

На правах рукописи



Долгих Иван Юрьевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИНДУКЦИОННО-СТЫКОВОЙ СВАРКИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Иваново 2016

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы электротехники и электро-
технологии» Ивановского государственного энергетического университета
имени В.И. Ленина

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент
Королёв Анатолий Николаевич

Официальные оппоненты

Щербаков Алексей Владимирович, доктор
технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский универси-
тет «МЭИ», заведующий кафедрой «Автомати-
зированные электротехнологические установки
и системы»

Галунин Сергей Александрович, кандидат
технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский государственный электротех-
нический университет «ЛЭТИ» им.
В.И. Ульянова (Ленина)», доцент кафедры
«Электротехнологическая и преобразовательная
техника»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Защита состоится 14 октября 2016 г. в 14 часов на заседании диссертационного со-
вета Д 212.064.02 Ивановского государственного энергетического университета
по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ауд. Б-237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации,
просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ИГЭУ,
Ученый совет. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01.

E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного
энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Dolgih_I.Yu..pdf.

Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.02



Сидоров
Сергей Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из наиболее распространённых технологий, является сварка, позволяющая посредством создания неразъёмных соединений получать изделия сложной конфигурации и самого различного назначения. Её технико-экономические показатели во многом определяют эффективность производственного процесса. Важной особенностью сварочной технологии является разнообразие её способов и средств реализации. Для каждого производственного процесса можно подобрать наиболее подходящий способ, обеспечивающий наилучшие характеристики готового продукта при минимизации затрат на производство. При этом наибольшее распространение получила электросварка, базирующаяся на тепловом действии электрического тока, вносящего необходимую энергию в соединяемые путём сварки изделия. Достоинство электросварки основано на простоте подачи необходимого количества энергии в зону сварного соединения при возможности высокого уровня автоматизации технологического процесса. Однако сварка встык изделий с большой площадью поперечного сечения до настоящего времени проводится с помощью методов с невысокими технико-экономическими показателями. Это делает актуальным разработку способов и электротехнических комплексов для стыковой сварки, позволяющей повысить её качественные и энергетические характеристики.

Не менее распространённым технологическим процессом является индукционный нагрев. Широкая область его применения обусловлена наличием важных преимуществ, определяющих перспективность использования в конкретном технологическом процессе. Это связано с возможностью бесконтактной передачи энергии и её локализации в требуемые области изделий. Таким образом, путём подбора основных параметров индукционного нагрева можно произвести повышение температуры выбранной области изделия с выходными характеристиками, требуемыми для осуществления заданной технологической операции.

Естественно, использование прогрессивного со многих сторон индукционного нагрева для сварки даёт возможность повысить технико-экономические показатели производственного процесса в целом. Однако применение индукционного нагрева для сварки встык не оптимизировано по технологическим и энергетическим показателям, что делает актуальным разработку методов совершенствования электротехнического комплекса для её реализации. Так применение для этого внешних индукторов оказывает электромагнитное воздействие на весь объём изделий вблизи места сварки. Это приводит к увеличению зоны, подвергающейся термическому воздействию со стороны индуктора, что с одной стороны отражается на качестве готового изделия, ухудшая его прочностные характеристики, а с другой – снижает энергетическую эффективность всего процесса в целом. Всё это указывает на актуальность разработки технических решений, повышающих технико-экономические показатели индукционно-стыковой сварки.

В то же время разработка нового вида сварки помимо теоретического обоснования перспективности его использования предполагает создание методики расчёта и анализа эксплуатационных характеристик посредством математического описания технологии с учётом всех компонентов комплекса, включая источник электромагнитного поля с его нелинейными зависимостями входных и выходных переменных. Поэтому наиболее важным является совместное математическое моделирование объекта индукционного нагрева с обеспечивающим его источником по-

ля высокой частоты. Это необходимо для проведения анализа динамики температурных и электротехнических показателей, а также оценки энергетических характеристик различных режимов индукционного нагрева и рекомендаций наиболее перспективных из них. При этом актуальной становится задача разработки системы управления, реализующей энергетически обоснованный режим. Кроме того, исходя из технологических особенностей индукционно-стыковой сварки с помощью плоского индуктора, обусловленных извлечением его на завершающем этапе из зоны сварки, необходимо исследовать связанный с этим процесс охлаждения частей изделия, являющийся следствием теплоотдачи в окружающую среду и глубинные слои изделий. Всё это требует применения принципиально новых подходов в вопросе расчёта и анализа процесса индукционного нагрева, что в целом обуславливает актуальность вопросов разработки технологии и методики исследования индукционно-стыковой сварки, а также её реализации системой управления, рассматриваемыми в рамках диссертационной работы.

Объект исследования. Электротехнический комплекс, состоящий из объекта сварки и источника электромагнитного поля с системой управления для реализации предложенного способа индукционно-стыковой сварки посредством использования плоского индуктора.

Цель работы. Разработка электротехнического комплекса для индукционно-стыковой сварки на базе анализа его характеристик посредством метода математического моделирования, способного произвести адекватный учёт взаимного влияния источника питания и объекта нагрева с его нелинейно изменяющимися параметрами в динамике электромагнитных и температурных процессов, и реализация системы управления индукционным нагревом с позиции энергетической эффективности процесса в целом.

Задачи исследования:

1. Разработать основные принципы осуществления индукционно-стыковой сварки с плоским индуктором и показать преимущества его применения.
2. Разработать метод математического моделирования для исследования индукционного нагрева, позволяющий учитывать нелинейно изменяющиеся физические свойства изделий как во время нагрева, так и при последующем охлаждении при отключении источника питания, а также выяснить степень влияния каждого из нелинейных параметров на характер индукционного нагрева.
3. Разработать математическую модель источника питания, позволяющую анализировать динамику изменения основных энергетических характеристик индукционного нагрева, а также комплексную модель источника питания и нагреваемого объекта при их взаимном влиянии.
4. Провести оценку вариантов управления индукционным нагревом и дать рекомендации по наиболее подходящим для индукционно-стыковой сварки с позиции энергетической эффективности процесса.
5. Разработать структурную схему системы автоматического управления индукционно-стыковой сваркой и провести её синтез.

Методы исследования. Решение поставленных задач достигается методами математического и структурного моделирования, в основе которых лежат теории электромагнитного поля, теплопроводности, автоматического управления, расчёта трансформатора с разомкнутым магнитопроводом, а также экспериментальными исследованиями характеристик ферромагнитных материалов при нагреве и воз-

действии токов различной частоты и показателей образцов сварных соединений. Достоверность и обоснованность изложенных в диссертации выводов и результатов подтверждена сопоставлением расчёта по разработанным моделям с существующими методиками при одинаковых с ними условиях проведения модельного эксперимента.

Научная новизна:

1. Обоснование применения плоского индуктора для индукционно-стыковой сварки, заключающейся в нагреве поверхностей свариваемого изделия на требуемую температуру и глубину с последующим их сжатием с необходимым усилием.

2. Разработан метод описания динамики электромагнитных и температурных процессов индукционного нагрева и последующего охлаждения, основанный на условной декомпозиции нагреваемого изделия и применении теории многообмоточного трансформатора с разомкнутым магнитопроводом, позволяющий учитывать взаимное влияние источника и нагреваемого объекта с учётом нелинейных температурных зависимостей его физических свойств.

3. На основе разработанных структурных схем выполнен сравнительный анализ различных режимов управления индукционным нагревом при сварке и рекомендованы наиболее перспективные с позиции энергетической эффективности и реализуемости.

4. Разработана структурная схема системы автоматического управления, реализующая энергетически эффективный режим индукционно-стыковой сварки и проведён её синтез.

Практическая значимость:

1. Предложен новый способ индукционно-стыковой сварки на основе применения плоского индуктора, позволяющий повысить качество готовых изделий и энергетическую эффективность процесса сварки за счёт уменьшения участка поверхности изделия, подвергающегося нагреву.

2. Разработана комплексная математическая модель, дающая возможность проводить расчёт основных показателей динамики электромагнитных и температурных процессов, а также энергетические параметры процесса, необходимые при создании установок индукционно-стыковой сварки.

