

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

На правах рукописи



Долгих Иван Юрьевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИНДУКЦИОННО-СТЫКОВОЙ СВАРКИ

05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

к.т.н., доцент

Королёв Анатолий Николаевич

Иваново – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Основы индукционно-стыковой сварки.....	12
1.1. Состояние, перспективы и проблемы современных способов сварки...	12
1.2. Особенности технологии индукционного нагрева.....	15
1.3. Разработка основ индукционно-стыковой сварки.....	15
1.4. Обоснование применения плоских индукторов для нагрева свариваемых поверхностей при индукционной сварке	20
1.5. Результаты и выводы.....	28
Глава 2. Моделирование индукционного нагрева	30
2.1. Анализ существующих методик расчёта индукционного нагрева.....	30
2.2. Разработка основ математического моделирования температурных процессов индукционного нагрева методом условной декомпозиции	36
2.2.1. Обоснование принципов разработки модели	36
2.2.2. Разработка принципов построения однослойной математической модели.....	39
2.3. Особенности построения двухслойной модели.....	43
2.4. Разработка общего вида многослойной математической модели индукционного нагрева	44
2.5. Исследование характера влияния нелинейно-зависимых параметров материала изделия на динамику нагрева	48
2.6. Исследование влияния теплоотдачи в окружающую среду.....	54
2.7. Разработка системы управления моделью по температуре	56
2.8. Результаты и выводы.....	57
Глава 3. Разработка основ моделирования динамики электромагнитных процессов в источнике энергии при индукционном нагреве	59
3.1. Физические основы предлагаемого метода	59
3.2. Математическая модель многообмоточного трансформатора с различными коэффициентами взаимоиндукции и параметрами обмоток	60

3.3. Модель трансформатора для действующих значений напряжений и токов	66
3.4. Модель многообмоточного трансформатора с учётом вносимого в цепь индуктора сопротивления слоёв	69
3.5. Методика определения параметров математической модели трансформатора	71
3.6. Совмещённая модель расчёта динамики процессов с учётом характеристик источника энергии	80
3.7. Результаты и выводы	86
Глава 4. Исследование характеристик индукционного нагрева плоских поверхностей при индукционно-стыковой сварке	87
4.1. Анализ основных особенностей индукционно - стыковой сварки	87
4.2. Режимы управления индукционным нагревом	99
4.2.1. Режим стабилизации напряжения на индукторе	101
4.2.2. Режим стабилизации тока индуктора	103
4.2.3. Режим стабилизации мощности индуктора	108
4.2.4. Режим стабилизации тока в первом слое	112
4.2.5. Режим стабилизации мощности в первом слое	116
4.3. Сопоставительный анализ режимов управления индукционным нагревом при индукционно-стыковой сварке	120
4.4. Результаты и выводы	123
Глава 5. Система управления индукционно-стыковой сваркой	125
5.1. Характеристики цикла индукционно-стыковой сварки	125
5.2. Экспериментальное исследование характеристик ферромагнитных материалов при различных частотах тока и температурах нагрева	129
5.3. Разработка структурной схемы системы реализации энергетически эффективного режима	134
5.4. Характеристики экспериментальных образцов индукционно-стыковой сварки	144
5.5. Результаты и выводы	146

Заключение	147
Библиографический список	150
Приложение 1. Акт внедрения диссертационной работы Долгих И.Ю.	160
Приложение 2. Проверка адекватности работы модели путём сравнения с инженерными методами расчёта	162
Приложение 3. Анализ адекватности разработанной тепловой модели путём сравнения результатов расчёта с её помощью и по программе Comsol Multiphysics	169
Приложение 4. Алгоритм работы системы управления по заданной температуре.....	172
Приложение 5. Методика определения параметров модели для расчёта электромагнитных процессов в индукторе и нагреваемом изделии	173
Приложение 6. Расчёт вносимых сопротивлений слоёв в электрическую цепь индуктора	180
Приложение 7. Экспериментальное определение характеристик нагреваемых изделий	184
Приложение 8. Технические характеристики индукционных нагревателей СЧ-40АВ и ВЧ-40АВ.....	189

Введение

Актуальность

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 актуальной 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 поля 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 к расчёту и анализу 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.

Постановка задач

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 воздействии 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» (Приложение 1).

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 электротехнологии» (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.

Глава 1. Основы индукционно-стыковой сварки

1.1. Состояние, перспективы и проблемы современных способов сварки

Сварка, как один из важных компонентов технологии изготовления изделий из металла, известна достаточно давно [34, 62, 86] и используется в самых различных отраслях промышленности [10, 38, 40, 45, 62]. Её достоинства заключаются в возможности получения изделий сложной конфигурации [10, 36, 64, 68], в неразборном соединении отдельных частей с заданным уровнем его прочности, в гибкости включения в единый технологический комплекс производства продукции. Классификация видов сварки представлена на рис.1.1.



Рис. 1.1. Классификация видов сварки

Анализ различных видов сварки позволяет, не отвергая некоторые, имеющие преимущества в узком ряде конкретных случаев, сделать выбор наиболее широко используемых и перспективных из них. К ним, прежде всего, относится группа технологии сварки на основе использования электрического тока. Достоинства её заключаются в широком спектре технических возможностей реализации, возможности регулирования температурных режимов, автоматизации процессов, технико-экономических и экологических преимуществах [17, 35, 62]. Это связано с тем, что величиной электрического тока и, следовательно, количеством выделенного в сварном соединении тепла легко управлять, подбирая их под конкретную технологию [17, 33, 55, 58]. В то же время установки на основе использования электрической энергии могут быть автоматизированы с использованием не только прямого, но и косвенного контроля качества, как собственно технологии, так и готового продукта [53, 54, 57, 59]. Особое значение при этом имеют показатели производительности производства изделий, энергосбережения и улучшения условий труда.

Из класса технологий электрической сварки следует выделить контактную сварку, широко применяющуюся в автомобилестроении, в производстве труб и в других отраслях промышленности [2, 22, 78, 81]. Процесс образования сварного соединения происходит в результате нагрева деталей по всей поверхности их касания до требуемой по технологии температуры и одновременном или последующем их сжатии. При этом могут применяться различные способы нагрева свариваемых деталей, однако наибольшее распространение получило выделение тепла в месте контакта свариваемых поверхностей за счёт пропускания тока требуемой величины [7, 33, 44, 51].

Однако, при всей простоте такого технического решения, нагрев посредством пропускания электрического тока ограничен как требованиями к качеству сварного соединения, так и видом соединяемых частей изделия. Например, контактная сварка в автомобилестроении гарантирует сварное

соединение без высоких требований к качеству по всей его площади. При этом свариваемые листы имеют невысокую толщину и легко позволяют провести сжатие в месте соединения. В то же время попытки применить контактную сварку для бесшовного соединения рельсов привели к необходимости усложнения технологии с целью гарантированно равномерного сварного соединения по всей его площади [54]. Одновременно шовная сварка труб, относящаяся также к контактной, кроме указанного недостатка, имеет пониженные энергетические характеристики за счёт токов шунтирования [73, 82]. Всё это делает необходимым поиск технических решений нагрева соединяемых сваркой поверхностей различной конфигурации и площади с помощью электрической энергии.

Одной из специфичных технологий является сварка встык [7, 43, 51, 60]. При этом свариваемые поверхности либо равны по величине, либо ограничены частью изделия с минимальной площадью. В этом случае определяющим фактором является качество соединения по всей его площади. Например, при соединении рельсов встык и использовании контактного вида сварки [54] для реализации равномерности нагрева по всему сечению система управления определяла его качество по косвенному показателю, к которому относится удельное усилие сдавливания, и вносила дополнительную энергию на завершающем этапе сварки. Очевидно, что такой подход снижает энергетические характеристики технологического процесса и не является абсолютной гарантией конечного качества соединения. Таким образом, сварка встык требует иных подходов в решении указанных проблем.

Всё это делает актуальной разработку средств и технологии сварки встык, обеспечивающих повышение показателей её качества. Наиболее перспективным в этом отношении является использование индукционного нагрева.

1.2. Особенности технологии индукционного нагрева

Индукционный нагрев имеет самое широкое распространение в различных отраслях промышленности [3, 6, 8, 15, 28, 29, 30, 63, 69]. Основное его достоинство заключается в передаче энергии от источника к нагреваемому телу с помощью электромагнитного поля, то есть без их гальванической связи. При этом возможна реализация технологии нагрева при нахождении источника и нагреваемой субстанции в разных средах. Это достоинство широко используется при выплавке высококачественных сплавов в вакуумных печах при ограниченном доступе атмосферного воздуха и минимизации его отрицательного влияния на качество готовой продукции [9, 37, 73, 79].

Другой особенностью индукционного нагрева является зависимость глубины проникновения электромагнитной энергии в изделие от параметров его материала и частоты питающего индуктор тока. Эта особенность позволяет осуществлять нагрев изделия только на желаемую глубину, что целесообразно, например, при поверхностной закалке [19, 23, 32, 41, 50]. При этом могут быть использованы индукторы различной конфигурации с целью нагрева поверхностей заданного вида [71, 84].

Немаловажную роль играет возможность организации процесса закалки, как прерывистым, так и непрерывным способом [23, 41]. Это позволяет разрабатывать оптимизированные по производительности труда установки.

1.3. Разработка основ индукционно-стыковой сварки

Возможность передачи значительного количества энергии от источника к нагреваемому телу указывает на целесообразность применения индукционного нагрева для сварки [5, 44, 67, 73, 82]. Одним из примеров такого использования может служить способ диффузионной сварки в вакууме многослойных изделий из разнородных сталей [56], при котором нагрев свариваемых частей осуществляется с помощью многовиткового

индуктора, внутрь которого помещаются свариваемые кольца. При этом для исключения нежелательной деформации сварку осуществляют в два этапа. На первом этапе задают большое усилие сдвливания при невысоких значениях тока индуктора и температуры нагрева. На втором интенсифицируют процесс диффузии, повышением температуры нагрева, резко снижая усилие сдвливания. Такое снижение усилия приходится делать потому, что многovitковый индуктор нагревает равномерно не только поверхности, участвующие в создании сварного соединения, а весь объём металла колец из свариваемой мартенситной стали. Она же обладает повышенной ползучестью при высоких температурах, необходимых для интенсификации процесса диффузии, что способно привести к недопустимым деформациям колец. Указанный недостаток возникает вследствие равномерности нагрева металла в индукторе, в то время как для получения качественного сварного соединения необходимо нагреть только поверхностные слои в месте их касания на глубину эффективной диффузии. Нагрев остальной части изделия не только отрицательно сказывается на технико-экономических показателях и снижает энергоэффективность сварочного процесса в связи с затратами большего количества электроэнергии, но и оказывает неблагоприятное влияние на качество получаемых сварных соединений ввиду возможных деформаций, возникающих в процессе сжатия. Устранение указанного недостатка существенно усложняет процесс и снижает его производительность в связи с увеличением временных затрат.

Для устранения этих недостатков более перспективным представляется использование для нагрева свариваемых деталей плоских индукторов [11, 24, 25, 26]. На рис. 1.2 представлены конструктивные формы применяющихся в настоящее время для сварки наружных и предлагаемых плоских индукторов.

В предлагаемом варианте плоский индуктор оказывает электромагнитное воздействие непосредственно на поверхности, участвующие в создании сварного соединения, вследствие чего в них

наводятся токи, являющиеся причиной нагрева. При этом пространственное расположение протекания токов определяется формой индуктора, а требуемая глубина нагреваемого слоя – частотой первичного тока [73]. Таким образом, при использовании плоского индуктора, форма которого соответствует профилю нагреваемых поверхностей, а также путём подбора частоты можно добиться требуемого тепловыделения в изделиях, что при последующем их сжатии приведёт к получению качественного сварного соединения при улучшенных энергетических и технико-экономических показателях процесса.



Рис. 1.2. Формы индукторов для закалки цилиндрических (а) и плоских поверхностей (б)

Предлагаемый способ [61] может быть использован для сварки изделий встык (рис. 1.3) при любом профиле поперечного сечения и для сварки внахлёт для плоских лент (рис. 1.4). В процессе сварки между свариваемыми изделиями – 1 помещается стыковой индуктор – 2, форма которого соответствует профилю свариваемых поверхностей. Индуктор подключается к источнику питания с заданной частотой тока. Свариваемые поверхности – 3 нагреваются до требуемой температуры, которая определяется длительностью протекания тока. Далее индуктор удаляется из зоны сварки, и свариваемые части изделия сдавливаются с заданным усилием Р.

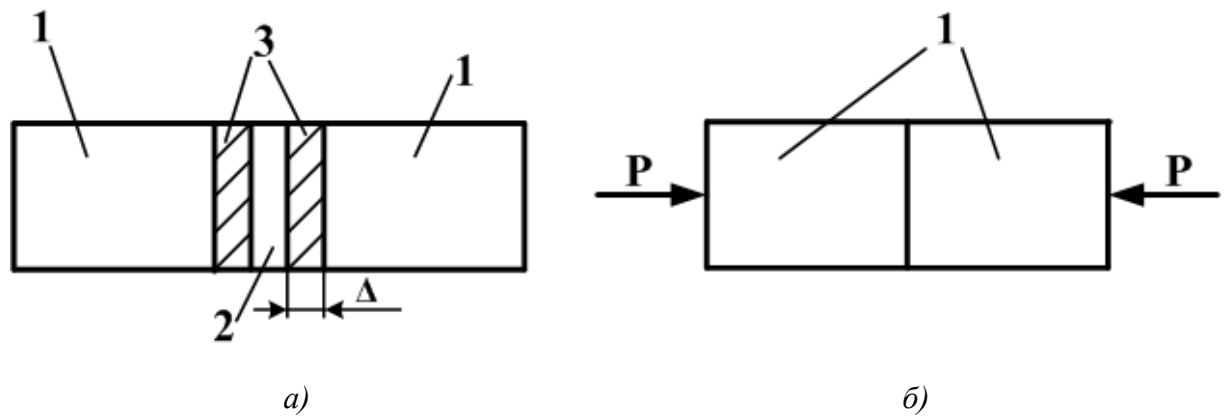


Рис. 1.3. Индукционно-стыковая сварка изделий встык: 1 – свариваемые изделия; 2 – стыковой индуктор; 3 – нагреваемая поверхность, непосредственно участвующая в создании сварного соединения

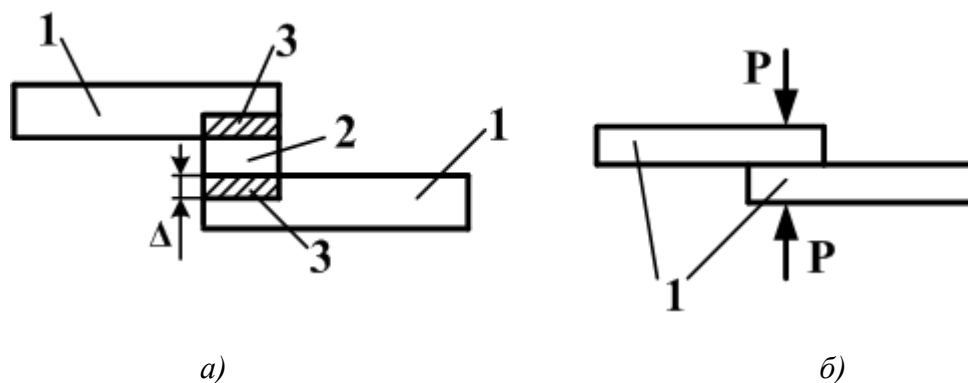


Рис. 1.4. Индукционно-стыковая сварка изделий внахлест: 1 – свариваемые изделия; 2 – стыковой индуктор; 3 – нагреваемая поверхность

По сравнению с известными аналогами [54, 56, 60] предложенный способ позволяет повысить качество сварного соединения и оптимизировать энергетические характеристики процесса сварки за счёт равномерного нагрева до требуемой температуры и на заданную глубину только тех поверхностей, которые непосредственно участвуют в создании сварного соединения.

В целом способ индукционно-стыковой сварки осуществляется следующим образом:

– перед началом сварки двух изделий – 1 встык (рис. 1.3,а) или внахлест (рис. 1.4,а) между их свариваемыми поверхностями – 3 устанавливают стыковой индуктор – 2, который, например, для сварки труб

(рис. 1.5) представляет собой выполненную в виде плоского кольца – 2 катушку индуктивности с проводниками – 1;

- в стыковой индуктор – СИ подаётся электрический ток от источника питания – ИП (рис. 1.6), частота тока которого подбирается в зависимости от заданной глубины нагрева свариваемых поверхностей – 3 (рис. 1.3,а; 1.4,а);

- длительность протекания тока в стыковом индукторе определяется блоком управления процессом сварки – БУ в зависимости от заданной температуры нагрева (рис. 1.6);

- после завершения нагрева свариваемых поверхностей – 3 источник питания отключается от индуктора – 2;

- индуктор – 2 удаляется из зоны сварки и изделия – 1 сдавливаются внешним устройством с заданным усилием Р (рис. 1.3,б; 1.4,б).

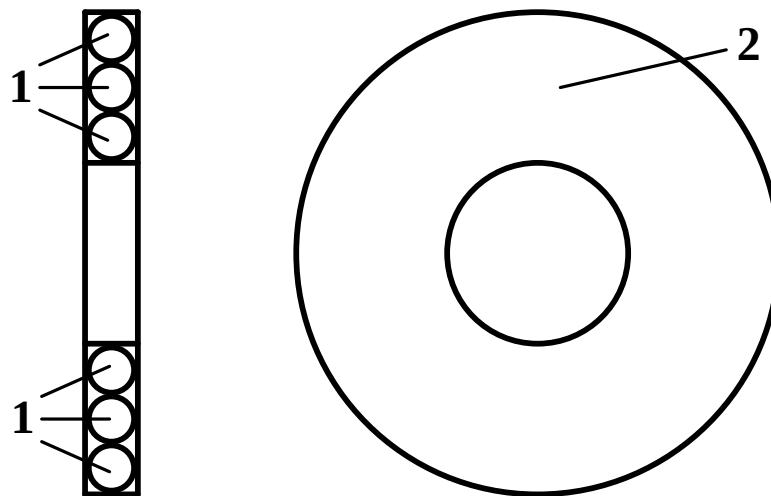


Рис. 1.5. Эскиз индуктора для стыковой сварки труб

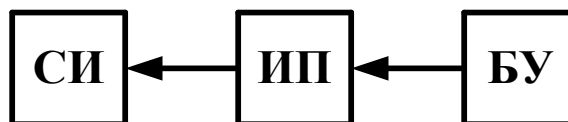


Рис. 1.6. Функциональная схема системы управления сваркой:

СИ – стыковой индуктор; ИП – источник питания стыкового индуктора; БУ – блок управления процессом сварки, задающий частоту и длительность протекающего тока в индукторе

Применение предложенного способа индукционно-стыковой сварки обеспечивает получение высокого качества сварных соединений с оптимизацией энергетических характеристик процесса сварки за счёт:

- равномерного нагрева ограниченной по глубине поверхности свариваемых изделий;
- применения плоского стыкового индуктора, обеспечивающего равномерный нагрев свариваемых поверхностей;
- подбора частоты тока, подаваемого в индуктор и обеспечивающего заданную глубину нагрева поверхности;
- обеспечения заданной длительности протекания тока в индукторе для получения требуемой температуры нагрева поверхностей;
- уменьшения зоны температурного воздействия на околошовный объём изделия;
- отсутствия затрат энергии на нагрев объёма изделия около свариваемых поверхностей, не участвующих в процессе создания сварного соединения;
- исключения нежелательной деформации нагретого объёма изделия при сжатии.

1.4. Обоснование применения плоских индукторов для нагрева свариваемых поверхностей при индукционной сварке

Теоретическое обоснование перспективности использования плоских индукторов при индукционной сварке может быть выполнено путём сравнения технологических и технико-экономических характеристик предлагаемого метода нагрева свариваемых поверхностей с применяемыми в настоящее время для тех же целей внешними цилиндрическими индукторами. При этом определяющим показателем при выборе лучшей технологии является равномерность нагрева свариваемых кромок, способствующая получению качественного и надёжного сварного соединения при отсутствии нежелательных дефектов, к которым относятся, в

первую очередь, грат и непровар. В то же время, существует необходимость минимизации подвергающейся термическому воздействию околошовной зоны, способной привести к деформации в месте сварки, а также стать причиной возможного разрушения готового изделия. Наконец, весьма существенными факторами являются время, затрачиваемое на нагрев до требуемой температуры, уменьшение которого даёт возможность повысить производительность технологического процесса, и количество затрачиваемой на нагрев энергии, обуславливающее его экономическую эффективность.

Использование для сварки внешних индукторов приводит к нагреву всего объёма изделий вблизи стыка, при котором глубинные слои прогреваются за счёт теплопередачи, обусловленной теплопроводностью. Такое техническое решение имеет ограниченную область применения и рационально к использованию при сварке тонкостенных труб и изделий сплошных сечений небольших размеров. При этом для обеспечения равномерного нагрева по всему сечению применяют токи сравнительно небольшой величины со значительным временем нагрева. Очевидно, что сварка изделий больших толщин и диаметров (более 30 мм) требует столь длительного времени нагрева, что процесс становится нерациональным [51]. Кроме того, неблагоприятное воздействие в этом случае оказывает нежелательная теплопередача в изделия по их длине, увеличивающая зону неблагоприятного температурного воздействия, что приводит к ухудшению их прочностных характеристик.

В связи с этим большим преимуществом использования плоских индукторов является возможность электромагнитного воздействия непосредственно на свариваемые кромки, по которым происходит создание неразъёмного соединения. Указанное обстоятельство позволяет путём подбора для конкретного изделия вида технологии обеспечить заданный уровень нагрева требуемой области, уменьшая тем самым зону термического воздействия.

Исследование указанных характеристик было выполнено на примере стыковой сварки толстостенных стальных труб с наружным диаметром 102 мм и толщиной стенки 10 мм. С этой целью в среде полевого моделирования Comsol Multiphysics были разработаны математические модели с различной конструкцией применяемых индукторов. В первом случае использовался двухвитковый внешний индуктор, а во втором – в виде плоской катушки индуктивности. Поставленная задача была реализована путём совместного расчёта электромагнитных и тепловых полей в соответствующих модулях при осесимметричной постановке.

Геометрия разработанных моделей (рис. 1.7, 1.8) включает в себя индуктор – 1, выполненный из медной водоохлаждаемой трубки диаметром 8 мм и толщиной стенки 1 мм, свариваемые изделия – 2 и расчётную область – 3, ограниченную с одной стороны осью симметрии, а с другой – линией окружности, находящейся на значительном расстоянии от источников поля. В качестве граничных условий принимается равенство нулю векторного магнитного потенциала. Величина воздушного зазора между свариваемыми изделиями, а также между ними и индуктором в обоих случаях принята равной 1 мм.

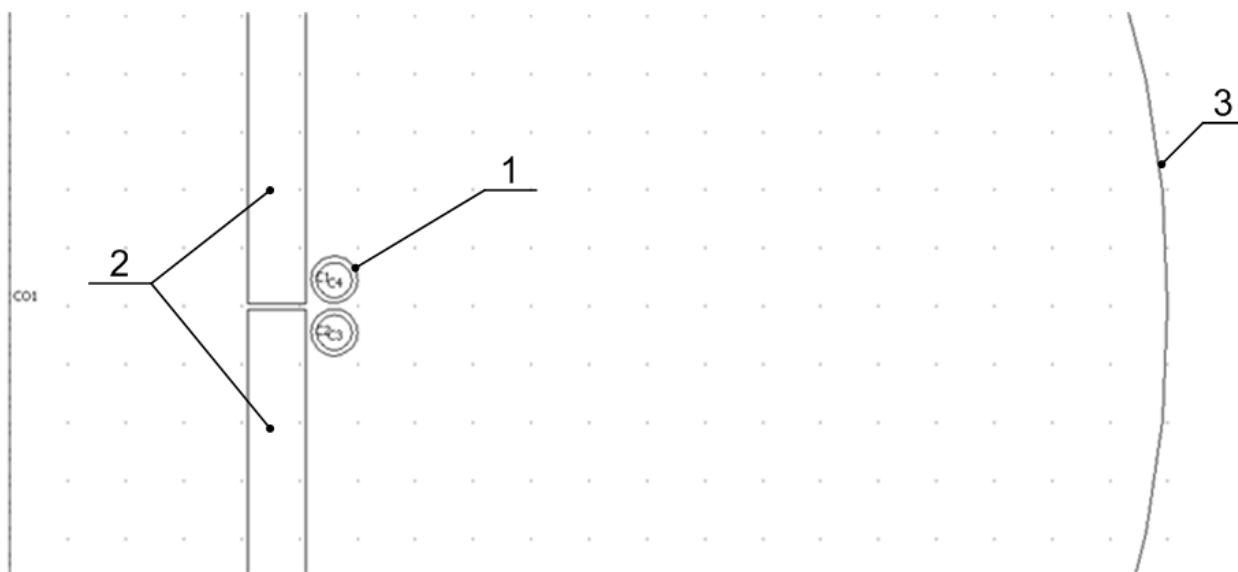


Рис. 1.7. Геометрия математической модели при нагреве изделий внешним индуктором

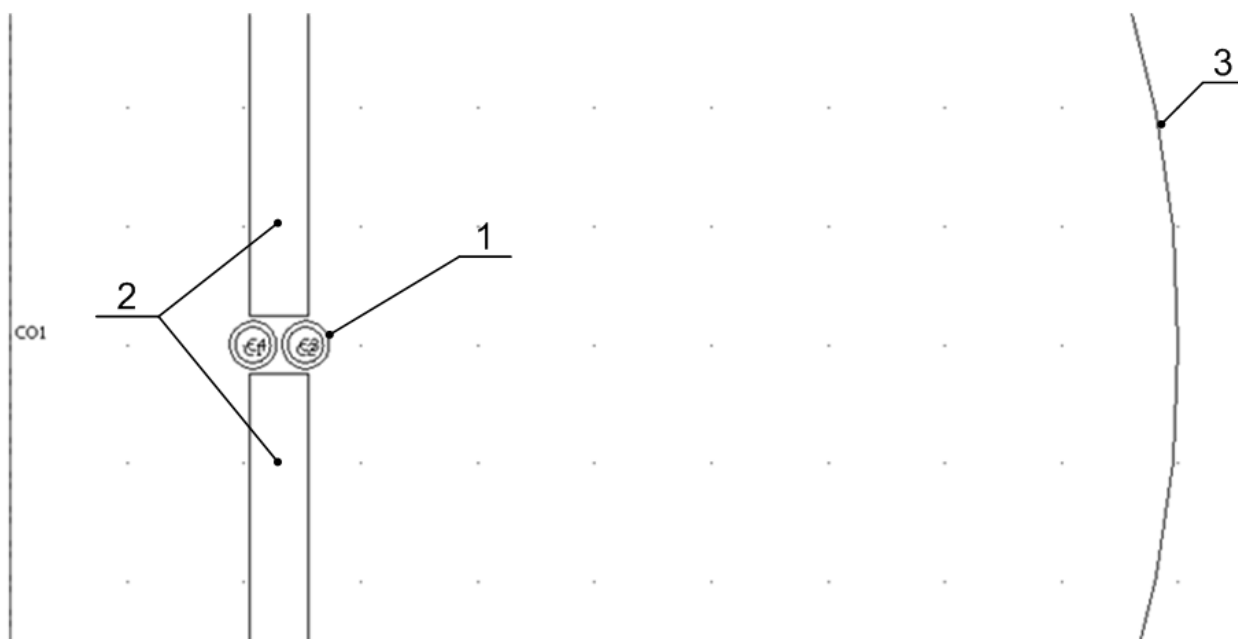


Рис. 1.8. Геометрия математической модели при нагреве изделий плоским индуктором

Исходными данными разработанных моделей является ток в индукторе высокой частоты ($f=50$ кГц), стабилизированный по величине, которая подбирается из условия получения такого характера нагрева, при котором обеспечивается равномерное распределение температуры по всему сечению. Кроме того, задаются параметры, описывающие физические свойства используемых материалов и окружающего воздуха. При этом значения параметров материала изделий, характеризующие его теплофизические и магнитные свойства (теплоёмкость, теплопроводность и относительная магнитная проницаемость) приняты для обеих моделей постоянными и равными их средним значениям в интервале применяемых температур, а температурная зависимость удельного электрического сопротивления учтена путём линейной аппроксимации на основе температурного коэффициента сопротивления. Аналогичные параметры индуктора приняты постоянными и соответствующими начальной температуре поскольку, индуктор охлаждается дистиллированной водой. В целом значения указанных и других характерных для моделей параметров сведены в табл. 1.1.

В качестве желаемой принята температура на поверхности изделия 1350 °С, что соответствует рекомендациям [5].

Таблица 1.1. Физические свойства применяемых материалов

	Свариваемые изделия	Индуктор	Охлаждающая индуктор вода	Расчётная область
Удельное электрическое сопротивление (при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$), Ом·м	$160 \cdot 10^{-9}$	$1,754 \cdot 10^{-8}$	-	-
Температурный коэффициент сопротивления	0,004	-	-	-
Магнитная проницаемость	100	1	1	1
Плотность, кг/м ³	7800	8930	1000	1,293
Теплоёмкость, Дж/(кг·°C)	460	340	4187	1010
Теплопроводность, Вт/(м·°C)	58	384	0,6	0,026

На рис. 1.9 – 1.11 представлены картины распределения магнитного поля и температуры в расчётной области, полученные при использовании внешнего цилиндрического индуктора с численным значением тока 675 А и временем нагрева 93 с, а также плоского индуктора с током 1200 А и временем нагрева 22 с. Различие токов в обоих случаях объясняется необходимостью исключения перегрева наружной поверхности при использовании внешнего индуктора, осуществляющего инерционный нагрев внутреннего объёма за счёт теплопроводности [5].

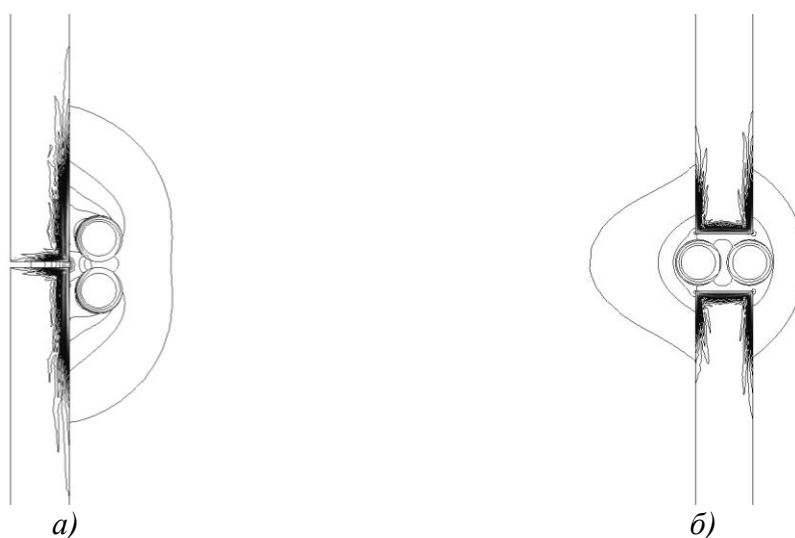


Рис. 1.9. Картина распределения магнитного поля в расчётной области:

а – наружный индуктор; б – плоский индуктор

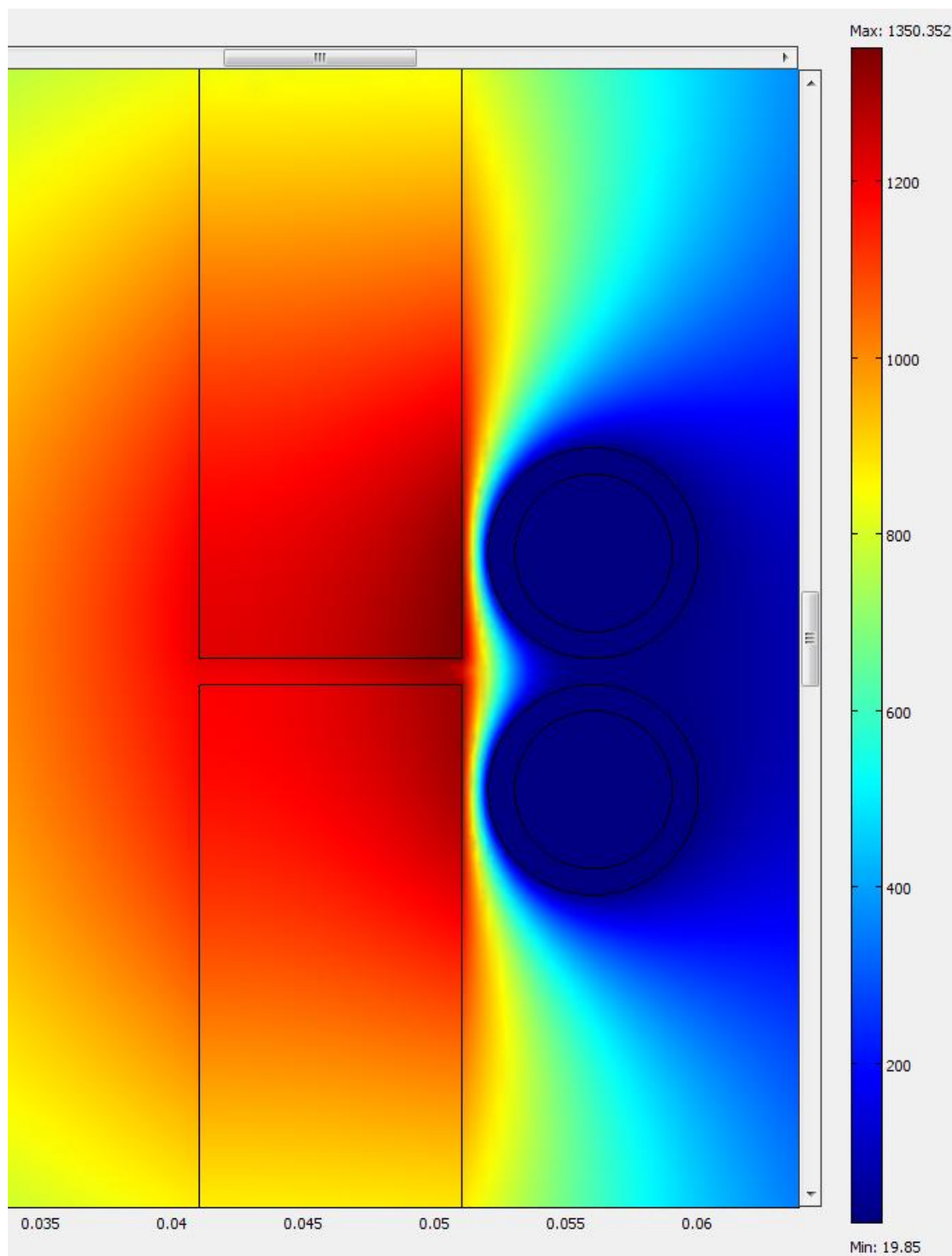


Рис. 1.10. Картина распределения температуры в расчётной области при использовании внешнего цилиндрического индуктора

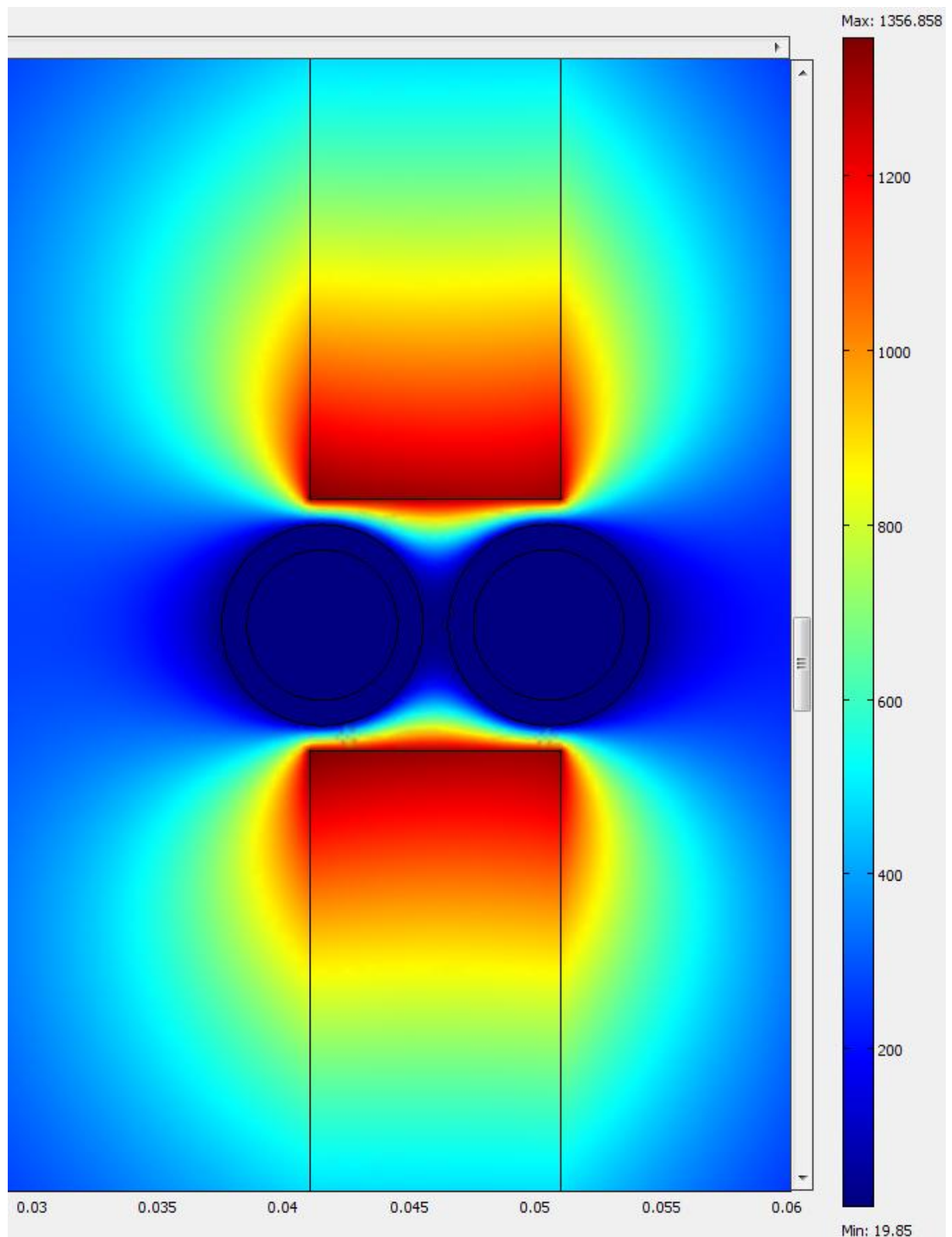


Рис. 1.11. Картина распределения температуры в расчётной области при использовании плоского индуктора

Анализ полученных результатов говорит о том, что для осуществления индукционно-стыковой сварки наиболее благоприятная картина наблюдается при использовании плоских индукторов, что объясняется концентрацией

магнитного поля непосредственно на поверхностях изделий, по которым осуществляется сварное соединение. Это, в свою очередь, приводит к более равномерному распределению плотности тока на свариваемых поверхностях и, как следствие, температуры (рис. 1.12, 1.13).

