

На правах рукописи



ГОРБУНОВ Антон Сергеевич

**ТРАНСФОРМАТОРНО-ИНДУКТОРНЫЕ МОДУЛИ
ДЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ С ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ**

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

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

Уфа – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (ФГБОУ ВПО «УГАТУ») на кафедре электромеханики

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Рогинская Любовь Эммануиловна

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Данилушкин Александр Иванович
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный
технический университет»
профессор кафедры электроснабжения
промышленных предприятий

Кандидат технических наук, доцент
Конесев Сергей Геннадьевич
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»
доцент кафедры электротехники
и электрооборудования предприятий

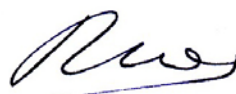
Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет»
(национальный исследовательский
университет), г. Челябинск

Защита диссертации состоится 18 июня 2015 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 на базе ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан « 12 » мая 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



А. В. Месропян

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В настоящее время в промышленности применяются различные электротехнологические процессы, включающие индукционный нагрев, так как такой вид нагрева обладает значительными преимуществами перед другими видами.

Несмотря на большое количество различных электротехнологических установок с индукционным нагревом и широкое разнообразие модулей, входящих в их состав, таких как выпрямители, инверторы, индукторные модули, включающие промежуточную проводящую среду, высокочастотные согласующие трансформаторы, применяющиеся устройства имеют низкие технико-экономические показатели, большие габаритные размеры, их работа недостаточно эффективная. Применяемые в электротехнологических установках с индукционным нагревом полупроводниковые инверторы в основном строятся на базе схем с большим количеством вентиляей, а также большим количеством резонансных контуров. Это усложняет схему устройств и увеличивает габаритные размеры. Для решения задач совершенствования инверторного модуля, упрощения схемы, необходимо исследовать современные одноключевые транзисторные инверторы с различными схемами резонансного контура, так как современная элементная база позволяет с помощью таких инверторов эффективно осуществлять электротехнологические процессы при минимальном количестве вентиляей.

В применяемых комплексных электротехнологических установках с индукционным нагревом деталей через промежуточную проводящую среду эффективность электротехнологического процесса низкая, вследствие того, что промежуточная среда в большинстве случаев не является прозрачной для электромагнитного поля, то есть поле, проходящее через добавочную среду, затухает. Для повышения эффективности таких установок необходимо определять степень затухания поля в проводящей среде и зависимость затухания от параметров проводящей среды и на основании полученных данных соответствующим образом выбирать параметры добавочной среды, а в ряде случаев необходимо выполнение прорезей в промежуточной среде.

Эффективность работы установки зависит от способа компенсации реактивной мощности. В большинстве случаев наиболее эффективной является последовательная компенсация, характеризующаяся минимальным количеством резонансных контуров и простотой схемы. Однако данный способ практически не применяется ввиду больших величин напряжений на элементах преобразователя.

Используемые для согласования нестандартных выходных напряжений источника питания согласующие высокочастотные трансформаторы имеют низкие технико-экономические показатели и большие габариты. Для увеличения эффективности установок и расширения области применения последовательной компенсации необходимо применять согласующие трансформаторы с новыми магнитными материалами – аморфными или нанокристаллическими сплавами, имеющие высокие технико-экономические показатели, высокий КПД, малые потери, по сравнению с используемыми трансформаторами.

В связи с увеличением мощности электротехнологических установок, включающих полупроводниковые преобразователи электроэнергии, возникает проблема обеспечения электромагнитной совместимости этих преобразователей с сетью и нагрузкой. Повышение электромагнитной совместимости и эффективности электротехнологических установок можно достичь, применяя фазопреобразующие трансформаторы для питания управляемых выпрямительных модулей.

Степень разработанности темы исследования.

Значительный вклад в развитие теории и практики комплексных электротехнологических процессов с индукционным нагревом внесли такие ученые, как А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, В.И. Руднев, А.Б. Кувалдин, В.П. Вологдин, С.В. Шапиро, В.Б. Демидович, А.С. Васильев, Л.Э. Рогинская, в том числе ряд известных российских и иностранных предприятий, таких как ВНИИТВЧ-Эстел (г. Санкт-Петербург), НКТБ «Вихрь», ABB (Германия), *Inductoheat*, *Inductotherm* (США), *Seit Elettronica* (Италия) и др.

Цель и задачи. Целью работы является разработка новых высокоэффективных источников питания для электротехнологических установок с индукционным нагревом. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработка структуры, создание математической модели и параметрический синтез новых источников питания для электротехнологических установок с индукционным нагревом на базе применения одноключевых транзисторных инверторов с последовательной компенсацией реактивной мощности индуктора.

2. Создание имитационных моделей источников питания электротехнологических установок с применением новых высокочастотных согласующих трансформаторов и многофазных выпрямительных модулей. Исследование электромагнитных процессов в установках с помощью разработанных моделей.

3. Разработка математических моделей и оригинальных конструкций индукторов комплексных электротехнологических установок с промежуточными проводящими средами с прорезями или без. Исследование электромагнитных процессов в этих устройствах с помощью разработанных моделей.

4. Совершенствование методики расчета новых согласующих высокочастотных трансформаторов с применением аморфных или нанокристаллических сплавов, а также совершенствование методики расчета индукторов комплексных электротехнологических установок с промежуточными проводящими средами; экспериментальное подтверждение разработанных математических и имитационных моделей.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель новых источников питания электротехнологических установок с индукционным нагревом на базе применения одноключевых транзисторных инверторов с последовательной компенсацией реактивной мощности индуктора.