3. Проанализированы различные варианты управления индукционным нагревом и рекомендованы к использованию те из них, которые позволяют обеспечить наилучшие показатели исследуемого технологического процесса с позиции его энергетической эффективности и реализуемости.

4. Разработана структура системы автоматического управления для реализации режима индукционно-стыковой сварки с минимизацией энергопотребления и выполнен её синтез.

5. Полученные результаты внедрены в учебный процесс и включены в программу обучения бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электротехнологические установки и системы».

На защиту выносятся следующие положения:

1. Преимущества использования плоского индуктора для индукционно-стыковой сварки.

2. Метод условной декомпозиции для описания статики и динамики энергетических и температурных показателей индукционно-стыковой сварки.

3. Математические модели объекта индукционного нагрева и источника электромагнитного поля и их структурные схемы для исследования статических и динамических характеристик индукционно-стыковой сварки.

4. Обоснование энергетически эффективных режимов индукционно-стыковой сварки и структурная схема системы реализации энергетически эффективного режима.

Апробация работы. Основные идеи и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2013, 2014, 2015); Международной молодёжной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2013, 2014, 2015); Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро-технологии» (г. Иваново, 2013, 2015); Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Энергия» (г. Иваново, 2013, 2014, 2015); конкурсе докладов по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ (г. Иваново, 2013, 2014, 2015); отчётной конференции молодых учёных ИГЭУ «Энергия инноваций» (г. Иваново, 2013, 2014); International Symposium TOPICAL PROBLEMS IN THE FIELD OF ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING (Parnu, Estonia, 2014); Международной научной конференции молодых учёных «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (г. Новосибирск, 2014); Всероссийской научно-практической конференции «Надёжность и долговечность машин и механизмов» (г. Иваново, 2015); Международной научной конференции молодых учёных «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (г. Новосибирск, 2015); Девятом Всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и инновации в технических университетах» (г. Санкт-Петербург, 2015).

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 29 печатных работ, 2 из которых в изданиях из списка ВАК и 1 патент на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Общий объём работы составляет 189 страниц, содержит 114 рисунков, 16 таблиц и 8 приложений. Список литературы состоит из 92 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется её цель и задачи исследования, характеризуется научная новизна и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируется состояние и направления развития электро-сварки, показывается перспективность использования индукционного нагрева для сварки встык. Рассматриваются недостатки использующихся в настоящее время для сварки внешних индукторов, поскольку они осуществляют нагрев не только непосредственно участвующих в сварном соединении поверхностей, но и нагревают остальную околошовную часть изделия. Это не только отрицательно отражается на технико-экономических показателях и снижает энергоэффективность сварочного процесса в связи с затратами дополнительного количества электроэнер-

гии, но и оказывает неблагоприятное влияние на качество получаемых сварных соединений ввиду возможных деформаций, возникающих в процессе сжатия.

Проведено обоснование применения плоских индукторов при сварке, помещаемых между свариваемыми поверхностями, и нагревающих только их. Полевое моделирование в пакете программ Comsol Multiphysics показало, что использование плоских индукторов даёт возможность снизить температурный перепад по поверхности изделия в 3 раза по сравнению с наружным индуктором. Одновременно в 2,3 раза уменьшается зона термического влияния, и в два раза энергия, затрачиваемая на нагрев свариваемых поверхностей до той же температуры. В дополнение к этому индукционно-стыковая сварка с плоским индуктором имеет следующие достоинства: отсутствие затрат энергии на нагрев объёма изделия около свариваемых поверхностей, не участвующих в процессе создания сварного соединения и, связанного с этим исключения нежелательной деформации нагретого объёма изделия при сжатии.

Вторая глава посвящена разработке метода условной декомпозиции для описания индукционного нагрева свариваемых поверхностей. Его сущность заключается в том, что производится декомпозиция объекта нагрева, представляющего собой единое функционально выделенное изделие. Но поскольку оно структурно неоднородно по глубине проникновения тока, температуре, и связанными с этим другими тепловыми и электромагнитными характеристиками, декомпозиция его может быть только условной по слоям с интересующей по технологии толщиной каждого из них. В частности, при индукционно-стыковой сварке важны параметры только поверхностного слоя, непосредственно участвующего в создании сварного соединения. Характеристики внутренних слоёв необходимы лишь для определения их влияния на поверхностный при оценке технологического процесса и его энергетических характеристик в целом, а также при разработке и реализации электротехнического комплекса.

Основу уравнения, характеризующего тепловое состояние k -го слоя при индукционном нагреве представляет закон сохранения энергии:

$$dQ_{zk} = dQ_{nk} + dQ_{n(k-1)} - dQ_{n(k+1)k},$$

где dQ_{zk} – повышающая температуру слоя энергия; dQ_{nk} – энергия нагрева слоя протекающим по нему током; $dQ_{n(k-1)}$ – энергия, поступающая в k -й слой от предыдущего; $dQ_{n(k+1)}$ – энергия, передающаяся из k -й слоя в последующий.

Подставляя выражения для указанных приращений энергии, имеем формулу для температуры рассматриваемого слоя в операторной форме:

$$T_k = \left(R_k I_k^2 + \frac{\lambda_{k(k-1)}}{\Delta_{k-1}} S_{k(k-1)} (T_{(k-1)} - T_k) - \frac{\lambda_{(k+1)k}}{\Delta_k} S_{(k+1)k} (T_k - T_{(k+1)}) \right) \frac{1}{m_k C_k p},$$

где T_k , $T_{(k-1)}$, $T_{(k+1)}$ – температура рассматриваемого, предыдущего и последующего слоёв; R_k , I_k – активное сопротивление и ток слоя; $\lambda_{k(k-1)}$, $\lambda_{(k+1)k}$ – коэффициенты теплопроводности предыдущего и последующего слоёв; $S_{k(k-1)}$, $S_{(k+1)k}$ – площади соприкосновения с предыдущим и последующими слоями; Δ_{k-1} , Δ_k – толщина предыдущего и рассматриваемого слоёв; m_k , C_k – масса и теплоёмкость рассматриваемого слоя.

Структурная схема, соответствующая уравнению для k -го слоя модели при индукционном нагреве, представлена на рис. 1.

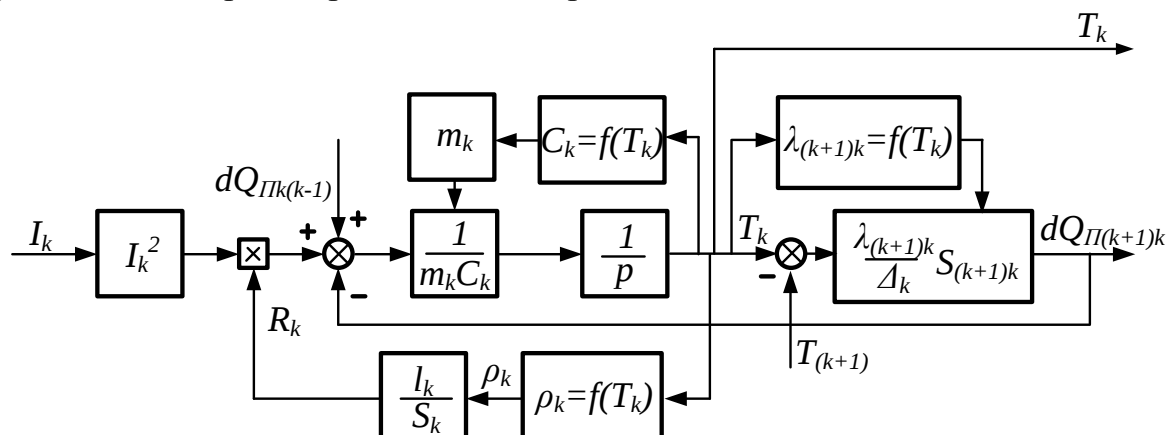


Рис. 1. Структурная схема модели тепловых процессов k -го слоя при индукционном нагреве

Достоинством разработанной модели является то, что в ней достаточно просто анализировать связь динамики нагрева слоя с индуцированным в нём током с учётом нелинейных зависимостей активного сопротивления $R_k = f(T_k)$, теплопроводности $\lambda_k = f(T_k)$, и теплоёмкости $C_k = f(T_k)$ от температуры для каждого из слоёв и проанализировать их влияние на процесс индукционного нагрева изделия в целом.