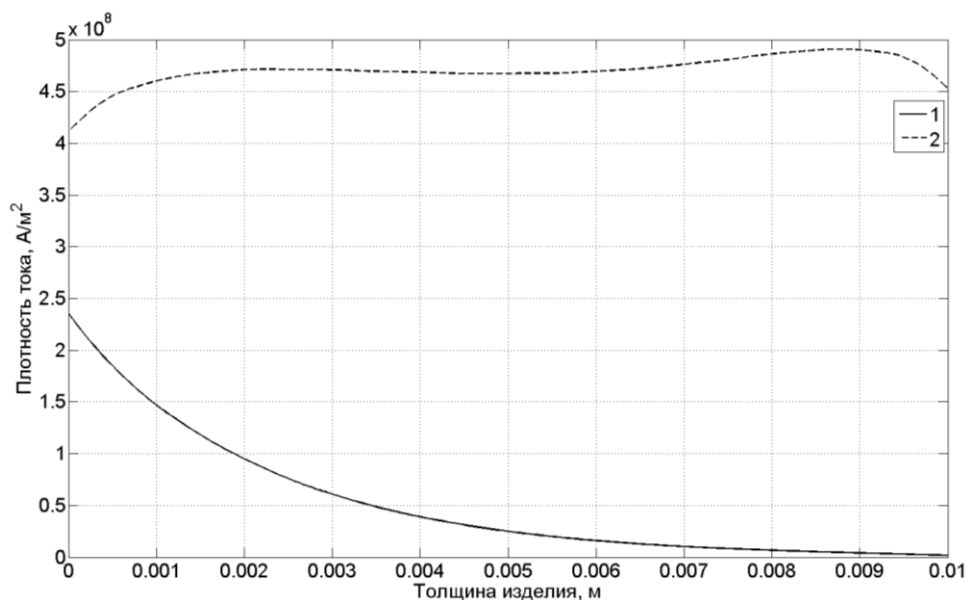


Рис. 1.12. График зависимости плотности тока по толщине изделия:

1 — наружный индуктор; 2 — плоский индуктор

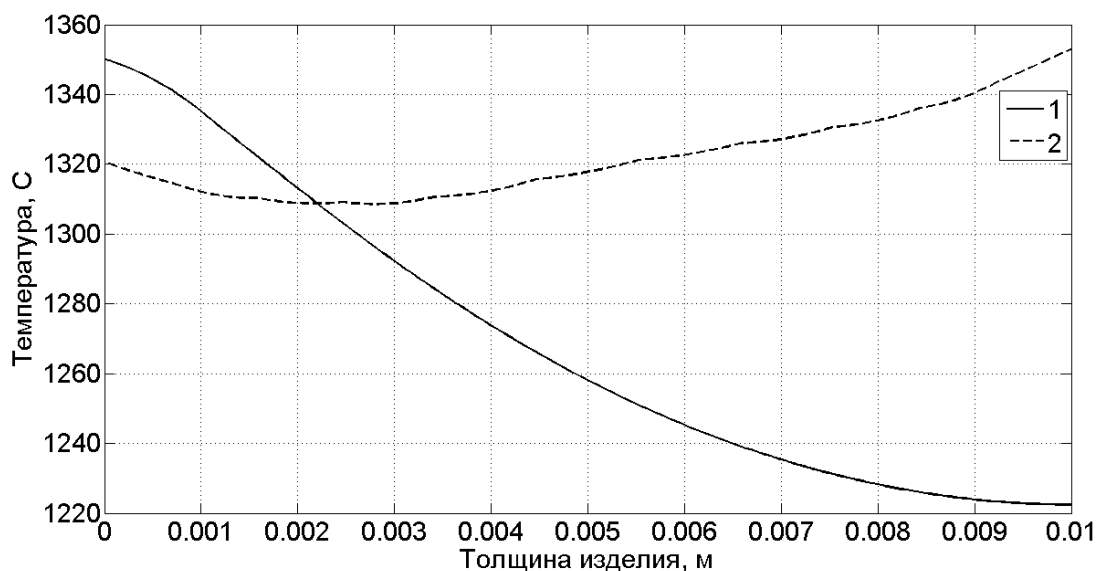


Рис. 1.13. График зависимости температуры по толщине изделия:

1 — наружный индуктор; 2 — плоский индуктор

В целом результаты определения основных параметров, характеризующих процесс индукционного нагрева в рамках индукционно-

стыковой сварки, сведены в табл. 1.2. При этом при оценке ширины околошовной зоны, подвергшейся термическому воздействию, учитывался участок изделия, нагревающийся до температуры более 400 °С.

Таблица 1.2. Анализ основных критериев оценки перспективности использования двух видов индукторов

	<i>Время нагрева, с</i>	<i>Температурный перепад, °С</i>	<i>Энергия, затрачиваемая на нагрев, Дж</i>	<i>Зона термического влияния, мм</i>
<i>Наружный индуктор</i>	92	128	$9,8 \cdot 10^5$	47
<i>Плоский индуктор</i>	17	45	$4,1 \cdot 10^5$	20

Анализ полученных результатов говорит о существенной неравномерности нагрева по толщине стенки изделия при использовании внешнего индуктора (рис. 1.13), когда перепад температуры между наружной и внутренней поверхностями изделия составляет более 120 °С. При этом дальнейшее увеличение времени нагрева при одновременном уменьшении сварочного тока, способное сделать нагрев более равномерным, приводит к существенному увеличению зоны термического влияния, оказывающей неблагоприятное воздействие на прочностные характеристики готового изделия.

В связи с этим более перспективным в области осуществления индукционно-стыковой сварки представляется использование плоских индукторов, обеспечивающих более равномерный нагрев по толщине изделия при значительно меньшей зоне термического влияния. При этом применение больших по величине токов компенсируется существенно меньшим временем нагрева, что обуславливает затраты на нагрев меньшей по величине электрической энергии.

1.5. Результаты и выводы

2. Проведённый анализ видов сварки указывает на актуальность разработки новых видов стыковой сварки с целью расширения её

технических возможностей, получения качественного сварного соединения и оптимизации её технико-экономических характеристик.

3. Аналитический обзор характеристик индукционного нагрева позволил сделать вывод о целесообразности его применения для сварки.

4. Предложенный способ индукционно-стыковой сварки, имеет следующие технико-экономические преимущества:

- равномерный нагрев ограниченной по глубине поверхности свариваемых изделий за счёт применения плоского стыкового индуктора;
- обеспечение требуемой глубины нагрева поверхности путём подбора частоты подаваемого в индуктор тока;
- получение требуемой температуры нагрева поверхностей за счёт регулирования длительности протекания тока в индукторе;
- уменьшение зоны температурного воздействия на околошовный объём изделия;
- энергосбережение за счёт отсутствия потерь энергии при нагреве объёма изделия около свариваемых поверхностей, не участвующих в процессе создания сварного соединения;
- исключение нежелательной деформации нагретого объёма изделия при сжатии.

5. Проведено моделирование двух вариантов технологии индукционно-стыковой сварки, показавшее технологические и энергетические преимущества использования плоских индукторов, нагревающих непосредственно свариваемые поверхности.

Глава 2. Моделирование индукционного нагрева

2.1. Анализ существующих методик расчёта индукционного нагрева

При разработке и эксплуатации установок индукционного нагрева их расчётом решаются следующие основные задачи:

- 1) определение параметров технологии обработки изделия;
- 2) конструктивная проработка элементов установки;
- 3) оптимизация энергетических и технологических характеристик, реализуемых системой управления.

В соответствии с этим на каждом из этапов используются методы расчёта, которые по подходу к получению результата могут быть классифицированы как аналитические, численные и инженерные.

Аналитические методы расчёта, возникшие и развившиеся на начальной стадии использования индукционного нагрева, базируются на анализе физических основ электромагнитной индукции и на определении характеристик передачи энергии волнами электромагнитного поля в нагреваемую среду [1, 16]. При этом были сделаны фундаментальные выводы о влиянии на нагрев поверхностного эффекта, эффекта близости и кольцевого эффекта, а также вариации характеристик нагреваемого материала при изменении температуры.

Недостатки аналитических методов расчёта, заключающиеся в сложности математического аппарата решения полевых задач, в ориентации на частные случаи, а также в затруднительности учёта нелинейных зависимостей в системе «индуктор – нагреваемое изделие», в настоящее время преодолены посредством разработки и внедрения в вычислительный процесс программного обеспечения компьютеров. При этом численные интегральные и конечно-разностные методы [49, 74] реализуются с помощью целого ряда коммерческих пакетов программ, что в конечном итоге способствует простоте их применения. Среди них наибольшее

распространение получили программы полевого моделирования, основанные на методе конечных элементов: ANSYS, ELCUT и Comsol Multiphysics, в основе которых лежат эффективные вычислительные алгоритмы и сверхмощный математический аппарат [87]. Указанные программы позволяют осуществлять расчёт в статике и в динамике электромагнитных и тепловых полей в изделии и индукторе, как в отдельности, так и в комплексе [14, 20, 21, 25, 46, 47].

Однако указанные программы не ориентированы на рассмотрение в комплексе взаимного влияния тепловых и электромагнитных процессов в динамике нагрева с учётом реальных характеристик источника питания. Это, во-первых, существенно искажает результаты моделирования и, во-вторых, затрудняет задачу разработки методов реализации технологических процессов и синтез соответствующей системы управления. В то же время значительные трудности могут возникнуть на этапах построения геометрии конкретной математической модели и получения из неё требуемых результатов [87].

Существенным шагом в устранении недостатков анализа индукционного нагрева посредством решения полевых задач является переход к эквивалентным схемам замещения. Например, в [66] предлагается перейти от полевых задач к расчёту эквивалентных электрических цепей, представляющих из себя каскадное соединение четырехполюсников. При этом каждый из них имеет параметры некоторого слоя нагреваемого изделия, что упрощает учёт влияния нелинейных зависимостей по глубине. Однако в предлагаемом методе характеристики источника питания не учитываются, он лишь рассматривается как элемент установки нагрева, обеспечивающий неизменную подаваемую на поверхность удельную мощность, что затрудняет решение задачи синтеза системы в целом.

В основе инженерных методов расчёта, направленных на разработку конструкции индукторов и конкретных технологических параметров, также лежат схемы замещения с вносимым в электрическую цепь индуктора

сопротивлением [71, 72, 73, 80]. При этом величина его активной и реактивной составляющих определяются с помощью математических выражений с нелинейными зависимостями коэффициентов в них, исходя из известной конструкции индуктора, размеров и характеристик материала изделия.

Основным понятием, характеризующим индукционный способ передачи энергии при закалке и сварке, является поверхностный эффект, заключающийся в вытеснении плотности тока на поверхность изделия, вследствие чего ток и, как следствие, поглощаемая изделием мощность, являющаяся причиной нагрева, распределяется по его глубине неравномерно (рис. 2.1), уменьшаясь по экспоненциальному закону. Мерой проявления поверхностного эффекта принята глубина проникновения тока Δ , величина которой зависит от физических свойств нагреваемого объекта и от частоты первичного тока [18, 76]:

$$\Delta = \frac{1}{k} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu_0 \mu}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (2.1)$$

где $k = \sqrt{\frac{\omega \sigma \mu}{2}}$ – параметр, характеризующий интенсивность затухания электромагнитной волны при её движении в материале изделия; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота изменения магнитной и электрической напряжённости во времени; σ – электрическая проводимость материала изделия, См; μ – относительная магнитная проницаемость материала изделия; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; ρ – удельное электрическое сопротивление материала изделия, Ом·м; f – частота тока в индукторе, Гц.

Являясь в значительной мере условным понятием, глубина проникновения тока принимается равной толщине слоя, в котором сосредоточено 63% полного тока и выделяется 86,5% мощности [74]. Данный факт имеет большое значение в области исследования индукционного нагрева, на котором основываются существующие инженерные методы

тепловых расчётов. При этом вводится допущение, что вся тепловая энергия выделяется в пределах поверхностного слоя, глубина которого соответствует глубине проникновения тока [73, 80]. Указанное обстоятельство позволяет существенно упростить расчёт, однако неизбежно сказывается на его точности.

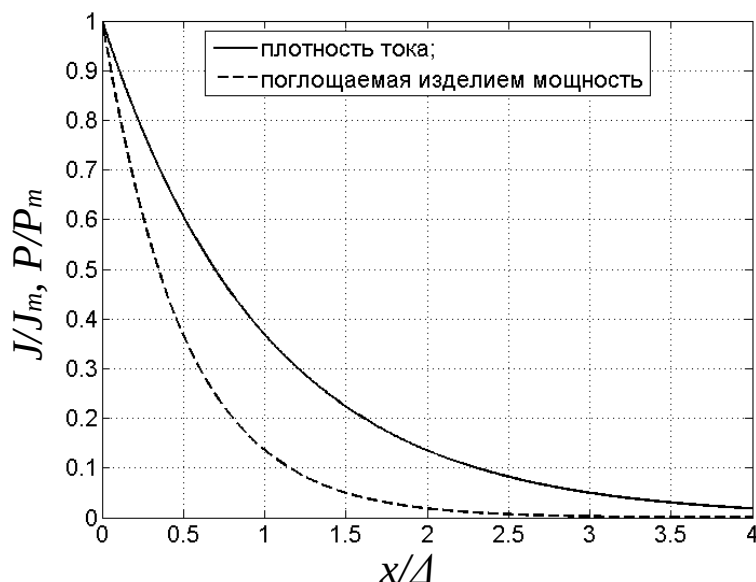


Рис. 2.1. Зависимость относительной плотности тока и поглощаемой деталью мощности от глубины

В то же время применяющиеся методики расчёта тепловых и электромагнитных полей, подробно рассматриваемые в литературе [71, 72, 73, 80], оперируют усреднёнными значениями параметров, характеризующих свойства нагреваемого материала, что способно привести к появлению существенных погрешностей, оказывающихся недопустимыми в ряде случаев.

К основным параметрам, характеризующим физические свойства широко используемых при сварке ферромагнитных материалов, подвергаемых индукционному нагреву, относятся магнитная проницаемость, удельное электрическое сопротивление, теплоёмкость и теплопроводность. Каждый из этих параметров в той или иной степени зависит от температуры, что оказывает существенное влияние на технологические параметры и технико-экономические характеристики процесса нагрева. Так, например,

удельное сопротивление, возрастающее в процессе нагрева, приводит к значительному изменению активного сопротивления нагреваемого металла и, как следствие, выделяемой в нём мощности. Теплоёмкость, также зависящая от температуры, влияет на теплосодержание массы нагреваемого изделия, необходимого для повышения температуры до требуемого значения. Температурная зависимость теплопроводности аналогично имеет не менее важное значение, поскольку от данного параметра зависит скорость нагрева глубинных слоёв, так как при принятом допущении о выделении всей тепловой энергии в пределах слоя, соответствующего глубине проникновения тока, металл, находящийся за его пределами, нагревается в основном за счёт теплопроводности. Наконец, магнитная проницаемость, слабо зависящая от температуры на первом этапе нагрева (так называемый холодный режим), скачком изменяется до единицы в точке структурных превращений (точка Кюри), что приводит к резкому изменению индуктивного сопротивления нагреваемого слоя, а также глубины проникновения тока в деталь и, как следствие, влияет на характер его распределения по глубине.

При этом учёт изменения указанных параметров существенно осложняется нелинейным характером изменения величин, влияющих на свойства нагреваемого металла (рис. 2.2), вследствие чего они могут быть учтены только посредством использования современных методов компьютерного моделирования.

Таким образом, необходимость оптимизации процесса индукционного нагрева для различных областей применения требует разработки более точных методик расчёта, в которых в должной мере будут учтены все интересующие параметры и характеристики. При этом важную роль играет возможность совмещения разрабатываемых разноплановых моделей, осуществляющих расчёт электрических параметров и тепловых процессов, а также возможность построения адекватной системы управления,

контролирующей и регулирующей основные характеристики процесса индукционного нагрева.

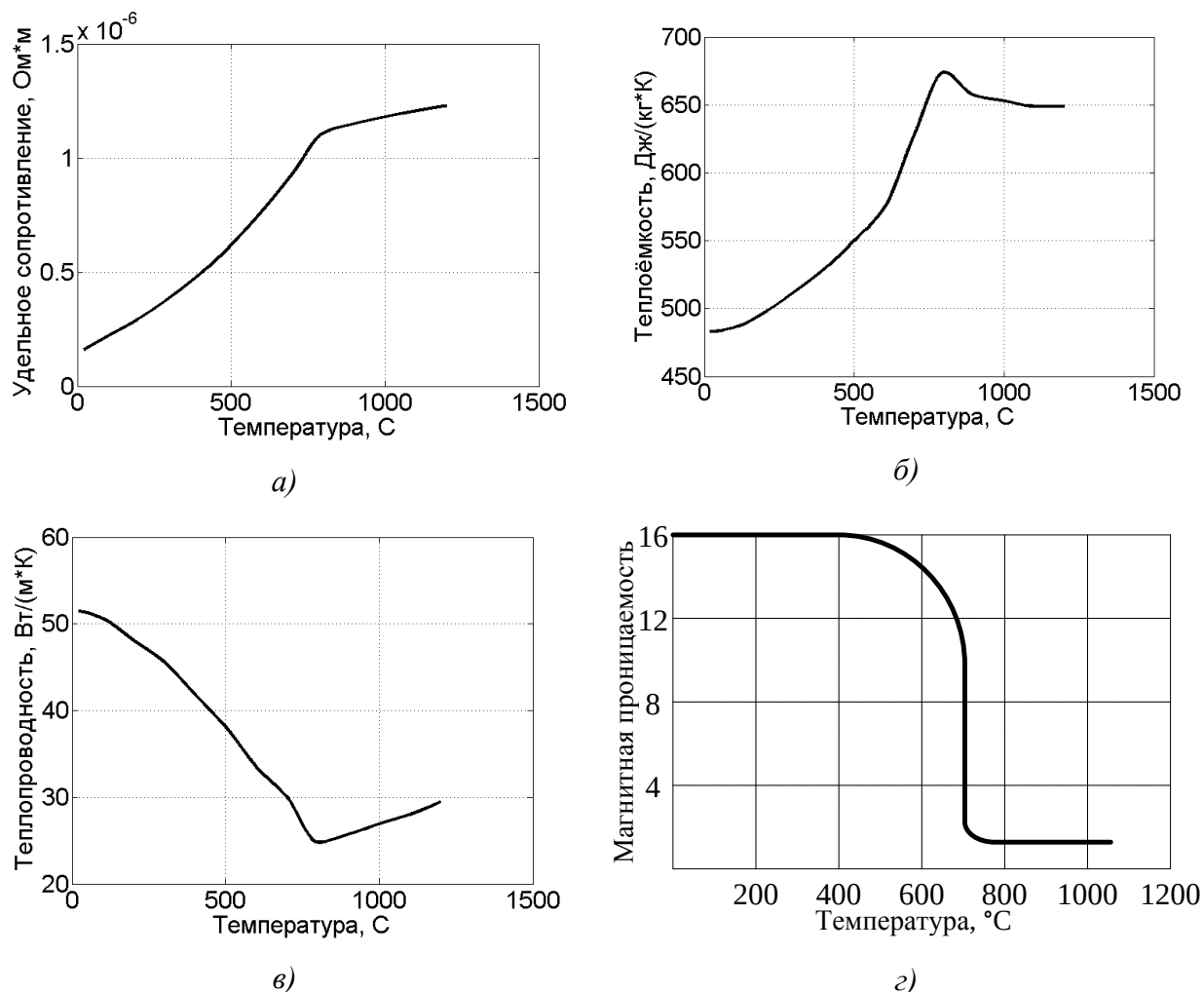


Рис. 2.2. Нелинейные зависимости параметров ферромагнитного материала от температуры на примере стали Ст-40: а – удельное электрическое сопротивление; б – теплоёмкость; в – теплопроводность; г – относительная магнитная проницаемость

Эти обстоятельства указывают на актуальность разработки методик расчёта на основе параллельной работы полевых моделей с программами схемотехнического моделирования. В связи с этим значительный интерес представляет осуществление компьютерного моделирования на базе структурных схем, в основу которых закладываются базовые физические законы и уравнения, характеризующие принимаемую схему замещения процесса индукционного нагрева. В этом случае при известных значениях параметров, характеризующих процесс нагрева, и виде их температурных

зависимостей можно получить модель, с высокой точностью отражающей исследуемый технологический процесс.

2.2. Разработка основ математического моделирования температурных процессов индукционного нагрева методом условной декомпозиции

2.2.1. Обоснование принципов разработки модели

Использование усреднённых значений выделяемой в изделии мощности, являющейся причиной его нагрева, на участке, соответствующем расчётной глубине проникновения тока [73, 80], может привести к значительным неточностям расчёта. Это обусловлено существенным изменением в процессе нагрева исследуемого параметра в пределах рассматриваемого слоя вследствие изменения удельного электрического сопротивления и магнитной проницаемости. Важным оказывается и тот факт, что в процессе нагрева изменяются теплофизические свойства изделия (теплоёмкость и теплопроводность), оказывающие значительное влияние на процессы теплопередачи, что также не учитывается инженерными методами расчёта [71, 72, 73, 80]. Наконец, существующие методы позволяют определять лишь грубую оценку времени нагрева до заданной температуры, в то время как для ряда технологических процессов существенным оказывается исследование температурных процессов в динамике (в том числе и последующего охлаждения).

Устранению указанных недостатков способствуют широко применяющиеся в настоящее время компьютерные технологии расчёта. Значительное распространение в этом плане получил метод структурного моделирования, основанный на декомпозиции сложного объекта исследования на отдельные конструктивно несложно делимые функциональные блоки с достаточно точно описывающими их математическими выражениями. Очевидно, что применительно к установкам индукционного нагрева рациональна их декомпозиция на источник

электромагнитного поля, систему его управления и объект нагрева. Однако последний, представляя собой единое функционально выделенное изделие, структурно неоднороден по глубине проникновения тока, температуре, и связанными с этим другими тепловыми и электромагнитными характеристиками. В связи с этим его декомпозиция может быть только условной по слоям с интересующей по технологии толщиной каждого из них. В частности, применяющиеся инженерные методы расчёта ориентированы на декомпозицию с учётом слоя толщиной, равной глубине проникновения тока, в то время как температурные процессы расширяют зону нагрева за счёт теплопроводности. Например, глубина проникновения тока при нагреве изделия из стали изменяется по величине более чем на порядок [51]. Поэтому рационально исследовать температурные процессы, происходящие при индукционном нагреве при использовании условной декомпозиции нагреваемого объекта на отдельные характеризующие электротехнологию слои [11, 12, 27, 88, 89, 90]. При этом каждый из них нагревается своим, постоянным для него по величине, током. При необходимости исследования процессов нагрева на малых глубинах (меньших глубины проникновения тока), данный метод является наиболее приемлемым и позволяет исследовать динамику процесса нагрева и, что немаловажно, последующего остывания изделия. При этом вычислительная ошибка, связанная с допущением о постоянстве по величине тока в пределах рассматриваемого слоя, значительно снижается за счёт учёта токов, протекающих в глубинных слоях. Так в соответствии с [73] величина греющего тока, протекающего в пределах поверхностного слоя, в $\sqrt{2}$ раз меньше его значения на поверхности

$$J_{\Delta} = \frac{J_{me}}{\sqrt{2}}, \quad (2.2)$$

а за его пределами отсутствует. Однако, как показано на рис. 2.3, поверхностный слой нагревается током, значительно превышающим принимаемое значение. Кроме того, существенным может оказаться влияние тока, сосредоточенного за его пределами в глубинных слоях.

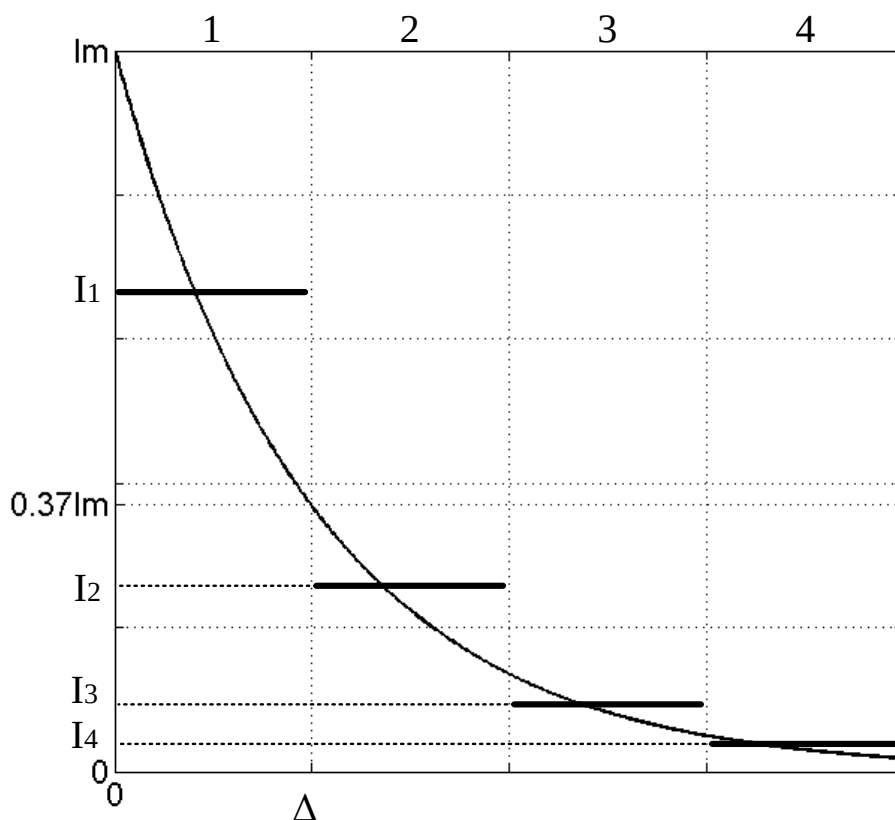


Рис. 2.3. Декомпозиция нагреваемого изделия по слоям

Эскиз нагреваемого изделия показан на рис. 2.4. Рассматриваемая модель строится на основе следующих допущений:

- свариваемые поверхности симметричны относительно плоского индуктора и допускают анализировать температурные процессы только в одной из них;
- охлаждение в окружающую среду в связи с малой поверхностью соприкосновения с ней нагреваемого слоя, толщина которого составляет в ряде случаев доли миллиметра, несопоставимо меньше отвода тепла в соседние слои через теплопроводность;
- расчётная температура одинакова во всех точках рассматриваемого слоя, вследствие чего удельное сопротивление нагреваемого металла, его теплоёмкость и теплопроводность характерны для всего слоя в целом.

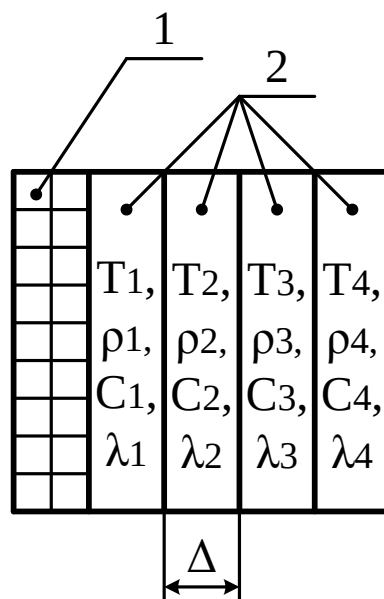


Рис. 2.4. Эскиз многослойного нагреваемого изделия: 1 – теплоизоляция; 2 – нагреваемые слои; Δ – толщина слоя

Кроме того, принято, что тепловые потери в окружающую среду с поверхностного слоя отсутствуют, ввиду наличия идеальной теплоизоляции (рис. 2.4). Данное допущение соответствует практическим случаям, поскольку индуктор в большинстве случаев покрыт изоляционным материалом, снижающим потери тепла и предотвращающим его контакт с нагреваемым изделием.

2.2.2. Разработка принципов построения однослойной математической модели

Математическую модель температурных процессов однослойного нагреваемого изделия строится на примере прямоугольной пластины, нагреваемой с одной стороны индуктором, выполненным в виде плоской шины (рис. 2.5).

Индуктор оказывает на пластину электромагнитное воздействие и вызывает возникновение в ней вихревых токов, протекающих по всему сечению изделия. Количество выделенной тепловой энергии dQ_n за время dt определяется в соответствии с законом Джоуля-Ленца:

$$dQ_n = RI^2 dt, \quad (2.3)$$

где R – сопротивление изделия, по которому протекает постоянный по величине электрический ток I .

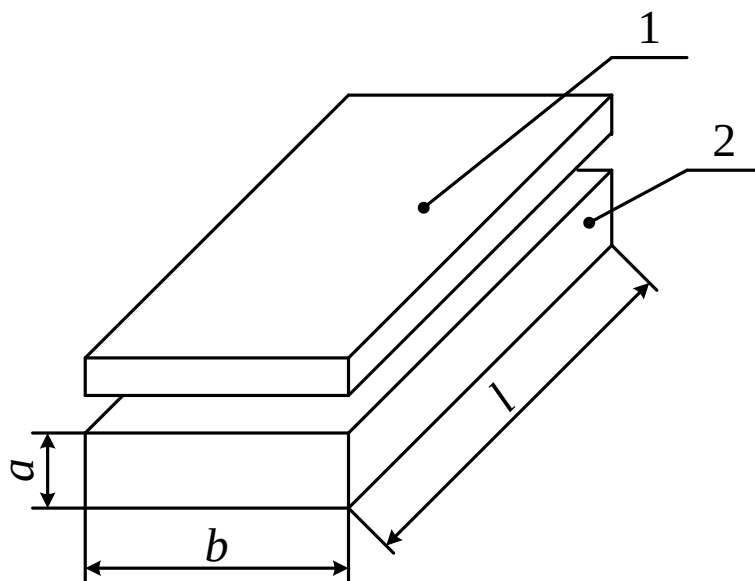


Рис. 2.5. Эскиз пространственной модели нагрева прямоугольной пластины плоским индуктором: 1 – индуктор; 2 – нагреваемое изделие

Сопротивление изделия определяется геометрическими размерами и физическими свойствами материала:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.4)$$

где ρ – удельное сопротивление материала изделия; l – длина нагреваемого изделия; S – площадь поперечного сечения изделия.

Ввиду ярко выраженной температурной зависимости удельного электрического сопротивления, данный параметр является одним из основных показателей, с которым связаны электротехнические и технико-экономические характеристики режима нагрева. Как видно из рис. 2.2, в интервале температур от начальной до приблизительно 750 °С, соответствующей точке магнитных превращений, указанная зависимость практически линейна. В связи с этим в литературе широкое распространение получили приближённые линейные зависимости удельного электрического сопротивления от температуры, основанные на введении понятия температурный коэффициент сопротивления, характеризующего

интенсивность изменения удельного сопротивления под воздействием применяемых температур. В этом случае приближённая зависимость удельного электрического сопротивления от температуры имеет вид:

$$\rho = \rho_{20} (1 + \alpha_t (T_2 - T_1)), \quad (2.5)$$

где ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление при температуре 20 °С; α_t – температурный коэффициент сопротивления материала изделия; T_1 , T_2 – соответственно начальное (20 °С) и текущее значение температуры нагрева.

Применение данного выражения возможно при исследовании режимов нагрева до точки структурных изменений, в то время как при более высоких температурах необходимо использование кривых, полученных экспериментальным путём [13] и приводимых в справочной литературе [39, 65] для конкретной марки стали.

Количество тепла, передаваемое нагретым изделием в окружающую среду dQ_n , определяется в соответствии с выражением:

$$dQ_n = \alpha S_o (T - T_o) dt, \quad (2.6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; S_o – площадь соприкосновения изделия с окружающей средой; T_o – температура окружающей среды, °С.

Коэффициент теплоотдачи, нелинейно зависящий от температуры, включает в себя конвективную и радиационную (лучистую) составляющие:

$$\alpha = \alpha_\kappa + \alpha_p. \quad (2.7)$$

Конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи в спокойном воздухе в соответствии с [83] приближённо описывается выражением:

$$\alpha_\kappa = 1,86 \sqrt[4]{T - T_o}. \quad (2.8)$$

Радиационная составляющая коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_p = C_0 \varepsilon_\kappa \frac{\left(\frac{T + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o + 273,15}{100} \right)^4}{T - T_o}, \quad (2.9)$$

протекающий в нагреваемом слое и выходные величины – его температура и количество тепла, отдаваемого в окружающую среду – связаны звеньями, позволяющими проводить расчёт динамики процесса нагрева с учётом нелинейно зависящих параметров.

2.3. Особенности построения двухслойной модели

При разработке двухслойной модели необходимо учитывать то обстоятельство, что второй слой нагревается не только за счёт собственной энергии, выделяемой в нём по закону Джоуля-Ленца, но и за счёт тепла, передаваемого из первого слоя. При этом при расчёте тепловых потерь для первого слоя коэффициент теплоотдачи заменяется на коэффициент теплопроводности. При этом сама формула приобретает вид:

$$dQ_{n2l} = \frac{\lambda_{2l}}{\Delta_l} S_{2l} (T_l - T_2) dt, \quad (2.12)$$

где λ_{2l} – коэффициент теплопередачи от первого слоя ко второму, нелинейно зависящий от температуры; Δ_l – толщина первого слоя, S_{2l} – площадь соприкосновения двух слоёв.

Остальные уравнения в целом аналогичны уравнениям для однослойной модели. Однако коэффициент теплопроводности сохраняет своё значение только для однородного материала слоёв. В случае неоднородности для второго слоя необходимо учитывать это в величине коэффициента.

Тогда, учитывая, что $dQ_{c1} = dQ_{n1} - dQ_{n2l}$ и $dQ_{c2} = dQ_{n2} + dQ_{n2l} - dQ_{n2}$, температура в первом и втором слоях определится из выражений:

$$T_1 = \left(R_1 I_1^2 - \frac{\lambda_{2l}}{\Delta_l} S_{2l} (T_1 - T_2) \right) \frac{1}{m_1 C_1 p}, \quad (2.13)$$

$$T_2 = \left(R_2 I_2^2 + \frac{\lambda_{2l}}{\Delta_l} S_{2l} (T_1 - T_2) - \alpha_{o2} S_{o2} (T_2 - T_o) \right) \frac{1}{m_2 C_2 p}. \quad (2.14)$$

Структурная схема математической модели индукционного нагрева плоского двухслойного изделия приведена на рис. 2.7.

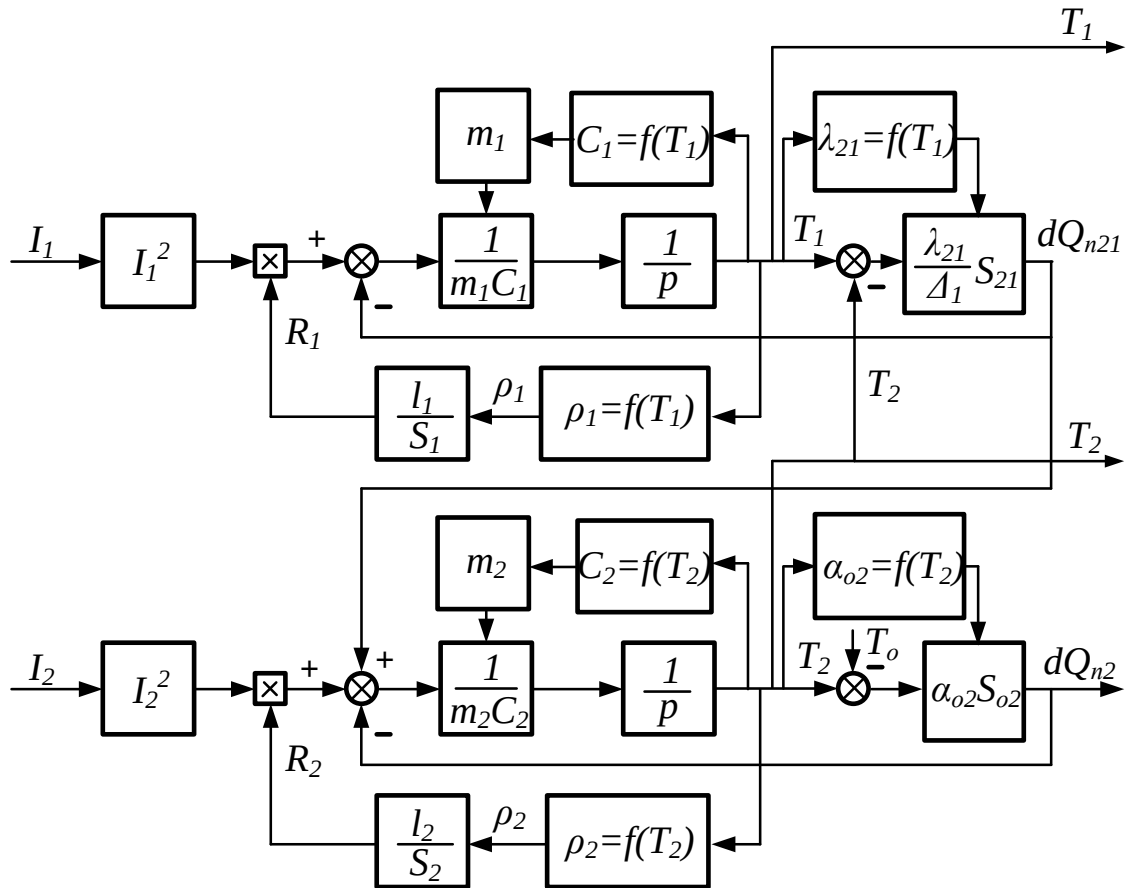


Рис. 2.7. Структурная схема математической модели индукционного нагрева двухслойного изделия

2.4. Разработка общего вида многослойной математической модели индукционного нагрева

На основе вышеизложенного сформулируем основные принципы построения многослойной математической модели методом декомпозиции. В общем случае k -й слой нагревается за счёт энергии, выделяемой в слое по закону Джоуля-Ленца

$$dQ_{nk} = R_k I_k^2 dt, \quad (2.15)$$

и энергии, поступающей в слой из предыдущего $(k-1)$ -го слоя

$$dQ_{nk(k-1)} = \frac{\lambda_{k(k-1)}}{\Delta_{k-1}} S_{k(k-1)} (T_{(k-1)} - T_k) dt. \quad (2.16)$$

В то же время указанный слой передаёт энергию в последующий $(k+1)$ -й слой:

$$dQ_{n(k+1)k} = \frac{\lambda_{(k+1)k}}{A_k} S_{(k+1)k} (T_k - T_{(k+1)}) dt. \quad (2.17)$$

При этом, если k -й слой является первым, уравнение (2.16) исключается, а если последним – уравнение (2.17) принимает вид:

$$dQ_{nk} = \alpha_{ok} S_{ok} (T_k - T_o) dt. \quad (2.18)$$

В приведённых уравнениях $\lambda_{k(k-1)}$, $\lambda_{(k+1)k}$ – коэффициенты теплопередачи от одного слоя к другому, которые могут быть приняты равными теплопроводности слоёв; $S_{k(k-1)}$, $S_{(k+1)k}$ – площади соприкосновения слоёв; α_{ok} – коэффициент теплопередачи от слоя к окружающей среде; S_{ok} – площадь соприкосновения слоя с окружающей средой.

Сопротивление слоя R_k , по которому протекает электрический ток, определяется в соответствии с выражением (2.19):

$$R_k = \rho_k(T_k) \cdot \frac{l_k}{S_k}, \quad (2.19)$$

где $\rho_k(T_k)$ – удельное сопротивление материала слоя изделия, зависящее от его температуры; l_k – длина слоя изделия; S_k – поперечное сечение слоя изделия.

Повышающая температуру энергия определяется выражением:

$$dQ_{zk} = m_k C_k(T_k) dT_k, \quad (2.20)$$

где m_k – масса слоя; $C_k(T_k)$ – теплоёмкость материала слоя изделия, нелинейно зависящая от температуры.

Таким образом, учитывая, что

$$dQ_{zk} = dQ_{nk} + dQ_{nk(k-1)} - dQ_{n(k+1)k}, \quad (2.21)$$

совмещая указанные уравнения, имеем в операторной форме:

$$T_k = \left(R_k I_k^2 + \frac{\lambda_{k(k-1)}}{A_{(k-1)}} S_{k(k-1)} (T_{(k-1)} - T_k) - \frac{\lambda_{(k+1)k}}{A_k} S_{(k+1)k} (T_k - T_{(k+1)}) \right) \frac{1}{m_k C_k p}. \quad (2.22)$$

Структурная схема k -го слоя модели представлена на рис. 2.8.

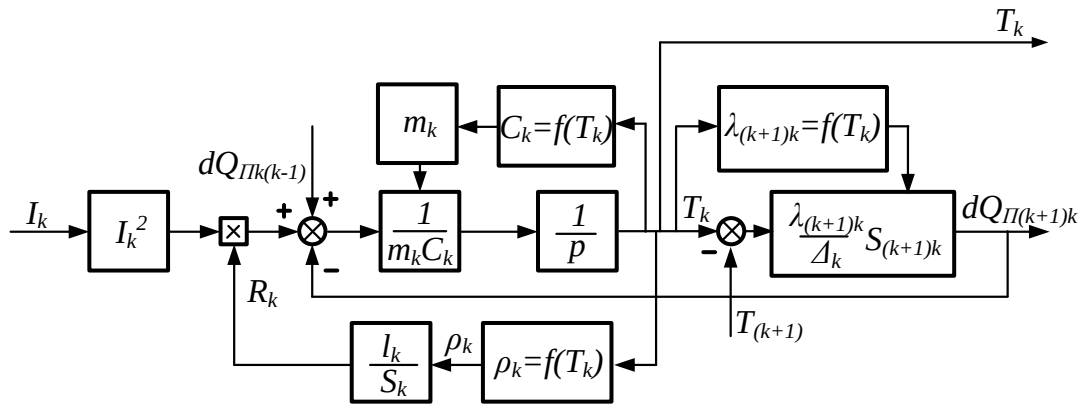


Рис. 2.8. Структурная схема модели тепловых процессов k -го слоя нагреваемого изделия

Общий вид функциональной схемы модели для n слоёв изделия представлен на рис 2.9.

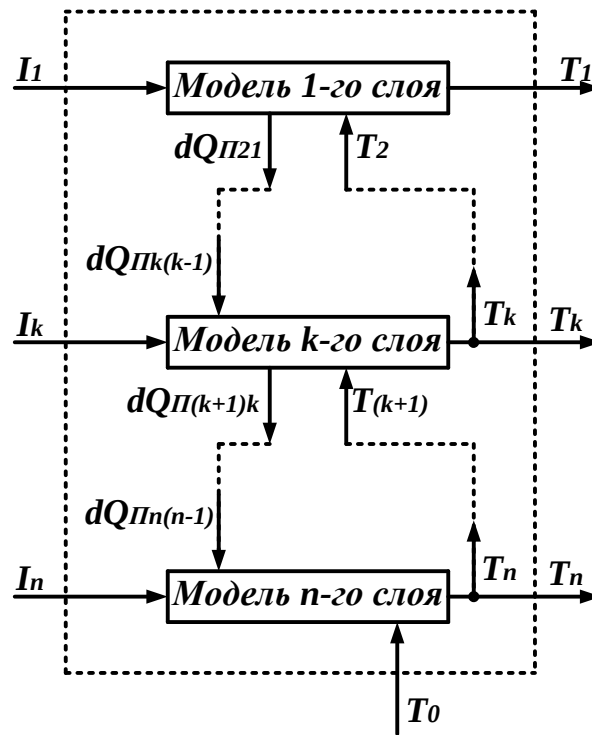


Рис. 2.9. Функциональная схема модели тепловых процессов n -слойного нагреваемого изделия

Одной из особенностей разработанной модели является то, что в некоторые внутренние слои, находящиеся вне глубины проникновения тока, он может не подаваться, а слои нагреваются посредством теплопередачи от поверхностных нагретых током слоёв. Это свойство модели оказывается важным фактором в частности при её использовании для исследования динамики процессов охлаждения изделия после отключения источника тока.

