусу нагреваемой детали

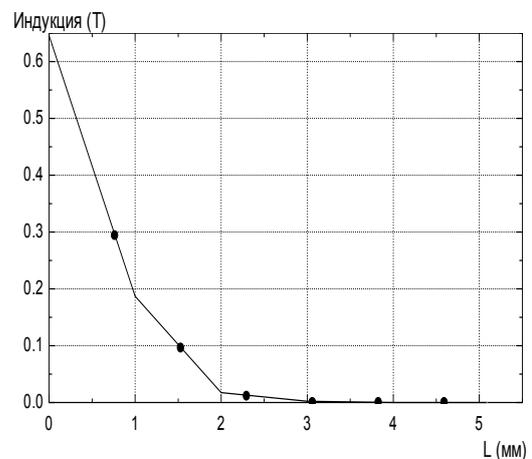


Рисунок 17 – Изменение индукции магнитного поля по радиусу нагреваемой детали

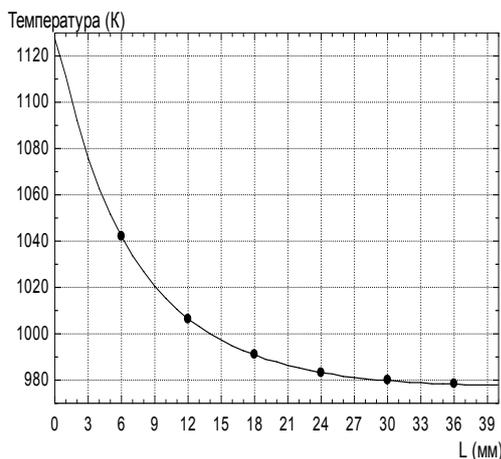


Рисунок 18 – Изменение температуры нагрева по радиусу нагреваемой детали

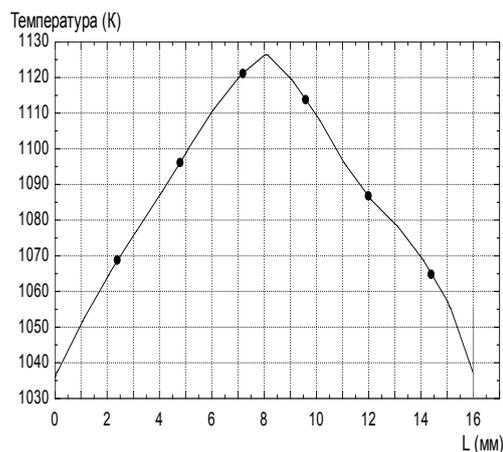


Рисунок 19 – Изменение температуры по ширине нагреваемого участка

Как видно из рис. 16-19 при проектировании коротких индукторов необходимо учитывать изменение электротеплового поля не только по радиусу, но и по ширине нагреваемой заготовки.

**В четвертой** главе произведено исследование следующих комплексов: полупроводниковый инвертор, согласующий трансформатор, индукторно-конденсаторный модуль. Структура данных комплексов считается известной. Задачей исследования является параметрический синтез взаимоиндуктивных модулей, включая согласующий трансформатор.

Для решения задачи согласования выходных параметров инвертора с параметрами нагрузочного контура с помощью высокочастотного трансформатора были разработаны имитационные модели одноячейкового несимметричного инвертора в пакете MATLAB с различными видами емкостной компенсации (рис 20, 21). Были исследованы особенности включения блока трансформатора (linear transformer) в имитационную модель, что приводит к изменениям и в схеме, и в расчете параметров нагрузочного контура. С учетом этого были рассчитаны основные параметры блока трансформатора. Для уточнения параметров модели была разработана проверочная методика расчета согласующего высокочастотного трансформатора.

На рис. 20 изображена имитационная модель одноячейкового несимметричного инвертора с трансформатором и параллельным резонансным контуром, разработанная в среде MATLAB. В представленной схеме нагрузкой служит индуктор для поверхностной заковки изделий, что определяет низкое выходное напряжение. На основании этого емкость нагрузочного контура при параллельной компенсации включается на первичную обмотку трансформатора, а трансформатор рассчитывается на полную мощность.