Кривые нагрева поверхностного слоя изделия при различных вариантах учёта нелинейно изменяющихся параметров представлены на рис. 2.

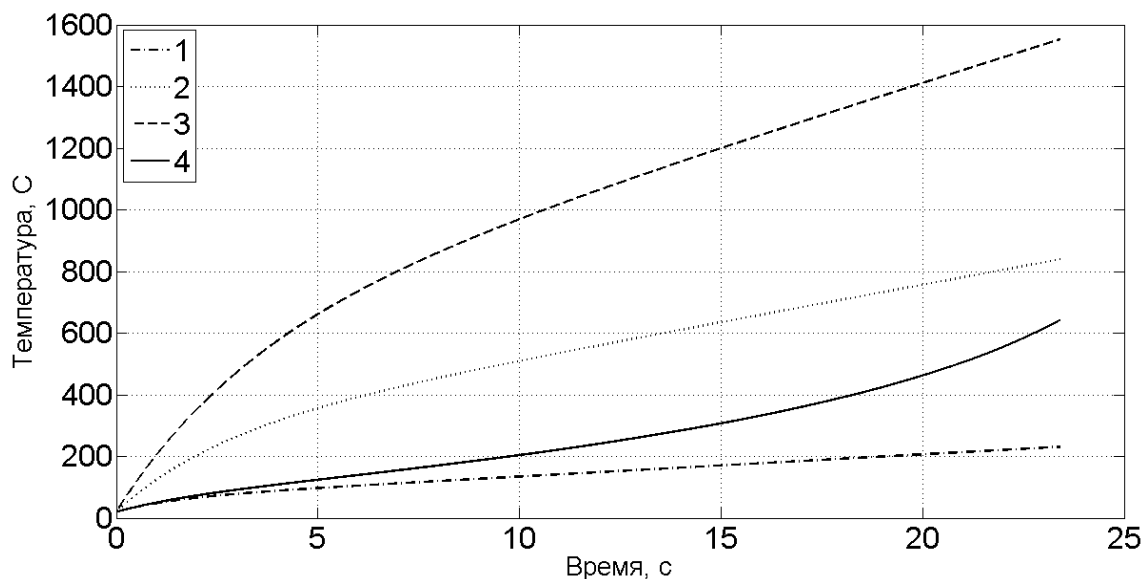


Рис. 2. Характеристики нагрева поверхностного слоя изделия при различных вариантах учёта удельного сопротивления, теплопроводности и теплоёмкости материала изделия:

1 – $\rho = \rho_{20} = 160 \cdot 10^{-9}$ Ом·м, $\lambda = \lambda_{20} = 51,5$ Вт/(м·°C), $c_1 = c_{20} = 483$ Дж/(кг·°C); 2 – $\rho = \rho_{cp} = 750 \cdot 10^{-9}$ Ом·м, $\lambda = \lambda_{cp} = 40,46$ Вт/(м·°C), $c_1 = c_{cp} = 674$ Дж/(кг·°C); 3 – $\rho = \rho_{1200} = 1230 \cdot 10^{-9}$ Ом·м, $\lambda = \lambda_{1200} = 29,5$ Вт/(м·°C), $c_1 = c_{1200} = 649$ Дж/(кг·°C); 4 – $\rho = f(T)$, $\lambda = f(T)$, $c = f(T)$

Анализ полученных кривых показывает на то, что принятие их неизменными во время нагрева приводит к погрешности расчёта по сравнению с учётом их изменения при росте температуры. При этом её значение столь велико, что в большинстве случаев не позволяет ставить задачу качественного анализа технологии индукционного нагрева.

В третьей главе разрабатываются основы моделирования динамики электромагнитных процессов индукционного нагрева. Значение решения этой задачи заключается в том, что источник не просто передаёт через электромагнитное поле

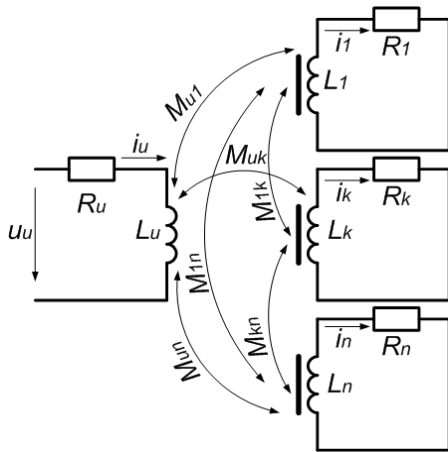


Рис. 3. Функциональная схема источника и нагреваемого изделия

требуемое количество энергии в нагреваемые поверхности, но и сам подвергается обратному влиянию изделия на свои параметры. Это взаимное влияние можно учесть, используя для математического описания теорию трансформатора с разомкнутым магнитопроводом. Для моделирования электромагнитных процессов в источнике в этом случае целесообразно применить тот же метод условной декомпозиции нагреваемого изделия на слои. При этом каждый из них может быть рассмотрен как замкнутая накоротко вторичная обмотка многообмоточного трансформатора с характерным для каждого слоя коэффициентом взаимоиндукции. Функциональная схема источника и изделия в этом случае представлена на рис. 3.

Система уравнений, описывающая представленную функциональную схему для n слоёв, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_u = R_u i_u + L_u \frac{di_u}{dt} - M_{u1} \frac{di_1}{dt} - \dots - M_{uk} \frac{di_k}{dt} - \dots - M_{un} \frac{di_n}{dt} \\ 0 = -M_{1u} \frac{di_u}{dt} + R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{1k} \frac{di_k}{dt} + \dots + M_{1n} \frac{di_n}{dt} \\ \dots \dots \dots \\ 0 = -M_{ku} \frac{di_u}{dt} + M_{k1} \frac{di_1}{dt} + R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + \dots + M_{kn} \frac{di_n}{dt} \\ \dots \dots \dots \\ 0 = -M_{nu} \frac{di_u}{dt} + M_{n1} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{nk} \frac{di_k}{dt} + R_n i_n + L_n \frac{di_n}{dt} \end{array} \right.$$

Здесь u_u – напряжение, приложенное к индуктору; i_u, i_1, i_k, i_n – токи в индукторе и слоях нагреваемого изделия; R_u, R_1, R_k, R_n – активное сопротивление индуктора и слоёв изделия; L_u, L_1, L_k, L_n – индуктивность индуктора и слоёв изделия; $M_{u1}, M_{1u}, M_{uk}, M_{ku}, M_{un}, M_{nu}, M_{1k}, M_{k1}, M_{1n}, M_{n1}, M_{kn}, M_{nk}$ – коэффициенты взаимной индукции индуктора со слоями и слоёв между собой.

Параметры многообмоточного трансформатора рационально определять на первом этапе для холодного состояния изделия посредством решения полевой задачи в пакете программ ELCUT.

Структурная схема многообмоточного трансформатора для мгновенных значений напряжения и токов, соответствующая математической модели, имеет вид рис. 4.

Модель позволяет учитывать динамику электромагнитных процессов источника электромагнитного поля в комплексе с температурными переходными процессами в нагреваемом изделии. Однако главным её достоинством является возможность проводить учёт влияния переменных параметров нагреваемого изделия на источник.