2. Созданы имитационные модели различных схем источников питания для индукционного нагрева с применением новых согласующих высокочастотных трансформаторов на базе магнитопроводов из аморфных или нанокристаллических сплавов.

3. Разработаны математические модели комплексных электротехнологических установок с индукционным нагревом, включающих индукторы с промежуточными проводящими средами; на основании данных моделей определены характеристики электромагнитного поля: напряженность магнитного и электрического полей, плотность тока, что позволяет определять целесообразность данного нагрева для осуществления термообработки деталей.

4. Создана имитационная модель источников питания с многофазными трансформаторами и управляемыми выпрямителями, с разработкой оригинальной системы управления данными преобразователями для улучшения электромагнитной совместимости полупроводниковых инверторов с сетью и нагрузкой.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработана структура источников питания для комплексных электротехнологических установок, включающих индукционный нагрев, имеющих более высокие энергетические показатели и обеспечивающих энергосбережение.

2. Получены результаты параметрического синтеза новых источников питания для электротехнологических установок с индукционным нагревом

на базе применения одноключевых транзисторных инверторов с последовательной компенсацией. Они позволяют определить области рациональных параметров элементов, обеспечивающих устойчивую работу инверторов.

3. С помощью полученных математических моделей комплексных электротехнологических установок с индукционным нагревом, включающих индукторы с промежуточными проводящими средами на промышленной и повышенной частотах, определены параметры, обеспечивающие максимально возможное значение напряженности электромагнитного поля.

4. Усовершенствованные методики расчетов согласующих высокочастотных трансформаторов и индукторов с промежуточными проводящими средами позволяют производить полный расчет новых устройств.

Практическая ценность результатов работы подтверждается актом внедрения результатов диссертационной работы в производственный процесс НПП «Курай».

Методология и методы исследования. Для достижения заявленной цели и решения поставленных задач были использованы основные положения теории электромагнитного поля, методы аналитического расчета электромагнитного поля, аналитические методы с численным решением уравнений Бесселя для расчета электромагнитного поля в пакете *Mathematica*, методы имитационного моделирования в пакете *Matlab*, *Mathcad*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные структуры и математическая модель одноключевых источников питания с последовательными резонансными контурами и результаты определения области рациональных параметров элементов установки на их основе.

2. Имитационные модели различных схем разработанных источников питания с согласующими высокочастотными трансформаторами на базе магнитопроводов из аморфных или нанокристаллических сплавов, с последовательными резонансными контурами и результаты исследования электромагнитных процессов в этих трансформаторах при совместной работе с полупроводниковыми преобразователями.

3. Математические модели комплексных электротехнологических установок с индукционным нагревом, включающих индукторы с промежуточными проводящими средами.

4. Усовершенствованная методика расчета индукторов комплексных электротехнологических установок, обеспечивающих эффективный нагрев деталей внутри реторты. Усовершенствованная методика расчета новых согласующих

высокочастотных трансформаторов с применением магнитопроводов из аморфных или нанокристаллических сплавов.

5. Имитационная модель управляемого выпрямительного модуля с многофазным согласующим трансформатором для улучшения электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей частоты с сетью и нагрузкой и результаты исследования электромагнитных процессов в данных модулях.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обусловлена адекватностью используемых математических моделей, методов компьютерного моделирования, подтверждаемых экспериментальными данными.

Результаты научной работы докладывались и обсуждались на Международных семинарах «Физико-математическое моделирование систем» (Воронеж, 2010 – 2014г.); Международной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2011 – 2014г.); на научно-теоретической конференции «Неделя науки» (Уфа), (III место в 2010г. и II место в 2011г.); на Всероссийской конференции "Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения" (II место, Уфа, 2010г.); на конкурсе программ для ЭВМ, созданных при дипломном проектировании, (I место, Уфа, 2011г.); на VIII Всероссийском конкурсе ВКР направления «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», с присуждением диплома за лучшую выпускную квалификационную работу в номинации «Исследовательская работа» (Томск, 2011г.).

Диссертация отражает результаты исследований, выполненных в рамках работы по теме «Разработка комплексной электротехнологической установки для индукционного нагрева и одновременного нанесения защитных покрытий на детали», являющейся победителем конкурса на получение стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2013–2015 годы, № гранта: СП-2895.2013.1, а также работы по теме «Силовые электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами», награжденной дипломом о выделении гранта Президента Республики Башкортостан в 2014 г. по итогам конкурса научных работ молодых ученых и молодежных коллективов.

Диссертационная работа выполнена на основании задания № 2014/240 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в 2014–2016 г. в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России. Тема НИР: «Исследование электрических и магнитных полей и газоразрядных процессов

в сложных гетерогенных средах перспективных электротехнических комплексов и систем».

Публикации.