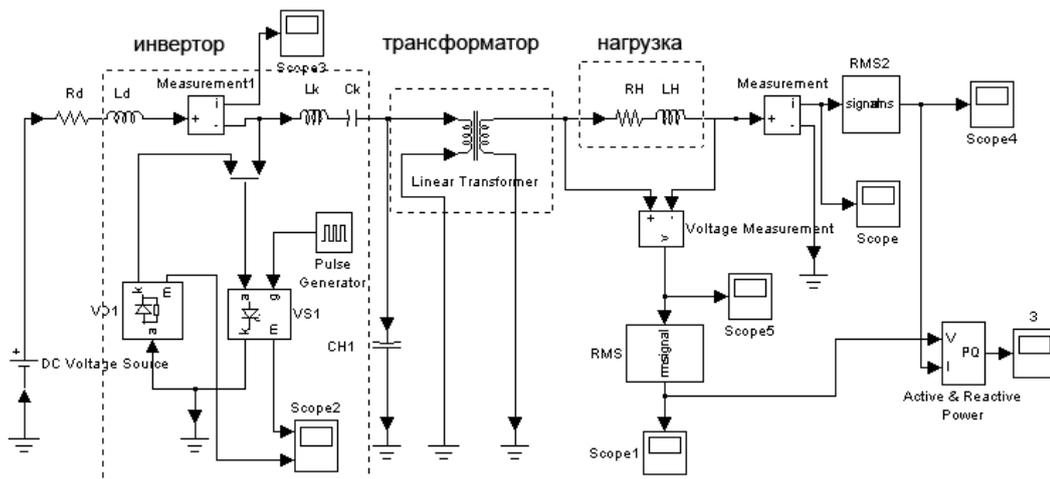


Рисунок 20 – Модель однофазного несимметричного инвертора с трансформатором и параллельным резонансным контуром.

Для уменьшения расчетной мощности трансформатора нужно использовать резонанс напряжений, а именно схему с последовательным резонансным контуром во вторичной цепи (рис. 21). При этом напряжение на конденсаторе будет значительно выше выходного напряжения трансформатора.

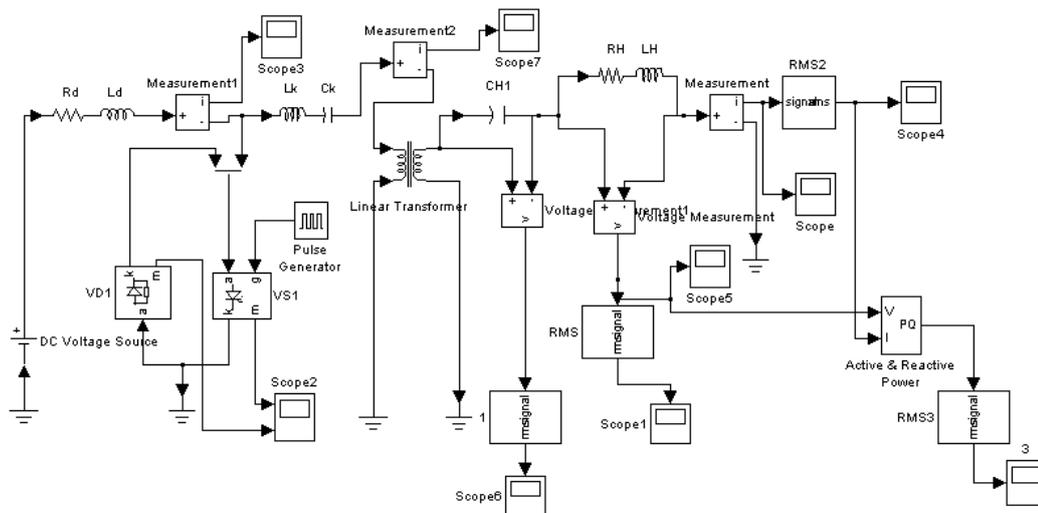


Рисунок 21 – Модель однофазного несимметричного инвертора с трансформатором и последовательным резонансным контуром во вторичной цепи.