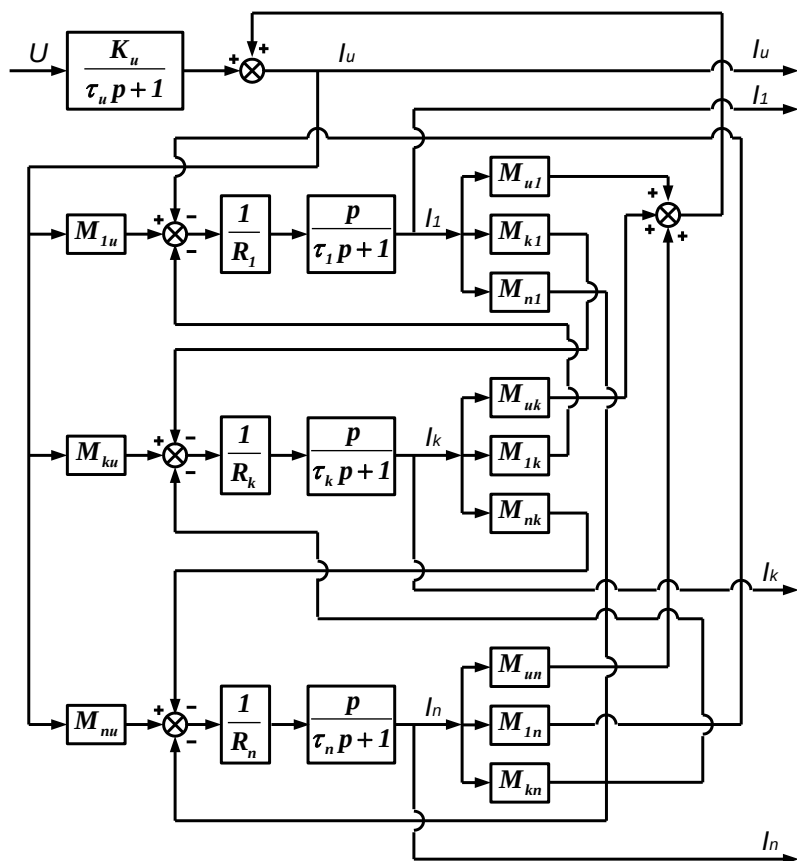


Рис 4. Структурная схема математической модели трансформатора

Анализируя рассчитанные по модели переходные процессы в источнике, можно отметить, что электромагнитные постоянные времени τ_u и τ_k для рассмотренного примера не превышают 0,005 и существенно ниже большой инерционности тепловых процессов. Поэтому разработанная модель рациональна к применению при индукционном нагреве мелких изделий с небольшой температурной постоянной времени. Кроме того, высокая частота питающего

индуктор тока приводит к мелкому шагу интегрирования при структурном моделировании, что значительно увеличивает машинное время расчёта динамики нагрева. Поэтому в случае индукционного нагрева изделий с большой массой целесообразно перейти к модели для действующих значений напряжений и токов. В этом случае совмещённая структурная схема источника и нагреваемого изделия имеет вид рис. 5.

Результаты расчёта динамики изменения токов в индукторе и слоях нагреваемого изделия при неизменном по величине напряжении источника представлены на рис. 6.

Анализ динамики тока в индукторе и в слоях показывает на их значительное уменьшение во время нагрева из-за влияния нелинейно изменяющихся параметров изделия на источник. Выявленный фактор является показателем снижения энергетической эффективности процесса в целом.

Четвёртая глава посвящена исследованию индукционного нагрева применительно к технологии индукционно-стыковой сварки. Её специфическими требованиями являются толщина нагреваемого слоя, непосредственно связанная с глубиной проникновения тока, и равномерность распределения его плотности по нагреваемым поверхностям. Кроме того важный фактор передачи энергии с помощью электромагнитного поля заключается в величине зазора между индуктором и поверхностями, наличие которого связано с необходимостью его теплоизоляции.

Четвёртая глава посвящена исследованию индукционного нагрева применительно к технологии индукционно-стыковой сварки. Её специфическими требованиями являются толщина нагреваемого слоя, непосредственно связанная с глубиной проникновения тока, и равномерность распределения его плотности по нагреваемым поверхностям. Кроме того важный фактор передачи энергии с помощью электромагнитного поля заключается в величине зазора между индуктором и поверхностями, наличие которого связано с необходимостью его теплоизоляции.

Существенным также является зависимость плотности тока на поверхности от частоты.

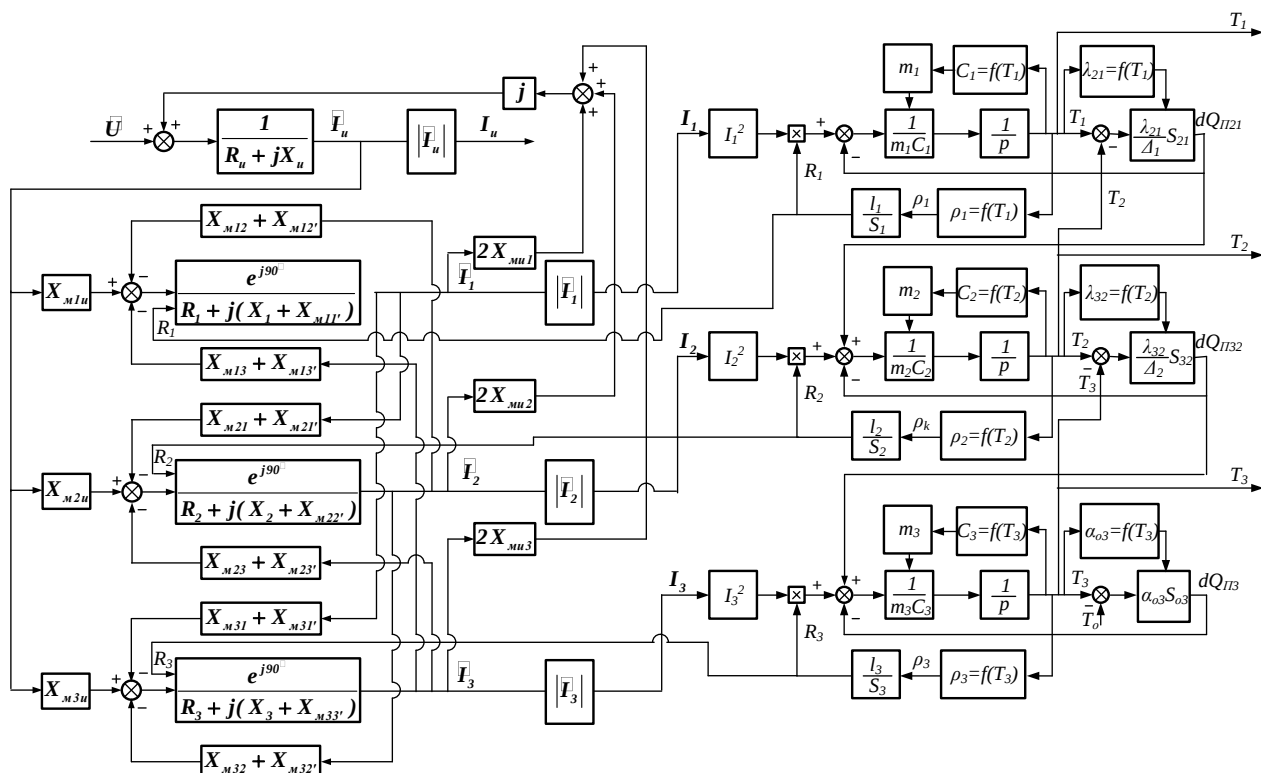


Рис. 5. Структурная схема совмещённой модели источника и нагреваемого изделия при трёх-слойной условной декомпозиции

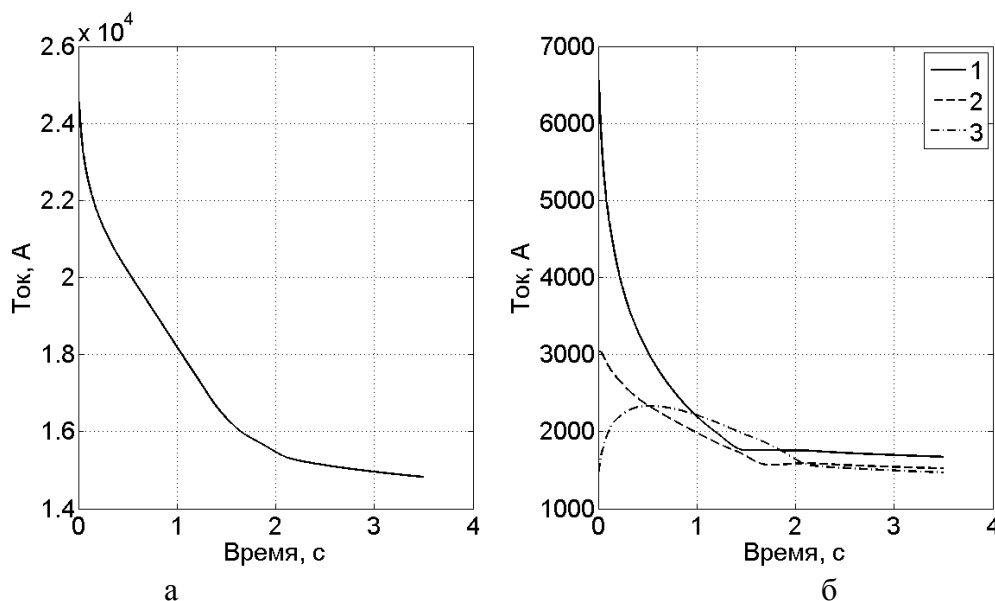


Рис. 6. Динамика изменения тока (а) в индукторе и (б) в слоях нагреваемого изделия: 1 – первый слой; 2 – второй слой; 3 – третий слой