Список публикаций по теме диссертации включает 42 научных труда, в том числе 31 статья, из них 4 входящие в перечень ВАК, 3 патента РФ на полезные модели, 4 свидетельства на программы для ЭВМ, 33 материала конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 142 наименования и 9 приложений. Общий объем диссертации составляет 188 страниц.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, изложены цели и задачи диссертационной работы, методы решения поставленных задач. Описаны состав и структура работы, показана научная новизна и практическая ценность, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы произведен сравнительный анализ применяемых электротехнологических установок с индукционным нагревом, их основных модулей, магнитных материалов и способов компенсации реактивной мощности индукторов, рассмотрены их преимущества и недостатки. Приведен обзор современных полупроводниковых инверторов. Установлено, что применение современных материалов – аморфных или нанокристаллических сплавов позволяет значительно повысить технико-экономические показатели согласующих трансформаторов и электротехнологических установок. Выяснено, что для достижения поставленной цели могут быть усовершенствованы основные модули, входящие в состав установки с индукционным нагревом. Результатом проведенного анализа явилось формирование цели и задач исследования.

Во второй главе разработана математическая и имитационные модели, описывающие электромагнитные процессы в современных одноключевых и мостовых резонансных инверторах. На рисунке 1, а приведена схема одноключевого транзисторного инвертора, на рисунке 1 б, в представлены схемы предлагаемых источников питания (инверторов) для индукционных установок с последовательной компенсацией с новыми согласующими трансформаторами. На рисунке 1, г, д представлены имитационные модели инверторов тока.

В одноключевом инверторе электромагнитные процессы можно исследовать с помощью дифференциальных уравнений второго порядка, а основные зависимости можно получить аналитическим путем. Постоянные интегрирования определяются из граничных условий.

Уравнение напряжения на конденсаторе:

$$u_C = U_d - U_d \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \cos(\omega \cdot t) + e^{-\delta \cdot t} \cdot \left(-\frac{U_d \cdot \delta}{\omega} + \frac{I_{\text{нач}}}{\omega \cdot C} \right) \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

где U_d – напряжение на выпрямителе, В; δ – коэффициент затухания; $I_{\text{нач}}$ – ток инвертора в момент отпирания транзистора, А; C – емкость конденсатора, Ф.

Уравнение для тока инвертора:

$$i = e^{-\delta \cdot t} \cdot \left(\frac{U_d}{\omega \cdot L} - \frac{I_{\text{нач}} \cdot \delta}{\omega} \right) \cdot \sin(\omega \cdot t) + I_{\text{нач}} \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (2)$$

где L – индуктивность индуктора, Гн.

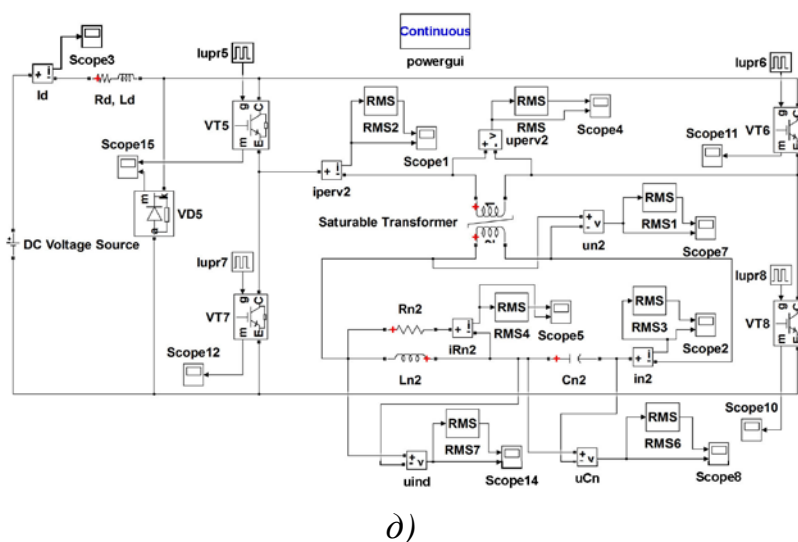
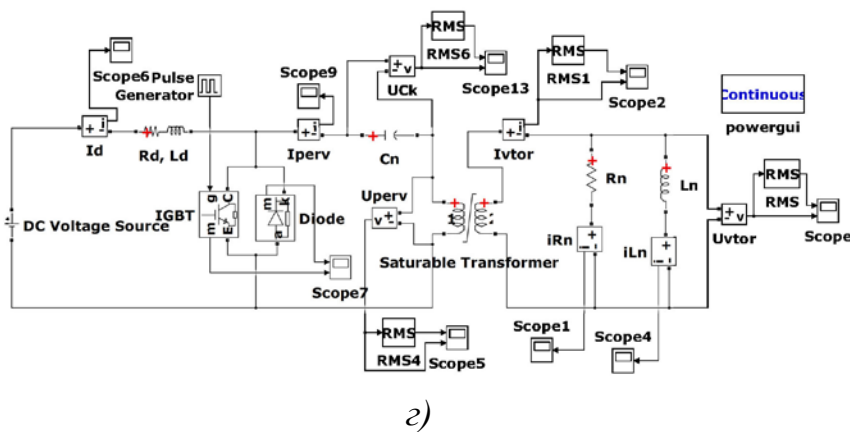
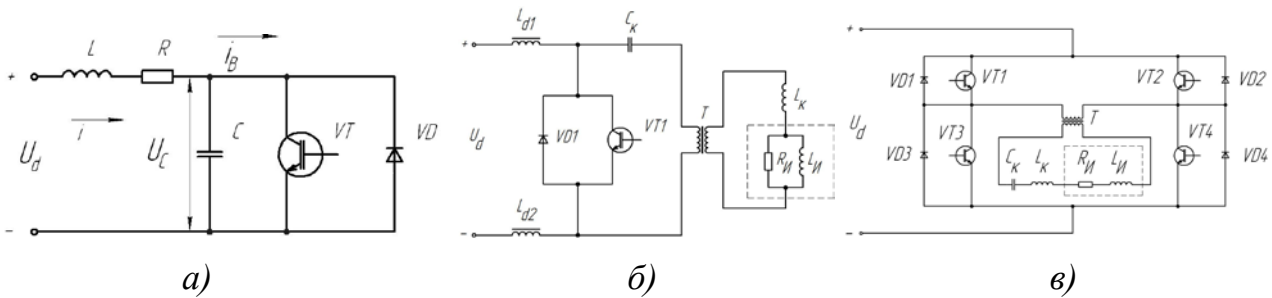