Проверка адекватности модели проводилась путём расчёта статике и динамики нагрева. Точность модели, разработанной на основе декомпозиции, оценивалась посредством сравнения результатов расчёта конечной температуры нагрева слоя изделия, определённой по используемой для практических целей инженерной методике [73], с результатами моделирования нагрева этого же изделия, полученных с помощью разработанной модели. Данные расчёта обоими методами приведены в Приложении 2. Сравнение результатов расчётов показывает на их относительную разницу в пределах 2%.

Точность расчёта динамики изменения температуры слоёв изделия по разработанной на основе декомпозиции, оценивалась посредством сравнения результатов, полученных на основе моделирования по применяющемуся для этих целей пакету программ Comsol Multiphysics. При этом сохранялась расчётная область и характеризующие её параметры (Приложение 3).

На рис. 2.10 представлены результаты исследования динамики нагрева поверхностных слоёв изделия, полученные с помощью двух моделей.

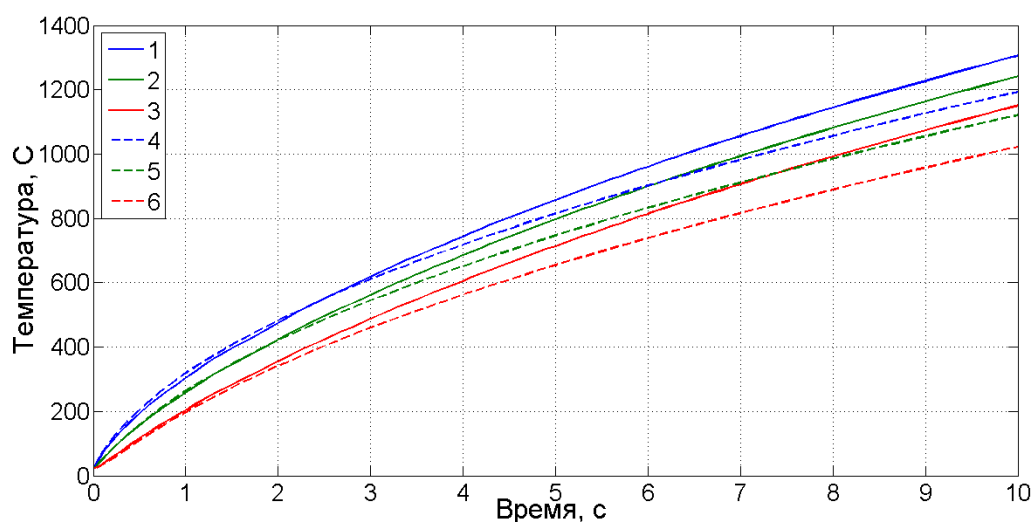


Рис. 2.10. Сравнение результатов расчёта: 1, 2, 3 – динамика изменения температуры в слоях в программе Comsol; 4, 5, 6 – динамика изменения температуры в слоях в декомпозиционной модели тепловых процессов

Анализ представленных результатов говорит об аналогичном характере нагрева, рассчитанном обоими методами. При этом расхождение

наблюдается в основном на финальной стадии нагрева. Так относительная разность для наиболее важного для сварки поверхностного слоя в конце нагрева находится ниже 8%. В глубинном, третьем от поверхности слое, она несколько превышает 10%.

Полученные результаты расчёта статики и динамики процесса индукционного нагрева говорят о достаточной точности разработанного метода послойной декомпозиции для изучения температурных процессов и, как следствие, о возможности его использования при оптимизации технологических и энергетических параметров. Важным достоинством модели является возможность исследования температурных процессов (нагрева и последующего остывания) в динамике. В то же время в разработанном методе доступен широкий спектр интересующих параметров, включая в дополнение к токам по слоям также поступающую, передаваемую и накапливающуюся в них энергию. Это даёт возможность сочетать разработанную модель температурных процессов с моделью электромагнитных процессов в источнике питания. Одновременно разработанная модель позволяет провести учёт нелинейных температурных зависимостей параметров, характеризующих свойства нагреваемого материала (удельное электрическое сопротивление, теплоёмкость, коэффициент теплопроводности и коэффициент теплоотдачи в окружающую среду) с дифференциацией по глубине, что затруднительно при использовании аналитических и инженерных методов анализа тепловых процессов индукционного нагрева.

2.5. Исследование характера влияния нелинейно-зависимых параметров материала изделия на динамику нагрева

Исследование влияния нелинейных зависимостей выполнено с помощью модели теплового расчёта динамики нагрева при стабильной величине тока в слое на примере плоского двухслойного изделия, представленного в Приложении 2. При этом греющая слой мощность

определяется не только током, но и активным сопротивлением слоя, существенно зависящим от температуры и, как следствие, во многом определяющим характер нагрева. Кроме того, важную роль играет температурная зависимость теплоёмкости и теплопроводности материала нагреваемого изделия, также оказывающая влияние на характер нагрева.

На рис. 2.11 представлен график зависимостей температуры поверхностного слоя при исследовании влияния теплоёмкости. При этом значения удельного электрического сопротивления и теплопроводности приняты постоянными и равными их средним значениям в интервале начальной и конечной температур. В связи с этим рассматриваемый случай соответствует режиму стабилизации мощности в поверхностном слое, величина которой была рассчитана в Приложении 2. Кривая 1 соответствует постоянному среднему значению теплоёмкости, применяемому в инженерных методиках, а кривая 2 получена с учётом её температурной зависимости (рис. 2.2,б). Анализ полученных результатов говорит о существенной относительной погрешности в динамике (рис. 2.12), максимальное значение которой превышает 20 %.

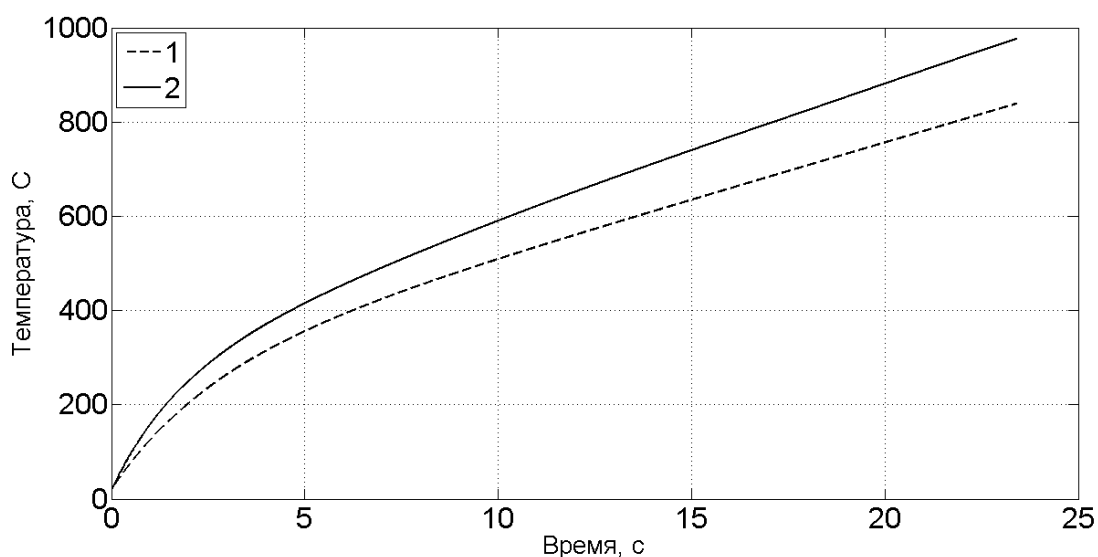


Рис. 2.11. График зависимости температуры поверхностного слоя изделия:
 1 – $\rho=750 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\lambda=40.46 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, $c=674 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; 2 – $\rho=750 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$,
 $\lambda=40.46 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, $c=f(T)$.

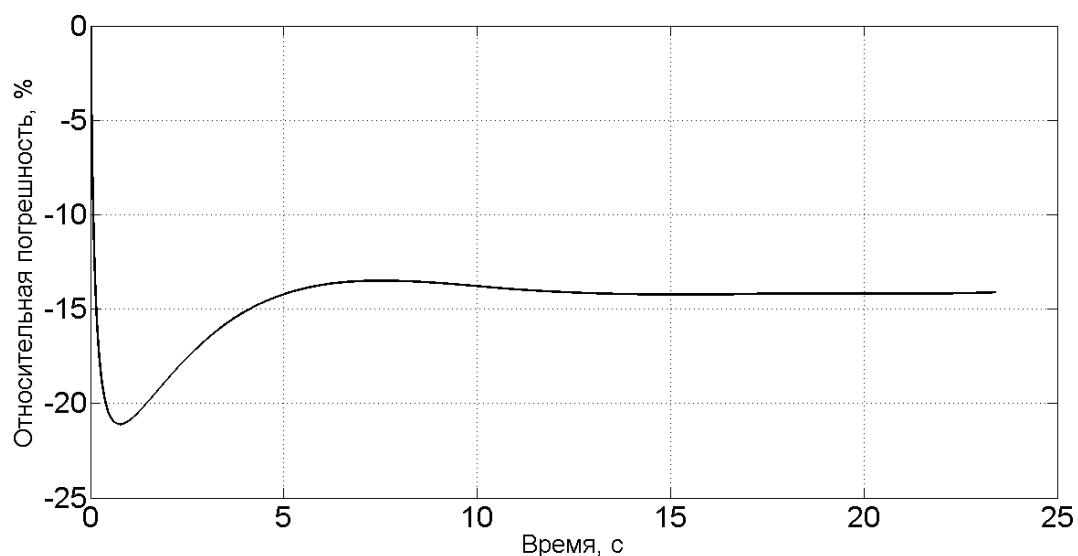


Рис. 2.12. Динамика изменения относительной погрешности

На рис 2.13 даны аналогичные характеристики нагрева верхнего слоя при среднем и изменяющемся значении теплопроводности материала изделия под действием возрастающей температуры (рис. 2.2,в) и при неизменном удельном сопротивлении и теплоёмкости материала.

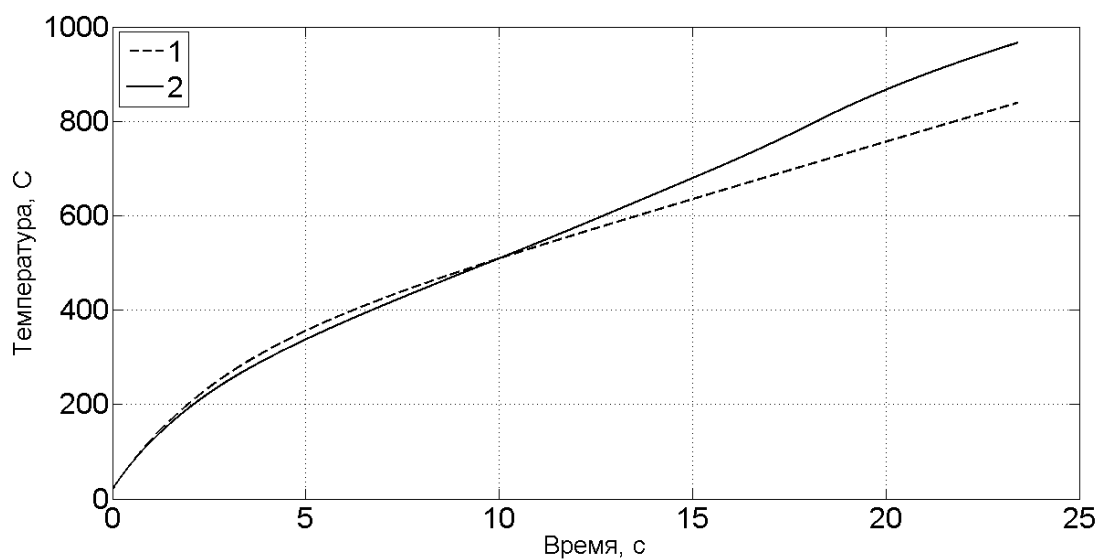


Рис. 2.13. График зависимости температуры поверхностного слоя изделия:

$$1 - \rho = 750 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}, \lambda = 40.46 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}), c = 674 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C});$$

$$2 - \rho = 750 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}, c = 674 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}), \lambda = f(T).$$

Анализируя полученные результаты необходимо отметить также существенное отклонение динамики нагрева и конечной величины температуры (рис. 2.13 – кривые 1 и 2), вносимое пренебрежением

зависимостью теплопроводности от температуры при принятии её средним значением. При этом погрешность в диапазоне температур, рациональных для осуществления индукционно-стыковой сварки (1000 °С), составляет более 10 % (рис. 2.14).

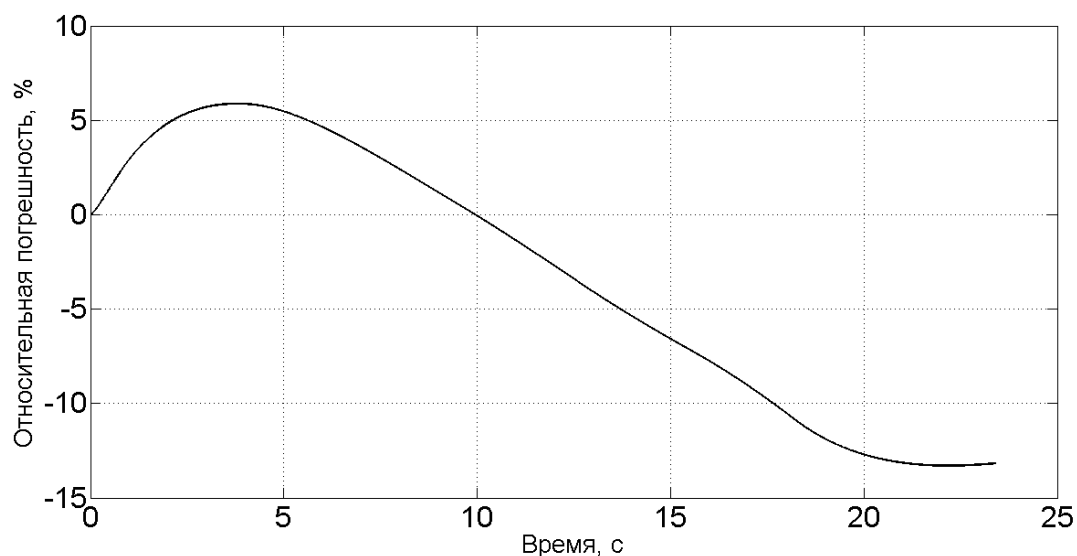


Рис. 2.14. Динамика изменения относительной погрешности

Все представленные результаты были получены для режима, характеризующегося неизменной входной греющей мощностью, передаваемой в деталь, что соответствует случаю постоянного тока в поверхностном слое и его активного сопротивления. При этом принятое его значение, равное $R_1 = 1,500 \cdot 10^{-4}$ Ом, соответствует среднему значению удельного электрического сопротивления в интервале рассматриваемых температур ($\rho = 750 \cdot 10^{-9}$ Ом·м). В то же время, как было показано выше, активное сопротивление на начальном этапе значительно меньше и существенно возрастает в процессе нагрева в соответствии с температурной зависимостью удельного сопротивления. Данное обстоятельство говорит о том, что в режиме стабилизации тока в поверхностном слое величина греющей мощности на начальном этапе оказывается завышенной, что приводит к большому искажению динамики индукционного нагрева (рис. 2.15, 2.16).

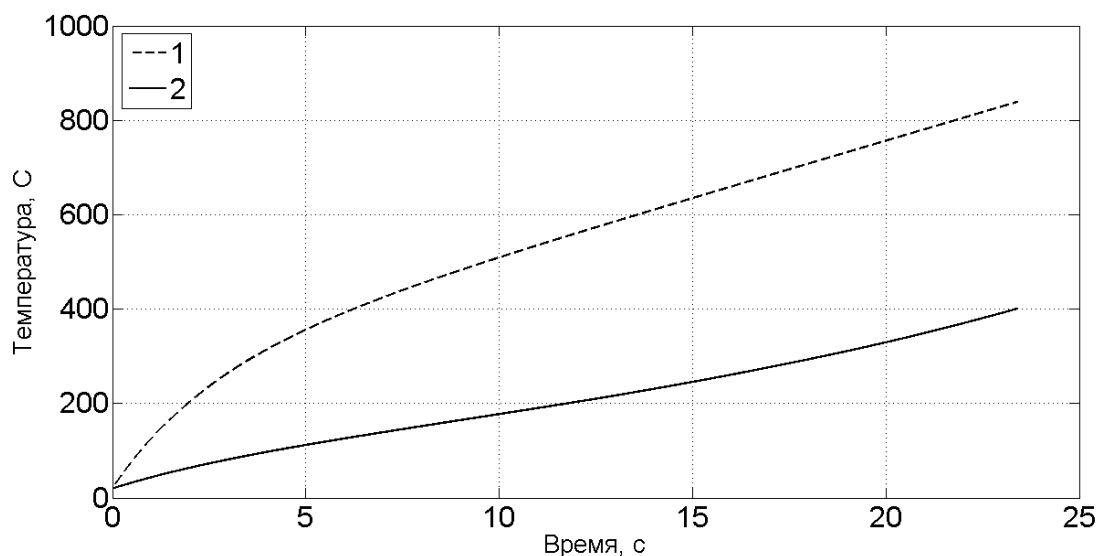


Рис. 2.15. График зависимости температуры поверхностного слоя изделия:

1 – $\rho = 750 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\lambda = 40.46 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$, $c = 674 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$;

2 – $\lambda = 40.46 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$, $c = 674 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$, $\rho = f(T)$.

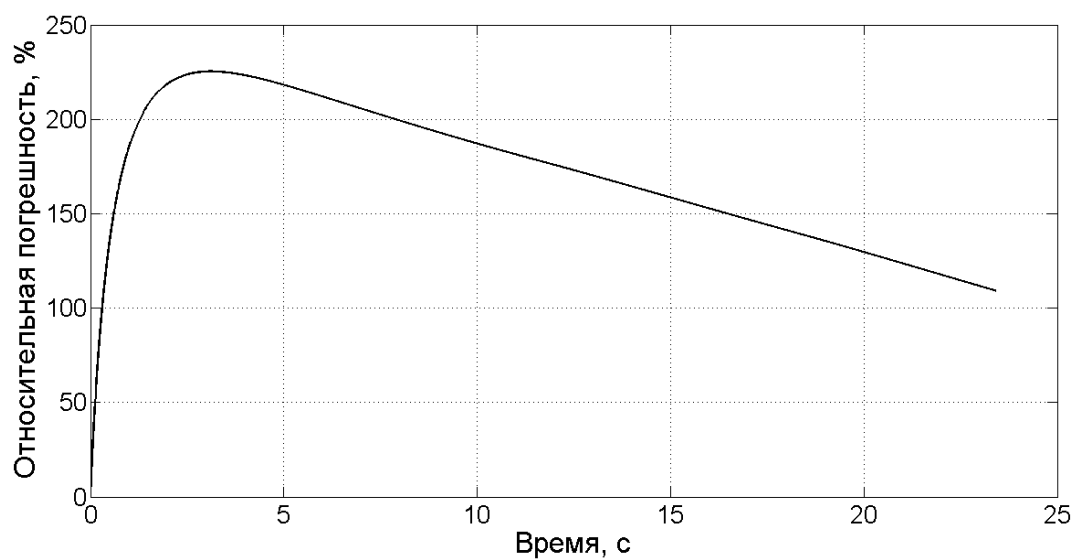


Рис. 2.16. Динамика изменения относительной погрешности

Анализ динамики нагрева поверхностного слоя, а также возникающей погрешности при различных способах учёта температурной зависимости активного сопротивления указывает на его самое существенное влияние на результаты расчёта из всех рассмотренных нелинейно изменяющихся параметров.

На рис. 2.17 представлены кривые нагрева поверхностного слоя изделия при различных постоянных значениях нелинейных параметров и при

их одновременной вариации в соответствии с нелинейными зависимостями от температуры (рис. 2.2).

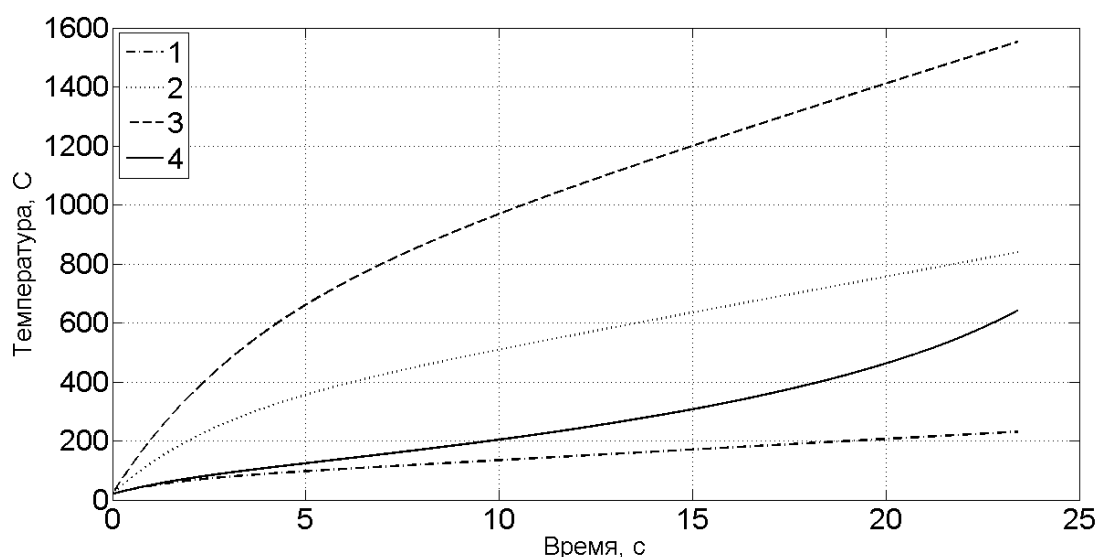


Рис. 2.17. Характеристики нагрева поверхностного слоя изделия при различных характерах изменения удельного сопротивления, теплопроводности и теплоёмкости материала изделия: 1 – $\rho = \rho_{20} = 160 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\lambda = \lambda_{20} = 51,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, $c_1 = c_{20} = 483 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; 2 – $\rho = \rho_{cp} = 750 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\lambda = \lambda_{cp} = 40,46 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, $c_1 = c_{cp} = 674 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; 3 – $\rho = \rho_{1200} = 1230 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\lambda = \lambda_{1200} = 29,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, $c_1 = c_{1200} = 649 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; 4 – $\rho = f(T)$, $\lambda = f(T)$, $c = f(T)$

Анализ полученных кривых нагрева поверхностного слоя изделия при различных видах учёта нелинейных параметров указывает на то, что в целом 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 корректного анализа технологии индукционного нагрева и её оптимизации. В связи с этим для повышения точности расчётов необходим учёт нелинейного характера изменения указанных параметров.

В целом полученные данные показывают на важное преимущество разработанной модели расчёта тепловых процессов, позволяющей учитывать нелинейную зависимость удельного сопротивления, теплопроводности и теплоёмкости от температуры при её изменении в процессе индукционного

нагрева. Это даёт возможность более качественно анализировать технологию индукционного нагрева и совершенствовать методы управления ею.

2.6. Исследование влияния теплоотдачи в окружающую среду

Исследование влияния тепловых потерь с поверхности нагреваемого изделия проводилось на модели, дополненной блоком, учитывающим теплоотдачу в окружающую среду. При этом поверхность взаимодействия с окружающей средой определялась в соответствии с рис. П.2.1 по формуле

$$S_{10} = a \cdot l + 2 \cdot x_k \cdot a + 2 \cdot x_k \cdot l. \quad (2.23)$$

В этом случае уравнение для расчёта динамики первого слоя принимает вид:

$$T_1 = \frac{1}{m_1 C_1 p} \left(R_1 I_1^2 - \frac{\lambda_{21}}{\zeta} S_{21} (T_1 - T_2) - \alpha_{10} S_{10} (T_1 - T_0) dt \right). \quad (2.24)$$

В табл. 2.1 представлены численные значения коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением, рассчитанные на основе выражений 2.7 – 2.9.

Таблица 2.1. Численные значения коэффициентов теплоотдачи в окружающую среду, рассчитанные по формулам 2.7-2.9

$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha_k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\alpha_p, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
100	5,563	6,842	12,405
200	6,813	10,826	17,639
300	7,609	16,372	23,981
400	8,212	23,753	31,965
500	8,706	33,244	41,950
600	9,128	45,117	54,245
700	9,498	59,646	69,144
800	9,830	77,106	86,936
900	10,131	97,769	107,900
1000	10,407	121,909	132,316
1100	10,663	149,799	160,462
1200	10,901	181,714	192,615

Результаты расчёта представлены на рис. 2.18, 2.19.

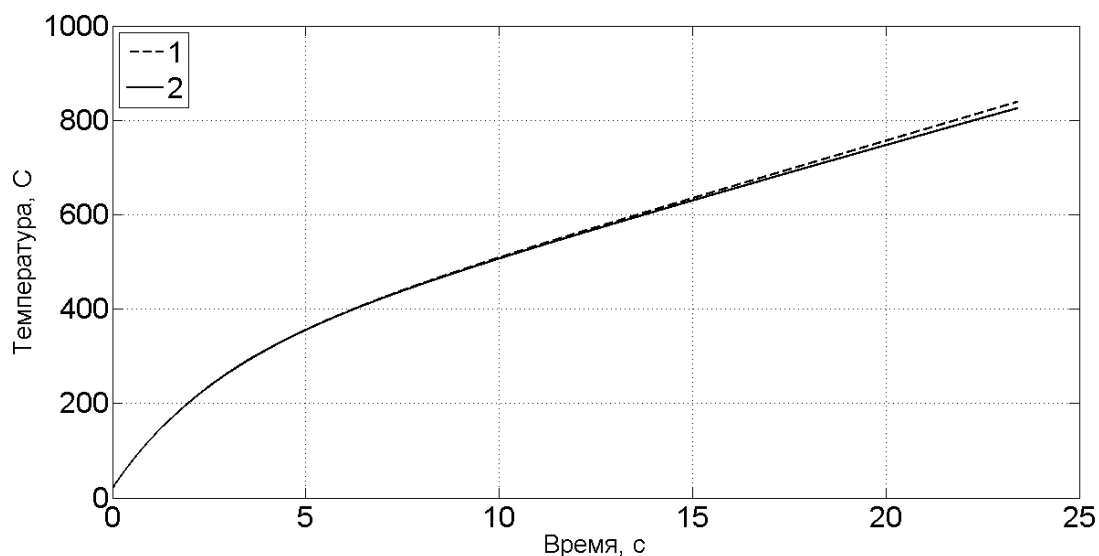


Рис. 2.18. График зависимости температуры поверхностного слоя изделия:

1 – $\rho=750 \cdot 10^{-9}$ Ом·м, $\lambda=40.46$ Вт/(м·°C), $c=674$ Дж/(кг·°C), $\alpha=0$ Вт/(м²·°C);

2 – $\lambda=40.46$ Вт/(м·°C), $c=674$ Дж/(кг·°C), $\rho=750 \cdot 10^{-9}$ Ом·м, $\alpha=f(T)$.

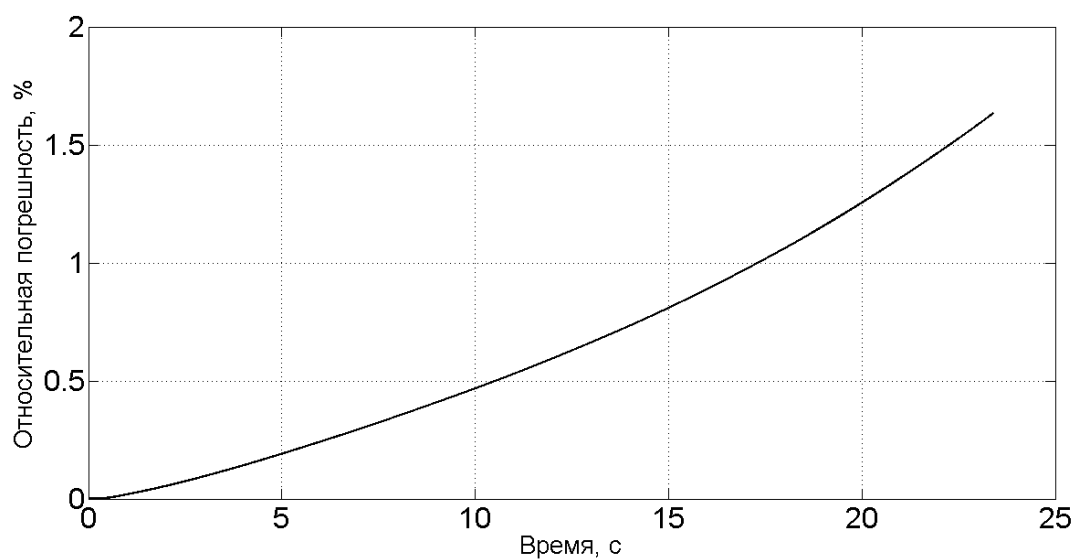


Рис. 2.19. Динамика изменения относительной погрешности

Анализ представленных результатов говорит о незначительных тепловых потерях с поверхности изделия и, как следствие, малом влиянии учёта соответствующего параметра, так как относительная погрешность не превышает 2 %. Это позволяет упростить модель расчёта индукционно – стыковой сварки посредством допущения об отсутствии тепловых потерь в окружающую среду.

2.7. Разработка системы управления моделью по температуре

Проведение оптимизации процесса нагрева для ряда технологических процессов связано с необходимостью исследования процессов остывания за счёт теплопроводности в глубинные слои и теплоотдачи в окружающую среду при отключении первичного тока в индукторе. Данное обстоятельство имеет особенно большое значение в области исследования индукционно-стыковой сварки, поскольку для получения качественного сварного соединения достаточно нагреть тонкий поверхностный слой изделий, однако при извлечении индуктора из области сварки нагретый тонкий слой начнёт интенсивно охлаждаться в окружающую среду и глубинные слои. В то же время недопустимым является и перегрев металла на свариваемых поверхностях до расплавленного состояния, что может привести к потерям части металла при образовании грата [7] и ухудшению качества сварного соединения. В связи с этим возникает необходимость проведения исследования температурных процессов не только на этапе нагрева, но и при последующем остывании, включающее в себя оценку времени остывания до минимально возможной температуры сварки, а также исследование влияния различных мероприятий, проводимых с целью его повышения. Таким образом, разработанная модель должна быть дополнена системой управления, отключающей токи в слоях, что соответствует моменту прекращения подачи первичного тока или извлечению индуктора из зоны сварки, при достижении поверхностным слоем заданной температуры.

Основными элементами структурной схемы (рис. 2.20), разрабатываемой средствами программы Matlab+Simulink, помимо объекта управления (на схеме обозначен Subsystem) являются блок переключателя Switch, выполняющего переключение входных сигналов по сигналу управления, блок сравнения текущих значений входных сигналов Relation Operator и интегрирующий блок Integrator.

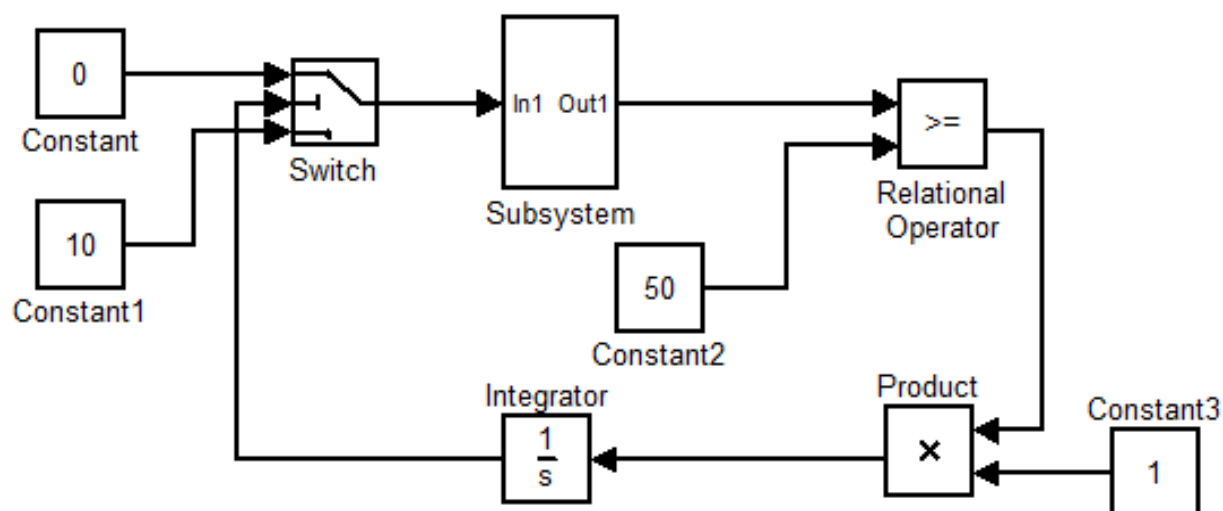


Рис. 2.20. Структурная схема системы управления, выполненная в Simulink

Алгоритм работы системы управления моделью по температуре приведён в Приложении 4.

2.8. Результаты и выводы

1. Проведён анализ существующих методик расчёта индукционного нагрева, определены их достоинства и недостатки.

2. Дано обоснование актуальности компьютерного моделирования электротехнологических аспектов индукционного нагрева для стыковой сварки.

3. 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.

4. Созданы математические модели и их структурные схемы при многослойной декомпозиции нагреваемого изделия.

5. 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. В связи с этим рекомендуется учитывать нелинейные зависимости изменяющихся параметров при расчёте динамики температурных процессов.

6. Разработана структура управления моделью по температуре, позволяющая исследовать процесс охлаждения изделия при отключении питания индуктора, что является одним из этапов индукционно – стыковой сварки.

Глава 3. Разработка основ моделирования динамики электромагнитных процессов в источнике энергии при индукционном нагреве

3.1. Физические основы предлагаемого метода

Электромагнитные процессы, являющиеся основой индукционного нагрева, широко исследованы на базе анализа проникновения электромагнитных волн в нагреваемую среду различной конструктивной конфигурации. При этом источник электромагнитных волн условно отделён от нагреваемого изделия и рассматривается как отдельный конструктивный элемент всего комплекса, обеспечивающий заданные параметры поступающей к изделию энергии. Однако за счёт внутренних обратных связей нагреваемое изделие осуществляет значительное влияние на параметры энергии, поступающей от источника. Это, в свою очередь, изменяет характер нагрева изделия, оказывая изменяющееся воздействие на источник. Очевидно, что такая взаимосвязь наиболее ярко проявляется в динамике процесса нагрева. То есть все компоненты системы «источник – индуктор – изделие» связаны единым электромагнитно-тепловым процессом и при анализе индукционного нагрева должны рассматриваться в комплексе. Поэтому получение методики совместного анализа электромагнитных и тепловых процессов в указанной системе является одной из актуальных задач.

Используемые в настоящее время методы учёта источника энергии в виде схем замещения с вносимым в электрическую цепь индуктора сопротивлением изделия ориентированы на расчёт статических режимов [72, 73, 80] при учёте только одного нагреваемого слоя. Однако проведённый анализ индукционного нагрева указывает на значительное влияние температурных процессов в глубине изделия. Поэтому при моделировании электромагнитных процессов в источнике целесообразно применить тот же метод декомпозиции нагреваемого изделия на слои. При этом каждый из них

может быть рассмотрен как замкнутая накоротко вторичная обмотка многообмоточного трансформатора с разомкнутым магнитопроводом и с характерным для каждого слоя коэффициентом взаимоиנדукции. Причём энергия передаётся в слои через электромагнитное поле, созданное индуктором. Функциональная схема индуктора и нагреваемого изделия с n слоями в этом случае представлена на рис. 3.1.

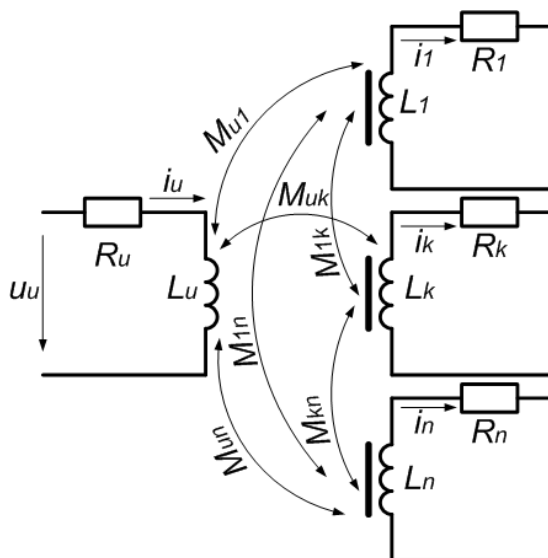


Рис. 3.1. Функциональная схема индуктора и нагреваемого изделия

3.2. Математическая модель многообмоточного трансформатора с различными коэффициентами взаимоиндукции и параметрами обмоток

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

$$\left\{ \begin{array}{l} u_u = R_u i_u + L_u \frac{di_u}{dt} - M_{ul} \frac{di_l}{dt} - \dots - M_{uk} \frac{di_k}{dt} - \dots - M_{un} \frac{di_n}{dt} \\ 0 = -M_{lu} \frac{di_u}{dt} + R_l i_l + L_l \frac{di_l}{dt} + \dots + M_{lk} \frac{di_k}{dt} + \dots + M_{ln} \frac{di_n}{dt} \\ \dots\dots\dots \\ 0 = -M_{ku} \frac{di_u}{dt} + M_{kl} \frac{di_l}{dt} + R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + \dots + M_{kn} \frac{di_n}{dt} \\ \dots\dots\dots \\ 0 = -M_{nu} \frac{di_u}{dt} + M_{nl} \frac{di_l}{dt} + \dots + M_{nk} \frac{di_k}{dt} + R_n i_n + L_n \frac{di_n}{dt} \end{array} \right. . \quad (3.1)$$

(3.1)

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.

При этом предлагается параметры многообмоточного трансформатора определять на первом этапе для холодного состояния изделия посредством решения полевой задачи в пакете программ ELCUT (Приложение 5). При использовании модели для расчёта динамики индукционного нагрева они корректируются в зависимости от изменяемой температуры слоёв. Таким образом, осуществляется сочетание полевого и схмотехнического моделирования, позволяющего повысить точность и достоверность проводимых расчётов.

Система уравнений п – обмоточного трансформатора в операторной форме имеет вид:

[illegible]

где U_u, I_u, I_1, I_2, I_3 – изображения мгновенных значений напряжения и токов индуктора и слоёв изделия.

Из представленных уравнений выражаем токи в индукторе и слоях нагреваемого изделия:

$$\left\{ \begin{aligned} I_u &= \frac{U}{L_u p + R_u} + \frac{M_{ul} p}{L_u p + R_u} I_l + \frac{M_{uk} p}{L_u p + R_u} I_k + \frac{M_{un} p}{L_u p + R_u} I_n \\ I_l &= \frac{M_{lu} p}{L_l p + R_l} I_u - \frac{M_{lk} p}{L_l p + R_l} I_k - \frac{M_{ln} p}{L_l p + R_l} I_n \\ &\dots\dots\dots \\ I_k &= \frac{M_{ku} p}{L_k p + R_k} I_u - \frac{M_{kl} p}{L_k p + R_k} I_l - \frac{M_{kn} p}{L_k p + R_k} I_n \\ &\dots\dots\dots \\ I_n &= \frac{M_{nu} p}{L_n p + R_n} I_u - \frac{M_{nl} p}{L_n p + R_n} I_l - \frac{M_{nk} p}{L_n p + R_n} I_k \end{aligned} \right. \quad (3.3)$$

Введём обозначение $K_u = \frac{1}{R_u}$, $\tau_u = \frac{L_u}{R_u}$, $\tau_1 = \frac{L_1}{R_1}$, $\tau_k = \frac{L_k}{R_k}$, $\tau_n = \frac{L_n}{R_n}$. Тогда

$$\left\{ \begin{aligned} I_u &= \frac{K_u}{\tau_u p + 1} U + (M_{ul} I_l + M_{uk} I_k + M_{un} I_n) \frac{K_u p}{\tau_u p + 1} \\ I_l &= (M_{lu} I_u - M_{lk} I_k - M_{ln} I_n) \frac{1}{R_l} \frac{p}{\tau_l p + 1} \\ &\dots\dots\dots \\ I_k &= (M_{ku} I_u - M_{kl} I_l - M_{kn} I_n) \frac{1}{R_k} \frac{p}{\tau_k p + 1} \\ &\dots\dots\dots \\ I_n &= (M_{nu} I_u - M_{nl} I_l - M_{nk} I_k) \frac{1}{R_n} \frac{p}{\tau_n p + 1} \end{aligned} \right. . \quad (3.4)$$

Представленная система уравнений может быть решена методом структурного моделирования. Структурная схема для данного случая представлена на рис. 3.2.