Изучение указанных особенностей индукционно-стыковой сварки посредством моделирования показало, что наряду с обратно пропорциональной зависимостью глубины проникновения тока в нагреваемую поверхность от частоты кривая тепловыделения при её некотором значении имеет экстремум (табл. 2), что необходимо учитывать при определении технологии нагрева.

Табл. 2. Зависимость тепловыделения от частоты

$f, \text{кГц}$	2	4	6	8	10	20	30	40	50
$Q \cdot 10^7$ Вт/м^3	1,42	1,59	1,58	1,53	1,49	1,27	1,15	1,1	1,08

Для исследования эффекта близости рассмотрена зависимость плотности тока у поверхности изделия от величины теплоизолирующего зазора между ним и индуктором. При этом диапазон изменения зазора находится в пределах от $0,1 \text{ мм}$ до 5 мм .

Эксперимент проводился при различных частотах питающего тока от 2 кГц до 50 кГц . Результаты моделирования представлены на рис.7.

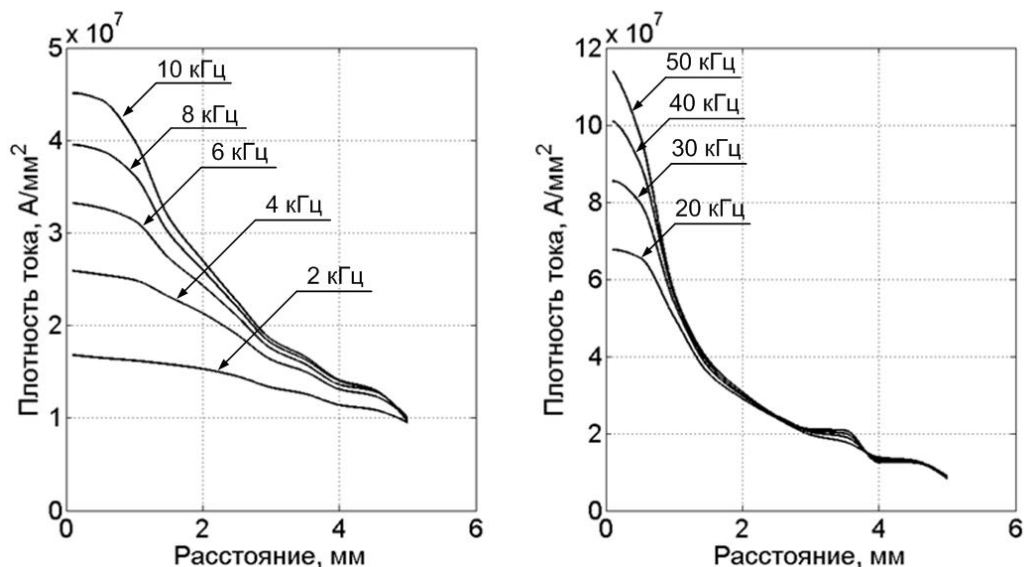


Рис. 7. Зависимость плотности тока от зазора при различных частотах

Из полученных графиков видно, что величина зазора сильно влияет на распределение тока в изделии, следовательно, на его нагрев. Поэтому минимизация зазора является одним из направлений повышения энергетических характеристик сварки. Однако следует учитывать необходимость теплоизоляции индуктора от изделия, что ограничивает величину минимального зазора.

Проблема разработки и совершенствования индукционно-стыковой сварки является многокритериальной задачей. Помимо чисто технологических вопросов разработанные математические модели индукционного нагрева и структуры их реализации позволяют качественно оценить направления построения систем управления индукционным нагревом с целью повышения его энергетических характеристик. Для этого проведено моделирование нескольких режимов управления, к которым относятся установки со стабилизацией напряжения, тока и мощности в индукторе, а также тока поверхностного слоя и поступающей в него активной мощности. Для сопоставления рассматриваемых режимов во всех случаях принято одно и то же конечное значение температуры поверхностного слоя (1400°C), а также одинаковое время её достижения ($3,5 \text{ с}$). При этом проанализирована получаемая из совмещённой модели динамика температуры поверхностного слоя, как одного из основных технологических параметров, поступающей в слой электрической и передаваемой во внутренние слои мощности. В качестве энергетических показателей рассмотрены изменение напряжения, тока, полной и активной мощно-

сти индуктора, коэффициента мощности и количества потреблённой за время нагрева до заданной температуры энергии. Одним из важных показателей оценки качества технологии в целом предлагается определение технологического коэффициента полезного действия η_m , который рассчитывается как отношение нагревающей непосредственно предназначенный для сварки поверхностный слой мощности к потребляемой индуктором активной мощности. Результаты сопоставительного анализа режимов представлены в табл. 3.

Табл. 3. Сводные энергетические показатели режимов управления индукционным нагревом

Стабилизируемый параметр		$U_{\text{и}}=\text{const}$	$I_{\text{и}}=\text{const}$	$P_{\text{и}}=\text{const}$	$I_1=\text{const}$	$P_1=\text{const}$
Напряжение на индукторе, В	U_{max}	2,75	3,1195	2,7798	4,0922	2,9167
	U_{min}	2,75	1,8786	2,7132	1,0213	2,0212
	$U_{\text{max}}/U_{\text{min}}$	1	1,6605	1,0245	4,0069	1,4431
Ток индуктора, А	I_{max}	$2,4555 \cdot 10^4$	16830	$2,3591 \cdot 10^4$	$2,3232 \cdot 10^4$	$1,8399 \cdot 10^4$
	I_{min}	$1,4822 \cdot 10^4$	16830	$1,4983 \cdot 10^4$	9175,2	$1,5462 \cdot 10^4$
	$I_{\text{max}}/I_{\text{min}}$	1,6567	1	1,5745	2,5320	1,19
Полная мощность индуктора, ВА	S_{max}	$6,7526 \cdot 10^4$	$5,2501 \cdot 10^4$	$6,2251 \cdot 10^4$	$9,0571 \cdot 10^4$	$5,1222 \cdot 10^4$
	S_{min}	$4,076 \cdot 10^4$	$3,1617 \cdot 10^4$	$4,1651 \cdot 10^4$	9370,2	$3,6554 \cdot 10^4$
	$S_{\text{max}}/S_{\text{min}}$	1,6567	1,6605	1,4946	9,6659	1,4013
Активная мощность индуктора, Вт	P_{max}	$2,2079 \cdot 10^4$	$2,5494 \cdot 10^4$	$2,0239 \cdot 10^4$	$4,3897 \cdot 10^4$	$2,2961 \cdot 10^4$
	P_{min}	$1,9807 \cdot 10^4$	$1,0327 \cdot 10^4$	$2,0239 \cdot 10^4$	3055,7	$1,1935 \cdot 10^4$
	$P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$	1,1147	2,4687	1	14,3656	1,9238
Ток первого слоя, А	$I_{1\text{max}}$	6552,6	4528,1	6300	2481	4914,3
	$I_{1\text{min}}$	1671,8	1815,2	1689,8	2481	1742,9
	$I_{1\text{max}}/I_{1\text{min}}$	3,9195	2,4946	3,7283	1	2,8196
Активная мощность первого слоя, Вт	$P_{1\text{max}}$	7222,7	4601,8	6626,6	7888,4	3893
	$P_{1\text{min}}$	3458,5	3287,0	3432,7	999,1	3893
	$P_{1\text{max}}/P_{1\text{min}}$	2,0884	1,4	1,9304	7,8955	1
Средний коэффициент мощности	$\cos\varphi_{\text{и.ср.}}$	0,4417	0,4208	0,4409	0,3807	0,4312
Средний технологический КПД	$\eta_{\text{т.ср.}}$	0,1956	0,2106	0,1959	0,2492	0,2045
Потреблённая индуктором энергия на нагрев, Дж	$W_{\text{и}}$	$7,11 \cdot 10^4$	$6,58810^4$	$7,083 \cdot 10^4$	$5,534 \cdot 10^4$	$6,879 \cdot 10^4$