В последнее время все больше внимания уделяется простым схемам силовой части установок, в том числе одноключевым схемам, имеющим наиболее простую структуру, высокую надежность и низкую стоимость. Одной из таких схем является схема одноключевого параллельного транзисторного инвертора (рис. 22), для которой была разработана методика выбора наиболее рациональных параметров и автоматизированного расчета, созданная на базе пакета MATHEMATICA.

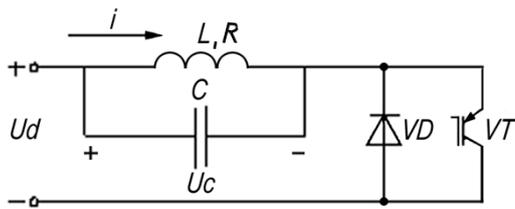


Рисунок 22 – Схема параллельного одноключевого транзисторного инвертора

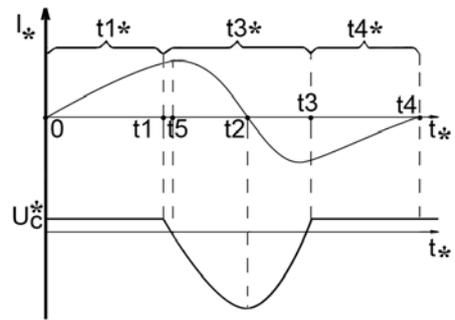


Рисунок 23 – Зависимость тока нагрузки и напряжения на конденсаторе от времени

В результате расчетов в относительных единицах получены зависимости параметров данного инвертора (рис. 23-27) от длительности работы резонансного контура  $t_3^*$ .