Проверка работоспособности модели была выполнена на примере четырёхслойного изделия при допущении о выделении тока лишь в трёх поверхностных слоях, толщина которых соответствует рассчитанной при заданных условиях глубине проникновения тока. Исходные данные, лежащие в основе модели, получены на основе методики, изложенной в приложении 5, и сведены в табл. 3.1.

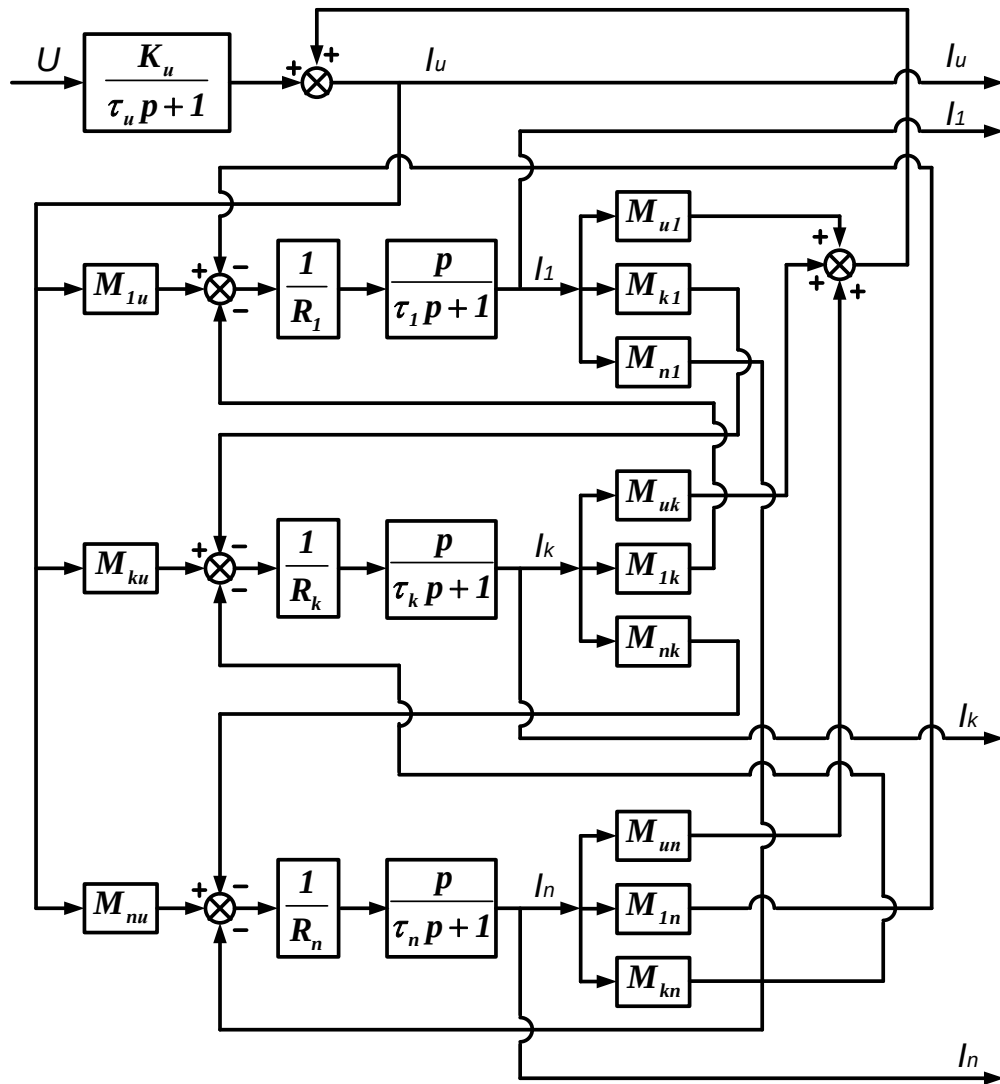


Рис. 3.2. Структурная схема математической модели трансформатора для мгновенных значений напряжений и токов

Таблица 3.1. Исходные данные модели трансформатора

Частота: $f=2000$ Гц,				
Напряжение на индукторе: $u_u = 4,2484\sqrt{2} \sin(\omega t)$.				
	Индуктор	Изделие 1 слой	Изделие 2 слой	Изделие 3 слой
R , Ом	0,0002232	0,005373	0,005373	0,005373
L , Гн	$7,135 \cdot 10^{-7}$	$1,137 \cdot 10^{-6}$	$1,611 \cdot 10^{-6}$	$1,936 \cdot 10^{-6}$
Коэффициенты взаимной индуктивности, М				
Индуктор	-	$6,6543 \cdot 10^{-7}$	$6,3606 \cdot 10^{-7}$	$6,0944 \cdot 10^{-7}$
Изделие 1 слой	$6,6543 \cdot 10^{-7}$	-	$11,434 \cdot 10^{-7}$	$10,397 \cdot 10^{-7}$
Изделие 2 слой	$6,3606 \cdot 10^{-7}$	$11,434 \cdot 10^{-7}$	-	$15,050 \cdot 10^{-7}$
Изделие 3 слой	$6,0944 \cdot 10^{-7}$	$10,397 \cdot 10^{-7}$	$15,050 \cdot 10^{-7}$	-

На рис. 3.3 – 3.6 представлены результаты моделирования электромагнитных процессов, происходящих при индукционном нагреве в

исследуемой модели, включающие в себя токи в индукторе и слоях нагреваемого изделия при заданном входном синусоидальном напряжении. В связи с тем, что в данной модели не учитываются температурные процессы, то параметры, характеризующие систему «индуктор-изделие», принимаются постоянными.

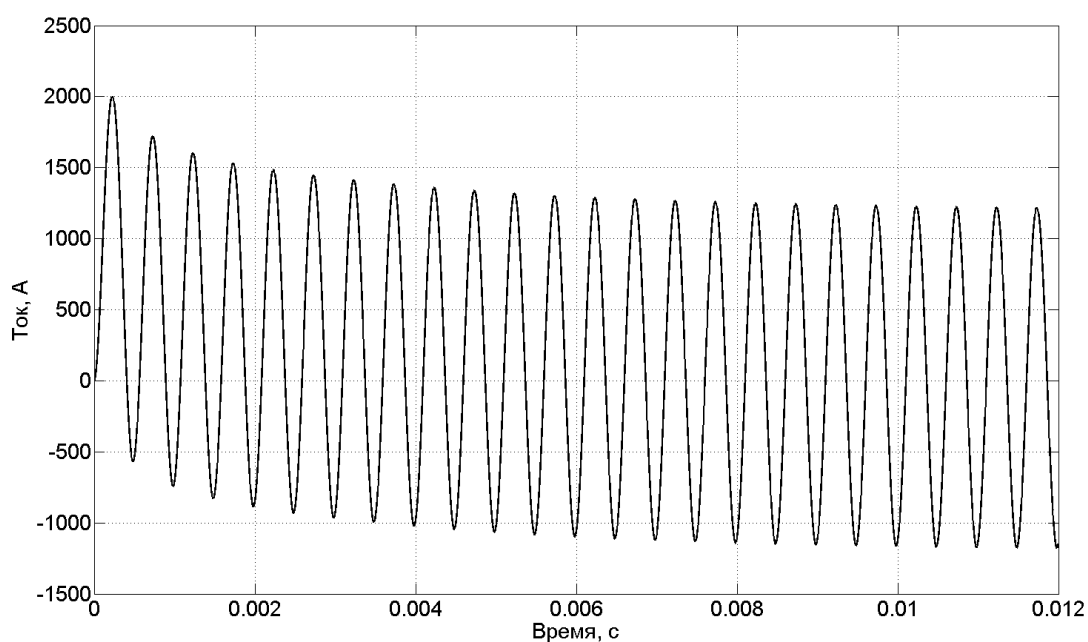


Рис. 3.3. Временная зависимость мгновенных значений тока в индукторе

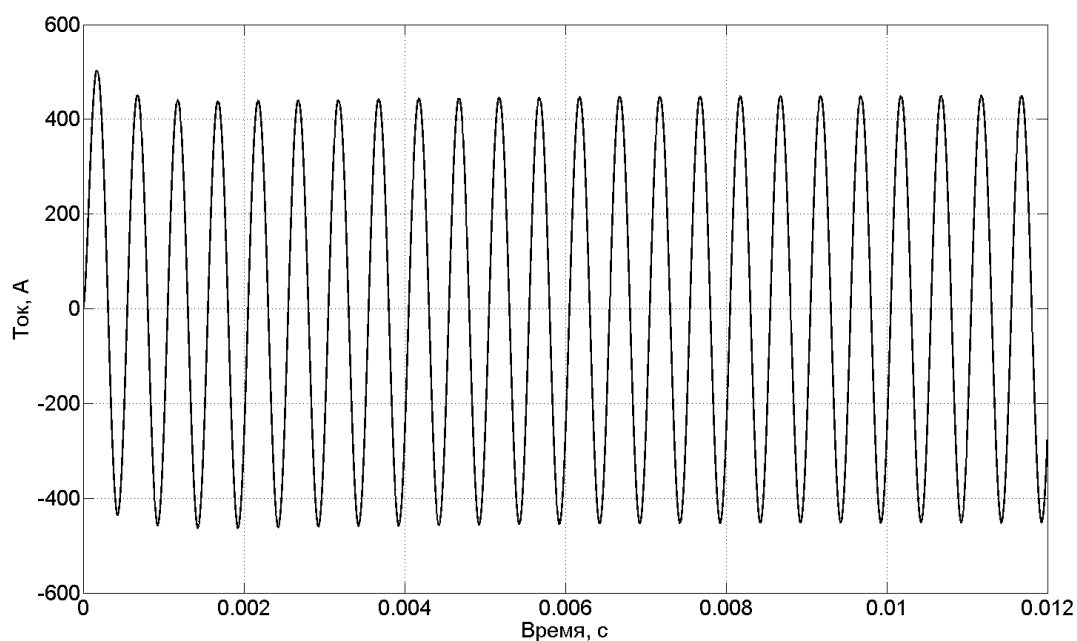


Рис. 3.4. Временная зависимость мгновенных значений тока в первом слое

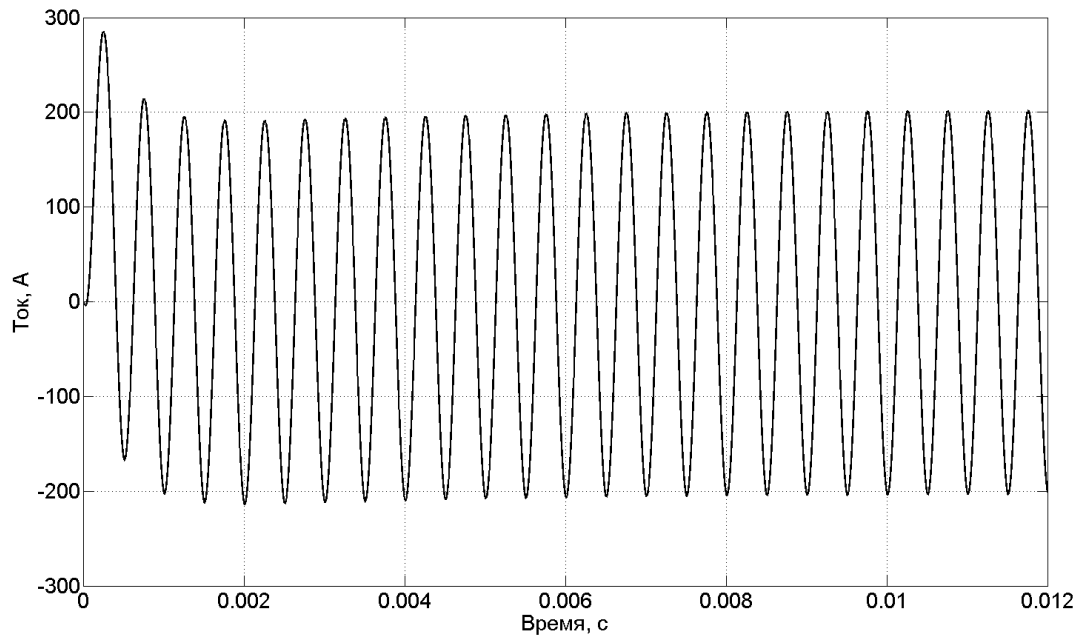


Рис. 3.5. Временная зависимость мгновенных значений тока во втором слое

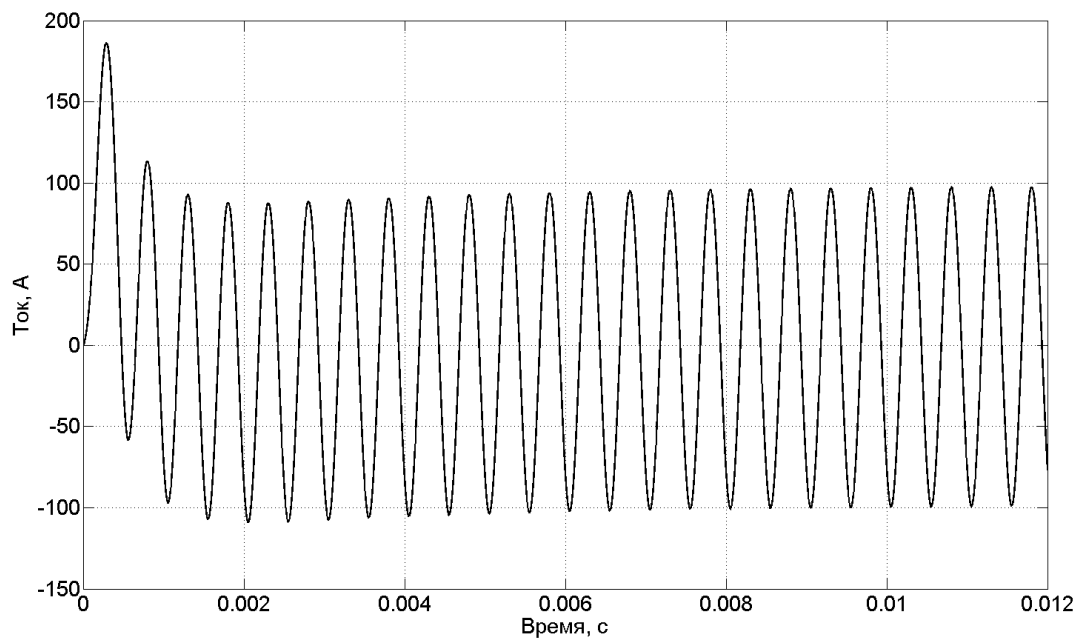


Рис. 3.6. Временная зависимость мгновенных значений тока в третьем слое

В целом использование представленного метода математического моделирования индукционного нагрева позволяет учитывать динамику электромагнитных процессов источника в комплексе с температурными переходными процессами в нагреваемом изделии. Однако главным

достоинством разработанной модели является возможность проводить учёт влияния переменных параметров нагреваемого изделия на источник.

Анализируя переходные процессы в источнике, можно отметить, что электромагнитные постоянные времени τ_u и τ_k невелики в связи с большим воздушным зазором между изделием и индуктором и, соответственно, небольшой индуктивностью в рассматриваемом примере расчёта. Очевидно, что разработанная модель наиболее применима при индукционном нагреве мелких изделий с небольшой температурной постоянной времени. Более точные результаты расчёта может дать также её применение при малой величине воздушного зазора. 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.

3.3. Модель трансформатора для действующих значений напряжений и токов

Система уравнений n – обмоточного трансформатора в комплексной форме для комплексов действующих значений напряжения и токов принимает вид:

$$\begin{cases} \dot{U} = \underline{Z}_u \dot{I}_u - \underline{Z}_{mu1} \dot{I}_1 - \underline{Z}_{mk} \dot{I}_k - \underline{Z}_{mn} \dot{I}_n \\ 0 = -\underline{Z}_{mu1} \dot{I}_u + \underline{Z}_1 \dot{I}_1 + \underline{Z}_{mk} \dot{I}_k + \underline{Z}_{mn} \dot{I}_n \\ 0 = -\underline{Z}_{mk} \dot{I}_u + \underline{Z}_{mk1} \dot{I}_1 + \underline{Z}_k \dot{I}_k + \underline{Z}_{kn} \dot{I}_n \\ 0 = -\underline{Z}_{mn} \dot{I}_u + \underline{Z}_{mn1} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{mnk} \dot{I}_k + \underline{Z}_n \dot{I}_n \end{cases} \quad (3.5)$$

Здесь $\underline{Z}_u$, $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_k$, $\underline{Z}_n$ – собственные сопротивления индуктора и слоёв изделия, определяемые в соответствии с выражениями:

$$\underline{Z}_u = R_u + j\omega L_u = R_u + jX_u,$$

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = R_1 + jX_1,$$

$$\underline{Z}_k = R_k + j\omega L_k = R_k + jX_k,$$

$$\underline{Z}_n = R_n + j\omega L_n = R_n + jX_n,$$

где ω – циклическая частота, определяемая частотой f первичного тока в индукторе $\omega=2\pi f$; X_u, X_1, X_k, X_n – реактивные сопротивления индуктора и слоёв изделия соответственно; $\underline{Z}_{mu1}, \underline{Z}_{m1u}, \underline{Z}_{muk}, \underline{Z}_{mku}, \underline{Z}_{mun}, \underline{Z}_{mnu}, \underline{Z}_{m1k}, \underline{Z}_{mk1}, \underline{Z}_{m1n}, \underline{Z}_{mn1}, \underline{Z}_{mkn}, \underline{Z}_{mnk}$ – сопротивления взаимной индукции индуктора со слоями и слоёв между собой, определяемые в соответствии с выражениями:

$$\underline{Z}_{mu1} = j\omega M_{u1} = jX_{mu1}, \underline{Z}_{m1u} = j\omega M_{1u} = jX_{m1u},$$

$$\underline{Z}_{muk} = j\omega M_{uk} = jX_{muk}, \underline{Z}_{mku} = j\omega M_{ku} = jX_{mku},$$

$$\underline{Z}_{mun} = j\omega M_{un} = jX_{mun}, \underline{Z}_{mnu} = j\omega M_{nu} = jX_{mnu},$$

$$\underline{Z}_{m1k} = j\omega M_{1k} = jX_{m1k}, \underline{Z}_{mk1} = j\omega M_{k1} = jX_{mk1},$$

$$\underline{Z}_{m1n} = j\omega M_{1n} = jX_{m1n}, \underline{Z}_{mn1} = j\omega M_{n1} = jX_{mn1},$$

$$\underline{Z}_{mkn} = j\omega M_{kn} = jX_{mkn}, \underline{Z}_{mnk} = j\omega M_{nk} = jX_{mnk}.$$

Решая систему уравнений (3.5) относительно токов, имеем:

$$\begin{cases} \dot{I}_u = \frac{\dot{U} + j(X_{mu1}\dot{I}_1 + X_{muk}\dot{I}_k + X_{mun}\dot{I}_n)}{R_u + jX_u} \\ \dot{I}_1 = \frac{j(X_{m1u}\dot{I}_u - X_{m1k}\dot{I}_k - X_{m1n}\dot{I}_n)}{R_1 + jX_1} \\ \dot{I}_k = \frac{j(X_{mku}\dot{I}_u - X_{mk1}\dot{I}_1 - X_{mkn}\dot{I}_n)}{R_k + jX_k} \\ \dot{I}_n = \frac{j(X_{mnu}\dot{I}_u - X_{mn1}\dot{I}_1 - X_{mnk}\dot{I}_k)}{R_n + jX_n} \end{cases}. \quad (3.6)$$

Структурная схема для нахождения токов слоёв изделия, поступающих от источника энергии, представлена на рис. 3.7.

Результаты расчёта модели при аналогичных конструктивных параметрах представлены в табл. 3.2.

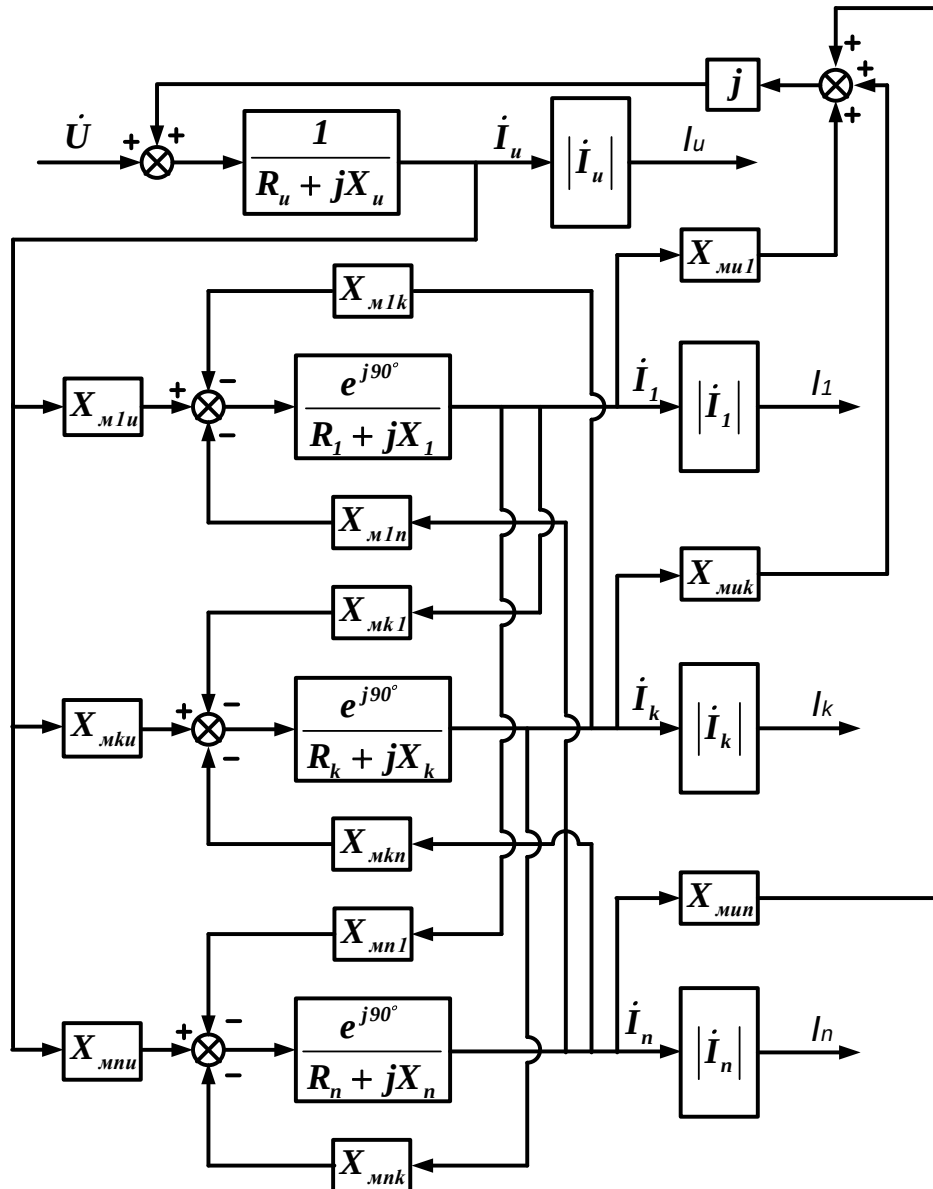


Рис. 3.7. Структурная схема для расчёта токов, поступающих в слои изделия от источника энергии

Таблица 3.2. Результаты расчёта модели

	Модель трансформатора для действующих значений токов и напряжений	Модель трансформатора для мгновенных значений токов и напряжений
Ток в индукторе, А	847,3029	847,0101
Ток в первом слое, А	318,9514	318,9459
Ток во втором слое, А	143,3126	143,3328
Ток в третьем слое, А	69,6135	69,6432

Результаты моделирования показывают, что токи индуктора и всех слоёв в рассматриваемой структурной схеме практически совпадают по величине с действующими значениями токов в установившемся режиме в модели расчёта по мгновенным значениям.

3.4. Модель многообмоточного трансформатора с учётом вносимого в цепь индуктора сопротивления слоёв

При разработке системы управления индукционным нагревом определяющее значение имеет объём и достоверность информации о процессе. Очевидно, что напряжение на индукторе и его ток являются наиболее доступными для измерения и обработки с целью получения интересующих технологических параметров. Поэтому рационально иметь модель, связывающую эти параметры с процессом индукционного нагрева. Наиболее адекватно в этом случае использование преобразования системы уравнений (3.5) с целью получения уравнения, связывающего эти два параметра. Это может быть выполнено при введении вносимого слоями изделия сопротивления в цепь индуктора [52].

Система уравнений (3.5) для трёхслойного изделия имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{U} = \underline{Z}_u \dot{I}_u - \underline{Z}_{mu1} \dot{I}_1 - \underline{Z}_{mu2} \dot{I}_2 - \underline{Z}_{mu3} \dot{I}_3 \\ 0 = -\underline{Z}_{m1u} \dot{I}_u + \underline{Z}_1 \dot{I}_1 + \underline{Z}_{m12} \dot{I}_2 + \underline{Z}_{m13} \dot{I}_3 \\ 0 = -\underline{Z}_{m2u} \dot{I}_u + \underline{Z}_{m21} \dot{I}_1 + \underline{Z}_2 \dot{I}_2 + \underline{Z}_{m23} \dot{I}_3 \\ 0 = -\underline{Z}_{m3u} \dot{I}_u + \underline{Z}_{m31} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{m32} \dot{I}_2 + \underline{Z}_3 \dot{I}_3 \end{cases} \quad (3.7)$$

Выразим ток I_3 из последнего уравнения и подставим полученное выражение в два предыдущих.

$$\dot{I}_3 = \frac{\underline{Z}_{m3u}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_u - \frac{\underline{Z}_{m31}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_1 - \frac{\underline{Z}_{m32}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_2, \quad (3.8)$$

$$0 = -\underline{Z}_{m1u} \dot{I}_u + \underline{Z}_1 \dot{I}_1 + \underline{Z}_{m12} \dot{I}_2 + \frac{\underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m3u}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_u - \frac{\underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m31}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_1 - \frac{\underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m32}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_2, \quad (3.9)$$

$$0 = -\underline{Z}_{m2u} \dot{I}_u + \underline{Z}_{m21} \dot{I}_1 + \underline{Z}_2 \dot{I}_2 + \frac{\underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m3u}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_u - \frac{\underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m31}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_1 - \frac{\underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m32}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_2. \quad (3.10)$$

Преобразованные уравнения (3.9) и (3.10) имеют вид:

$$(\underline{Z}_{m1u}\underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m13}\underline{Z}_{m3u})\dot{I}_u = (\underline{Z}_1\underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m13}\underline{Z}_{m31})\dot{I}_1 + (\underline{Z}_{m12}\underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m13}\underline{Z}_{m32})\dot{I}_2, \quad (3.11)$$

$$(\underline{Z}_{m2u}\underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m23}\underline{Z}_{m3u})\dot{I}_u = (\underline{Z}_{m21}\underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m23}\underline{Z}_{m31})\dot{I}_1 + (\underline{Z}_2\underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m23}\underline{Z}_{m32})\dot{I}_2. \quad (3.12)$$

После проведения преобразований и введения обозначений (Приложение 6) получаем выражения, связывающие ток индуктора с токами слоёв с помощью коэффициентов связи, учитывающими вносимое слоями активное и индуктивное сопротивление в цепь индуктора:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = K_{1u} \cdot \dot{I}_u = (K_{1u Re} + jK_{1u Im})\dot{I}_u = \sqrt{K_{1u Re}^2 + K_{1u Im}^2} e^{j \arctg \frac{K_{1u Im}}{K_{1u Re}}} \cdot \dot{I}_u \\ \dot{I}_2 = K_{2u} \cdot \dot{I}_u = (K_{2u Re} + jK_{2u Im})\dot{I}_u = \sqrt{K_{2u Re}^2 + K_{2u Im}^2} e^{j \arctg \frac{K_{2u Im}}{K_{2u Re}}} \cdot \dot{I}_u, \\ \dot{I}_3 = K_{3u} \cdot \dot{I}_u = (K_{3u Re} + jK_{3u Im})\dot{I}_u = \sqrt{K_{3u Re}^2 + K_{3u Im}^2} e^{j \arctg \frac{K_{3u Im}}{K_{3u Re}}} \cdot \dot{I}_u \end{cases} \quad (3.13)$$

где $K_{1u} = K_{1u Re} + jK_{1u Im}$, $K_{2u} = K_{2u Re} + jK_{2u Im}$, $K_{3u} = K_{3u Re} + jK_{3u Im}$ – комплексные коэффициенты связи между током индуктора и токами слоёв.

Подставляя полученные выражения для токов в первое уравнение системы (3.7), имеем непосредственную зависимость тока индуктора от напряжения на нём с учётом вносимого слоями сопротивления:

$$\dot{I}_u = \frac{\dot{U}}{\sqrt{R_{сум}^2 + X_{сум}^2} e^{j \arctg \frac{X_{сум}}{R_{сум}}}}. \quad (3.14)$$

где $\dot{U}$ – комплекс действующего значения напряжения на индукторе; $R_{сум} = R_{инд} + R_{вн}$ – суммарное активное сопротивление цепи, включающее, как сопротивление собственно индуктора, так и вносимое активное сопротивление слоёв; $X_{сум} = X_{инд} + X_{вн}$ – суммарное реактивное сопротивление цепи, учитывающее сопротивление индуктора и вносимое сопротивление слоёв.

Полученным выражениям соответствует функциональная схема (рис. 3.8).

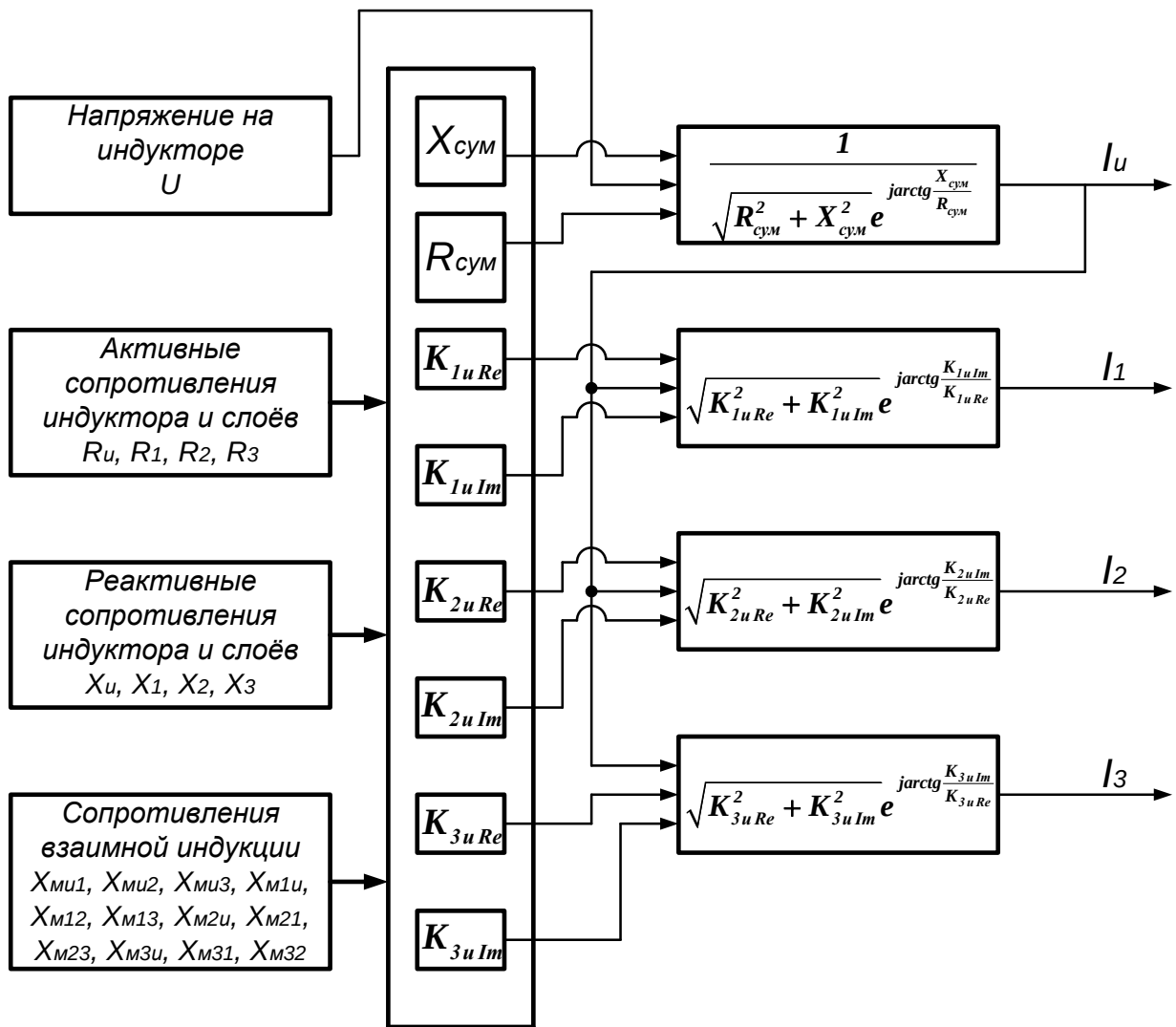


Рис. 3.8. Функциональная схема математической модели трансформатора с разомкнутым магнитопроводом с учётом вносимого слоями сопротивления

Важной особенностью разработанной математической модели является то, что она позволяет оценить не только количественное влияние нагреваемого изделия на первичную цепь, но и получить информацию о протекающих в нём токах.

3.5. Методика определения параметров математической модели трансформатора

Разработка методики определения параметров математической модели электромагнитных процессов на основе трансформатора с разомкнутым магнитопроводом является одним из важнейших моментов на этапе моделирования. При этом в соответствии с разработанной теорией

необходимо знать не только сами параметры, характеризующие систему индуктор-загрузка (активные и реактивные сопротивления индуктора и слоёв изделия, а также коэффициенты взаимной индуктивности индуктора со слоями и слоёв между собой), но и закон их изменения, связанного с процессом нагрева. В этом случае наибольший интерес представляет температурная зависимость активного сопротивления слоёв нагреваемого изделия, обусловленная существенным ростом удельного электрического сопротивления в процессе нагрева. Она легко может быть учтена на основе информации о температуре слоёв изделия из его модели и данных, приводимых в литературе о температурной характеристике удельного сопротивления материала изделия.

В наиболее простых случаях конфигурации свариваемых поверхностей активное и реактивное сопротивления слоёв изделия могут быть определены аналитически посредством расчёта характера проникновения электромагнитного поля в проводящее ток изделие [77]. При синусоидально изменяющихся напряжённостях электрического и магнитного полей их выражение в символической форме для проекций по осям x и y имеют вид:

$$\dot{E}_x = \dot{E}_m e^{j\omega t} ; \dot{H}_x = \dot{H}_m e^{j\omega t}, \quad (3.15)$$

где $\dot{E}_m$ и $\dot{H}_m$ – комплексы амплитудного значения напряжённости электрического и магнитного поля с учётом их начальных фаз Ψ_E и Ψ_H .

Комплексы амплитудного значения напряжённостей магнитного и электрического полей связаны уравнениями Максвелла для плоской электромагнитной волны и синусоидальных переменных [73]:

$$-\frac{d\dot{H}_m}{dz} = \gamma \dot{E}_m ; \frac{d\dot{E}_m}{dz} = -j\omega\mu\dot{H}_m. \quad (3.16)$$

Решение этой системы уравнений при отсутствии отражённой волны, что реально при интенсивном затухании падающей волны электромагнитного поля в функции глубины её проникновения и при большой величине последней, имеет вид [73]:

$$\dot{H}_m = \dot{H}_{ms} e^{-\alpha z}; \quad \dot{E}_m = \frac{\alpha}{\gamma} \dot{H}_{ms} e^{-\alpha z}, \quad (3.17)$$

где $\dot{E}_{ms}$ и $\dot{H}_{ms}$ – комплексы амплитудного значения напряжённости электрического и магнитного поля на поверхности изделия; $\alpha = \sqrt{j\omega\mu\gamma}$ – корень характеристического уравнения для системы (3.16).

Отношение электрической и магнитной напряжённости является волновым сопротивлением материала нагреваемого изделия, которое можно представить как единичное электрическое сопротивление материала (в расчёте на единицу длины по осям x и y , по которым направлены соответственно векторы электрической и магнитной напряжённости) [66].

$$\begin{aligned} Z = \frac{\dot{E}_m}{\dot{H}_m} &= \frac{\alpha}{\gamma} = \frac{\sqrt{j\omega\mu\gamma}}{\gamma} = \frac{\sqrt{j}\sqrt{\omega\mu\gamma}}{\gamma} = \frac{(1+j)\sqrt{\omega\mu\gamma}}{\sqrt{2}\gamma} = \\ &= (1+j) \frac{1}{\gamma \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}}} = \frac{1}{\gamma\Delta} + j \frac{1}{\gamma\Delta} = R + jX. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Введя соответствующие размеры для слоя (рис. 3.9) по оси $x=l$ (длина слоя) и по оси $y=h$ (высота изделия), имеем

$$R_{cl} = \frac{1}{\gamma h \Delta} = \frac{l}{\gamma S}, \quad (3.19)$$

где $S = h\Delta$ – площадь поперечного сечения слоя толщиной Δ .

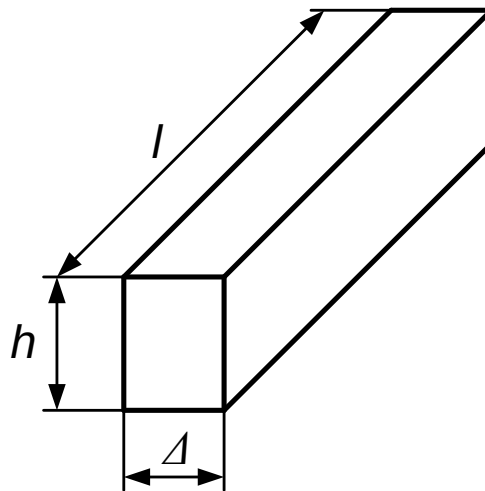


Рис. 3.9. Конструктивный чертёж нагреваемого слоя изделия

При необходимости рассчитывать активное сопротивление слоёв отличной от глубины проникновения толщины необходимо вводить соответствующую коррекцию в (3.19):

$$R_{cl} = \frac{1}{\gamma h k \Delta}, \quad (3.20)$$

где $k = \frac{b}{\Delta}$ – относительная глубина слоя толщиной b .

Например, для слоя $l=1$ м, $h=0,03$ м и $\Delta=0,001$ м и $\gamma=6250000$ См/м активное сопротивление слоя

$$R_{cl}=0,005333 \text{ Ом}.$$

Одной из особенностей моделирования индукционного нагрева для индукционно-стыковой сварки является нагрев одновременно двух поверхностей от одного плоского индуктора. При этом рационально упростить задачу моделирования, учитывая симметрию частей свариваемого изделия относительно индуктора.

На рис. 3.10 приведена полная конструкция нагрева свариваемых поверхностей. При этом принят во внимание ранее сделанный вывод о том, что достаточную точность расчёта тепловых процессов обеспечивает учёт только трёх поверхностных слоёв.