Анализ основных энергетических показателей режимов индукционного нагрева показывает, что с эксплуатационной точки зрения наилучшие характеристики имеет режим стабилизации тока поверхностного слоя. При нём расходуется на нагрев энергии в 1,3 раза меньше, чем при неизменном напряжении на индукторе, а средний технологический КПД в 1,3 раза больше. Однако это достигается повышенными требованиями к диапазону изменения напряжения (4 кратное) и тока (2,5 кратное) индуктора. Одновременно режим характеризуется большим, чем у других режимов максимальным значением требуемой от индуктора активной мощности (почти 44 кВт). Поэтому реализация режима индукционного нагрева со стабилизацией величины тока в поверхностном слое требует тщательного технико-экономического обоснования для каждого конкретного производственного процесса.

Из других режимов индукционного нагрева достаточно энергетически близким к наилучшему и легко реализуемым является режим стабилизации тока индуктора. Наименее благоприятными энергетическими и регулировочными характеристиками обладает режим поддержания постоянства напряжения на индукторе.

В пятой главе рассматриваются принципы построения системы управления установкой индукционно-стыковой сварки, разрабатывается её функциональная схема и проводится синтез регуляторов.

При детализации процесса сварки в целом можно видеть, что весь его цикл состоит из подготовительного периода, а также интервалов времени нагрева свариваемых поверхностей, извлечения плоского индуктора из пространства между ними, последующего сдавливания и его выдержки с требуемой длительностью и усилием для достижения заданного качества сварного соединения. Как длительность каждого из периодов, так и интенсивность воздействия на сварное соединение, определяются параметрами конкретного изделия и реализуемой технологией.

Режимы индукционного нагрева достаточно полно проанализированы в предыдущих главах с помощью метода условной декомпозиции и даны рекомендации по их реализации. Однако достоинство метода заключается также в том, что имеется возможность исследовать интервал времени, связанный с неизбежным извлечением плоского индуктора из зоны нагрева и имеющимся при этом снижением температуры нагретых поверхностей за счёт теплопроводности во внутренний объём изделия и отдачи энергии в окружающую среду. Это оказывает влияние на выбор технологии сварки и реализации её средствами автоматизации.

С целью определения связи длительности нагрева и охлаждения поверхностного слоя при отключении индуктора было проведено моделирование этих процессов. При этом температура нагрева оставалась постоянной для всех вариантов и равнялась $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, а длительность нагрева определялась величиной нагревающего тока. Отключение его при достижении поверхностным слоем заданной температуры приводило к снижению температуры за счёт теплопроводности во внутренние слои. Длительность охлаждения определялась как интервал времени снижения температуры от начального ($1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) до конечного ($900\text{ }^{\circ}\text{C}$). Динамика нагрева и снижения температуры представлена на рис. 8.

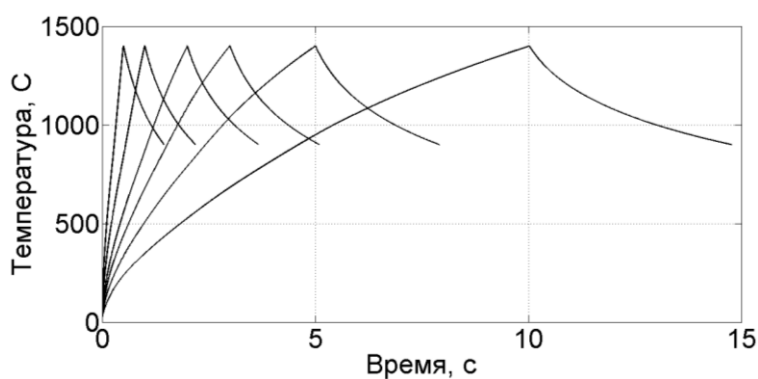


Рис. 8. Графики, характеризующие процессы нагрева и остывания при различном времени

Анализ полученных графиков показывает на то, что реализация индукционно-стыковой сварки посредством интенсивного нагрева ($0,5\text{ с}$) не приводит к повышению температуры внутренних слоёв за счёт теплопроводности. Это отражается на высокой скорости снижения температуры при отключении индуктора за счёт значительного количества тепла, передаваемо-

го во внутренние слои. Более длительный нагрев ведёт к прогреву внутренних слоёв и, соответственно, к уменьшению темпа охлаждения поверхностного слоя. Очевидно, что полученная зависимость должна учитываться при разработке авто-

матизации оборудования для индукционно-стыковой сварки на интервале извлечения индуктора и срабатывания устройства сдавливания поверхностей.

Однако, другой стороной длительности нагрева поверхностного слоя являются затраты энергии на этот этап технологического процесса. На рис. 9 приведена зависимость потребляемой энергии на нагрев от его длительности.

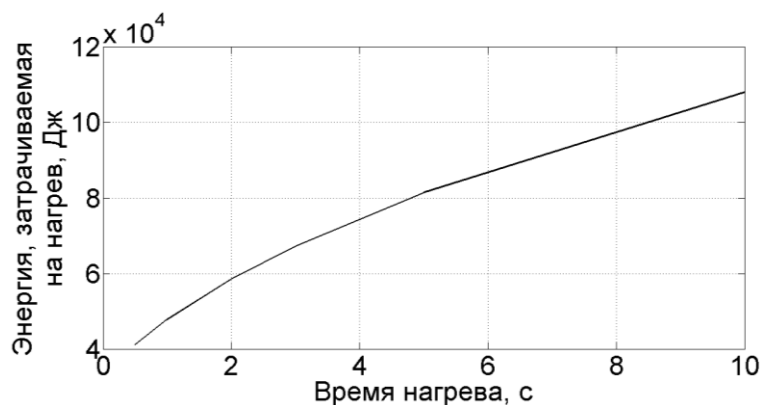


Рис. 9. Характеристика зависимости потребления энергии на нагрев от его длительности

Характер представленной зависимости указывает на то, что длительный нагрев энергетически нецелесообразен, поскольку потребляемая энергия идёт на повышение температуры внутренних слоёв, не принимающих непосредственного участия в создании неразъёмного соединения. Это явление делает необходимым поиск компромиссного решения при проектировании оборудования

с учётом энергопотребления и минимизации времени извлечения индуктора из пространства между нагреваемыми поверхностями.

Моделирование индукционного нагрева при учёте взаимного влияния источника энергии с нагреваемым изделием делает необходимым знание его характеристик при вариации параметров поступающей от источника энергии, а также изменения этих характеристик в зависимости от температуры. Не менее важно это знать и при разработке системы управления технологией нагрева. С этой целью было проведено экспериментальное исследование характеристик образцов ферромагнитных изделий при неизменной и переменной температуре. Некоторые результаты экспериментального исследования характеристик ферромагнитного образца при различной температуре нагрева и токах различной частоты представлены в виде графиков (рис. 10).