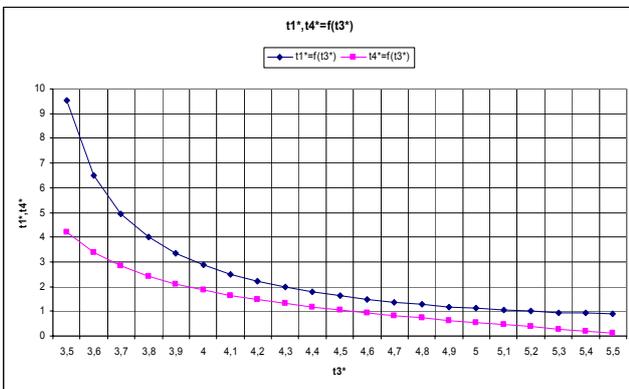


Рисунок 24 – Зависимость  $t_1^*$ ,  $t_4^*$  от  $t_3^*$

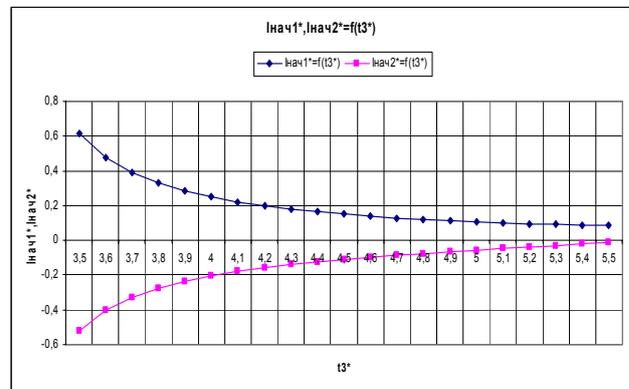


Рисунок 25 – Зависимость  $i_{нач1}$ ,  $i_{нач2}$  от  $t_3$

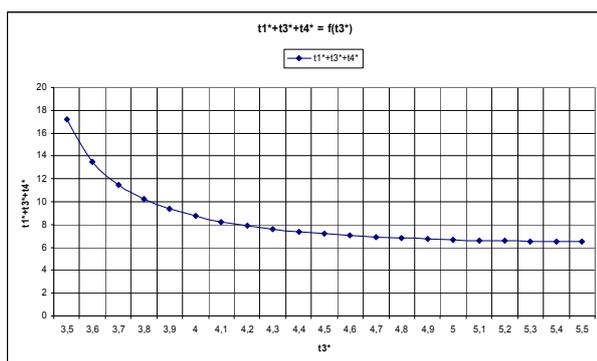


Рисунок 26 – Зависимость суммы  $t_1^*+t_2^*+t_3^*$  от  $t_3^*$

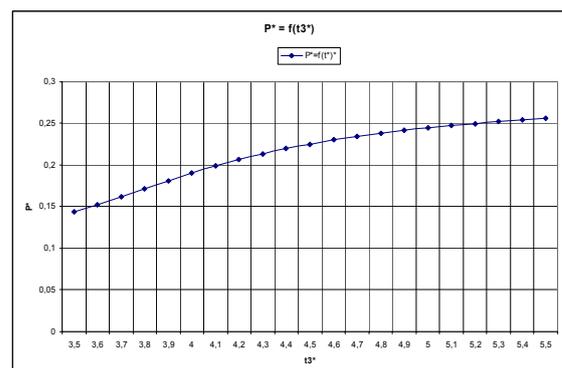


Рисунок 27 – Зависимость относительного значения мощности в нагрузке от  $t_3^*$ .

Полученные зависимости позволяют проанализировать, как значение времени  $t_3^*$ , при котором происходит отпирание обратного диода VD, влияет на время запаривания  $t_1^*$  и отпирания  $t_4^*$  транзистора VT (рис. 24), на значения

начальных токов  $I_{\text{нач1}*}$ ,  $I_{\text{нач2}*}$  (рис. 25), на длительность работы резонансного контура (рис. 26) и на значение мощности в нагрузке (рис. 27).

В приложениях приведены исходные данные для исследуемых электротехнологических установок в пакете ELCUT; расчет параметров разработанных имитационных моделей в пакете MATLAB; методика расчета высокочастотного согласующего трансформатора.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате расчета электромагнитных параметров системы индуктор – добавочная проводящая среда – деталь для заданных значений относительных радиусов ( $m_{1,2}$ ) установлено, что:

- наличие промежуточной проводящей среды с прорезями позволяет сохранить постоянство значения напряженности магнитного поля на ее внешней и внутренней поверхностях;

- напряженность магнитного поля снижается по сечению проводящей среды не более чем на 8% ( $H'_m = 0,92$ );

- электромагнитные процессы в индукторе-трансформаторе, индукторе с водоохлаждаемым металлическим тиглем и в ряде других специальных индукторах аналогичны, что позволяет рассчитывать их предложенным методом.

2. Из анализа электротепловых полей индукторно-трансформаторных модулей для современной электротехнологии получены:

- необходимые параметры источника питания и системы индуктор-деталь, необходимые для получения заданных характеристик косвенного индукционного нагрева диэлектрика в графитовом тигле;

- неравномерное распределение электромагнитных параметров по сечению плоской детали, а именно интенсивный нагрев происходит на внутренней поверхности детали;

- неравномерное распределение электротепловых параметров по радиусу и ширине нагреваемой заготовки в коротких (одновитковых) индукторах. При этом в зависимости от режима нагрева колебания электротепловых параметров могут составлять от 5 до 20 %.

3. В результате исследования вопросов согласования выходных параметров инвертора с параметрами нагрузочного установлено, что:

- учет реальных параметров согласующих трансформаторов, а именно главной индуктивности и индуктивности рассеяния позволяет на этапе проектирования уточнить емкость компенсирующего конденсатора;

- при использовании понижающих трансформаторов для повышения их энергетических показателей рационально применять последовательный колебательный контур на вторичной стороне.