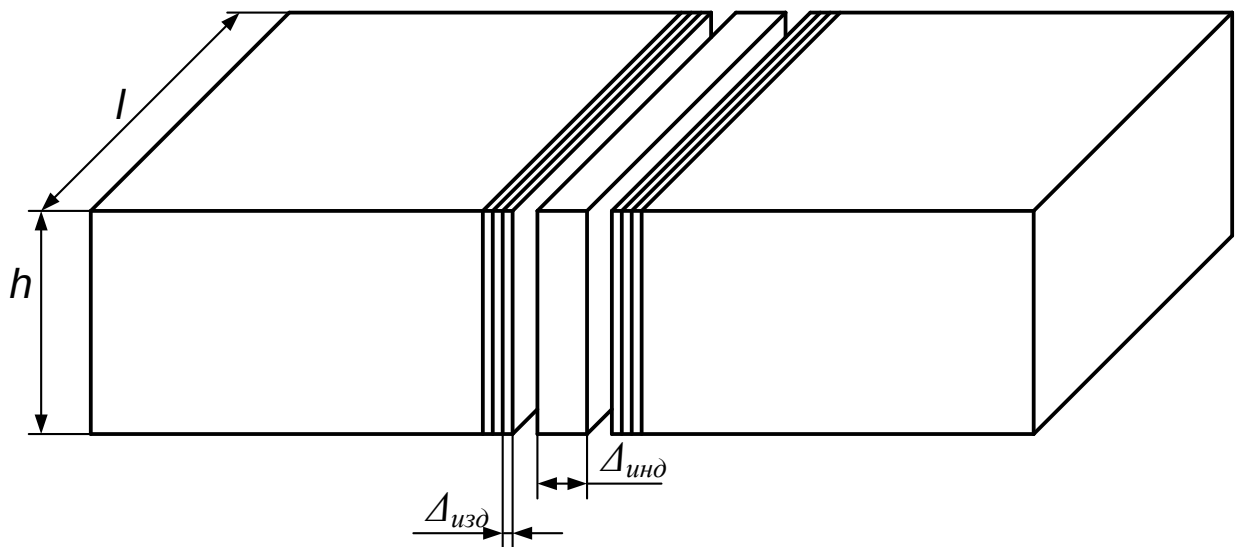


Рис. 3.10. Конструктивный чертёж свариваемого изделия

Система уравнений, описывающая электромагнитную модель в этом случае, имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{U} = \underline{Z}_u \dot{I}_u - \underline{Z}_{mu1} \dot{I}_1 - \underline{Z}_{mu2} \dot{I}_2 - \underline{Z}_{mu3} \dot{I}_3 - \underline{Z}_{mu1'} \dot{I}_{1'} - \underline{Z}_{mu2'} \dot{I}_{2'} - \underline{Z}_{mu3'} \dot{I}_{3'} \\ 0 = -\underline{Z}_{m1u} \dot{I}_u + \underline{Z}_1 \dot{I}_1 + \underline{Z}_{m12} \dot{I}_2 + \underline{Z}_{m13} \dot{I}_3 + \underline{Z}_{m11'} \dot{I}_{1'} + \underline{Z}_{m12'} \dot{I}_{2'} + \underline{Z}_{m13'} \dot{I}_{3'} \\ 0 = -\underline{Z}_{m2u} \dot{I}_u + \underline{Z}_{m21} \dot{I}_1 + \underline{Z}_2 \dot{I}_2 + \underline{Z}_{m23} \dot{I}_3 + \underline{Z}_{m21'} \dot{I}_{1'} + \underline{Z}_{22'} \dot{I}_{2'} + \underline{Z}_{m23'} \dot{I}_{3'} \\ 0 = -\underline{Z}_{m3u} \dot{I}_u + \underline{Z}_{m31} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{m32} \dot{I}_2 + \underline{Z}_3 \dot{I}_3 + \underline{Z}_{m31'} \dot{I}_{1'} + \underline{Z}_{m32'} \dot{I}_{2'} + \underline{Z}_{33'} \dot{I}_{3'} \\ 0 = -\underline{Z}_{m1'u} \dot{I}_u + \underline{Z}_{m1'l} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{m1'2} \dot{I}_2 + \underline{Z}_{m1'3} \dot{I}_3 + \underline{Z}_{1'l} \dot{I}_{1'} + \underline{Z}_{m1'2'} \dot{I}_{2'} + \underline{Z}_{m1'3'} \dot{I}_{3'} \\ 0 = -\underline{Z}_{m2'u} \dot{I}_u + \underline{Z}_{m2'l} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{2'2} \dot{I}_2 + \underline{Z}_{m2'3} \dot{I}_3 + \underline{Z}_{m2'l'} \dot{I}_{1'} + \underline{Z}_{2'2'} \dot{I}_{2'} + \underline{Z}_{m2'3'} \dot{I}_{3'} \\ 0 = -\underline{Z}_{m3'u} \dot{I}_u + \underline{Z}_{m3'l} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{m3'2} \dot{I}_2 + \underline{Z}_{3'3} \dot{I}_3 + \underline{Z}_{m3'l'} \dot{I}_{1'} + \underline{Z}_{m3'2'} \dot{I}_{2'} + \underline{Z}_{3'3'} \dot{I}_{3'} \end{cases} \quad (3.21)$$

Решая систему уравнений относительно токов, а также представляя комплексные сопротивления через собственные активные и реактивные, получим:

$$\begin{cases} \dot{I}_u = \frac{\dot{U} + j(X_{mu1} \dot{I}_1 + X_{mu2} \dot{I}_2 + X_{mu3} \dot{I}_3 + X_{mu1'} \dot{I}_{1'} + X_{mu2'} \dot{I}_{2'} + X_{mu3'} \dot{I}_{3'})}{R_u + jX_u} \\ \dot{I}_1 = \frac{j(X_{m1u} \dot{I}_u - X_{m12} \dot{I}_2 - X_{m13} \dot{I}_3 - X_{m11'} \dot{I}_{1'} - X_{m12'} \dot{I}_{2'} - X_{m13'} \dot{I}_{3'})}{R_1 + jX_1} \\ \dot{I}_2 = \frac{j(X_{m2u} \dot{I}_u - X_{m21} \dot{I}_1 - X_{m23} \dot{I}_3 - X_{m21'} \dot{I}_{1'} - X_{m22'} \dot{I}_{2'} - X_{m23'} \dot{I}_{3'})}{R_2 + jX_2} \\ \dot{I}_3 = \frac{j(X_{m3u} \dot{I}_u - X_{m31} \dot{I}_1 - X_{m32} \dot{I}_2 - X_{m31'} \dot{I}_{1'} - X_{m32'} \dot{I}_{2'} - X_{m33'} \dot{I}_{3'})}{R_3 + jX_3} \\ \dot{I}_{1'} = \frac{j(X_{m1'u} \dot{I}_u - X_{m1'l} \dot{I}_1 - X_{m1'2} \dot{I}_2 - X_{m1'3} \dot{I}_3 - X_{m1'2'} \dot{I}_{2'} - X_{m1'3'} \dot{I}_{3'})}{R_{1'} + jX_{1'}} \\ \dot{I}_{2'} = \frac{j(X_{m2'u} \dot{I}_u - X_{m2'l} \dot{I}_1 - X_{m2'2} \dot{I}_2 - X_{m2'3} \dot{I}_3 - X_{m2'l'} \dot{I}_{1'} - X_{m2'3'} \dot{I}_{3'})}{R_{2'} + jX_{2'}} \\ \dot{I}_{3'} = \frac{j(X_{m3'u} \dot{I}_u - X_{m3'l} \dot{I}_1 - X_{m3'2} \dot{I}_2 - X_{m3'3} \dot{I}_3 - X_{m3'l'} \dot{I}_{1'} - X_{m3'2'} \dot{I}_{2'})}{R_{3'} + jX_{3'}} \end{cases} \quad (3.22)$$

В то же время, учитывая равенство аналогичных параметров одноимённых слоёв двух частей свариваемого изделия, представленная система уравнений может быть сведена к четырём уравнениям:

$$\begin{cases} \dot{I}_u = \frac{\dot{U} + j(2X_{mu1}\dot{I}_1 + 2X_{mu2}\dot{I}_2 + 2X_{mu3}\dot{I}_3)}{R_u + jX_u} \\ \dot{I}_1 = \frac{j(X_{m1u}\dot{I}_u - (X_{m12} + X_{m12'})\dot{I}_2 - (X_{m13} + X_{m13'})\dot{I}_3)}{R_1 + j(X_1 + X_{m11'})} \\ \dot{I}_2 = \frac{j(X_{m2u}\dot{I}_u - (X_{m21} + X_{m21'})\dot{I}_1 - (X_{m23} + X_{m23'})\dot{I}_3)}{R_2 + j(X_2 + X_{m22'})} \\ \dot{I}_3 = \frac{j(X_{m3u}\dot{I}_u - (X_{m31} + X_{m31'})\dot{I}_1 - (X_{m32} + X_{m32'})\dot{I}_2)}{R_3 + j(X_3 + X_{m33'})} \end{cases} \quad (3.23)$$

Рационально все интересующие параметры модели для каждого конкретного изделия определять с помощью современных компьютерных программ полевого моделирования, основанных на методе конечных элементов. При этом возможно не только закладывать в модель все конструктивные параметры индуктора, изделия и их взаимного расположения в пространстве, но и проводить исследование влияния последних на параметры модели и на результаты расчёта интересующих величин. Одним из вариантов определения параметров модели, характеризующих исследуемую систему, может служить использование программного комплекса Elcut (порядок расчёта и его результаты приводятся в Приложении 5).

С целью выявления влияния учёта кривой намагничивания на параметры модели и величину токов в слоях изделия был проведён их расчёт для двух вариантов с различными значениями магнитной проницаемости материала слоёв. Кривые намагничивания и дифференциальной магнитной проницаемости для рассматриваемого изделия из стали СТ-40 приведены в приложении 5. Результаты расчёта при постоянной и переменной магнитной проницаемости представлены в табл. 3.3 и 3.4 соответственно.

Таблица 3.3. Параметры модели и токи слоёв изделия при постоянной для них магнитной проницаемости

Исходные данные опыта							
$l=1 \text{ м}; h=0,03 \text{ м}; \Delta=0,001 \text{ м}; f=2000 \text{ Гц}; \delta=5 \text{ мм}; \mu_1=20; \mu_2=20; \mu_3=20; \mu_4=20;$ $\gamma=6,25 \cdot 10^6 \text{ См/м}$							
	Индуктор	Изделие 1 слой	Изделие 2 слой	Изделие 3 слой	Изделие 1' слой	Изделие 2' слой	Изделие 3' слой
R, Ом	0,0002231	0,005373	0,005373	0,005373	0,005373	0,005373	0,005373
$X_{\text{сум}}, \text{ Ом}$	0,010403	0,015494	0,021298	0,025243	0,015489	0,021295	0,02524
$X_{\text{нар}}, \text{ Ом}$	-	0,013228	0,017616	0,020001	0,013226	0,01761	0,019999
$X_{\text{внут}}, \text{ Ом}$	-	0,002266	0,003682	0,005242	0,002263	0,003685	0,005241
Сопротивления взаимной индуктивности, $\cdot 10^{-3}$							
Индуктор	-	9,659	9,2089	8,802	9,6591	9,2097	8,8025
Изделие 1 слой	9,659	-	15,46	14,085	9,1027	8,6729	8,2895
Изделие 2 слой	9,2089	15,46	-	19,855	8,6724	8,2792	7,9278
Изделие 3 слой	8,802	14,085	19,855	-	8,2895	7,9282	7,6048
Рассчитанные значения токов в программе Elcut				Рассчитанные значения токов в программе Matlab			
$I_u=1000 \text{ А}$ и $U_u=3,4374 \text{ В}$ $I_1=291,73 \text{ А}; I_2=117,78 \text{ А}; I_3=52,146 \text{ А};$				$I_u=1000 \text{ А}$ и $U_u=3,7044 \text{ В}$ $I_1=271,1687 \text{ А}; I_2=121,0765 \text{ А}; I_3=58,3729 \text{ А};$			

Таблица 3.4. Параметры модели и токи слоёв изделия при учёте кривой намагничивания

Исходные данные опыта							
$l=1 \text{ м}; h=0,03 \text{ м}; \Delta=0,001 \text{ м}; f=2000 \text{ Гц}; \delta=5 \text{ мм}; \mu_1=20; \mu_2=86; \mu_3=167; \mu_4=198,9;$ $\gamma=6,25 \cdot 10^6 \text{ См/м}$							
	Индуктор	Изделие 1 слой	Изделие 2 слой	Изделие 3 слой	Изделие 1' слой	Изделие 2' слой	Изделие 3' слой
R, Ом	0,0002231	0,005373	0,005373	0,005373	0,005373	0,005373	0,005373
$X_{\text{сум}}, \text{ Ом}$	0,010672	0,016798	0,030582	0,060863	0,016792	0,030532	0,06082
$X_{\text{нар}}, \text{ Ом}$	-	0,01379	0,018914	0,026826	0,013789	0,018906	0,02682
$X_{\text{внут}}, \text{ Ом}$	-	0,003008	0,011668	0,034037	0,003003	0,011626	0,034
Сопротивления взаимной индуктивности, $\cdot 10^{-3}$							
Индуктор	-	10,113	9,8564	9,4205	10,113	9,8568	9,4201
Изделие 1 слой	10,113	-	17,348	15,744	9,818	9,5647	9,1297
Изделие 2 слой	9,8564	17,348	-	30,713	9,5639	9,322	8,9079
Изделие 3 слой	9,4205	15,744	30,713	-	9,1304	8,9092	8,5282
Рассчитанные значения токов в программе Elcut				Рассчитанные значения токов в программе Matlab			
$I_u=1000 \text{ А}$ и $U_u=3,5132 \text{ В}$ $I_1=328,38 \text{ А}; I_2=96,597 \text{ А}; I_3=2,138 \text{ А};$				$I_u=1000 \text{ А}$ и $U_u=3,9045 \text{ В}$ $I_1=316,128 \text{ А}; I_2=111,3497 \text{ А}; I_3=10,2363 \text{ А};$			

Сопоставление полученных результатов указывает на то, что учёт изменения магнитной проницаемости слоёв в соответствии с кривой намагничивания приводит к отклонению параметров, характеризующих непосредственно участвующий в сварке поверхностный слой (индуктивное сопротивление слоя и сопротивление его взаимоиндукции с индуктором), в пределах 8% и 5% соответственно. При этом отличие тока первого слоя в обоих случаях находится в пределах 11%. Естественно большее отличие имеют параметры и токи второго и, особенно, третьего слоя за счёт возросшего при учёте кривой намагничивания их индуктивного сопротивления. Однако, ток третьего слоя на два порядка меньше тока первого слоя, что естественно выражается в его меньшем влиянии на температурные процессы. Кроме того, в предлагаемой модели декомпозиции изделия на три слоя не учитываются токи внутренних слоёв, что нивелирует стремление получать более точное значение тока последнего учитываемого слоя. Также в динамике нагрева относительная магнитная проницаемость третьего слоя может меняться, и в какой-то момент температура может превысить точку Кюри, что приведёт к изменению величины тока. Однако, как показывает исследование температурных процессов, его значение остаётся менее значимым, чем первого слоя. Поэтому данные расчёта параметров модели электромагнитных процессов указывают на незначительное влияние учёта кривой намагничивания на результаты анализа температурных процессов.

При индукционно-стыковой сварке изделий из ферромагнитных материалов нагрев поверхностного слоя выше точки структурных преобразований приводит к скачкообразному уменьшению относительной магнитной проницаемости до $\mu = 1$. Поэтому важно оценить влияние этого процесса на модель расчёта электромагнитных процессов. С этой целью было проведено определение параметров модели при переходе поверхностным слоем точки Кюри. Результаты расчёта сведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Параметры модели и токи слоёв изделия при $\mu_1 = 1$

Исходные данные опыта							
$l=1 \text{ м}; h=0,03 \text{ м}; \Delta=0,001 \text{ м}; f=2000 \text{ Гц}; \delta=5 \text{ мм}; \mu_1=1; \mu_2=86; \mu_3=167; \mu_4=198,9;$ $\gamma=6,25 \cdot 10^6 \text{ См/м}$							
	Индуктор	Изделие 1 слой	Изделие 2 слой	Изделие 3 слой	Изделие 1' слой	Изделие 2' слой	Изделие 3' слой
$R, \text{ Ом}$	0,0002231	0,005373	0,005373	0,005373	0,005373	0,005373	0,005373
$X_{\text{сум}}, \text{ Ом}$	0,010512	0,013703	0,022678	0,055521	0,013701	0,022625	0,055482
$X_{\text{нар}}, \text{ Ом}$	-	-	-	-	-	-	-
$X_{\text{внут}}, \text{ Ом}$	-	-	-	-	-	-	-
Сопротивления взаимной индуктивности, $\cdot 10^{-3}$							
Индуктор	-	9,9614	9,786	9,3718	9,9611	9,7852	9,3713
Изделие 1 слой	9,9614	-	13,274	12,433	9,6062	9,4194	9,0126
Изделие 2 слой	9,786	13,274	-	24,877	9,4195	9,2379	8,8472
Изделие 3 слой	9,3718	12,433	24,877	-	9,0131	8,8476	8,4868
Рассчитанные значения токов в программе Elcut				Рассчитанные значения токов в программе Matlab			
$I_u=1000 \text{ А}$ и $U_u=2,5881 \text{ В}$ $I_1=334,27 \text{ А}; I_2=126,38 \text{ А}; I_3=11,714 \text{ А};$				$I_u=1000 \text{ А}$ и $U_u=3,0041 \text{ В}$ $I_1=313,0631 \text{ А}; I_2=143,4431 \text{ А}; I_3=24,1885 \text{ А};$			

Сопоставление результатов расчёта параметров показывает, что сопротивление взаимной индукции первого слоя с индуктором уменьшилось всего на 1,5%. Несколько больше изменилось индуктивное сопротивление поверхностного слоя (на 18%). Однако его ток изменился менее чем на 2%. Это указывает на то, что учёт изменения относительной магнитной проницаемости при переходе температурой точки Кюри не даёт значимого повышения точности расчёта индукционного нагрева в целом.

При полученных значениях параметров декомпозиционной модели были рассчитаны токи в слоях изделия, которые сравнивались с аналогичными результатами в программе Elcut. Проведённый анализ указывает на небольшое отклонение токов во всех случаях для наиболее важного с точки зрения осуществления индукционно-стыковой сварки первого слоя. При этом максимальное значение относительной погрешности в рассчитанных значениях не превышает 7%.

3.6. Совмещённая модель расчёта динамики процессов с учётом характеристик источника энергии

Исследование взаимовлияния тепловых процессов в изделии с характеристиками источника является основой разработки технологии индукционного нагрева и выбора оборудования для её реализации. На рис. 3.11 представлена структурная схема совмещённой модели источника энергии и нагреваемого изделия при их трёхслойной декомпозиции. При более детальной декомпозиции на n слоёв функциональная схема совмещённой модели приобретает вид рис. 3.12.

На рис. 3.13 – 3.17 даны результаты моделирования динамики наиболее характерных параметров индукционного нагрева четырехслойного изделия стали СТ-40 (структура изделия представлена ранее на рис. 3.10) при подаче на индуктор постоянного по величине напряжения, равного 2,75 В. Рис. 3.13,а,б характеризует динамику изменения тока индуктора и поступающих от него токов в слои изделия. На рис. 3.14 представлены температуры первого, второго и третьего слоёв, на рис. 3.15 дано изменение во времени удельного сопротивления, на рис. 3.16 – теплопроводности и на рис. 3.17 – теплоёмкости первого, второго и третьего слоёв.

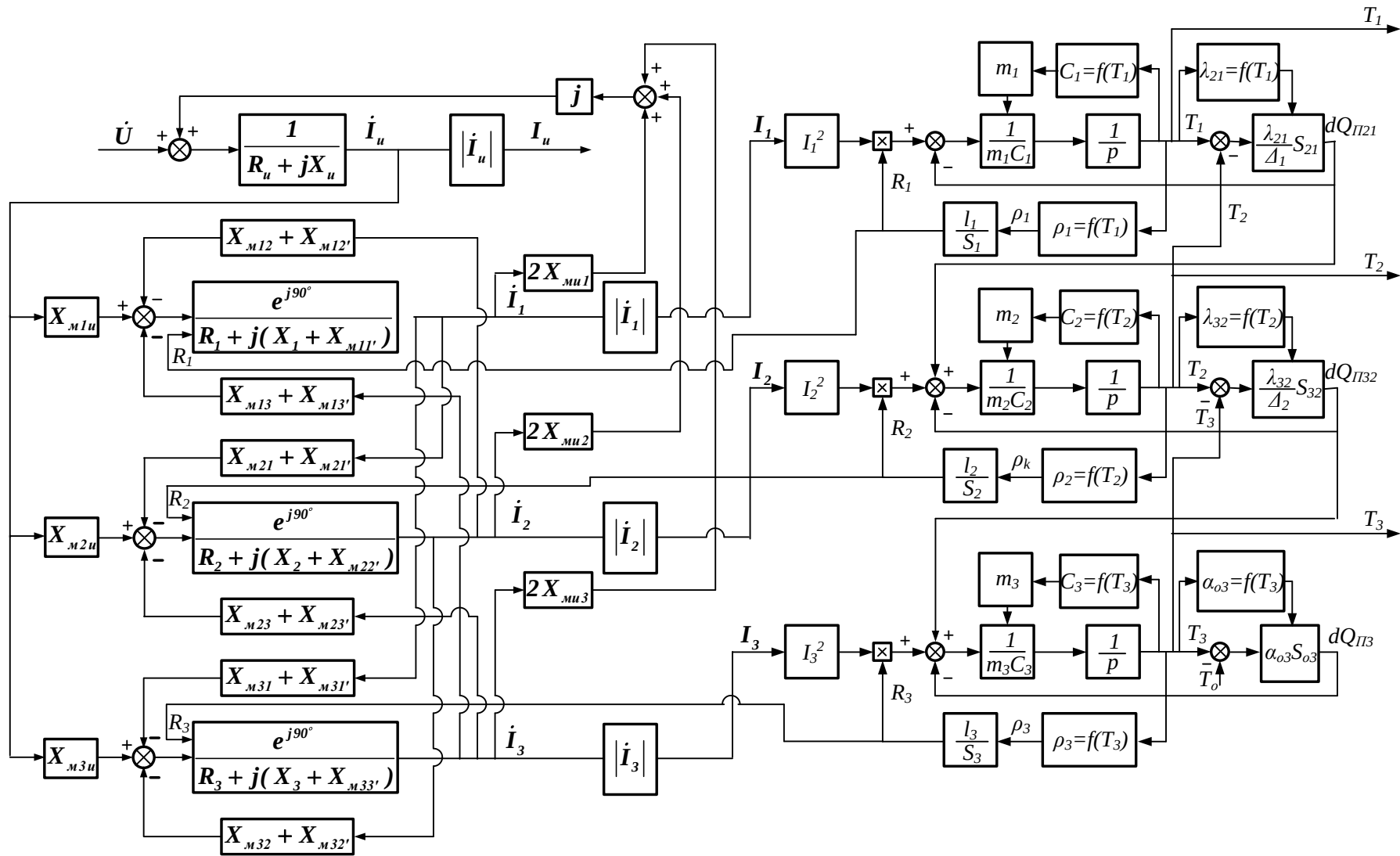


Рис. 3.11. Структурная схема совмещённой модели источника и трёхслойного нагреваемого изделия

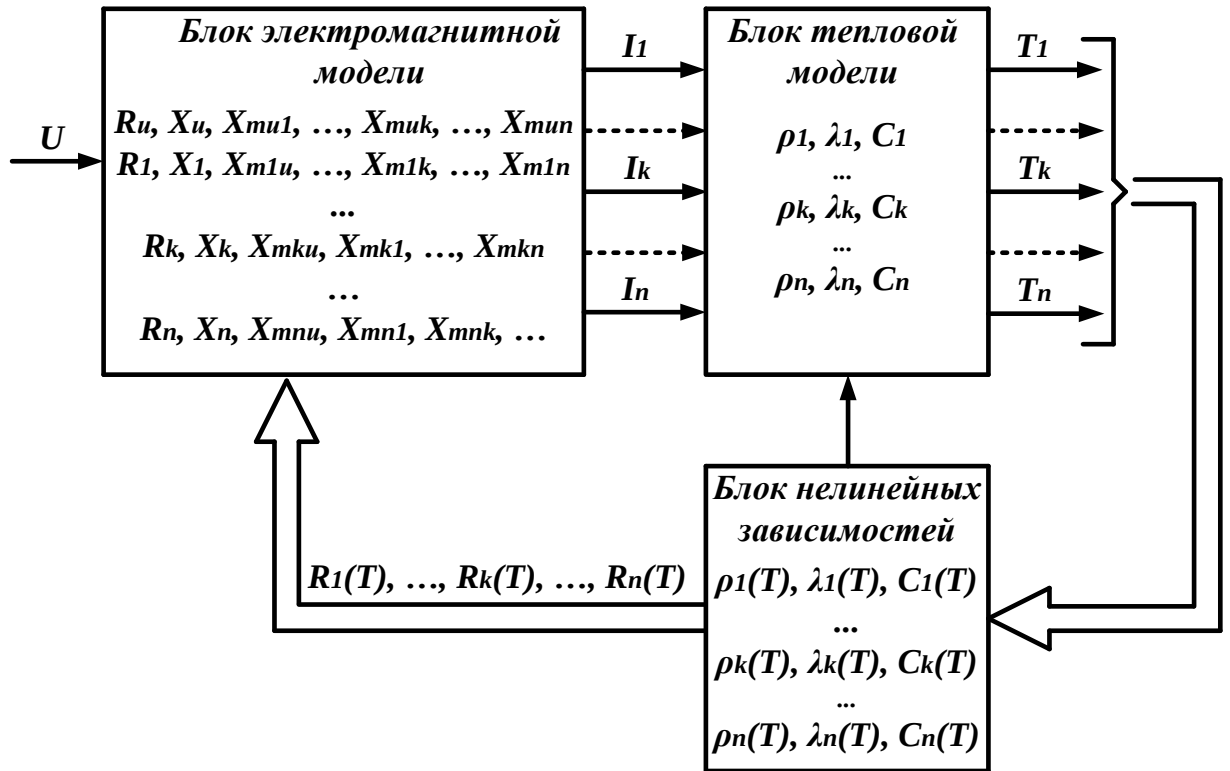


Рис. 3.12. Функциональная схема совмещённой модели источника нагреваемого изделия при декомпозиции на n слоёв

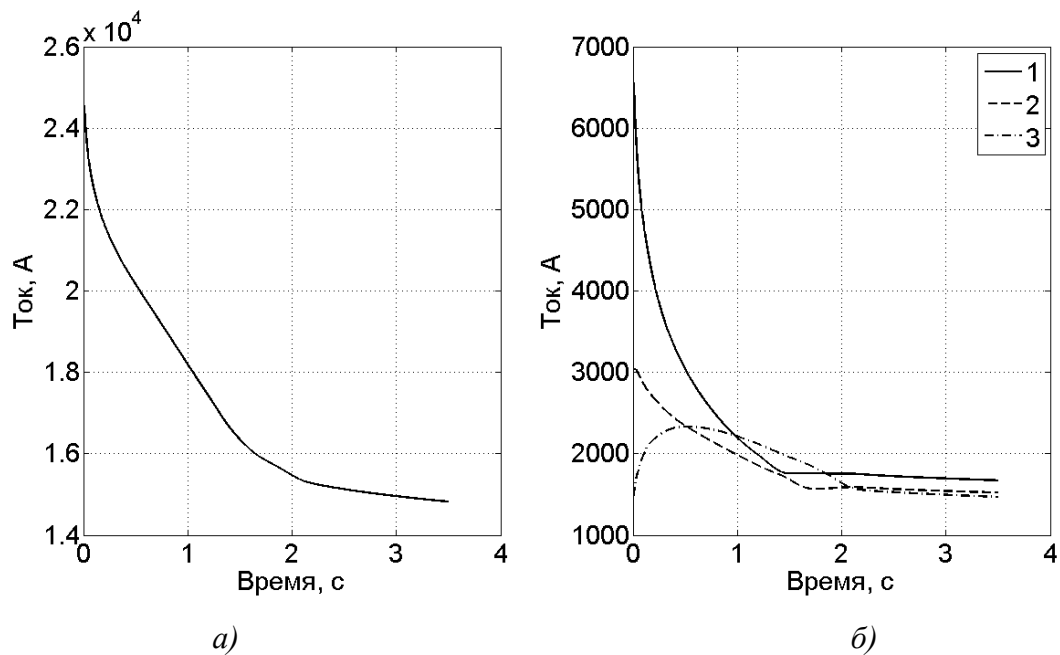


Рис. 3.13. Динамика изменения токов в индукторе (а) и слоях нагреваемого изделия (б):
1 – первый слой; 2 – второй слой; 3 – третий слой

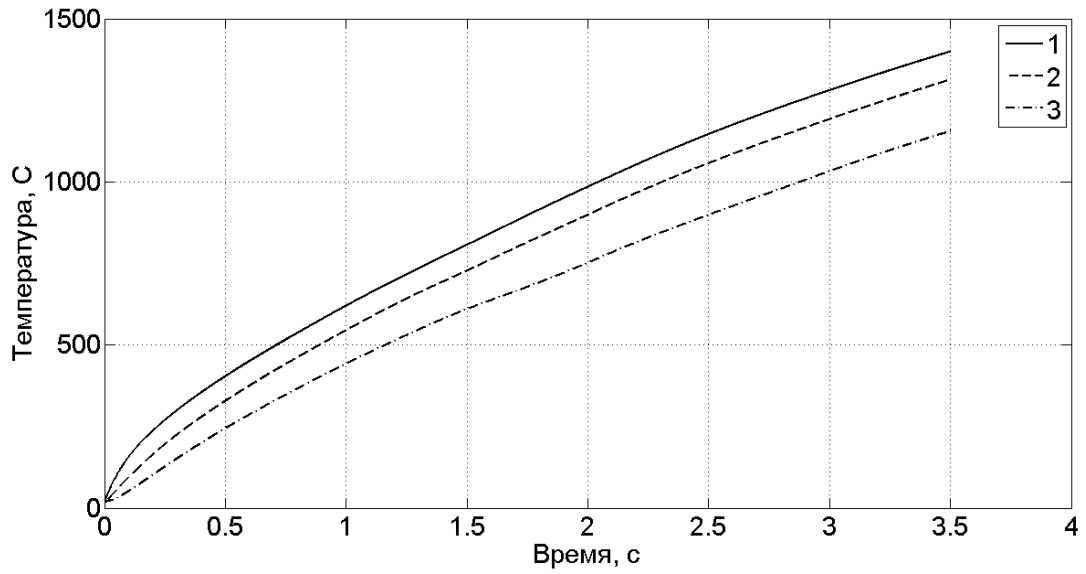


Рис. 3.14. Динамика изменения температуры в слоях нагреваемого изделия:

1 – первый слой; 2 – второй слой; 3 – третий слой

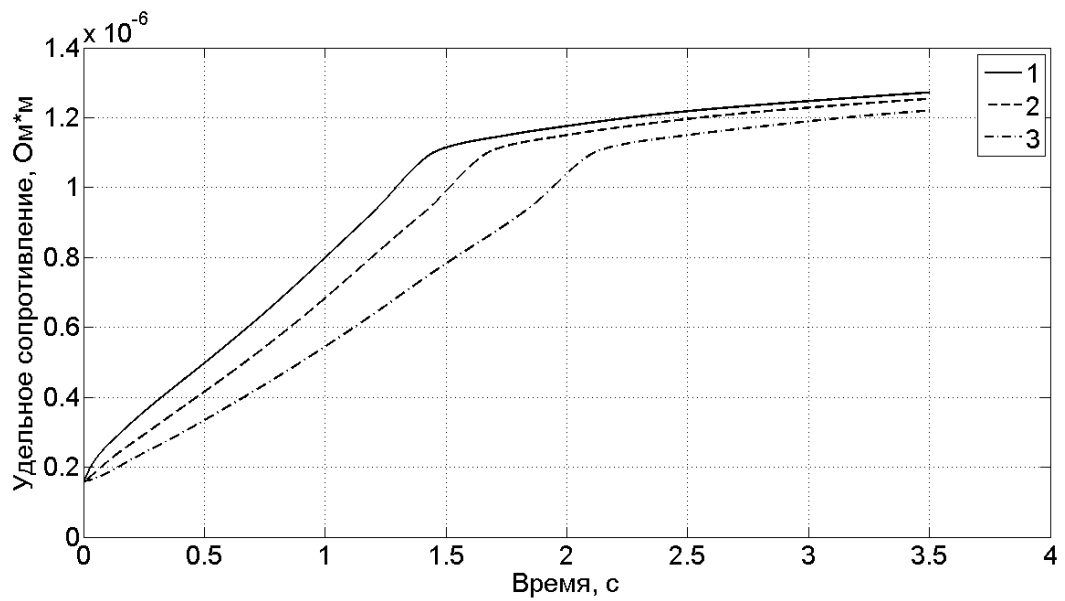


Рис. 3.15. Динамика изменения удельного электрического сопротивления в слоях

нагреваемого изделия: 1 – первый слой; 2 – второй слой; 3 – третий слой

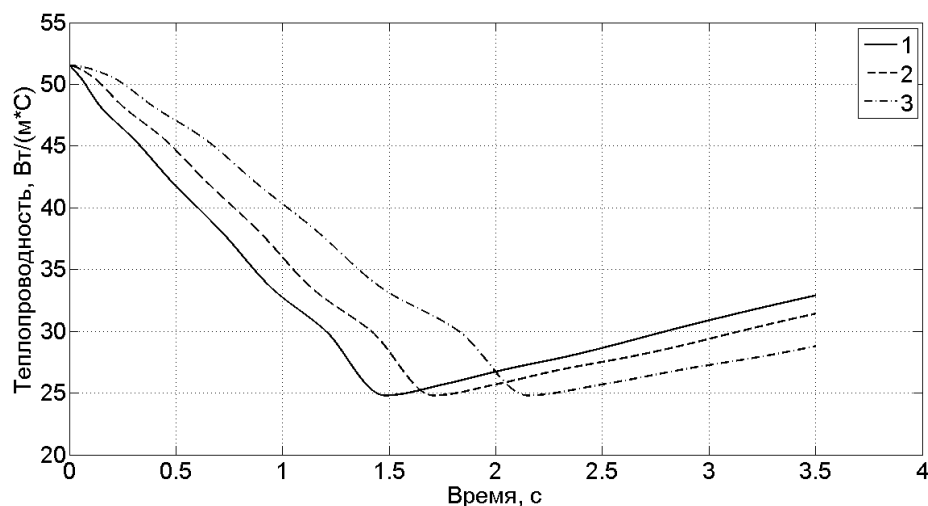


Рис. 3.16. Динамика изменения теплопроводности в слоях нагреваемого изделия:
1 – первый слой; 2 – второй слой; 3 – третий слой

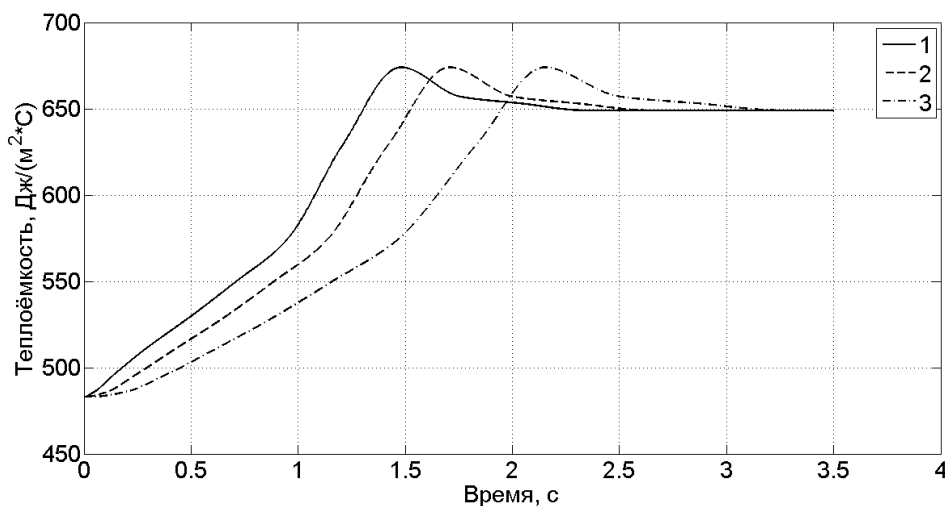


Рис. 3.17. Динамика изменения теплоёмкости в слоях нагреваемого изделия:
1 – первый слой; 2 – второй слой; 3 – третий слой

Анализ динамики переменных, характеризующих индукционный нагрев, указывает на существенное отличие нелинейно изменяющихся параметров в процессе нагрева изделия по глубине. Отставание увеличения удельного сопротивления и теплоёмкости, а также уменьшения теплопроводности по слоям приводят к отличным по характеру распределениям токов по интервалам времени нагрева (рис 3.18). Гистограммы показывают, что в момент начала нагрева ($t = 0$) при одинаковых для всех слоёв нелинейно изменяющихся параметрах распределение токов соответствует их статическому экспоненциальному

закону ($I_1 > I_2 > I_3$). К моменту времени $t = 0,5$ с происходит более чем двукратное снижение численного значения тока первого слоя, а также приблизительное выравнивание токов второго и третьего слоёв ($I_1 > I_2 = I_3$). Через секунду после начала нагрева ($t = 1$ с) ток третьего слоя становится приблизительно равным току первого слоя, который в свою очередь больше тока второго слоя ($I_3 = I_1 > I_2$). В дальнейшем $t > 2$ с падение токов прекращается, и их соотношение для всех слоёв сводится к первоначальному уровню. Эти и другие моменты времени указывают на неравномерность поступления греющих слоёв токов за счёт параметров, изменяющихся в соответствии с их нелинейными зависимостями от температуры, что должно быть учтено при исследовании и выборе режима нагрева для заданного технологического процесса.

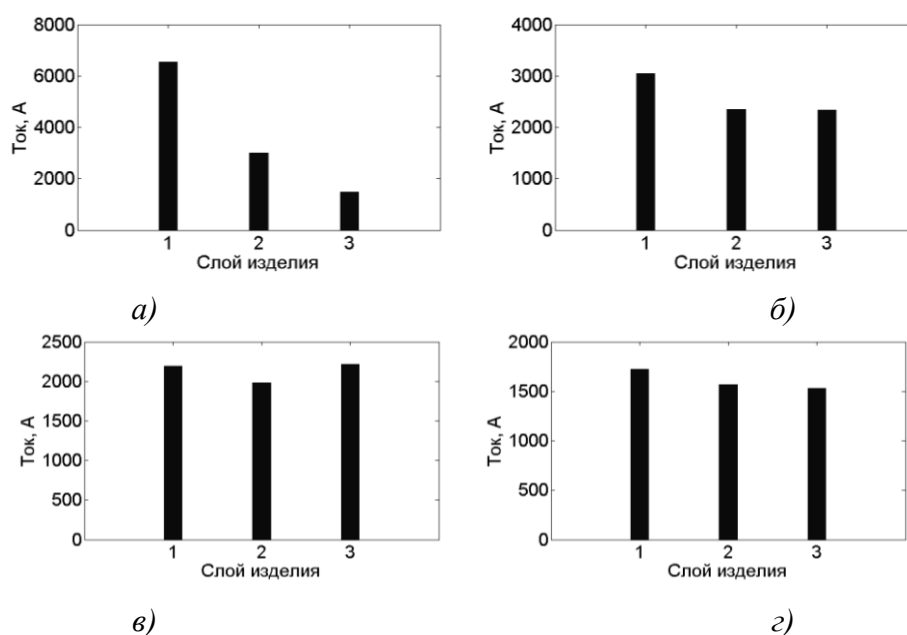


Рис. 3.18. Характер распределения токов в слоях в динамике индукционного нагрева: а – начальный момент времени; б – момент времени 0,5 с; в – момент времени 1 с; г – момент времени 2,5 с

В целом проведённое моделирование динамики температурных процессов показало расширенные возможности разработанной модели по получению широкого спектра информации, необходимой при разработке технологии индукционного нагрева и совершенствования применяемого оборудования.

3.7. Результаты и выводы

1. Обоснованы принципы создания модели источника энергии на основе представления индуктора и нагреваемого изделия в виде многообмоточного трансформатора с разомкнутым магнитопроводом.

2. Разработаны математические модели многообмоточного трансформатора с индуктором в качестве первичной обмотки и слоёв изделия как вторичных обмоток с характеризующими их коэффициентами взаимоиנדукции, а также активными и реактивными сопротивлениями для различных областей их применения

- для мгновенных значений напряжений и токов;
- для действующих значений напряжений и токов;
- на основе схемы замещения с вносимым сопротивлением.

3. 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, показавший возможность с достаточной точностью не учитывать её изменение по слоям в связи с незначительным изменением тока поверхностного слоя. Показано незначительное влияние перехода температурой точки структурных преобразований ферромагнитного материала на параметры модели поверхностного слоя.

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

Глава 4. Исследование характеристик индукционного нагрева плоских поверхностей при индукционно-стыковой сварке

Индукционный нагрев, как вид технологии, имеет самое широкое распространение в самых различных областях промышленности и бытовой сферы деятельности человека. Разнообразие целей и видов оборудования, использующих индукционный нагрев, ведёт к существенному отличию его технологии, выражающегося, как в связи её с мощностями установок, так и в конкретных технологических этапах её реализации.

Разработанная индукционно-стыковая сварка имеет значительные отличия от других видов применения индукционного нагрева характером его введения в нагреваемое изделие, наличием периода отключённого источника энергии, конструкцией плоского индуктора и его позиционированием в рабочем пространстве, а также рядом других особенностей. Кроме того, как и в любой электротехнической установке, важным вопросом является анализ энергетических характеристик технологии, оптимизация режима энергопотребления и конструктивная проработка используемого оборудования. Всё это делает важным проведение исследования характеристик индукционного нагрева плоских поверхностей для индукционно-стыковой сварки как с помощью разработанных моделей, так и посредством применения известных методик решения конкретных технологических задач.

4.1. Анализ основных особенностей индукционно - стыковой сварки

С целью формирования основных направлений конструирования установок индукционно – стыковой сварки, а также выбора параметров технологии было проведено её исследование с помощью программы ELCUT [48, 91].

Моделирование, проводимое в программе ELCUT, осуществлялось в соответствии с геометрией модели, представленной на рис. 4.1.

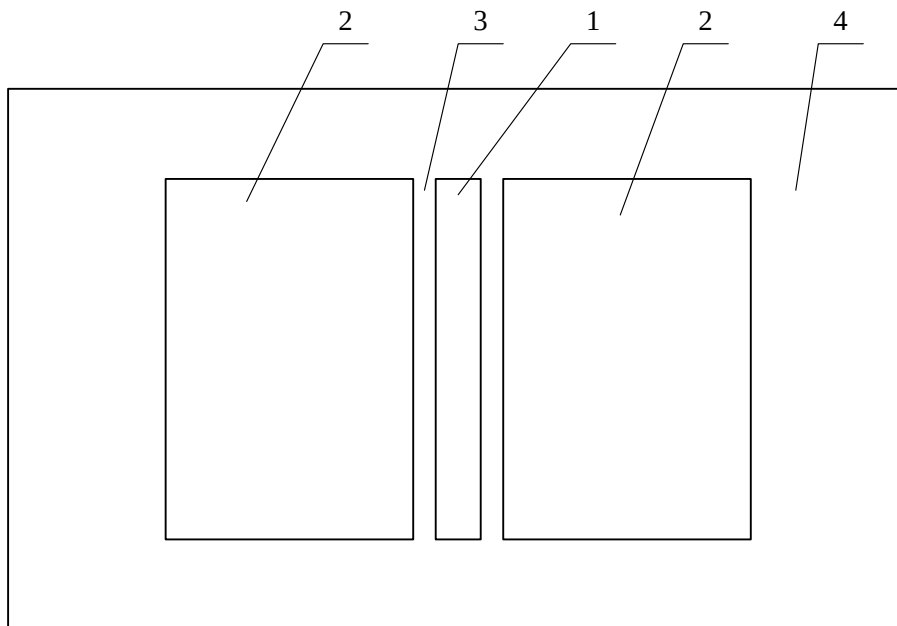


Рис. 4.1. Геометрия модели индукционного нагрева

Модель состоит из следующих частей:

- 1) Плоский индуктор из меди, для которого заданы магнитная проницаемость $\mu = 1$, проводимость $\gamma = 58100000 \text{ См/м}$ и ток $I = 1000 \text{ А}$.
- 2) Нагреваемое изделие из материала Сталь 40, для которого заданы $\mu = 100$ и $\gamma = 6250000 \text{ См/м}$.
- 3) Воздушный зазор между индуктором и изделием, для которого заданы $\mu = 1$ и $\gamma = 0$.
- 4) Расчётная область, для которой заданы граничные значения, а именно равенство нулю векторного магнитного потенциала.