Рисунок 1 – Транзисторные инверторы:

а – одноключевая схема; *б* – одноячейковая схема; *в* – схема инвертора напряжения;
г – модель одноячейкового инвертора; *д* – модель мостового инвертора тока

Схемы одноventильных инверторов просты, не содержат большого количества элементов, что повышает надежность работы установки.

В работе были получены выражения в абсолютных и относительных единицах (U_C^* , $I_{нач1}^*$ и др.), позволяющие при известных параметрах нагрузки с помощью моделирования в пакете *Mathematica* определять области рациональных параметров элементов одноключевых инверторов, обеспечивающих их устойчивую работу.

На рисунке 2, а, б приведены полученные в результате моделирования осциллограммы первичных и вторичных напряжений, вторичного тока инвертора. На рисунке 3 приведены осциллограммы относительных величин действующих значений вторичного напряжения, напряжения на индукторе и напряжения на компенсирующем конденсаторе в мостовом инверторе напряжения.

Из осциллограмм на рисунках 2 и 3 видно, что предложенные согласующие трансформаторы позволяют снизить напряжения на индукторе и компенсирующем конденсаторе до требуемых значений, например понизить напряжение от 1000 В до 400 В, при котором не будет происходить пробой изоляции индуктора или диэлектрика компенсирующего конденсатора. При этом, как видно из рисунка 3, вторичное напряжение согласующего трансформатора намного меньше напряжения на индукторе и компенсирующем конденсаторе и равно активной составляющей напряжения индуктора.

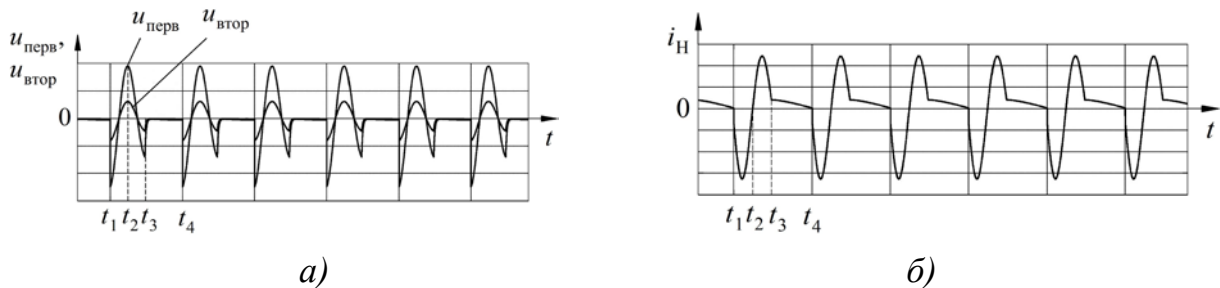


Рисунок 2 – Результаты моделирования:

а – первичное и вторичное напряжения в одноячейковом инверторе; б – вторичный ток одноячейкового инвертора

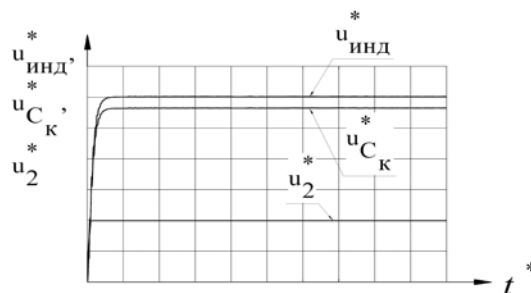


Рисунок 3 – Действующие значения напряжения на индукторе, компенсирующем конденсаторе и на вторичной обмотке трансформатора в мостовом инверторе

В третьей главе разработаны математические модели комплексных электротехнологических установок с применением промежуточной проводящей среды (реторты) (рисунок 4, а). При анализе электромагнитных процессов в разрабатываемой электротехнологической установке, приняты следующие допущения: неограниченная длина катушки индуктора, промежуточной проводящей среды и нагреваемых изделий; материал изготовления промежуточной проводящей среды – немагнитная жаропрочная нержавеющая сталь; постоянство удельного электрического сопротивления и магнитных проницаемостей промежуточной проводящей среды и нагреваемых изделий по их сечениям.