4. Из параметрического синтеза одноключевого параллельного транзисторного инвертора получено, что максимальные частота управления и мощность в нагрузке имеют место при следующих параметрах в относительных единицах:  $2,9 \geq t_{1*} \geq 1,1$ ;  $5 \geq t_{3*} \geq 4$ ;  $1,9 \geq t_{4*} \geq 0,5$ ;  $0,24 \geq P_* \geq 0,2$ .

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В рецензируемом журнале из списка ВАК:

1. Особенности работы резонансных преобразователей частоты на нелинейный индукторно-конденсаторный контур / Рогинская Л.Э., Исмагилов Р.Р., Гайнетдинов Т.А. // Вестник УГАТУ: Научн. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2008. Т.10, №1 (26). С. 142–150.

### В других изданиях:

2. Выбор рациональных параметров взаимоиндуктивных модулей при проектировании электротехнологических установок / Гайнетдинов Т.А., Гуляев Е.Н. // Известия: Межвуз. научный сб. – Москва – Н.Новгород, 2005. – С. 135–138.

3. Выбор параметров модулей при проектировании электротехнологических установок / Рогинская Л.Э., Гайнетдинов Т.А., Гуляев Е.Н. // Электротехнологические системы и комплексы: Межвуз. сб. научных трудов №11. – Магнитогорск, 2005. – С. 123–130.

4. Особенности расчета высокочастотных трансформаторов для электротехнологии / Гайнетдинов Т.А., Гуляев Е.Н., Рахманова Ю.В. // Электротехнические комплексы и системы: Межвуз. научный сб. – Уфа: УГАТУ, 2007. – С. 252–255.

5. Высокочастотные транзисторные резонансные преобразователи частоты для электротехнологических комплексов / Гайнетдинов Т.А., Неугодников Е.В. // Электротехнические комплексы и системы: Межвуз. научный сб. – Уфа: УГАТУ, 2007. – С. 99–102.

6. Одновентильные инверторы для индукционного нагрева / Гайнетдинов Т.А., Неугодников Е.В. // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ-2007»: Всероссийская научная конференция – Астрахань, 2007. – С. 52–54.

7. Применение машинного моделирования для построения двумерного электротеплового поля системы индуктор – деталь / Гайнетдинов Т.А. // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Всероссийская научно-техническая конференция УГНТУ: Сб. научных трудов. – Уфа, 2007. – С. 146–149.

8. Параметры индукторно-трансформаторного модуля для поверхностной закалки / Гайнетдинов Т.А., Неугодников Е.В. // Электромеханика,

электротехнические комплексы и системы: Межвуз. научный сб. – Уфа: УГАТУ, 2008. – С. 167–171.

9. Программа расчета динамических режимов работы системы резонансный инвертор с удвоением частоты – индукторно-конденсаторный модуль / Рогинская Л.Э., Исмагилов Р.Р., Гайнетдинов Т.А. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009610100 от 18.12.2008

10. Особенности работы полупроводниковых преобразователей, нагруженных на последовательный колебательный контур / Рогинская Л.Э., Гайнетдинов Т.А., Листова Н.В. // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Материалы 2-ой всероссийской научно-технической конференции: Сб. научных трудов. – Уфа: УГНТУ, 2009. – С. 9–13.

11. Программа расчета режимов работы частотно-регулируемого полупроводникового комплекса для индукционного нагрева на базе простого одноячейкового несимметричного инвертора с трансформаторным выходом/ Рогинская Л.Э., Исмагилов Р.Р., Гайнетдинов Т.А. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009610101 от 11.01.2009

Диссертант

Гайнетдинов Т.А.

ГАЙНЕТДИНОВ Тимур Айратович

ИНДУКТОРНО-ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ  
КОМПЛЕКС ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ  
ТЕРМООБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ  
(РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ)

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 07.04.2010. Формат 60× 84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.  
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр. – отт. 1,0. Уч. – изд. л. 0,9  
Тираж 100 экз. Заказ № 175

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный  
технический университет  
Центр оперативной полиграфии  
450000, Уфа – центр, ул. К. Маркса,12