Класс модели – плоская, эксперименты проводились с изменением значений воздушного зазора от $0,1 \text{ мм}$ до 5 мм , частоты от 2 кГц до 50 кГц и удельного сопротивления, которое изменяется с ростом температуры согласно табл. 4.1.

Табл. 4.1. Зависимость удельного сопротивления Стали 40 от температуры

$t \text{ } ^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700
$\rho \cdot 10^{-9}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	160	221	296	387	493	619	766	932

Картина распределения магнитного поля в расчетной зоне, представленная на рисунке 4.2, а, б, указывает на его концентрацию в поверхностном слое нагреваемого изделия, что при переменном токе приводит к его интенсивному нагреву.

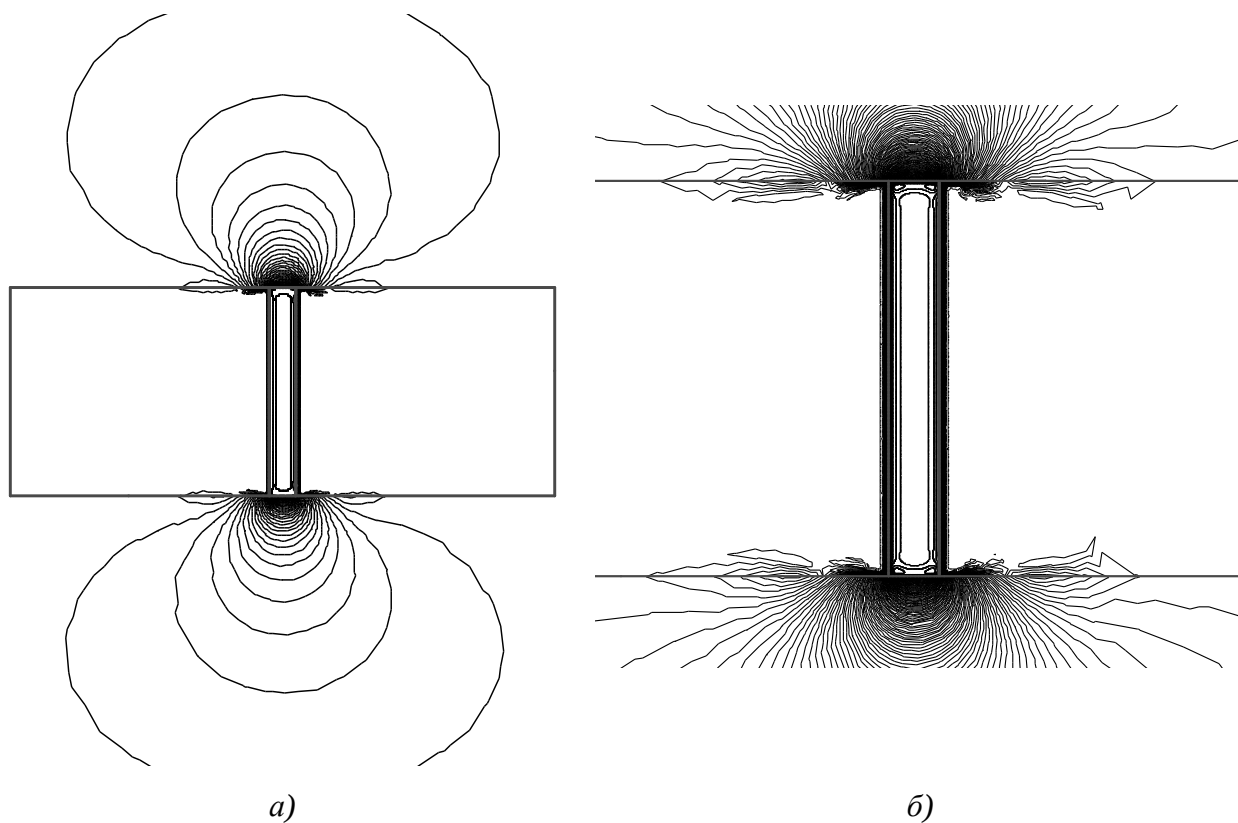


Рис. 4.2. Распределение магнитного поля в расчетной зоне

График распределения индукции по глубине при воздушном зазоре $X = 0,1$ мм и при частоте тока $f = 20$ кГц представлен на рис. 4.3. Анализ распределения индукции показывает, что при увеличении глубины она убывает, уменьшаясь до нуля при $X = 5$ Δ.

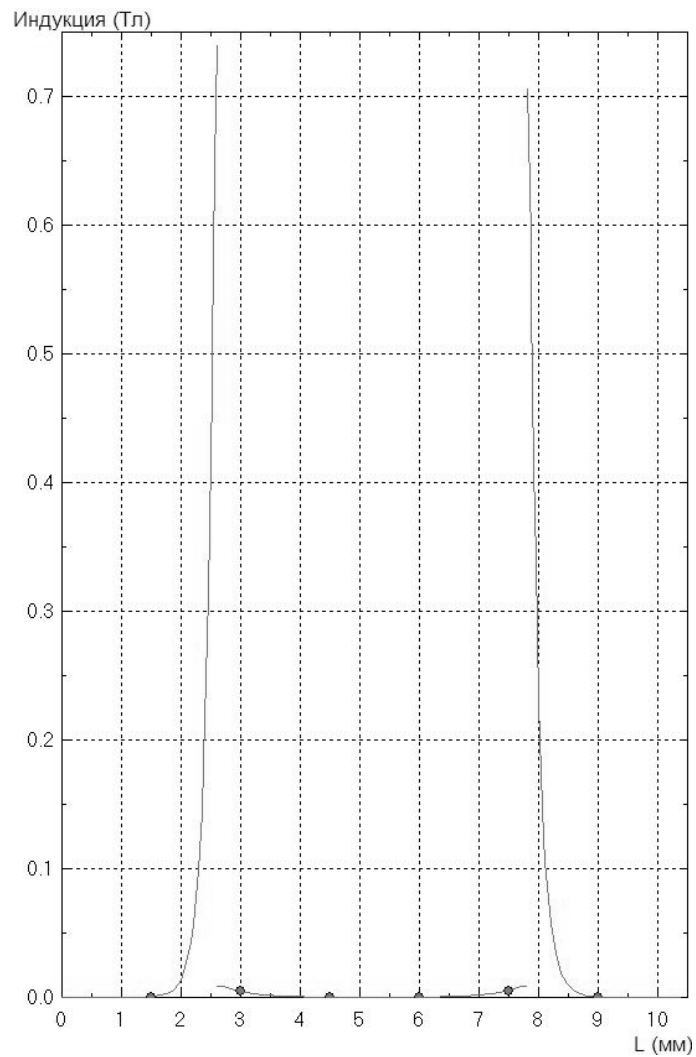


Рис. 4.3. График распределения индукции по глубине проникновения магнитного поля

График распределения тока по глубине проникновения при воздушном зазоре $\Delta = 0,1$ мм и при частоте тока $f = 20$ кГц представлен на рис. 4.4. Анализ распределения тока показывает, что при увеличении глубины ток убывает по экспоненциальному закону, уменьшаясь до нуля при $X = 5 \Delta$.

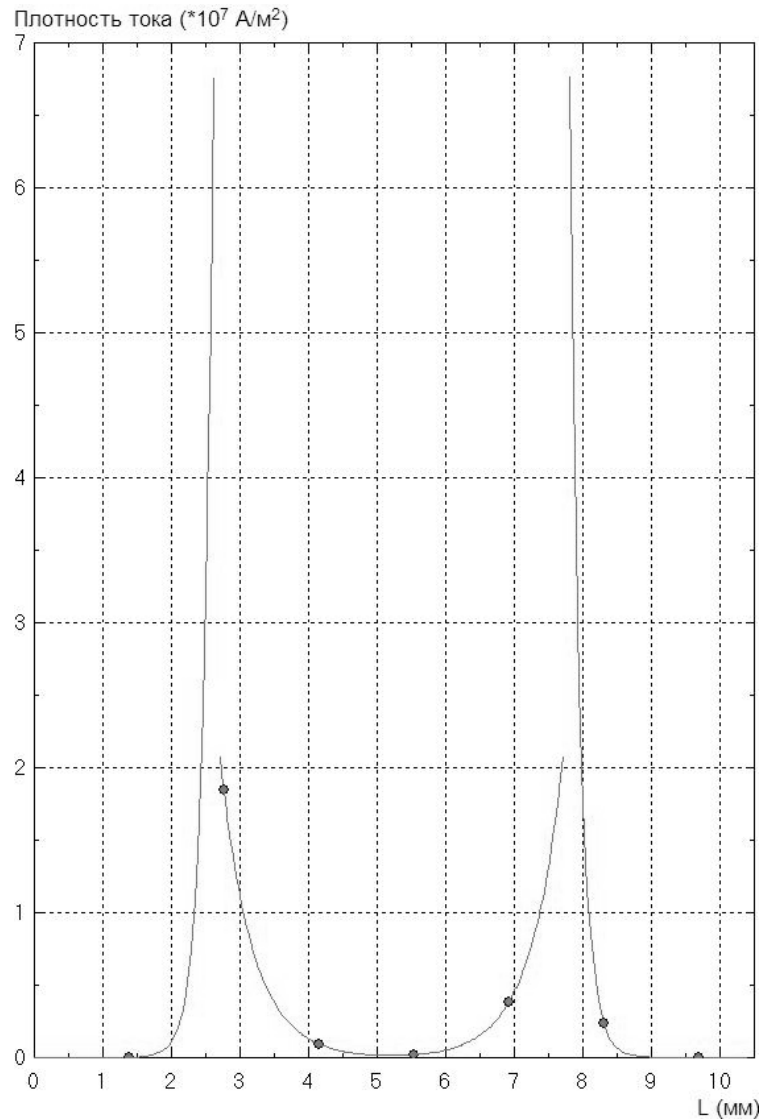


Рис. 4.4. График распределения тока по глубине его проникновения в изделие

Не менее важным для обеспечения равномерности нагрева поверхности имеет распределение тока по ней. На рис. 4.5 дан график его распределения по поверхностному слою, который показывает, что для обеспечения равномерности ее нагрева необходимо подбирать соответствующую форму индуктора.

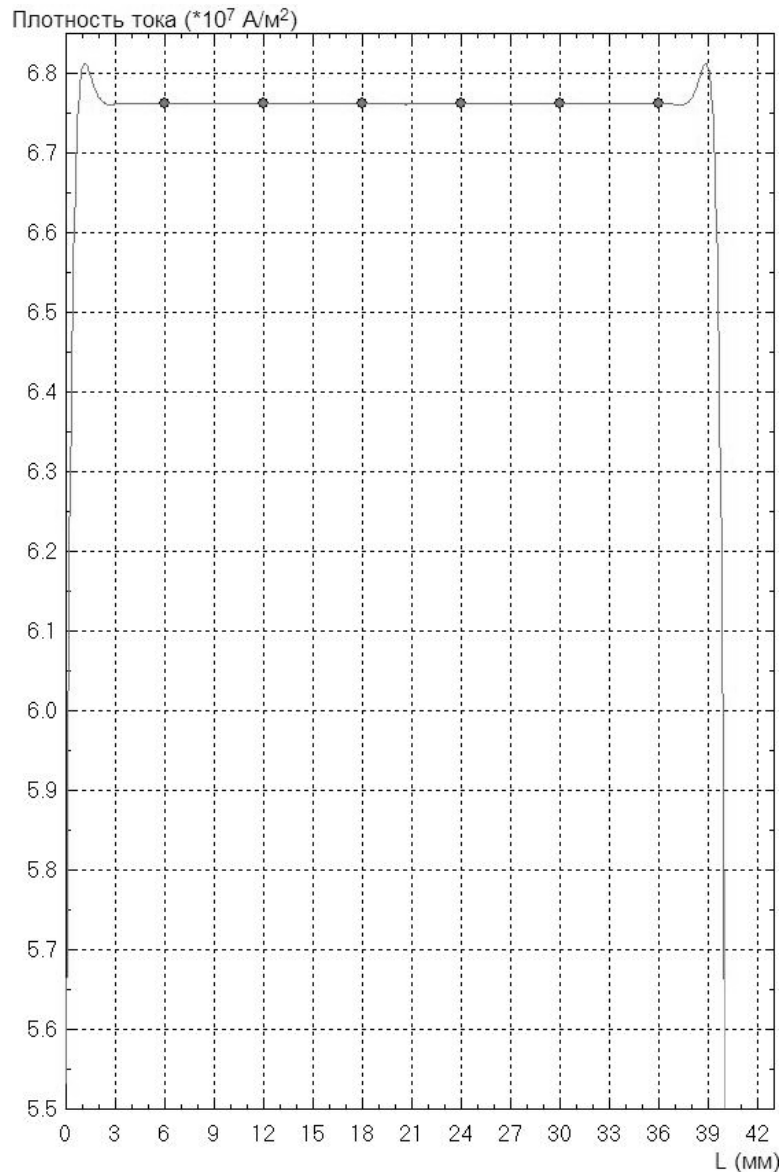


Рис. 4.5. График распределения тока по поверхности изделия

Как указывалось ранее, частота питающего индуктор тока определяет глубину его проникновения и, соответственно, толщину нагреваемого слоя изделия. В зависимости от требований технологии она может изменяться в значительных пределах, что требует выбора частоты источника тока. Поэтому важно знать эту зависимость и использовать ее для удовлетворения требований технологии, а также при выборе источника для индукционного нагрева.

Далее рассматривается зависимость величины максимальной плотности тока на поверхности изделия от частоты. Величина воздушного зазора постоянна и равна 5 мм, ток индуктора – 1000 А, а частота меняется в

пределах от 2 кГц до 50 кГц. Результаты моделирования представлены в табл. 4.2 и на рис. 4.6.

Таблица 4.2. Зависимость максимальной плотности тока на поверхности изделия от частоты

$f, \text{кГц}$	2	4	6	8	10	20	30	40	50
$J \cdot 10^6, \text{А/мм}^2$	9,41	9,96	9,92	9,79	9,64	8,92	8,49	8,29	8,2

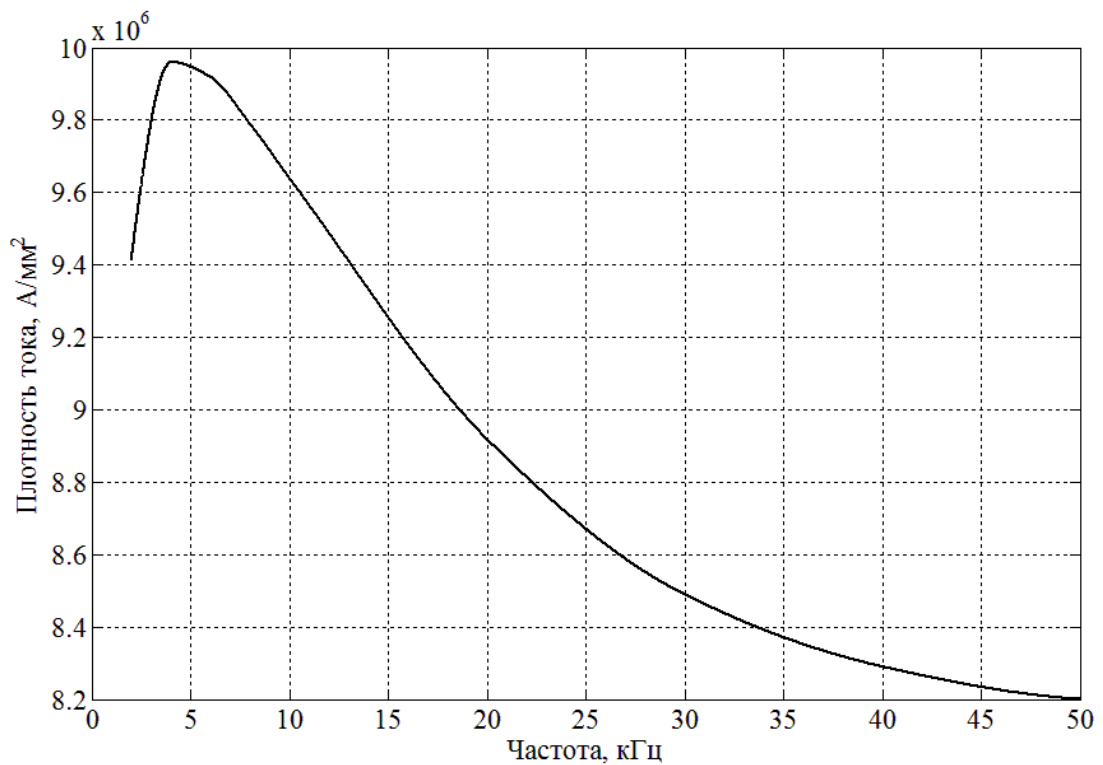


Рис. 4.6. Зависимость плотности тока от частоты тока

Из графика видно, что при низких частотах происходит увеличение плотности тока с последующим её снижением при частотах выше 4 кГц. Эффект наличия экстремума объясняется разнонаправленным действием активной и реактивной составляющих вносимых в индуктор активной и реактивной составляющих сопротивления нагреваемого изделия. Это позволяет сделать вывод о том, что для каждой системы индуктор – изделие существует своя оптимальная частота, которая должна учитываться при разработке технологии индукционного нагрева и конструировании индуктора, а также при выборе и расчете источника питания.

Количество выделенного в изделии тепла определяет как технологию нагрева, так и его энергетические характеристики. Поэтому при модельном эксперименте были рассмотрены зависимости максимального значения тепловыделения на поверхности изделия от частоты тока и от его удельного сопротивления. При этом величина воздушного зазора оставалась постоянной и равной 5 мм, а частота изменялась в пределах от 2 кГц до 50 кГц. В то же время удельное сопротивление изменялось согласно табл. 4.1. Результаты моделирования представлены в табл. 4.3 и 4.4, а так же на рис. 4.7 и 4.8.

Анализ кривой распределения тепловыделения по глубине удаления от поверхности, представленный на рис. 4.7, указывает на значительное его снижение при удалении от поверхности. Однако при разработке технологии важно знать максимальное значение тепловыделения, по которому можно далее определять характер нагрева.

Табл. 4.3. Зависимость тепловыделения от частоты

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

Таблица 4.4. Зависимость тепловыделения от удельного электрического сопротивления

$\rho \cdot 10^{-9}, \text{Ом} \cdot \text{м}$	160	221	296	387	493	619	766	932
$Q \cdot 10^7, \text{Вт/м}^3$	1,27	1,9	2,7	3,67	4,8	6,1	7,54	9,04

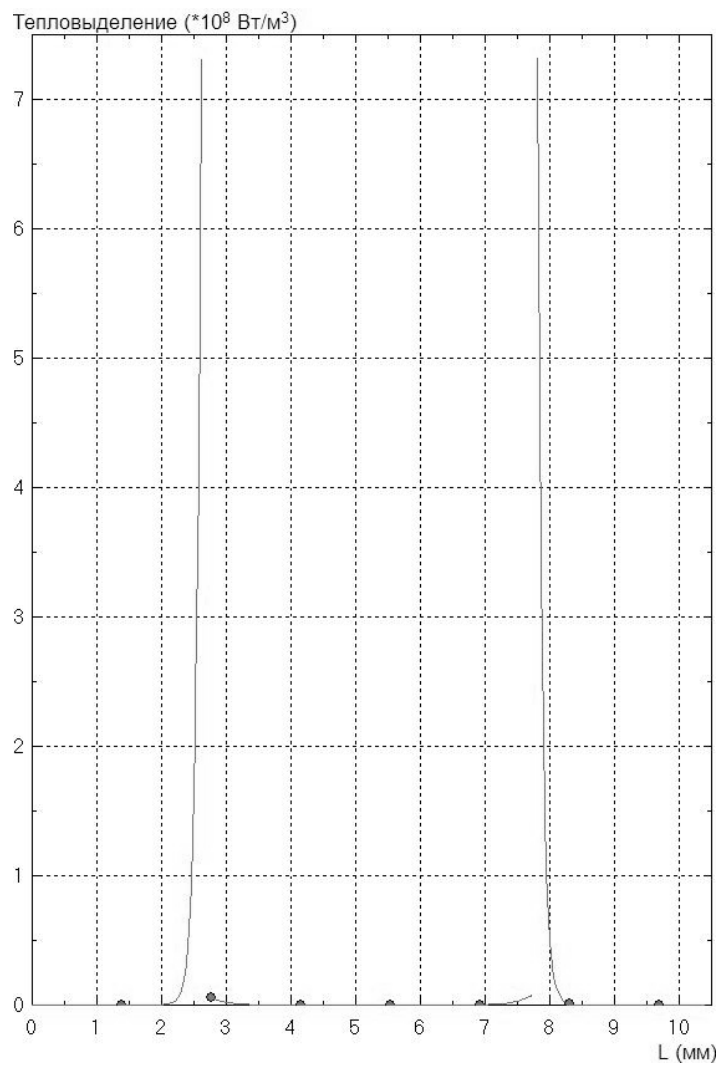


Рис. 4.7. График распределения тепловыделения по глубине изделия

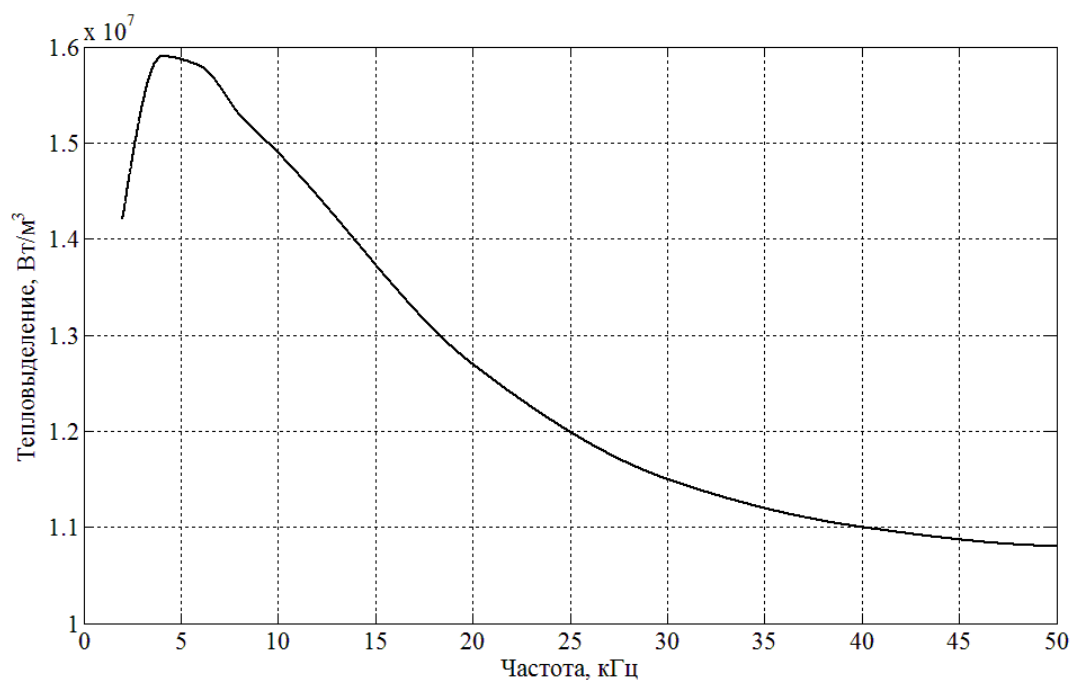


Рис. 4.8. Зависимость тепловыделения от частоты тока

Анализ кривой максимального тепловыделения на поверхности изделия от частоты указывает на её идентичный характер распределению тока, что полностью соответствует их взаимозависимости.

В процессе нагрева стального изделия происходит изменение его удельного сопротивления и магнитной проницаемости. При увеличении температуры до точки Кюри, соответствующей структурным преобразованиям в стали, магнитная проницаемость меняется незначительно, в то время как при переходе этой точки происходит резкий скачок ее величины до $\mu=1$. Поэтому при исследовании индукционного нагрева стального изделия до точки магнитных превращений изменение магнитной проницаемости можно не учитывать, и наибольший интерес в этом случае представляет зависимость тепловыделения от удельного сопротивления изделия, представленный на рис. 4.9.

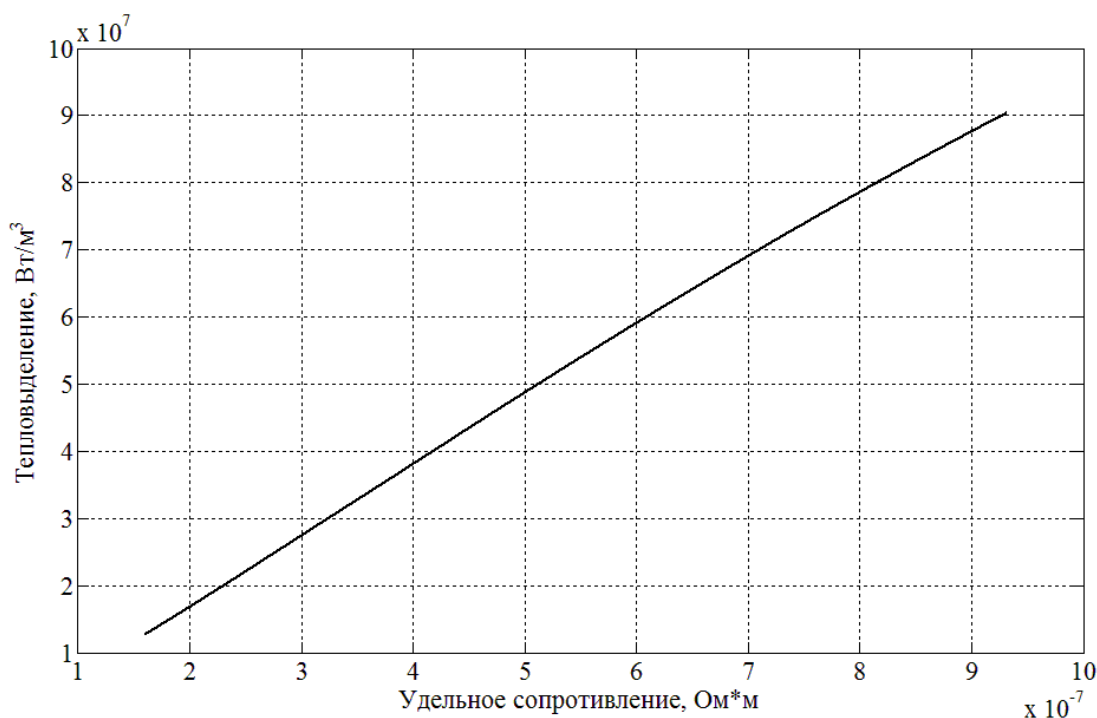


Рис. 4.9. Зависимость тепловыделения от удельного сопротивления

Анализ графика указывает на значительное увеличение тепловыделения в изделии с ростом его удельного сопротивления. Это показывает, что неравномерность температуры изделия по глубине при нагреве первоначально поверхностного слоя будет значительной, что

необходимо учитывать при разработке технологии и системы управления индукционной установкой.

Эффект близости проявляется при небольшом расстоянии между двумя токоведущими проводниками. Чем меньше это расстояние, тем более ярко проявляется этот эффект за счёт снижения магнитного сопротивления, что даёт возможность передачи большего количества энергии от индуктора в изделие. В конкретных технологических установках расстояние между индуктором и нагреваемым изделием определяется исходя из необходимости защиты индуктора от теплового излучения нагреваемого изделия, а также конструктивных особенностей реализации технологии нагрева. Однако исследование эффекта близости крайне необходимо при оптимизации конструкции установок индукционного нагрева, причем более полно этот эффект может быть исследован методами компьютерного моделирования.

Для исследования эффекта близости рассмотрена зависимость плотности тока у поверхности изделия от величины воздушного зазора между ним и индуктором. При этом диапазон изменения воздушного зазора находится в пределах от 0,1 мм до 5 мм. Эксперимент проводился при различных частотах питающего тока от 2 кГц до 50 кГц. Результаты моделирования представлены в табл. 4.5 и на рис. 4.10, 4.11.

Таблица 4.5. Зависимость плотности тока от зазора при различной частоте тока

Δ , мм	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$f = 2 \text{ кГц}$											
$j \cdot 10^7$, А/мм ²	1,68	1,65	1,62	1,58	1,53	1,45	1,33	1,26	1,14	1,09	0,95
$f = 4 \text{ кГц}$											
$j \cdot 10^7$, А/мм ²	2,59	2,55	2,49	2,31	2,13	1,9	1,63	1,5	1,31	1,24	1
$f = 6 \text{ кГц}$											
$j \cdot 10^7$, А/мм ²	3,32	3,27	3,13	2,73	2,43	2,1	1,75	1,58	1,36	1,29	1

$f = 8 \text{ кГц}$											
$j \cdot 10^7, \text{ A/мм}^2$	3,95	3,89	3,62	3	2,6	2,2	1,81	1,63	1,4	1,3	0,98
$f = 10 \text{ кГц}$											
$j \cdot 10^7, \text{ A/мм}^2$	4,51	4,44	4	3,17	2,7	2,26	1,85	1,66	1,41	1,31	0,96
$f = 20 \text{ кГц}$											
$j \cdot 10^7, \text{ A/мм}^2$	6,76	6,55	5,01	3,56	2,9	2,39	1,96	1,78	1,38	1,3	0,89
$f = 30 \text{ кГц}$											
$j \cdot 10^7, \text{ A/мм}^2$	8,54	7,98	5,4	3,72	2,97	2,43	2,03	1,91	1,33	1,28	0,85
$f = 40 \text{ кГц}$											
$j \cdot 10^7, \text{ A/мм}^2$	10,1	9	5,58	3,82	3,01	2,45	2,07	2	1,28	1,26	0,83
$f = 50 \text{ кГц}$											
$j \cdot 10^7, \text{ A/мм}^2$	11,4	9,73	5,67	3,9	3,07	2,46	2,11	2,08	1,24	1,24	0,82

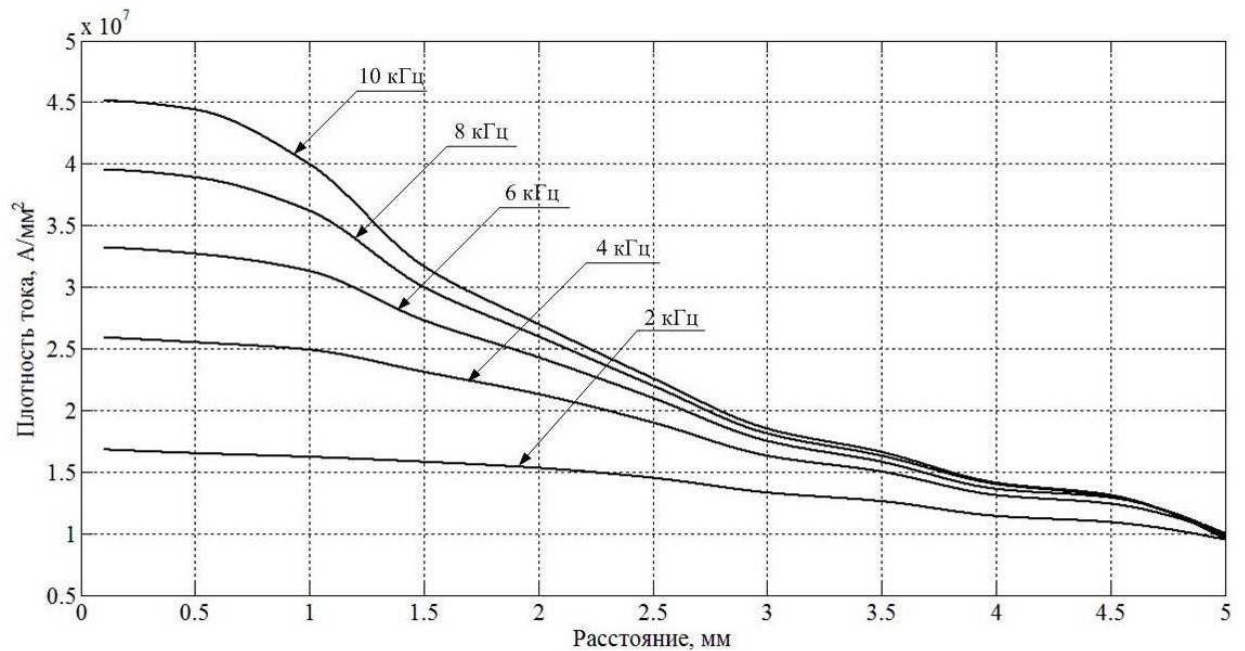


Рис. 4.10. Зависимость плотности тока от зазора при различных частотах

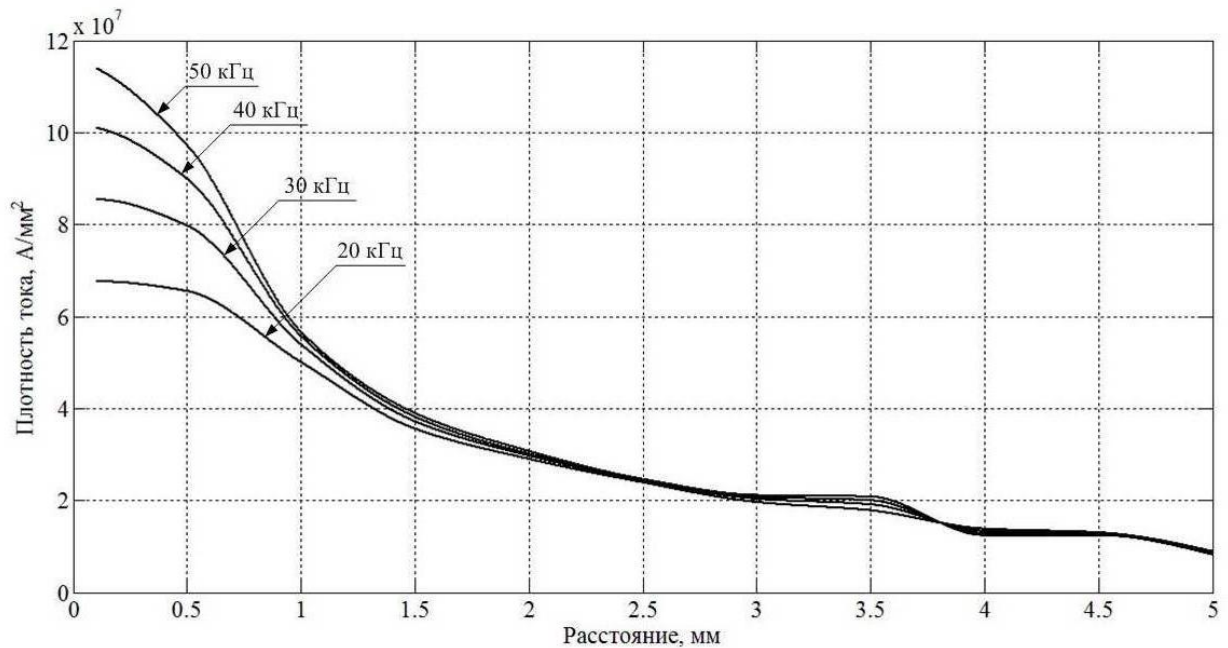


Рис. 4.11. Зависимость плотности тока от зазора при различных частотах

Из полученных графиков видно, что величина воздушного зазора сильно влияет на распределение тока в изделии, а следовательно, на его нагрев. Чем меньше воздушный зазор, тем лучше и быстрее будет происходить процесс нагрева. Однако при этом необходимо учитывать наличие теплоизоляции индуктора от изделия, что ограничивает величину минимального зазора.

4.2. Режимы управления индукционным нагревом

Проблема разработки и совершенствования индукционно-стыковой сварки является многокритериальной задачей, решение которой направленно на оптимизацию следующих показателей:

- качество сварного соединения;
- технология индукционного нагрева;
- система управления сварочным процессом;
- параметры плоского индуктора;
- конструкция источника питания;
- характеристики потребления установкой электрической энергии.

Помимо чисто технологических задач разработанные математические модели индукционного нагрева и структуры их реализации позволяют качественно оценить направления построения систем управления индукционным нагревом с целью оптимизации его энергетических характеристик. Для этого проведено моделирование как используемых, так и предлагаемых 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 анализируются 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 изучается изменение напряжения, тока, полной и активной мощности 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.

Изменение в процессе нагрева потребляемой полной S_u и активной P_u мощности индуктора, технологического коэффициента полезного действия η_m и коэффициента мощности $\cos\varphi_u$ рассчитывались по формулам:

$$S_u = U_u I_u; \quad (4.1)$$

$$P_u = U_u I_u \cos\varphi_u; \quad (4.2)$$

$$\eta_m = P_1 / P_u; \quad (4.3)$$

$$\cos\varphi_u = \cos(\Psi_u - \Psi_i). \quad (4.4)$$

4.2.1. Режим стабилизации напряжения на индукторе

Динамика изменения температуры первых трёх слоёв, протекающих по ним токов и тока индуктора, представлены ранее на рис. 3.11 и 3.12. Характер изменения в процессе нагрева напряжения на индукторе, а также потребляемой им полной и активной мощности, представлен на рис. 4.12. Вид изменения выделяемой в поверхностном слое электрической и передаваемой во второй слой мощности, а также суммарной мощности, идущей на нагрев изделия, приведены на рис. 4.13. На рис. 4.14 представлены энергетические показатели процесса сварки – коэффициент мощности и технологический КПД.