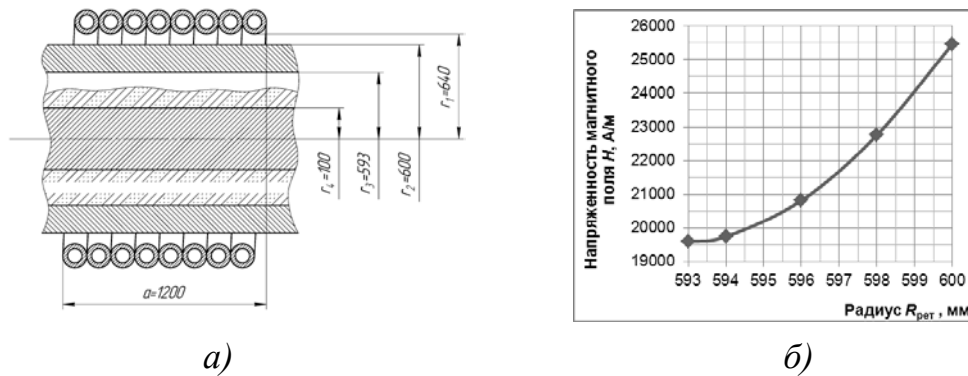


Рисунок 4 – Комплексная электротехнологическая установка:

а – схема; б – распределение напряженности магнитного поля по сечению реторты

При решении задачи исходными уравнениями являются основные уравнения Максвелла. Решением этих уравнений было получено уравнение Бесселя нулевого порядка от комплексного аргумента

$$\frac{d^2 \dot{H}_m}{d(\sqrt{-j} \cdot m)^2} + \frac{1}{\sqrt{-j} \cdot m} \cdot \frac{d\dot{H}_m}{d(\sqrt{-j} \cdot m)} + \dot{H}_m = 0, \quad (3)$$

где H_m – амплитуда напряженности магнитного поля, А/м; $m = \frac{\sqrt{2} \cdot R}{\Delta}$ – относительный радиус; Δ – глубина проникновения тока в промежуточную проводящую среду, м.

Путем решения этого уравнения, было получено выражение для напряженности магнитного поля на внутренней поверхности реторты

$$\dot{H}_{m_3} = H_{m_0} \cdot \frac{F_{10}(m_3, m_3) - \beta_4 \cdot m_3 \cdot \sqrt{-j} \cdot F_{00}(m_3, m_3)}{F_{10}(m_3, m_2) - \beta_4 \cdot m_3 \cdot \sqrt{-j} \cdot F_{00}(m_3, m_2)}, \quad (4)$$

где $F_{10}(m_3, m_3) = N_1(m_3 \cdot \sqrt{-j}) \cdot J_0(m_3 \cdot \sqrt{-j}) - J_1(m_3 \cdot \sqrt{-j}) \cdot N_0(m_3 \cdot \sqrt{-j})$; N_1 – функция Бесселя второго рода, первого порядка; J_0 – функция Бесселя первого рода, нулевого порядка; J_1 – функция Бесселя первого рода, первого порядка; N_0 – функция Бесселя второго рода, нулевого порядка; m_3 – относительный внутренний радиус реторты;

m_2 – относительный наружный радиус реторты;

$$\beta_4 = \frac{1}{2 \cdot \mu_{\text{пер}}}; F_{00}(m_3, m_3) = N_0(m_3 \cdot \sqrt{-j}) \cdot J_0(m_3 \cdot \sqrt{-j}) - J_0(m_3 \cdot \sqrt{-j}) \cdot N_0(m_3 \cdot \sqrt{-j});$$

$$F_{10}(m_3, m_2) = N_1(m_3 \cdot \sqrt{-j}) \cdot J_0(m_2 \cdot \sqrt{-j}) - J_1(m_3 \cdot \sqrt{-j}) \cdot N_0(m_2 \cdot \sqrt{-j});$$

$$F_{00}(m_3, m_2) = N_0(m_3 \cdot \sqrt{-j}) \cdot J_0(m_2 \cdot \sqrt{-j}) - J_0(m_3 \cdot \sqrt{-j}) \cdot N_0(m_2 \cdot \sqrt{-j}).$$

Значения напряженности магнитного поля рассчитаны в пакете *Mathematica* при различных радиусах R сечения реторты от центра к периферии. По результатам расчетов были построены графики распределения напряженности магнитного поля по сечению реторты (рисунок 4, б) и детали. Установлено, что значение напряженности магнитного поля во внутренней полости реторты составляет 77% от значения напряженности магнитного поля, создаваемого индуктором. Следовательно, применение такой промежуточной проводящей среды является возможным. Значение напряженности магнитного поля в детали уменьшается до нуля на глубине 12 мм, следовательно, возможен поверхностный индукционный нагрев ферромагнитных деталей в полном цилиндре (реторте). Результаты расчетов для различных значений диаметров добавочной проводящей среды в зависимости от толщины стенки добавочной проводящей среды показаны на рисунке 5, а.

Для подробного расчета параметров комплексной электротехнологической установки создана ее полная электрическая схема замещения, учитывающая влияние реторты на параметры электромагнитного поля, определяющего нагрев деталей. Схема замещения электротехнологической установки представлена на рисунке 5, б.

Таким образом, с помощью разработанной схемы замещения индукторов с промежуточной проводящей средой, учитывающей влияние реторты на параметры электромагнитного поля, задача расчета электромагнитного поля сведена к задаче расчета электрической цепи, что существенно упрощает определение параметров комплексной установки и позволяет применять аналитический метод расчета.