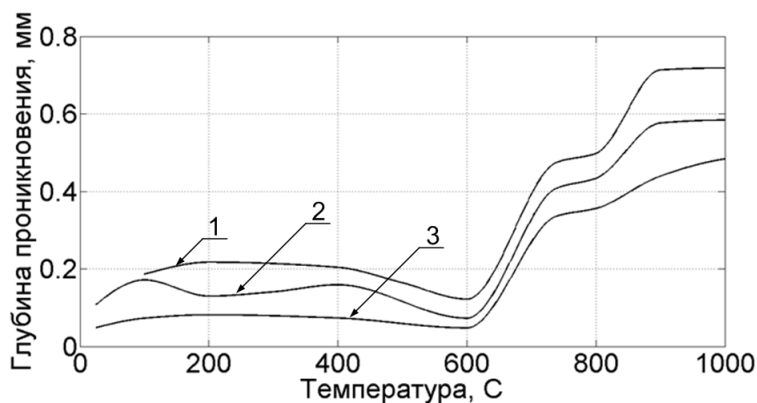


Рис. 10. Зависимость глубины проникновения тока от температуры: 1 – частота 10 кГц; 2 – частота 20 кГц; 3 – частота 5 кГц

В целом проведённое экспериментальное исследование ферромагнитных образцов показало существенное изменение внутренней индуктивности при нагреве проводника выше точки Кюри, а также глубины проникновения тока.

Проведённое исследование режимов нагрева с позиции оценки их энергетической эффективности, а также при учёте требований к источнику питания, позволяет рекомендовать для реализации режим стабилизации тока индуктора.

Он обладает минимальным потреблением энергии на нагрев при относительно высоком коэффициенте мощности и технологическом коэффициенте полезного действия. В то же время этот ре-

жим не предъявляет повышенных требований к диапазону изменения напряжения на индукторе и может быть реализован с помощью достаточно простых средств.

Синтез структурной схемы системы управления на основе оптимизации по модулю позволил выбрать интегральный регулятор напряжения с передаточной функцией

$$H_{pn}(p) = \frac{1}{k_{un} a \tau_{un} p},$$

где k_{un}, τ_{un} – коэффициент передачи и постоянная времени источника питания, $a=2$ при настройке на модульный оптимум.

Для компенсации постоянной времени индуктора применяем интегральный регулятор с передаточной функцией:

$$H_{pm}(p) = \frac{1}{k_u a \cdot 2 \tau_{un} p}.$$

В результате передаточная функция замкнутого контура регулирования тока индуктора имеет вид:

$$H_{zm}(p) = \frac{1}{8 \tau_{un} p + 1}.$$

Структурная схема системы стабилизации тока индуктора представлена на рис.11.

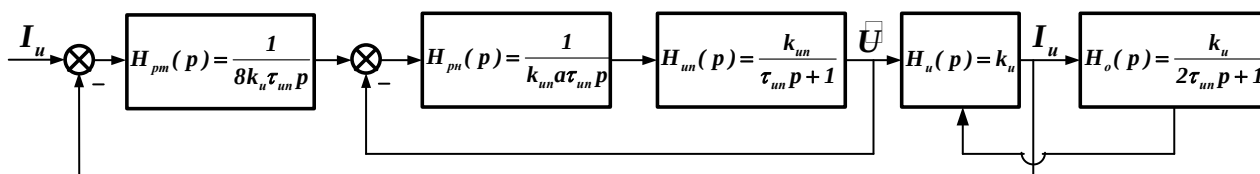


Рис. 11. Структурная схема контура регулирования тока индуктора

Для сопоставительной оценки качественных показателей образцов была проведена сварка наружным и плоским индуктором, показанным на рис. 12.

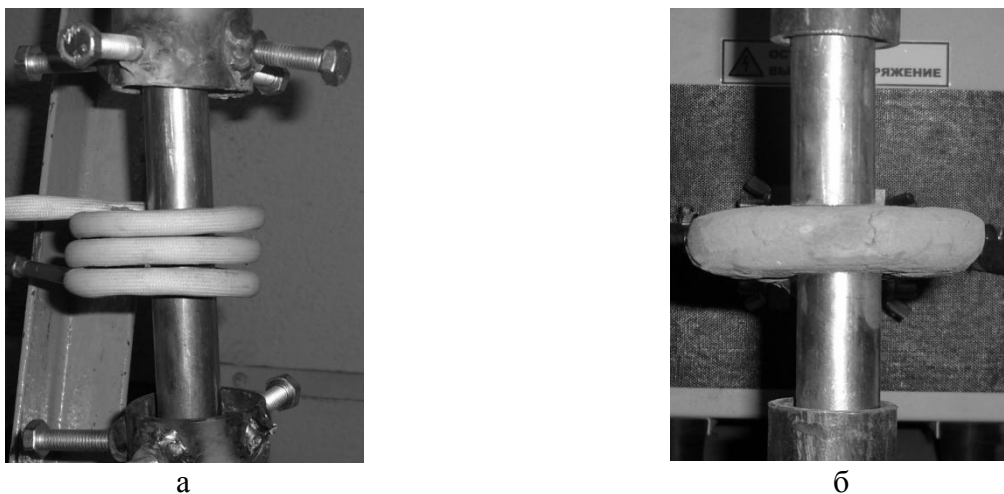


Рис. 12. Общий вид индукторов установки индукционно-стыковой сварки: а – наружный индуктор, б – плоский индуктор

Анализ параметров образцов индукционно-стыковой сварки указывает на превосходство сварки плоским индуктором по сравнению с наружным. В первом случае присутствует неизбежное утолщение околошовной зоны на 6 %, имеется грат 1,5 мм и достаточно широкая зона температурного влияния. При сварке плоским индуктором она меньше в 2,5 раза. Необходимо также учитывать преимущества плоского индуктора при сварке встык изделий с большой площадью свариваемых поверхностей.

Заключение

1. Проведённый анализ видов сварки показал на актуальность разработки новых видов стыковой сварки с целью расширения её технических возможностей, получения качественного сварного соединения и оптимизации её технико-экономических характеристик. На основе этого предложен способ индукционно-стыковой сварки, позволяющий получить следующие технико-экономические преимущества: равномерный нагрев ограниченной по глубине поверхности свариваемых изделий, уменьшение зоны температурного воздействия на околошовный объём изделия, энергосбережение, а также исключение нежелательной деформации нагретого объёма изделия при сжатии. Моделирование электромагнитного поля системы индуктор – ферромагнитное изделие позволило провести сравнение двух вариантов технологии индукционно-стыковой сварки и дало возможность оценить технологические и энергетические преимущества использования плоских индукторов, нагревающих непосредственно свариваемые поверхности, по сравнению с наружными индукторами.

2. Разработаны принципы структурного моделирования индукционного нагрева при стыковой сварке на основе условной декомпозиции нагреваемого изделия при вариативности удельного сопротивления, теплопроводности и теплоёмкости в соответствии с их нелинейными зависимостями от температуры. Созданы математические модели и их структурные схемы при многослойной декомпозиции нагреваемого изделия. Проведён факторный анализ влияния нелинейных характеристик изменяемых в процессе нагрева параметров на динамику температурных процессов. Показана значительная и в ряде случаев недопустимая погрешность расчётов при использовании стационарных значений удельного сопротивления, теплопроводности и теплоёмкости. Разработана структура управления моделью по температуре, позволяющая исследовать процесс охлаждения изделия при отключении питания индуктора, что является одним из этапов индукционно – стыковой сварки.

3. Обоснованы принципы создания модели источника энергии на основе представления индуктора и нагреваемого изделия в виде многообмоточного трансформатора с разомкнутым магнитопроводом. Разработаны структурные схемы многообмоточного трансформатора с индуктором в качестве первичной обмотки и слоёв изделия как вторичных обмоток с характеризующими их коэффициентами взаимоиндукции, а также активными и реактивными сопротивлениями для мгновенных и действующих значений напряжений и токов, а также на основе схемы замещения с вносимым сопротивлением. Представлена методика определения параметров математических моделей многообмоточного трансформатора на базе компьютерных программ полевого моделирования. Проведён анализ влияния кривой намагничивания слоёв нагреваемого изделия на параметры модели, показав-

ший возможность с достаточной точностью не учитывать её изменение по слоям в связи с незначительным изменением тока поверхностного слоя.

4. Составлена совмещённая модель расчёта тепловых процессов в индукционно нагреваемом изделии с учётом характеристик источника энергии и их взаимным влиянием. Моделирование динамики температурных процессов показало расширенные возможности совмещённой модели по получению широкого спектра информации, необходимой при разработке технологии индукционного нагрева и совершенствования применяемого оборудования.