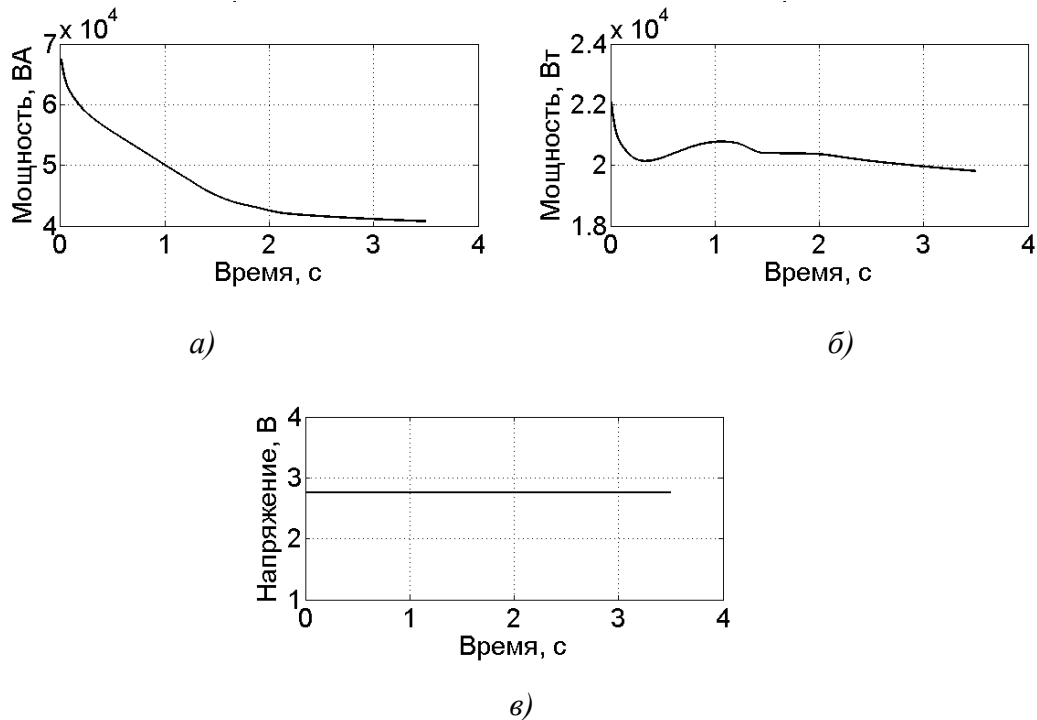


Рис. 4.12. Динамика изменения технологических параметров индуктора:

а – полная мощность; б – активная мощность; в – напряжение

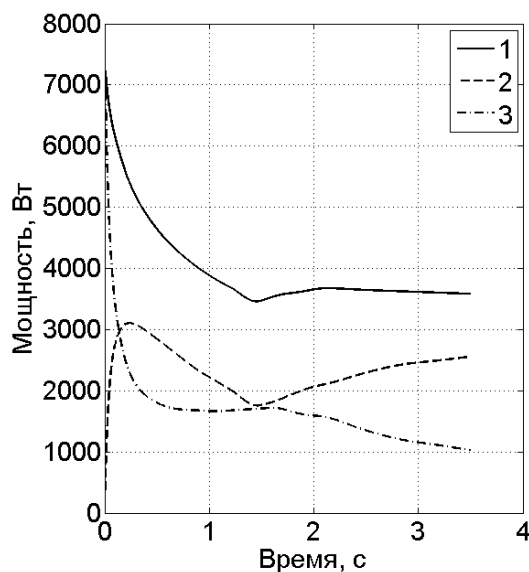


Рис. 4.13. Динамика изменения характеристик первого слоя нагреваемого изделия:
 1 – мощность, выделяемая в поверхностном слое; 2 – мощность, передаваемая во второй слой; 3 – мощность, нагревающая поверхностный слой

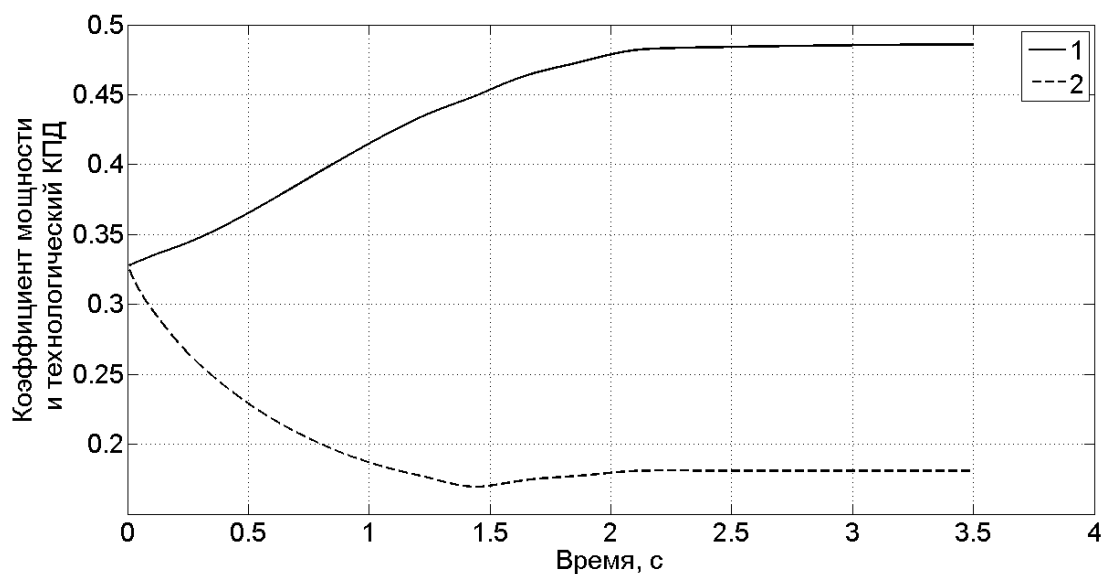


Рис. 4.14. Динамика изменения энергетических показателей процесса индукционного нагрева: 1 – коэффициент мощности; 2 – технологический КПД

Анализ динамики изменяющихся в процессе нагрева величин показывает на снижение интенсивности нагрева поверхностного слоя в 1,8 раза при температуре выше 1000°C . Это связано с уменьшением токов индуктора более чем в 1,6 раза и первого слоя в 3,7 раза, а также зависящих от них активных мощностей. С этим же связано резкое падение технологического КПД процесса до 0,17-0,18, а также низкий коэффициент

мощности в пределах $0,48$, что свидетельствует о невысокой энергетической эффективности всего технологического процесса со стабилизацией напряжения на индукторе.

С целью оценки вклада тока индуктора в греющий ток слоёв изделия по структурной схеме рис. 3.8 получены зависимости коэффициентов связи токов индуктора и слоёв от температуры в процессе нагрева последних. Указанные зависимости представлены на рис. 4.15.

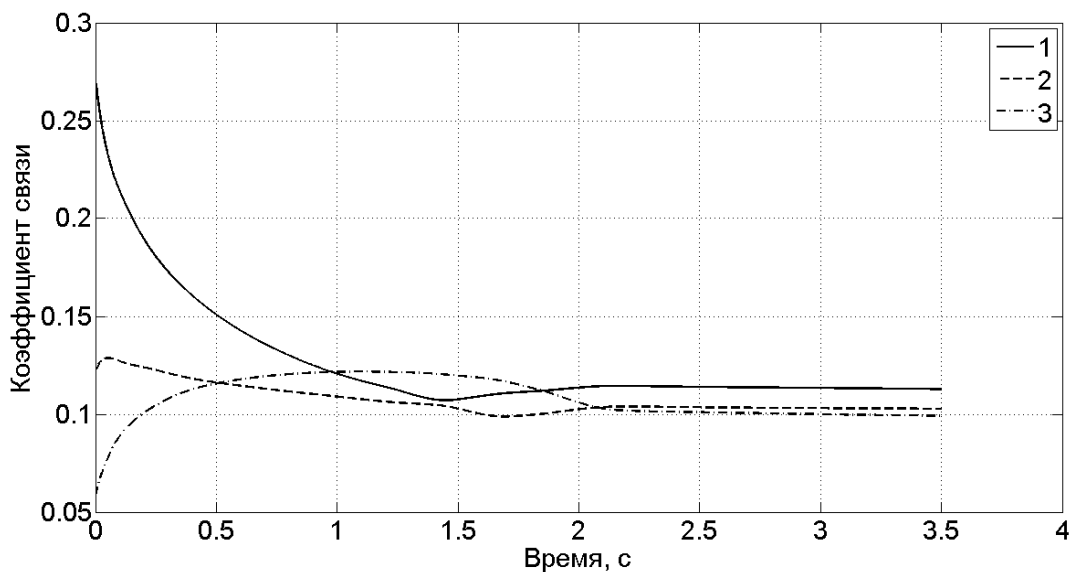


Рис. 4.15. Зависимость коэффициентов связи токов индуктора и слоёв от температуры

Анализ результатов моделирования показывает, что наиболее эффективно греется поверхностный слой только на начальном этапе. Через 1 с после начала нагрева коэффициенты, характеризующие взаимосвязь между индуктором и слоями, становятся близкими по величине, что обуславливает приблизительное равенство токов во всех слоях.

4.2.2. Режим стабилизации тока индуктора

Режим стабилизации тока индуктора может быть реализован системой управления достаточно просто. Поэтому его качественная оценка необходима для определения возможности применения в установках индукционного нагрева. Исследование режима проводилось на совмещённой модели источника питания и нагреваемого изделия. Структурная схема

модели источника питания (рис. 4.16) строится в соответствие с системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{I}_u(R_u + jX_u) - j(2X_{mu1}\dot{I}_1 + 2X_{mu2}\dot{I}_2 + 2X_{mu3}\dot{I}_3) \\ \dot{I}_1 = \frac{j(X_{m1u}\dot{I}_u - (X_{m12} + X_{m12'})\dot{I}_2 - (X_{m13} + X_{m13'})\dot{I}_3)}{R_1 + j(X_1 + X_{m11'})} \\ \dot{I}_2 = \frac{j(X_{m2u}\dot{I}_u - (X_{m21} + X_{m21'})\dot{I}_1 - (X_{m23} + X_{m23'})\dot{I}_3)}{R_2 + j(X_2 + X_{m22'})} \\ \dot{I}_3 = \frac{j(X_{m3u}\dot{I}_u - (X_{m31} + X_{m31'})\dot{I}_1 - (X_{m32} + X_{m32'})\dot{I}_2)}{R_3 + j(X_3 + X_{m33'})} \end{cases} \quad (4.5)$$

Конструктивная модель изделия и его параметры с целью сопоставления исследуемых режимов приняты теми же, что и при стабилизации напряжения индуктора. При этом ток индуктора подбирался из условия обеспечения того же самого времени нагрева поверхностного слоя.

На рис. 4.17 показана динамика изменения температуры в слоях нагреваемого изделия. Характер изменения в процессе нагрева тока и напряжения на индукторе, а также потребляемой им полной и активной мощности, представлен на рис. 4.18. Вид изменения протекающих по слоям токов, выделяемой в поверхностном слое электрической и передаваемой во второй слой мощности, а также суммарной мощности, идущей на нагрев изделия, приведены на рис. 4.19. На рис. 4.20 представлены энергетические показатели процесса сварки – коэффициент мощности и технологический КПД.

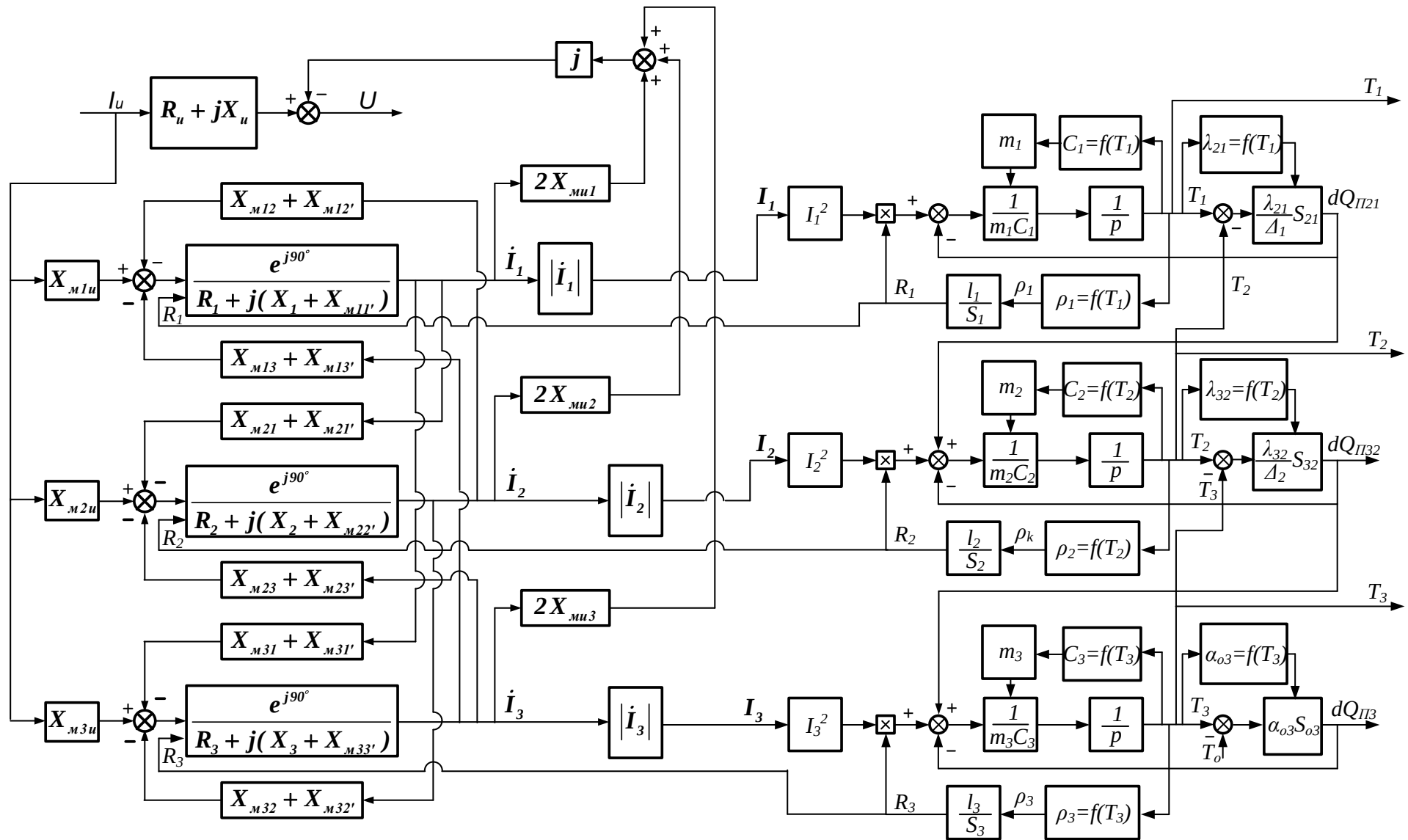


Рис. 4.16. Структурная схема совмещённой модели в режиме стабилизации тока индуктора

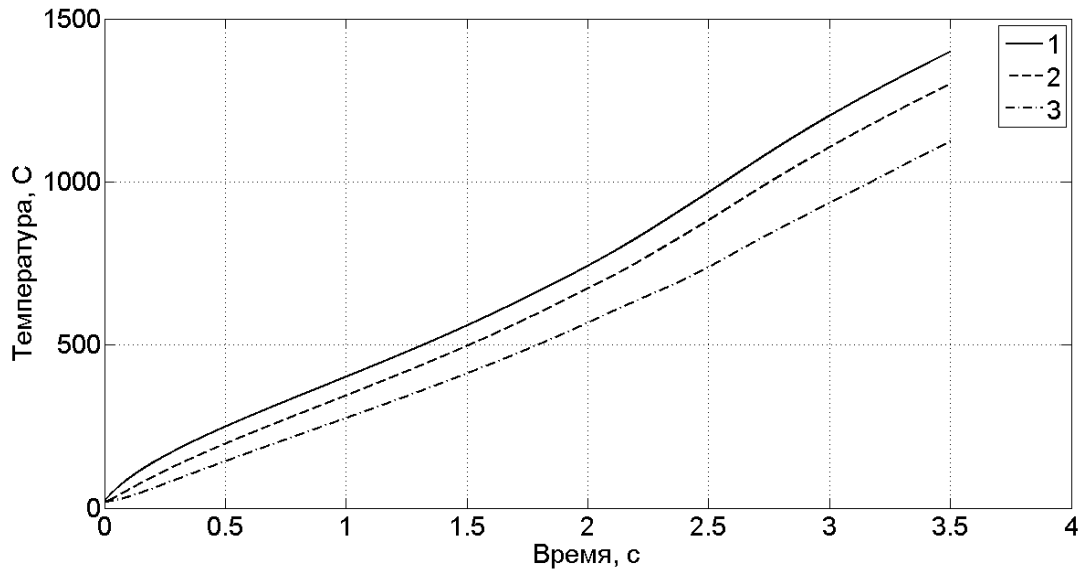


Рис. 4.17. Динамика изменения температуры в слоях изделия

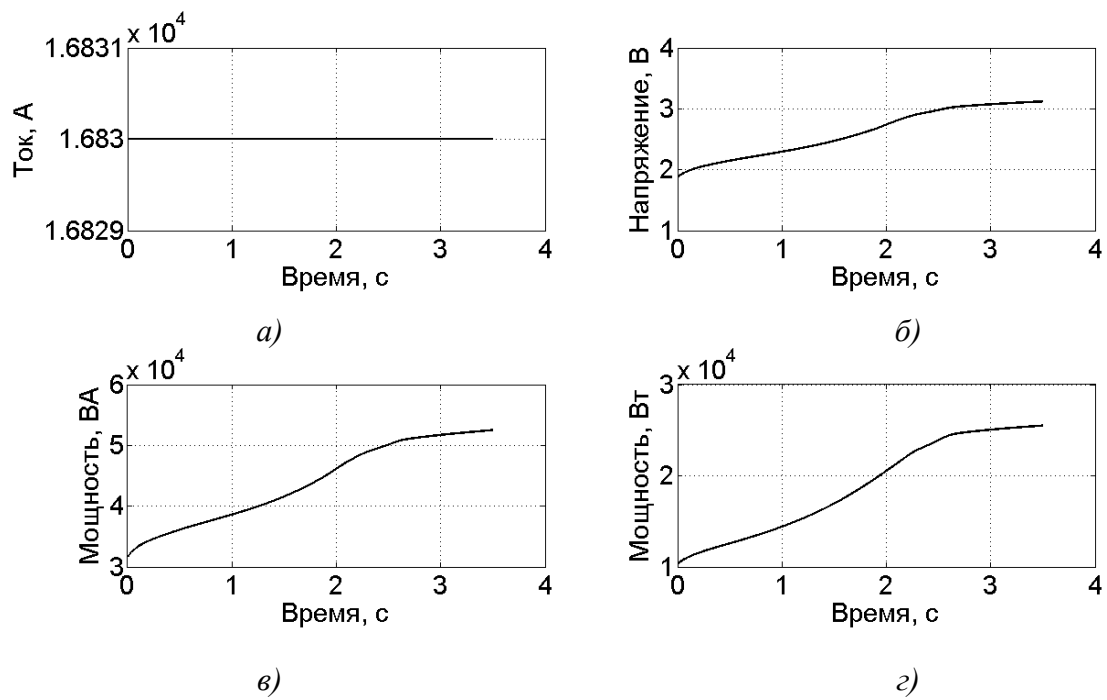


Рис. 4.18. Динамика изменения технологических параметров индуктора:
а – ток; б – напряжение; в – полная мощность; г – активная мощность

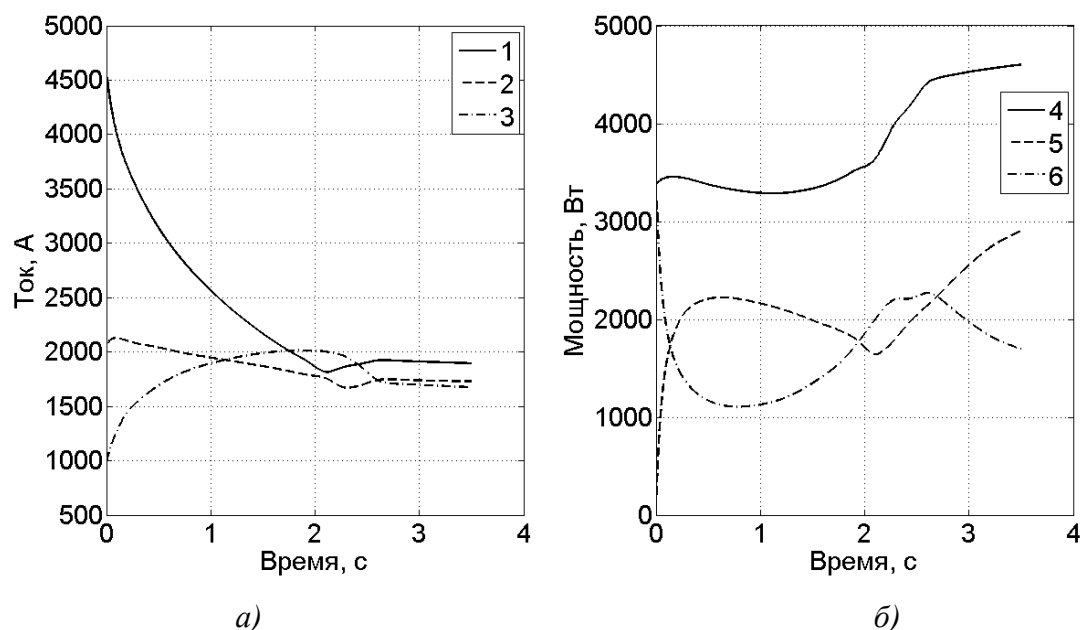


Рис. 4.19. Динамика изменения характеристик слоёв нагреваемого изделия: 1, 2, 3 – токи первого, второго и третьего слоёв соответственно; 4 – мощность, выделяемая в поверхностном слое; 5 – мощность, передаваемая во второй слой; 6 – мощность, нагревающая поверхностный слой

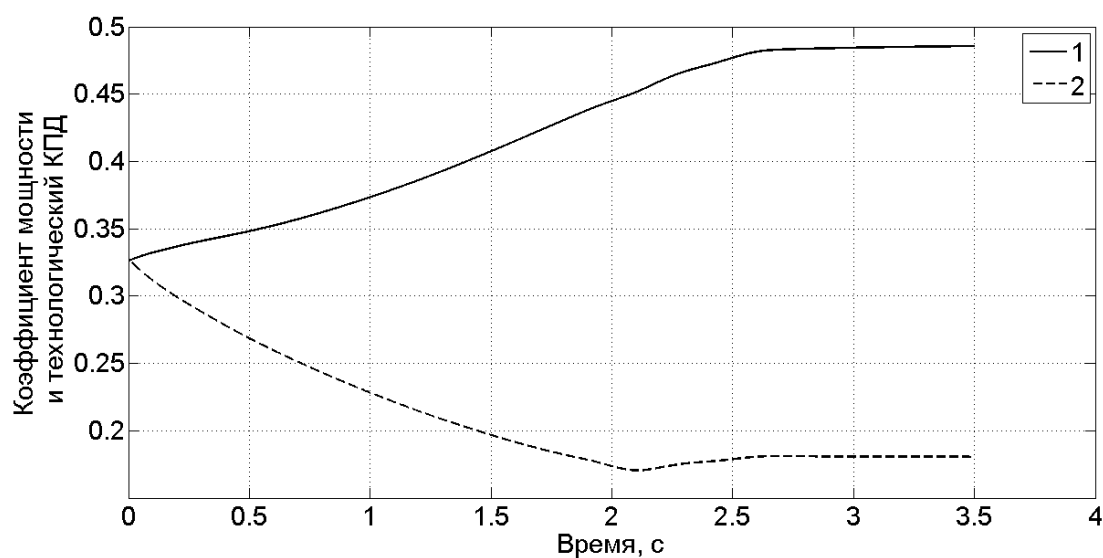


Рис. 4.20. Динамика изменения энергетических показателей процесса индукционного нагрева: 1 – коэффициент мощности; 2 – технологический КПД

Анализ результатов моделирования указывает на значительно более стабильный по сравнению с режимом поддержания неизменным напряжения на индукторе темп нагрева слоёв на всех его этапах. Это достигается при том, что ток индуктора на начальном этапе меньше в 1,5 раза, а полная и активная

мощности индуктора – в 2,2 раза. При этом характер изменения и значения технологического КПД и коэффициента мощности остались практически неизменными. Это указывает на большую перспективность режима стабилизации тока индуктора по сравнению со стабилизацией его напряжения.

4.2.3. Режим стабилизации мощности индуктора

Информация об активной мощности индуктора является также легко доступной и может быть использована для построения системы управления индукционным нагревом при сварке. Кроме того, за исключением потерь в индукторе, стабилизация его мощности должна привести к меньшему отклонению греющей мощности слоёв от требуемой по технологии сварки. Исследование режима проводилось на той же совмещённой модели источника питания и нагреваемого изделия. Структурная схема модели источника питания (рис. 4.21) строится в соответствие с системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U} = \dot{I}_u (R_u + jX_u) - j(2X_{mu1}\dot{I}_1 + 2X_{mu2}\dot{I}_2 + 2X_{mu3}\dot{I}_3) \\ \dot{I}_1 = \frac{j(X_{m1u}\dot{I}_u - (X_{m12} + X_{m12'})\dot{I}_2 - (X_{m13} + X_{m13'})\dot{I}_3)}{R_1 + j(X_1 + X_{m11'})} \\ \dot{I}_2 = \frac{j(X_{m2u}\dot{I}_u - (X_{m21} + X_{m21'})\dot{I}_1 - (X_{m23} + X_{m23'})\dot{I}_3)}{R_2 + j(X_2 + X_{m22'})} \\ \dot{I}_3 = \frac{j(X_{m3u}\dot{I}_u - (X_{m31} + X_{m31'})\dot{I}_1 - (X_{m32} + X_{m32'})\dot{I}_2)}{R_3 + j(X_3 + X_{m33'})} \\ I_u = \frac{P_u}{U_u \cos \varphi_u} \end{array} \right. \quad (4.6)$$

Конструктивная модель изделия и его параметры с целью сопоставления исследуемых режимов приняты теми же, что и для других режимов.

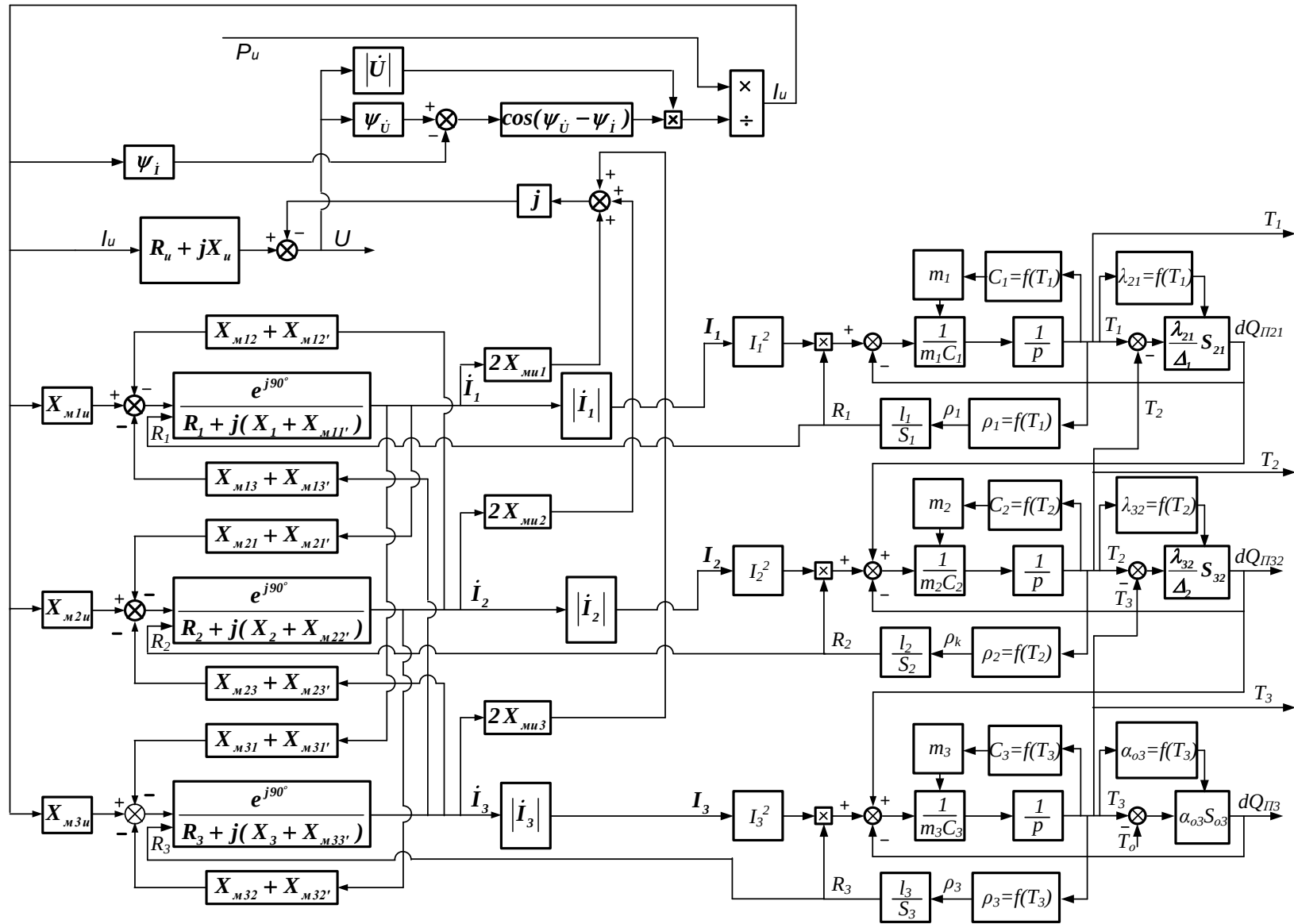


Рис. 4.21. Структурная схема совмещённой модели в режиме стабилизации мощности индуктора

На рис. 4.22 показана динамика изменения температуры в слоях нагреваемого изделия. Характер изменения в процессе нагрева тока и напряжения на индукторе, а также потребляемой им полной и активной мощности, представлен на рис. 4.23. Вид изменения протекающих по слоям токов, выделяемой в поверхностном слое электрической и передаваемой во второй слой мощности, а также суммарной мощности, идущей на нагрев изделия, приведены на рис. 4.24. На рис. 4.25 представлены энергетические показатели процесса сварки – коэффициент мощности и технологический КПД.

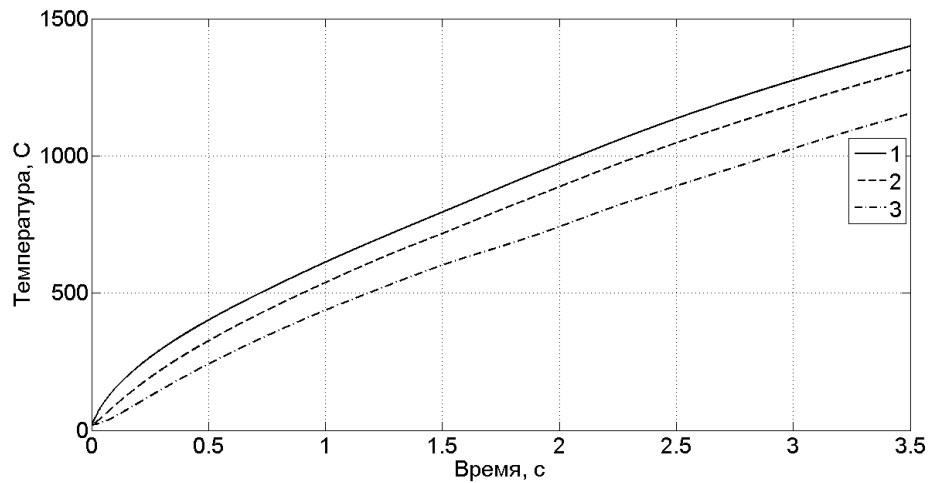


Рис. 4.22. Динамика изменения температуры в слоях изделия

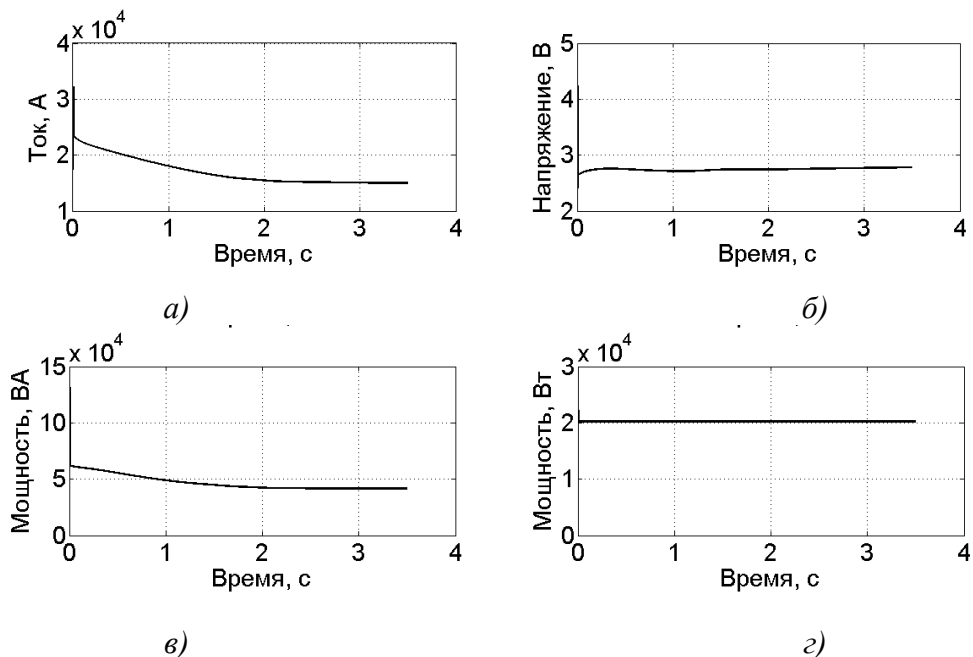


Рис. 4.23. Динамика изменения технологических параметров индуктора:

а – ток; б – напряжение; в – полная мощность; г – активная мощность

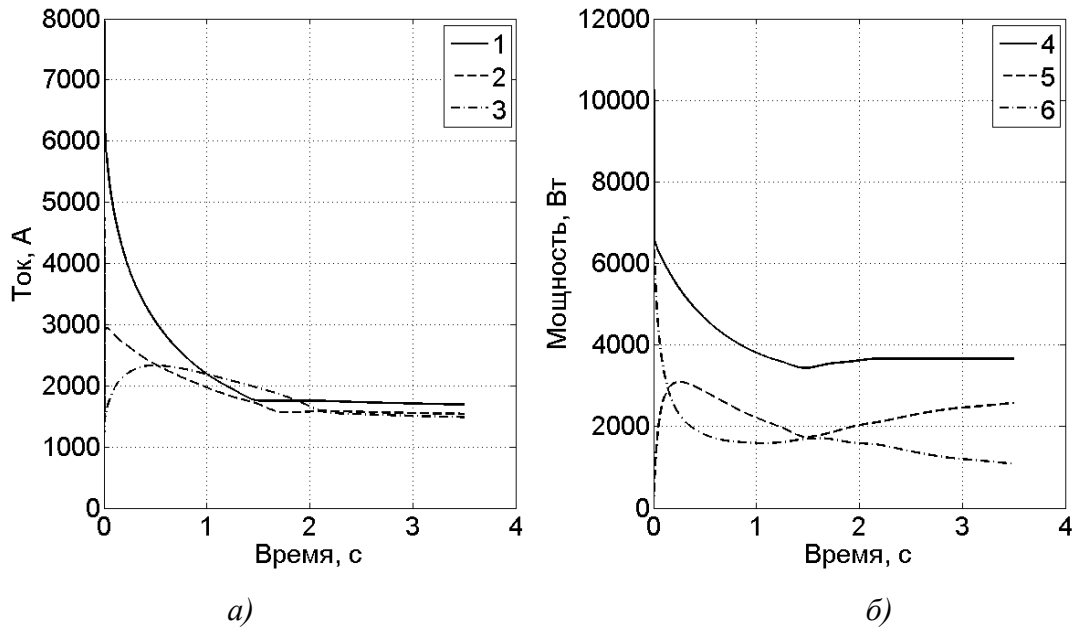


Рис. 4.24. Динамика изменения характеристик слоёв нагреваемого изделия: 1, 2, 3 – токи первого, второго и третьего слоёв соответственно; 4 – мощность, выделяемая в поверхностном слое; 5 – мощность, передаваемая во второй слой; 6 – мощность, нагревающая поверхностный слой

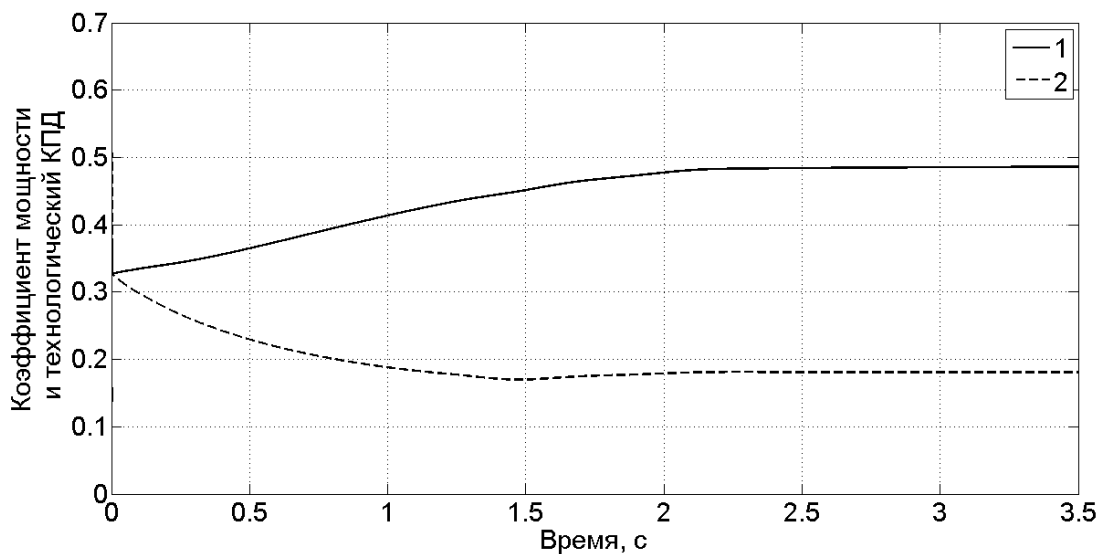


Рис. 4.25. Динамика изменения энергетических показателей процесса индукционного нагрева: 1 – коэффициент мощности; 2 – технологический КПД

Анализ результатов моделирования показывает, что рассматриваемый режим управления индукционным нагревом обладает более благоприятными характеристиками изменения потребляемой мощности, но делает необходимым для этого значительное превышение тока в индукторе.

4.2.4. Режим стабилизации тока в первом слое

Поверхностный (первый) слой изделия является основным, образующим сварной шов при индукционно-стыковой сварке. Именно его нагрев, как по величине максимальной температуры, так и по глубине, определяют качество сварного соединения. Поэтому при оптимизации технологии индукционно-стыковой сварки рационально рассмотреть динамику процессов при стабилизации по величине этого тока. Для исследования этого случая может использоваться модель, структурная схема электромагнитных процессов которой (рис. 4.26) строится в соответствие с системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{I}_u = \frac{R_1 + j(X_1 + X_{m1l'})}{jX_{m1u}} \dot{I}_1 + \frac{X_{m12} + X_{m12'}}{X_{m1u}} \dot{I}_2 + \frac{X_{m13} + X_{m13'}}{X_{m1u}} \dot{I}_3 \\ \dot{I}_2 = \frac{j(X_{m2u} \dot{I}_u - (X_{m2l} + X_{m2l'}) \dot{I}_1 - (X_{m23} + X_{m23'}) \dot{I}_3)}{R_2 + j(X_2 + X_{m22'})} \\ \dot{I}_3 = \frac{j(X_{m3u} \dot{I}_u - (X_{m3l} + X_{m3l'}) \dot{I}_1 - (X_{m32} + X_{m32'}) \dot{I}_2)}{R_3 + j(X_3 + X_{m33'})} \\ \dot{U} = \dot{I}_u (R_u + jX_u) - j(2X_{mu1} \dot{I}_1 + 2X_{mu2} \dot{I}_2 + 2X_{mu3} \dot{I}_3) \end{cases} \quad (4.7)$$

На рис. 4.27 показана динамика изменения температуры в слоях нагреваемого изделия. Характер изменения в процессе нагрева тока и напряжения на индукторе, а также потребляемой им полной и активной мощности, представлен на рис. 4.28. Вид изменения протекающих по слоям токов, выделяемой в поверхностном слое электрической и передаваемой во второй слой мощности, а также суммарной мощности, идущей на нагрев изделия, приведены на рис. 4.29. На рис. 4.30 представлены энергетические показатели процесса сварки – коэффициент мощности и технологический КПД.