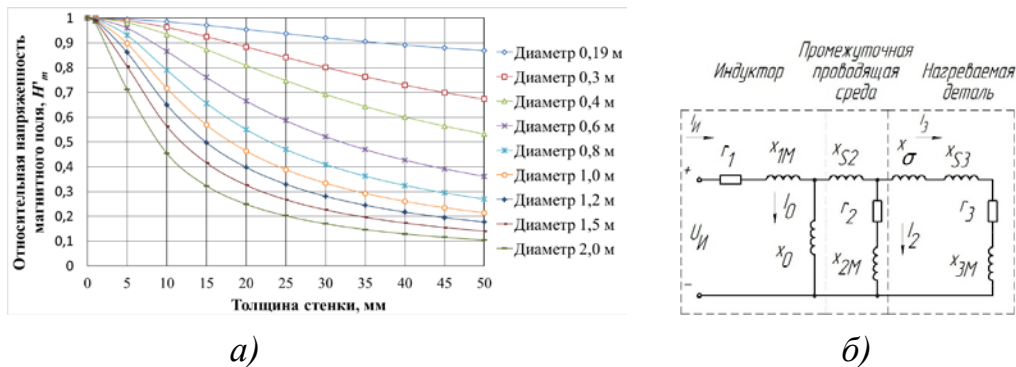


Рисунок 5 – К определению параметров электротехнологической установки:

а – результаты расчетов напряженности магнитного поля; б – схема замещения

На рисунке 6, а приведена расчетная схема индуктора с добавочной проводящей средой с прорезями: 1 – индуктор; 2 – добавочная проводящая среда; 3 – прорезь, 4 – нагреваемая деталь.

С учетом принятых ранее допущений напряженность магнитного поля указанной установки можно определить выражением

$$\dot{H}_m = c_1 \cdot J_0 (m \cdot \sqrt{-j}) + c_2 \cdot N_0 (m \cdot \sqrt{-j}), \quad (5)$$

где c_1, c_2 – постоянные коэффициенты, определяемые из граничных условий.

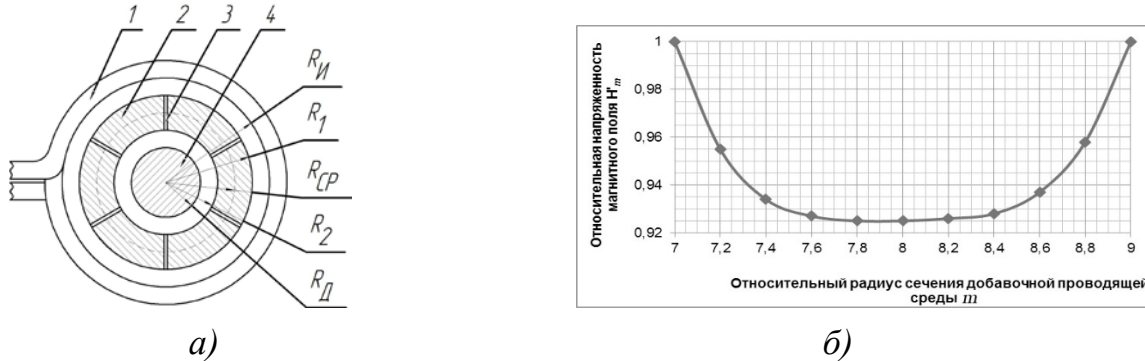


Рисунок 6 – Индуктор с добавочной проводящей средой с прорезями:
а – схема; б – распределение относительной напряженности магнитного поля по сечению добавочной проводящей среды

Уравнения были решены в относительных единицах в пакете *Mathematica*, результаты решения в виде графика распределения относительной напряженности магнитного поля по сечению добавочной проводящей среды для случая $m_1=9$ и $m_2=7$ представлены на рисунке 6, б. Из данного графика видно, что напряженность магнитного поля убывает от наружной поверхности добавочной проводящей среды до ее среднего радиуса, а затем возрастает до внутренней поверхности добавочной проводящей среды.

На основании разработанных математических моделей и схемы замещения установки была усовершенствована методика расчета индукторов комплексных электротехнологических установок с учетом влияния промежуточной проводящей среды на параметры электромагнитного поля, обеспечивающего нагрев деталей.

В четвертой главе на основании разработанных имитационных моделей была усовершенствована методика расчета новых согласующих высокочастотных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных или нанокристаллических сплавов, позволяющая осуществлять расчет всех параметров новых согласующих высокочастотных трансформаторов на базе применения новых магнитных материалов – магнитопроводов из аморфных или нанокристаллических сплавов,

с учетом работы трансформатора, как согласующего звена в составе электротехнологических установок с полупроводниковыми модулями.

Были проведены экспериментальные исследования установок для закалки металлических деталей. На рисунке 7, *а* показана фотография исследуемого индуктора для поверхностной закалки. На рисунке 7, *б* представлена фотография приборного блока во время работы устройства.