5. Экспериментальное исследование ферромагнитных образцов указывает на изменение внутренней индуктивности при нагреве проводника выше точки Кюри. Однако моделирование индукционного нагрева показало на влияние этого явления на величину тока поверхностного слоя в пределах 2%, что позволяет не учитывать его при индукционно-стыковой сварке.

6. Выполнена оценка энергетических показателей различных режимов индукционного нагрева, проведено моделирование и рассчитаны их характеристики. Определен наиболее перспективный режим стабилизации тока индуктора, отвечающий как минимизации потребляемой энергии, так и рациональным диапазоном изменения напряжения и мощности. Разработана структурная схема реализации управления индукционно-стыковой сваркой со стабилизацией тока индуктора и проведён её синтез.

7. Сравнение характеристик экспериментальных образцов индукционно-стыковой сварки показывает преимущества использования плоских индукторов по сравнению с наружными по влиянию на искажение формы изделия, наличию грата и по величине околошовной зоны температурного воздействия.

Публикации по теме диссертации

В рекомендованных ВАК РФ научных журналах и изданиях

1. Долгих И.Ю. Моделирование динамики температурных процессов при индукционном нагреве / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв, В.М. Захаров // Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ). – Вып. 5. – 2014. – С. 57-63.

2. Долгих И.Ю. Разработка декомпозиционного метода исследования индукционно-стыковой сварки / А.С. Волков, И.Ю. Долгих // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва. 2015. № 2 (33). – С. 64-69.

3. Патент 2558802 Российская Федерация МПК В 23 К 13/01. Способ индукционно-стыковой сварки профилей различной конфигурации / А.Н. Королёв, В.В. Тютиков, И.Ю. Долгих, А.С. Орлов; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22.

В других изданиях

4. Долгих И.Ю. Исследование плоских индукторов / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: материалы Девятнадцатой Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 4 т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – Т. 2. – С. 296.

5. Долгих И.Ю. Моделирование вихревых токов в ферромагнитных материалах / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Тинчуринские чтения: материалы VIII Международной молодёжной научной конференции: в 4 т. – Казань: КГЭУ, 2013. – Т. 1. – С. 214-215.

6. Долгих И.Ю. Моделирование индукционного нагрева плоским индуктором в программе COMSOL MULTIPHYSICS / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв, В.Д. Лебедев // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVII Бенардосовские чтения): материалы Международной научно-технической конференции. – Иваново: ИГЭУ, 2013. – Т. 1: Электроэнергетика. – С. 12-15.
7. Долгих И.Ю. Особенности индукционного нагрева ферромагнитных поверхностей / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Энергия инноваций – 2012: материалы отчётной конференции молодых учёных ИГЭУ. – Иваново: ИГЭУ, 2013. – Т. 1. – С. 100-105.
8. Долгих И.Ю. Частотные характеристики ферромагнитных материалов / И.Ю. Долгих, В.В. Волков, А.Н. Королёв // Энергия-2013: материалы Восьмой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: в 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2013. – Т. 3. Ч. 2. – С. 80-83.
9. Долгих И.Ю. Исследование ферромагнитных материалов при нагреве / И.Ю. Долгих, В.В. Волков, А.Н. Королёв // Энергия-2013: материалы Восьмой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: в 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2013. – Т. 3. Ч. 2. – С. 83-87.
10. Dolgikh I., Korolev A., Orlov A. Induction heating exploration, 14th International Symposium TOPICAL PROBLEMS IN THE FIELD OF ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING, Parnu, Estonia, 2014, pp. 7-10.
11. Долгих И.Ю. Индукционный нагрев ферромагнитных материалов при переменных параметрах / И.Ю. Долгих, В.В. Волков, А.Н. Королёв // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: материалы Двадцатой Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 4 т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – Т. 2. – С. 282.
12. Долгих И.Ю. Исследование температурных процессов при индукционном нагреве / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Тинчуринские чтения: материалы IX Международной молодёжной научной конференции: в 4 т. – Казань: КГЭУ, 2014. – Т. 1. – С. 202.
13. Долгих И.Ю. Исследование многослойной модели индукционного нагрева / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Энергия-2014: материалы Девятой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: в 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – Т. 3. Ч. 2. – С. 3-7.
14. Долгих И.Ю. Исследование энергетических характеристик индукционного нагрева в программе ELCUT / И.Ю. Долгих, В.В. Волков, А.Н. Королёв // Энергия-2014: материалы Девятой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: в 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – Т. 3. Ч. 2. – С. 7-11.
15. I. Dolgikh, A. Korolev, V. Zakharov, Temperature processes of induction heating simulations, SCIENTIFIC ENQUIRY IN THE CONTEMPORARY WORLD: THEORETICAL BASICS AND INNOVATIVE APPROACH, Vol. 5. Technical Sciences, San Francisco, California, USA, 2014, pp. 68-74.
16. Долгих И.Ю. Исследование процессов нагрева поверхностей при индукционно-стыковой сварке / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Энергия инноваций – 2013: материалы отчётной конференции молодых учёных ИГЭУ. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – Т. 1. – С. 72-79.
17. Долгих И.Ю. Математическое моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв, В.М. Захаров // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: Материалы I Международной научной конференции молодых учёных. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 1. – С. 85-88.
18. Долгих И.Ю. Исследование характеристик индукционного нагрева методом послойной декомпозиции / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: материалы Двадцать первой Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 4 т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – Т. 2. – С. 244.

19. Долгих И.Ю. Моделирование электромагнитных процессов при индукционном нагреве на основе теории многообмоточного трансформатора / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Тинчуринские чтения: материалы X Международной молодёжной научной конференции: в 3 т. – Казань: КГЭУ, 2015. – Т. 3. – С. 48.
20. Долгих И.Ю. Повышение надёжности сварных соединений при индукционной сварке / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Надёжность и долговечность машин и механизмов: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2015. – С. 28-32.
21. Долгих И.Ю. Моделирование индукционного нагрева / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Энергия-2015: материалы Десятой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: в 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – Т. 3. – С. 140-142.
22. Долгих И.Ю. Расчёт параметров электромагнитной модели индукционного нагрева при использовании метода послойной декомпозиции / И.Ю. Долгих, А.С. Волков, А.Н. Ушаков, А.Н. Королёв // Энергия-2015: материалы Десятой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: в 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – Т. 3. – С. 146-147.
23. Долгих И.Ю. Исследование влияния нелинейных характеристик тепловой модели индукционного нагрева / И.Ю. Долгих, А.В. Горбатовский, Е.А. Помельников, А.Н. Королёв, А.С. Орлов // Энергия-2015: материалы Десятой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: в 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – Т. 3. – С. 149-151.
24. Долгих И.Ю. Декомпозиционный метод при моделировании индукционного нагрева / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: Материалы VII Международной научной конференции молодых учёных. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 2. – С. 50-53.
25. Долгих И.Ю. Декомпозиционная модель электромагнитных процессов при индукционном нагреве плоских изделий / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVIII Бенардосовские чтения): материалы Международной научно-технической конференции. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – Т. 1. – С. 14-17.
26. Долгих И.Ю. Методика расчёта электрических параметров многослойной модели индукционного нагрева / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVIII Бенардосовские чтения): материалы Международной научно-технической конференции. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – Т. 1. – С. 3-6.
27. Dolgikh I.Yu., Korolev A.N., Shapina Yu.O. Decomposition method for induction heating simulation, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol.2, no.3, pp. 8-13.
28. Долгих И.Ю. Исследование режимов управления индукционным нагревом для высокочастотной сварки / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Наука и инновации в технических университетах: материалы Девятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых учёных. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 18-20.
29. Долгих И.Ю. Использование плоских индукторов для стыковой сварки изделий больших сечений / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Наука и инновации в технических университетах: материалы Девятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых учёных. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 95-96.

Долгих Иван Юрьевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ИНДУКЦИОННО-СТЫКОВОЙ СВАРКИ**

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 05.07.2016 г. Формат 60х84¹/₁₆ Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 114
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