*а)**б)*

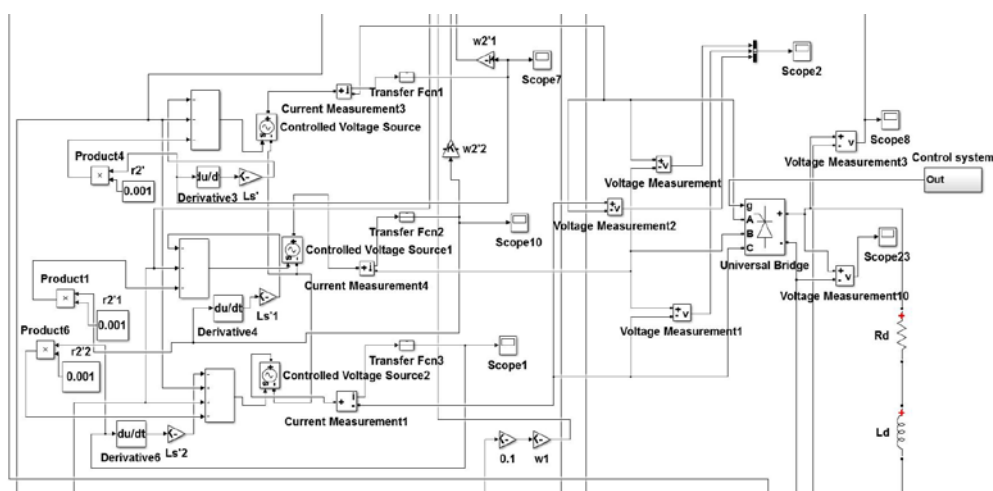
Рисунок 7 – Установка для поверхностной закалки:

а – индуктор для поверхностной закалки; *б* – приборный блок

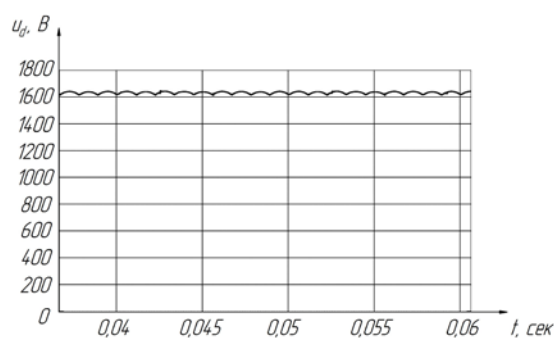
Индукционный нагрев осуществляется при частоте 7900 Гц. Выпрямленное напряжение $U_d = 500$ В, ток выпрямителя $I_d = 160$ А, выходное напряжение инвертора $U_{\text{вых}} = 200$ В. Мощность на выходе выпрямителя $P_d = 80$ кВт. Был произведен поверочный расчет параметров инвертора и индуктора. В результате расчетов параметров инвертора и индуктора были получены данные: напряжение на нагрузке $U_H = 200$ В, ток в индукторе $I_H = 5800$ А, напряжение на индукторе $U_H = 27$ В, мощность, подводимая к индуктору $P_H = 85$ кВт. Как показало экспериментальное исследование, расчетная мощность, подводимая к индуктору, практически совпадает с мощностью, полученной экспериментальным путем.

Была разработана имитационная модель управляемого выпрямительного модуля с многофазным согласующим трансформатором для обеспечения электромагнитной совместимости мощных преобразователей с сетью и нагрузкой (рисунок 8, *а*). На рисунке 8, *б*, представлена осциллограмма выпрямленного напряжения.

Было установлено, что применение управляемых выпрямительных модулей с многофазными согласующими трансформаторами позволяет регулировать в широких пределах параметры электрической энергии. Также был разработан многофазный согласующий трансформатор, позволяющий преобразовать входную трехфазную систему напряжений в восемнадцатифазную на базе правильного шестиугольника, защищенный патентом РФ № 143244.



а)



б)

Рисунок 8 – Управляемый выпрямитель с многофазным трансформатором:

а – фрагмент имитационной модели; б – выпрямленное напряжение

Заключение

1. Проведена разработка структуры, создана математическая модель и осуществлен параметрический синтез источников питания электротехнологических установок с индукционным нагревом на базе применения одноключевых транзисторных инверторов с последовательной компенсацией реактивной мощности индуктора. Выявлено, что одноключевые схемы инверторов наиболее перспективны, так как они наиболее простые и надежные в работе. Кроме того, они позволяют в широких пределах регулировать выходные параметры для наилучшего согласования с нагрузкой. На основании разработанной модели произведен параметрический синтез инверторов, получены основные соотношения для параметров определения инверторов. Таким образом, с помощью разработанных соотношений при известных параметрах нагрузки становится возможным определять области оптимальных параметров разрабатываемых инверторов, при которых обеспечивается их устойчивая работа и максимум мощности в нагрузке.

2. Разработаны имитационные модели источников питания

электротехнологических установок с применением новых высокочастотных согласующих трансформаторов, защищенных патентом РФ № 131538 и свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ № 2011611332, 2011611333, 2011612261, 2013618410, и электротехнологических установок с управляемыми выпрямительными модулями с многофазными согласующими трансформаторами. В результате моделирования установок с последовательной компенсацией было установлено, что новые высокочастотные трансформаторы позволяют эффективно преобразовывать параметры источников питания, например, понижать напряжение на элементах от 1000 В до 400 В, при эксплуатации не требуется дорогостоящего высоковольтного оборудования. Благодаря таким материалам удастся увеличить рабочую индукцию до 1 Тл с многократным снижением магнитных потерь, ток холостого хода трансформаторов составляет 0,5%, а КПД до 99%. Применение таких трансформаторов в электротехнологических установках значительно эффективнее, по сравнению с обычными трансформаторами с большими потерями и более низким КПД. Применение управляемых выпрямительных модулей с многофазными трансформаторами позволяет обеспечить электромагнитную совместимость электротехнологических установок с сетью и нагрузкой и регулировать в широких пределах параметры электрической энергии. Один из разработанных многофазных фазопреобразующих трансформаторов защищен патентом РФ № 143244.

3. Созданы математические модели и оригинальные конструкции индукторов комплексных электротехнологических установок, включающих добавочные проводящие среды с применением индукционного нагрева на промышленной и повышенной частоте, что позволяет определять целесообразность данного нагрева для осуществления термообработки деталей и определены параметры устройств, при которых необходимо применение промежуточной проводящей среды с прорезями. Установлено, что напряженность магнитного поля внутри реторты составляет 77% от значения около индуктора. То есть целесообразен индукционный нагрев на промышленной частоте деталей внутри добавочной проводящей среды. Напряженность магнитного поля в детали уменьшается до нуля от ее поверхности до глубины 12 мм, то есть возможен поверхностный индукционный нагрев ферромагнитных деталей в добавочной среде. С помощью разработанной схемы замещения индукторов с промежуточной проводящей средой, учитывающей ее влияние на параметры электромагнитного поля, задача расчета электромагнитного поля сведена к задаче расчета электрической цепи, что существенно упрощает определение параметров установки и позволяет применять аналитический метод.

Данная схема замещения позволяет более простым способом рассчитать параметры комплексных установок при наличии промежуточных проводящих сред.

4. Усовершенствована методика расчета новых согласующих высокочастотных трансформаторов с аморфными или нанокристаллическими сплавами, учитывающая работу таких трансформаторов в индукционных установках, и методика расчета индукторов комплексных установок с промежуточными проводящими средами с учетом их влияния на параметры электромагнитного поля. Экспериментально подтверждена возможность применения согласующих высокочастотных трансформаторов как элементов электротехнологических установок с индукционным нагревом под закалку, а также адекватность математических моделей. Расхождение экспериментальных данных и теоретических расчетов составило не более 6 %. Экспериментально подтверждена возможность расчета индукторов с магнитопроводами с помощью соотношений, применяемых для трансформаторов.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в изданиях по перечню ВАК:

1. **Горбунов А.С.** Расчет параметров комплексной электротехнологической установки, включающей индукционный нагрев деталей / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, А.А. Шуляк // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/106-8042>.

2. **Горбунов А.С.** Трансформаторно-индукторный комплекс с последовательным включением конденсатора в цепь нагрузки. / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/113-11608>.

3. **Горбунов А.С.** Расчет электромагнитного поля в комплексных электротехнологических установках для индукционного нагрева / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18, – № 2 (63). – С. 61–68.

4. **Горбунов А.С.** Улучшение электромагнитной совместимости преобразовательных устройств с сетью и нагрузкой с помощью многофазных трансформаторов / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, З.И. Ялалова // Электротехнические и информационные комплексы и системы, УГУЭС. – 2014. – Т.10. – № 3. – С. 21–30.

Патенты:

5. **Горбунов А.С.** Инвертор (варианты) / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, Д.В. Гусаков: Пат. РФ 131538, МПК H02M7/44, Заявлено 18.02.2013; Опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23.

6. **Горбунов А.С.** Многофазный трансформаторный преобразователь числа фаз / Ю.В. Рахманова, Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, П.В. Шилов: Пат. РФ 143244 МПК H02M5/14, Заявлено 04.03.2014, Оpubл. 20.07.2014, Бюл. № 20.

7. **Горбунов А.С.** Антирезонансный трехфазный трансформатор напряжения с ленточным магнитопроводом / Исмагилов Ф.Р. [и др.]: Пат. РФ 131231 МПК H01F30/12, Заявлено 16.01.2013, Оpubл. 10.08.2013, Бюл. № 22.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

8. **Горбунов А.С.** Программа для исследования одноячейкового несимметричного инвертора с повышенным выходным напряжением / Л.Э. Рогинская, Р.Р. Исмагилов, А.С. Горбунов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. № 2011611332, от 10.02.2011.

9. **Горбунов А.С.** Программа для исследования одноячейкового несимметричного инвертора с трансформаторным выходом и с учетом насыщения индуктора / Л.Э. Рогинская, Р.Р. Исмагилов, А.С. Горбунов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. № 2011611333, от 10.02.2011.

10. **Горбунов А.С.** Программа для исследования электротехнического комплекса для индукционного нагрева на базе одноячейкового несимметричного инвертора с учетом насыщения индуктора / Л.Э. Рогинская, Р.Р. Исмагилов, А.С. Горбунов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2011612261, от 17.03.2011.

11. **Горбунов А.С.** Программа для моделирования полупроводниковых преобразователей частоты с взаимоиндуктивными модулями / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, Д.В. Гусаков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2013618410, от 09.09.2013.

Статьи в других изданиях

12. **Горбунов А.С.** Расчет и выбор ферромагнитных модулей для автономных инверторов / Л. Э. Рогинская, А. С. Горбунов, // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы. Межвузовский научный сборник. – Уфа: УГАТУ, 2011. – С. 35–40.

13. **Горбунов А.С.** Разработка комплексной электротехнологической установки для цинкования / А. С. Горбунов, Д. В. Гусаков, Р. Д. Каримов // Сборник материалов V Международной молодежной научной конференции «Гражданская авиация: XXI век», 11–12 апреля 2013 г. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2013. – С. 50-51.

Соискатель



А.С. Горбунов

ГОРБУНОВ Антон Сергеевич

ТРАНСФОРМАТОРНО-ИНДУКТОРНЫЕ МОДУЛИ
ДЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ С ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 13.04.2015. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.

Тираж 100 экз. Заказ № 240.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»

Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12