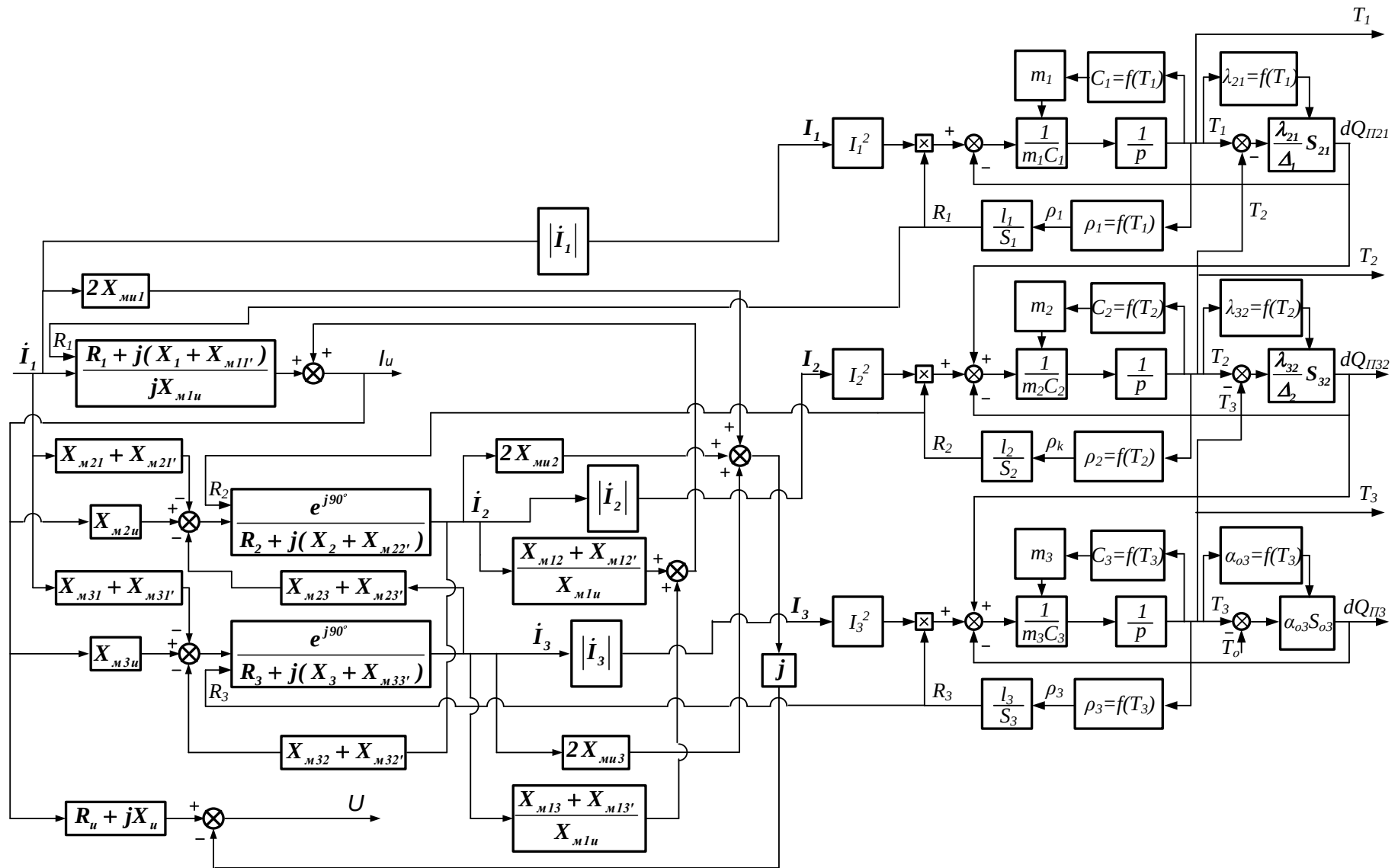


Рис. 4.26. Структурная схема совмещённой модели в режиме стабилизации тока в первом слое

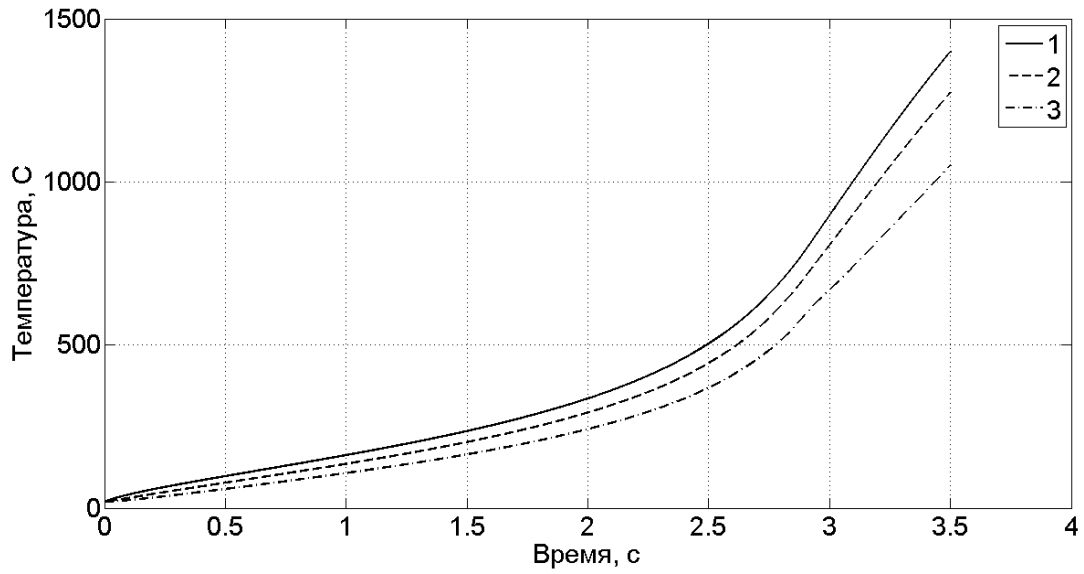


Рис. 4.27. Динамика изменения температуры в слоях изделия

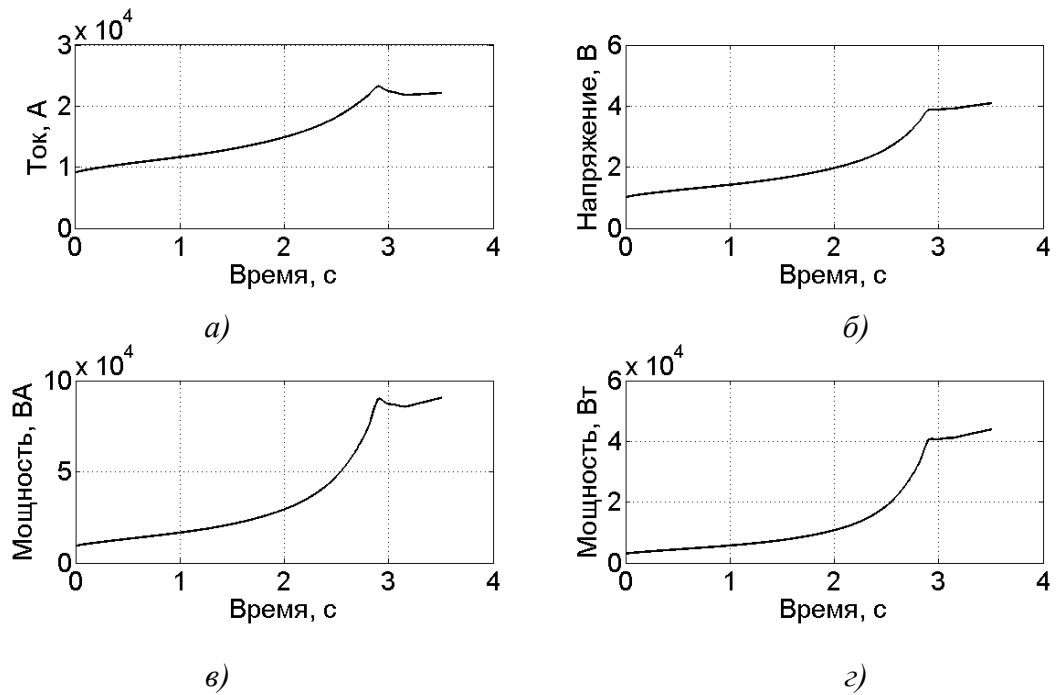


Рис. 4.28. Динамика изменения технологических параметров индуктора:
а – ток; б – напряжение; в – полная мощность; г – активная мощность

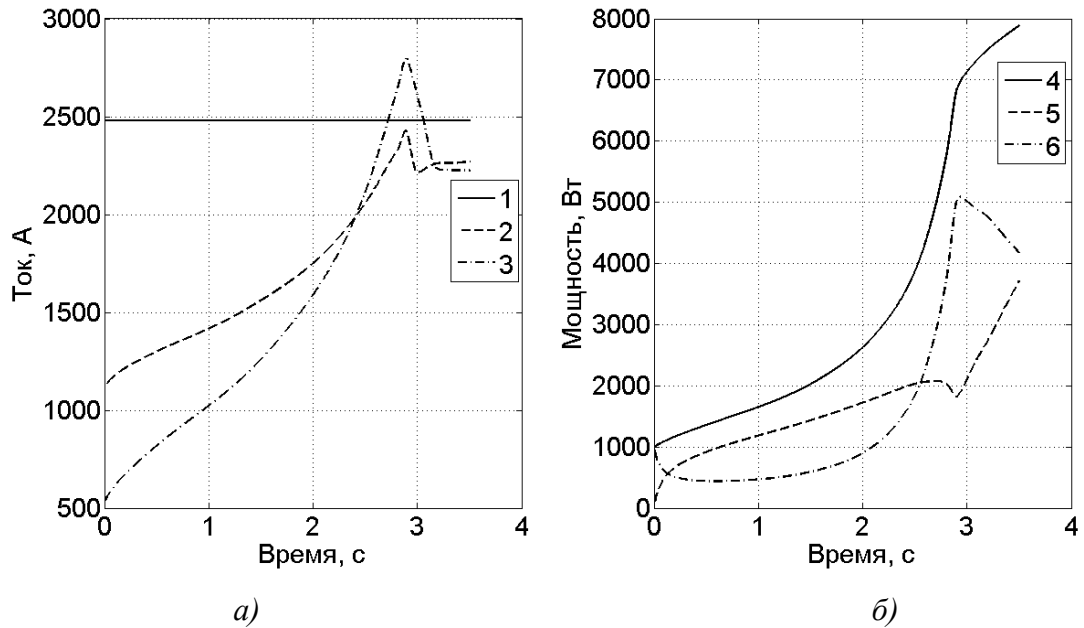


Рис. 4.29. Динамика изменения характеристик слоёв нагреваемого изделия: 1, 2, 3 – токи первого, второго и третьего слоёв соответственно; 4 – мощность, выделяемая в поверхностном слое; 5 – мощность, передаваемая во второй слой; 6 – мощность, нагревающая поверхностный слой

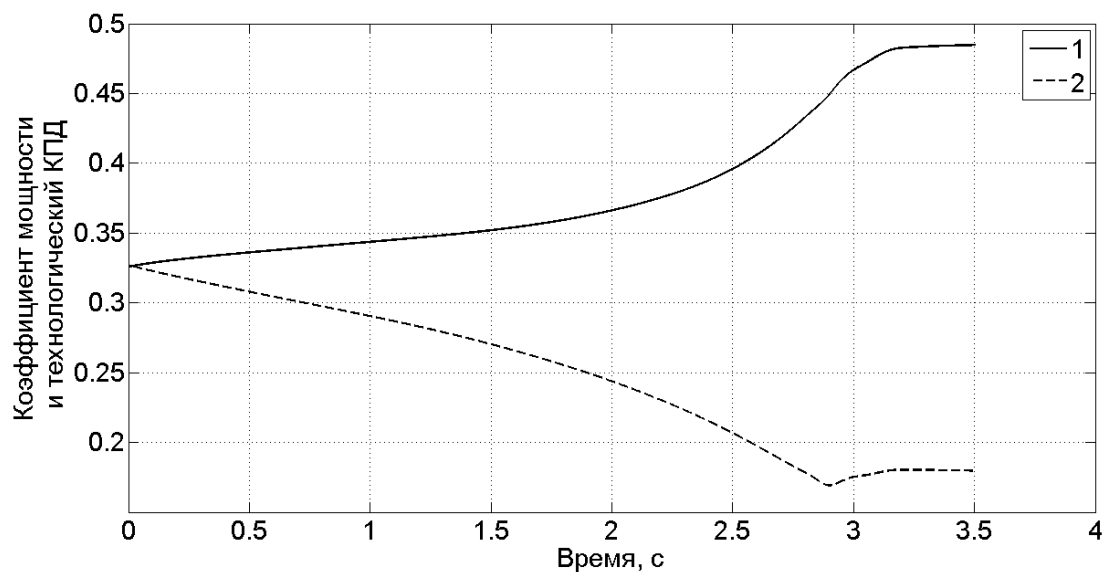


Рис. 4.30. Динамика изменения энергетических показателей процесса индукционного нагрева: 1 – коэффициент мощности; 2 – технологический КПД

Анализ результатов моделирования указывает на необходимость значительного диапазона изменения регулирующих параметров для реализации указанного режима. Так напряжение на индукторе к концу нагрева должно возрасти в 4 раза, ток индуктора в 2,2 раза, полная и

активная мощность соответственно в 8,5 и 12 раз. Всё это, естественно, снижает экономические показатели установки в целом.

4.2.5. Режим стабилизации мощности в первом слое

Исследование динамики индукционного нагрева в режиме стабилизации мощности в поверхностном слое проводилось на модели, структурная схема электромагнитных процессов которой (рис. 4.31) строится в соответствии с системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = \sqrt{\frac{P_1}{R_1}} \\ \dot{I}_u = \frac{R_1 + j(X_1 + X_{m1l'})}{jX_{m1u}} \dot{I}_1 + \frac{X_{m12} + X_{m12'}}{X_{m1u}} \dot{I}_2 + \frac{X_{m13} + X_{m13'}}{X_{m1u}} \dot{I}_3 \\ \dot{I}_2 = \frac{j(X_{m2u} \dot{I}_u - (X_{m2l} + X_{m2l'}) \dot{I}_1 - (X_{m23} + X_{m23'}) \dot{I}_3)}{R_2 + j(X_2 + X_{m22'})} \\ \dot{I}_3 = \frac{j(X_{m3u} \dot{I}_u - (X_{m3l} + X_{m3l'}) \dot{I}_1 - (X_{m32} + X_{m32'}) \dot{I}_2)}{R_3 + j(X_3 + X_{m33'})} \\ \dot{U} = \dot{I}_u (R_u + jX_u) - j(2X_{mu1} \dot{I}_1 + 2X_{mu2} \dot{I}_2 + 2X_{mu3} \dot{I}_3) \end{array} \right. \quad (4.8)$$

На рис. 4.32 показана динамика изменения температуры в слоях нагреваемого изделия. Характер изменения в процессе нагрева тока и напряжения на индукторе, а также потребляемой им полной и активной мощности, представлен на рис. 4.33. Вид изменения протекающих по слоям токов, выделяемой в поверхностном слое электрической и передаваемой во второй слой мощности, а также суммарной мощности, идущей на нагрев изделия, приведены на рис. 4.34. На рис. 4.35 представлены энергетические показатели процесса сварки – коэффициент мощности и технологический КПД.

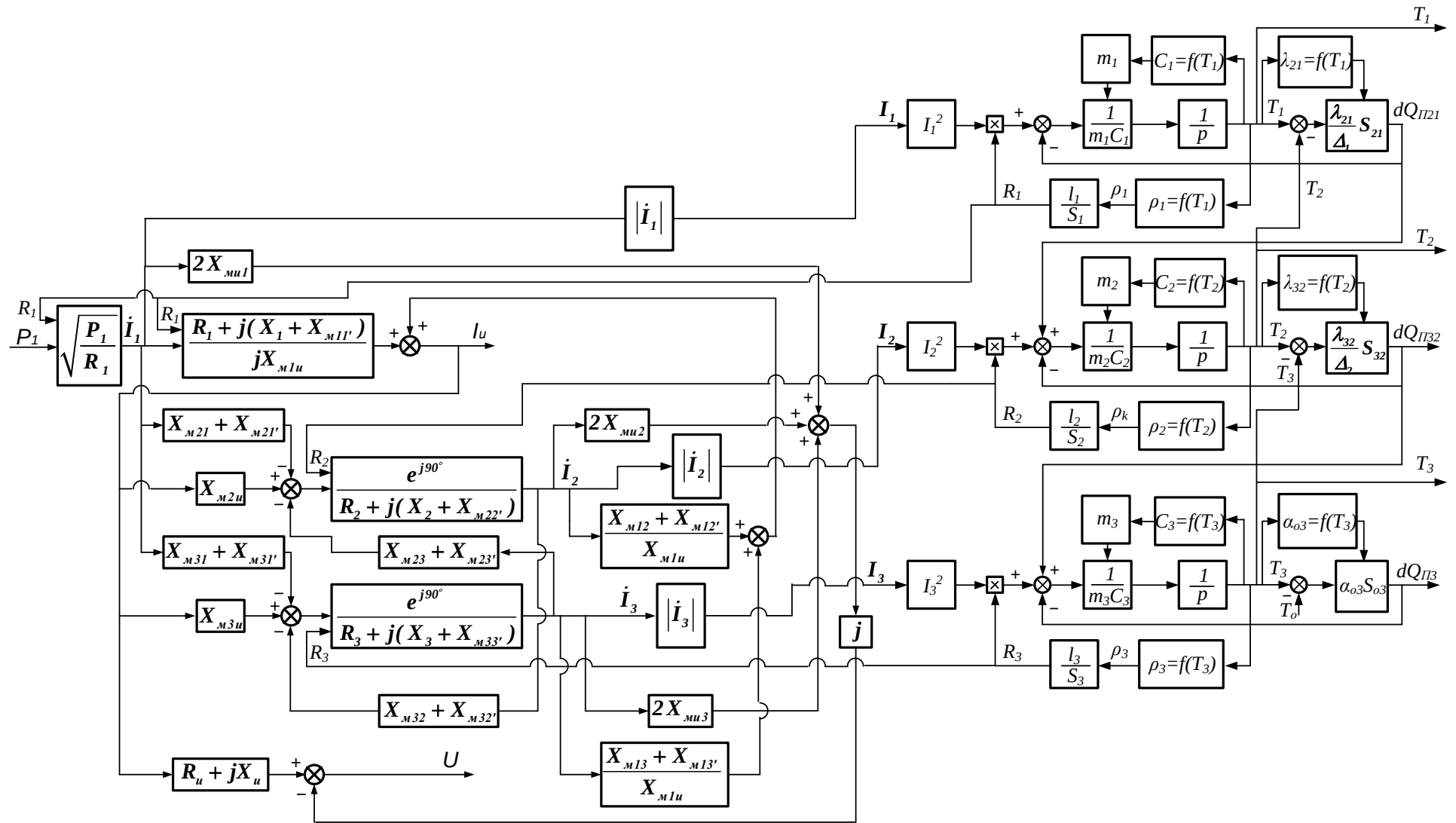


Рис. 4.31. Структурная схема совмещённой модели в режиме стабилизации мощности в первом слое

Анализ результатов моделирования показывает на аналогичные, хотя и несколько меньшие, требуемые диапазоны изменения регулирующих параметров. Так напряжение на индукторе для обеспечения этого режима надо изменять в пределах 1,4 раза. В то же время потребляемые индуктором полная и активная мощности изменяются приблизительно в 1,2 и 1,7 раза соответственно. Всё это указывает на существенные недостатки рассматриваемого режима.

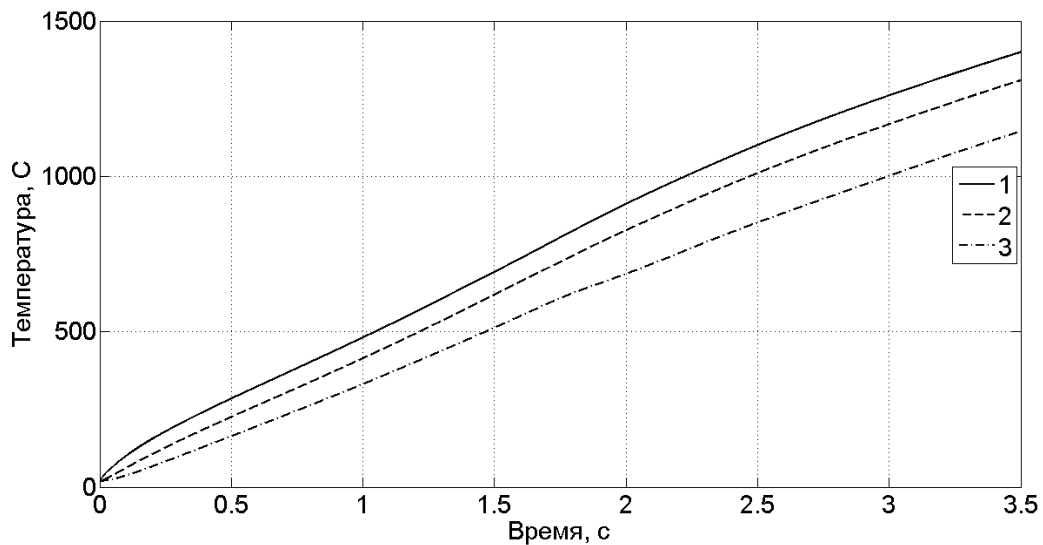


Рис. 4.32. Динамика изменения температуры в слоях изделия

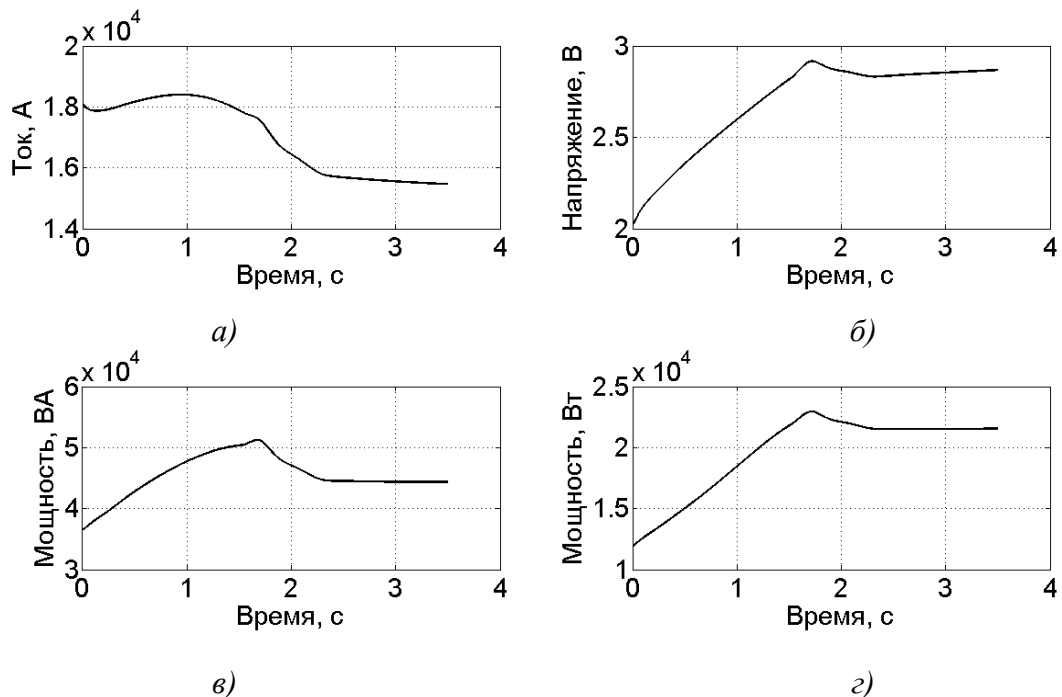


Рис. 4.33. Динамика изменения технологических параметров индуктора:

а – ток; б – напряжение; в – полная мощность; г – активная мощность

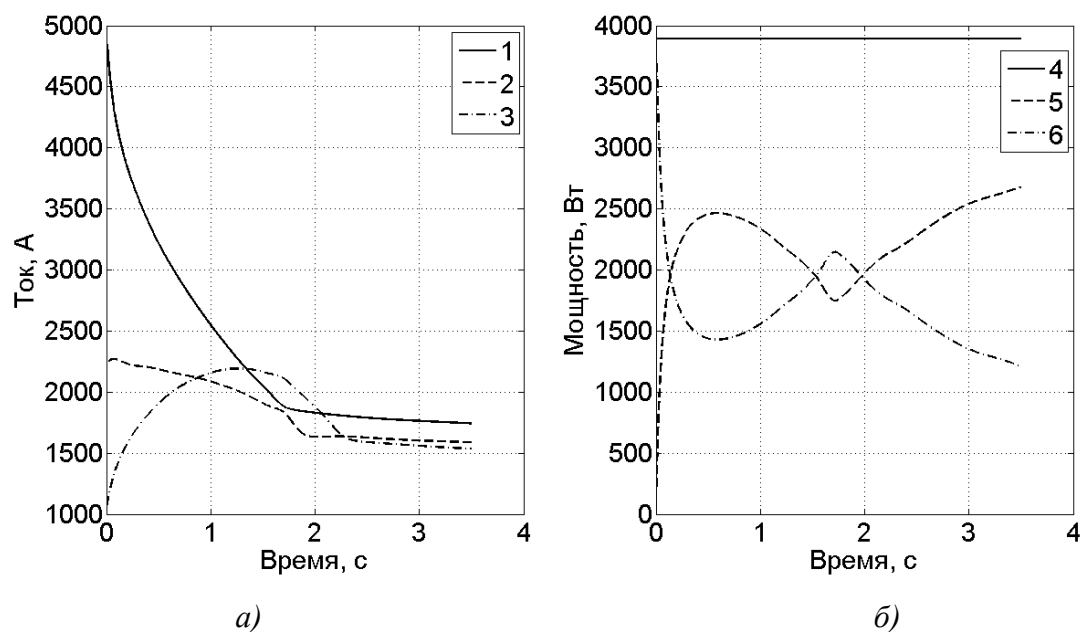


Рис. 4.34. Динамика изменения характеристик слоёв нагреваемого изделия:
 1, 2, 3 – токи первого, второго и третьего слоёв соответственно; 4 – мощность, выделяемая в поверхностном слое; 5 – мощность, передаваемая во второй слой; 6 – мощность, нагревающая поверхностный слой

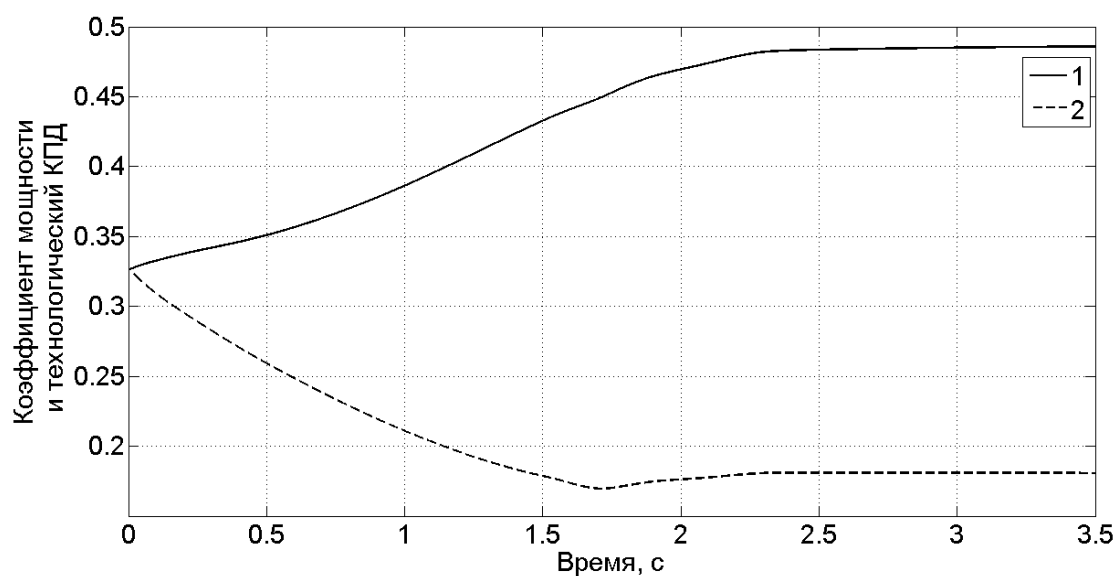


Рис. 4.35. Динамика изменения энергетических показателей процесса индукционного нагрева: 1 – коэффициент мощности; 2 – технологический КПД

4.3. Сопоставительный анализ режимов управления индукционным нагревом при индукционно-стыковой сварке

С целью сопоставления энергетических характеристик рассмотренных режимов индукционного нагрева объединённые графики динамики показателей для них представлены на рис. 4.36-4.39.

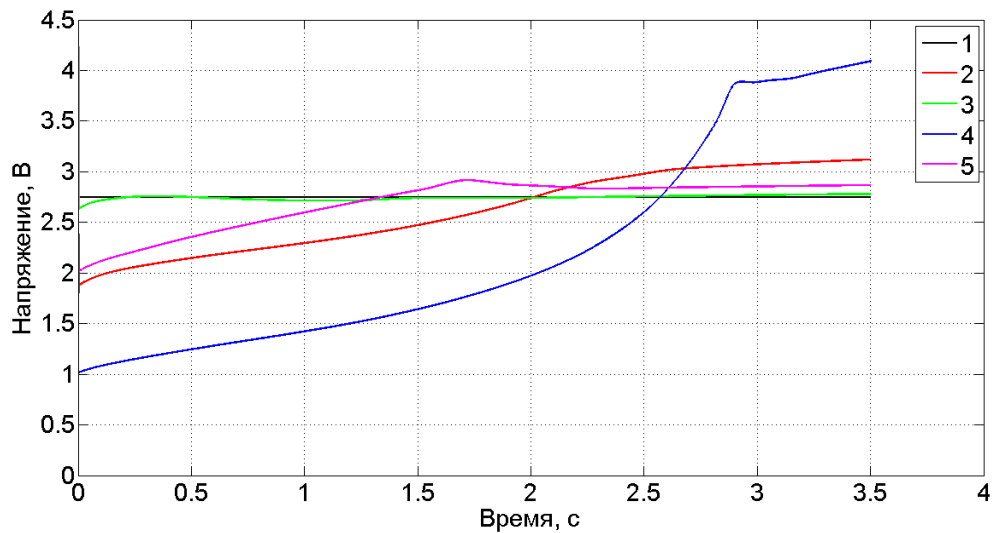


Рис. 4.36. Динамика изменения напряжения на индукторе в различных режимах: 1 – режим стабилизации напряжения на индукторе; 2 – режим стабилизации тока в индукторе; 3 – режим стабилизации мощности в индукторе; 4 – режим стабилизации тока в первом слое; 5 – режим стабилизации мощности в первом слое

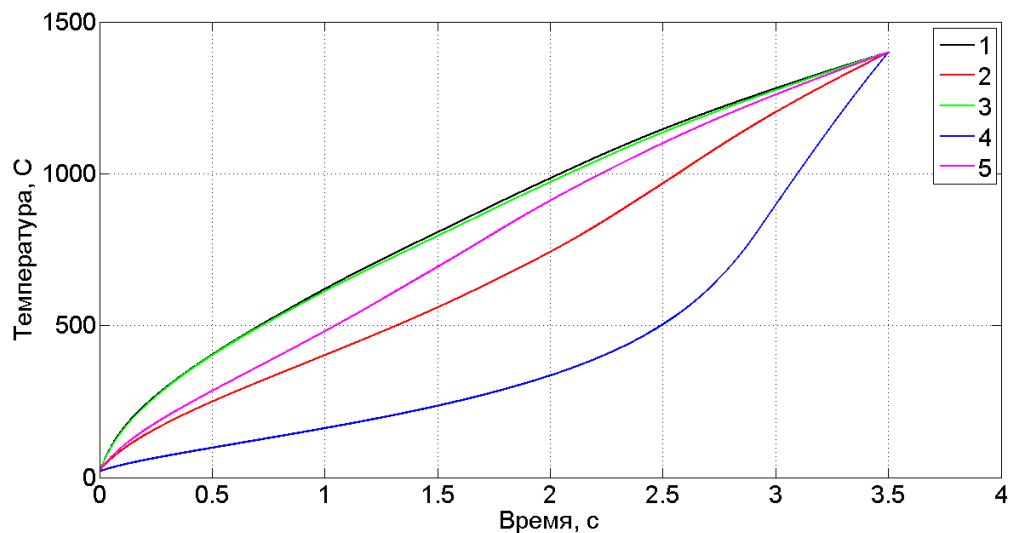


Рис. 4.37. Динамика изменения температуры первого слоя в различных режимах: 1 – режим стабилизации напряжения на индукторе; 2 – режим стабилизации тока в индукторе; 3 – режим стабилизации мощности в индукторе; 4 – режим стабилизации тока в первом слое; 5 – режим стабилизации мощности в первом слое

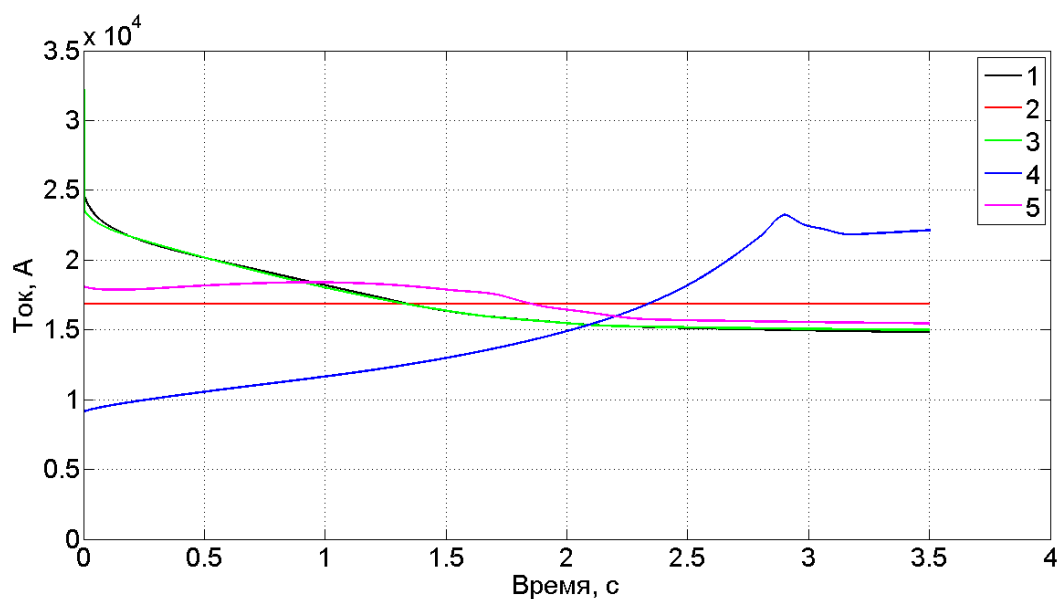


Рис. 4.38. Динамика изменения тока в индукторе в различных режимах: 1 – режим стабилизации напряжения на индукторе; 2 – режим стабилизации тока в индукторе; 3 – режим стабилизации мощности в индукторе; 4 – режим стабилизации тока в первом слое; 5 – режим стабилизации мощности в первом слое

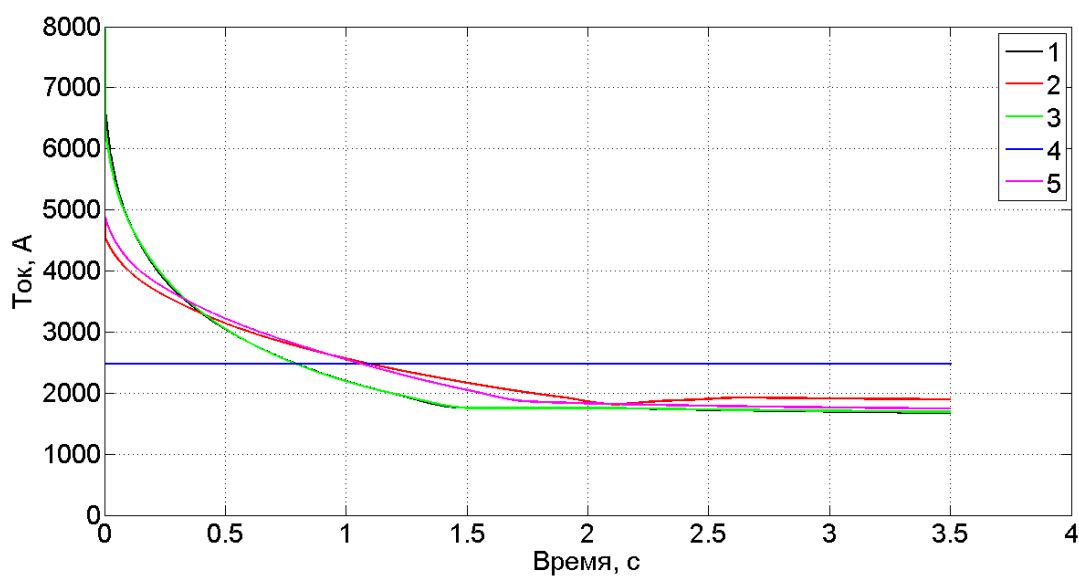


Рис. 4.39. Динамика изменения тока первого слоя в различных режимах: 1 – режим стабилизации напряжения на индукторе; 2 – режим стабилизации тока в индукторе; 3 – режим стабилизации мощности в индукторе; 4 – режим стабилизации тока в первом слое; 5 – режим стабилизации мощности в первом слое

Данные для оценки режимов через их основные энергетические показатели сведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6. Сводные энергетические показатели режимов управления индукционным нагревом

Стабилизируемый параметр		$U_u = \text{const}$	$I_u = \text{const}$	$P_u = \text{const}$	$I_1 = \text{const}$	$P_1 = \text{const}$
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
	$U_{\max}/U_{\min}$	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	$1,5462 \cdot 10^4$
	$I_{\max}/I_{\min}$	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	$3,6554 \cdot 10^4$
	$S_{\max}/S_{\min}$	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	$1,1935 \cdot 10^4$
	$P_{\max}/P_{\min}$	1,1147	2,4687	1	14,3656	1,9238
Ток первого слоя, А	$I_{1\max}$	6552,6	4528,1	6300	2481	4914,3
	$I_{1\min}$	1671,8	1815,2	1689,8	2481	1742,9
	$I_{1\max}/I_{1\min}$	3,9195	2,4946	3,7283	1	2,8196
Активная мощность первого слоя, Вт	$P_{1\max}$	7222,7	4601,8	6626,6	7888,4	3893
	$P_{1\min}$	3458,5	3287,0	3432,7	999,1	3893
	$P_{1\max}/P_{1\min}$	2,0884	1,4	1,9304	7,8955	1
Средний коэффициент мощности	$\cos \varphi_{u.c.p.}$	0,4417	0,4208	0,4409	0,3807	0,4312
Средний технологический КПД	$\eta_{т.ср.}$	0,1956	0,2106	0,1959	0,2492	0,2045
Потреблённая индуктором энергия на нагрев, Дж	W_u	$7,11 \cdot 10^4$	$6,58810^4$	$7,083 \cdot 10^4$	$5,534 \cdot 10^4$	$6,879 \cdot 10^4$

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 привлекательным и легко реализуемым является режим стабилизации тока индуктора. Наименее благоприятными энергетическими и регулировочными характеристиками обладает режим поддержания постоянства напряжения на индукторе.

В некоторых случаях возможна под конкретные требования технологии разработка комбинированных режимов с переключаемыми целевыми функциями.

В целом проведённый анализ режимов индукционного нагрева на основе разработанных моделей исследования температурных процессов при учёте их взаимного влияния с источником энергии показывают на гибкость и универсальность предложенного метода послойного моделирования и его возможности использования при разработке технологии индукционно-стыковой сварки, используемого оборудования и вида системы управления.

4.4. Результаты и выводы

1. Проведено моделирование магнитного поля плоской системы индуктор – ферромагнитное изделие, которое показало близкую к поверхности область концентрации поля и её соответствующего нагрева.

2. Частотные характеристики индукционного нагрева дают возможность определить энергетическую оптимальность частоты тока, что должно учитываться при конструировании индукционных установок.

3. Полученные характеристики тепловыделения в изделии от глубины проникновения тока и от температурной зависимости удельного сопротивления металла указывают на значительное различие нагрева изделия по глубине при усреднении указанных параметров и их реальном значении при удалении от поверхности.

4. Рассмотрены варианты структурных схем для реализации технологического процесса при стабилизации приложенного к индуктору напряжения, тока индуктора, его активной мощности, тока поверхностного слоя и греющей его мощности.

5. С целью оценки энергетических показателей различных режимов индукционного нагрева проведено их моделирование и рассчитаны характеризующие их параметры. Определены наиболее перспективные направления реализации с помощью систем управления.

Глава 5. Система управления индукционно-стыковой сваркой

5.1. Характеристики цикла индукционно-стыковой сварки

Как указывалось выше, существо индукционно-стыковой сварки заключается в нагреве свариваемых поверхностей с помощью плоского индуктора и сдавливания соединяемых частей изделия. Однако, при детализации процесса сварки в целом, 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 (рис. 5.1). Как длительность каждого из периодов, так и интенсивность воздействия на сварное соединение, определяются параметрами конкретного изделия и реализуемой технологией.

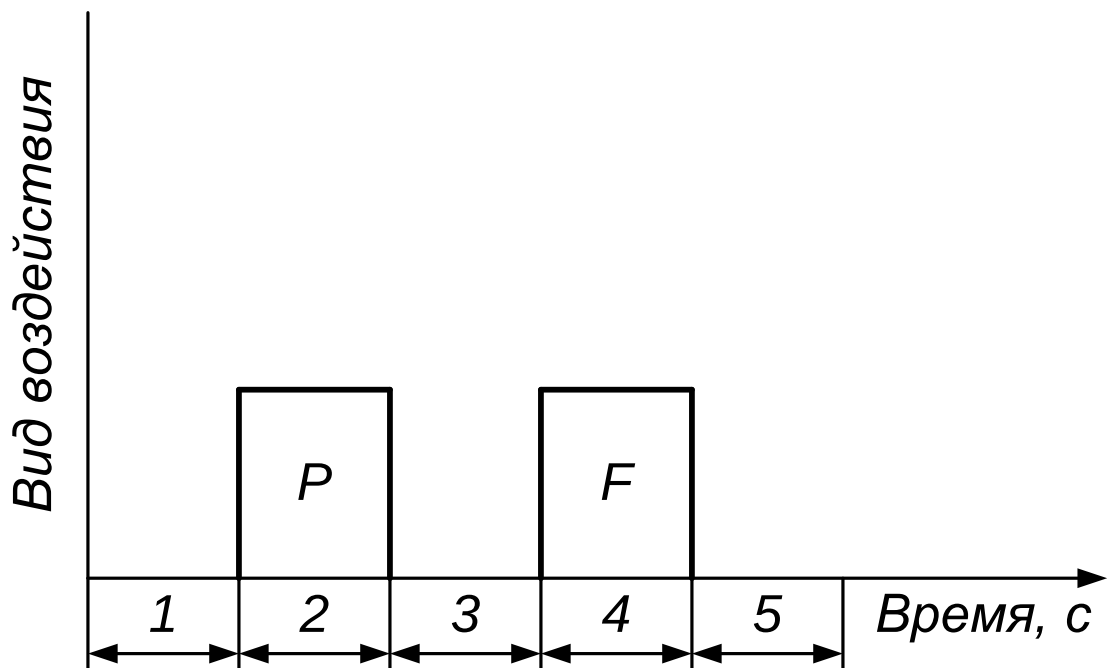


Рис. 5.1. Цикл индукционно-стыковой сварки. 1 – время подготовки свариваемых поверхностей, координатного позиционирования и закрепления свариваемых частей изделия; 2 – нагрев свариваемых поверхностей путём ввода греющей мощности P ; 3 – интервал извлечения индуктора из пространства между нагретыми поверхностями; 4 – процесс сдавливания сварного соединения с усилием F ; 5 – извлечение готового сварного соединения из зоны сварки

Длительность подготовки свариваемых поверхностей зависит от выбранного вида сварки в каждом конкретном случае. При индукционно-стыковой сварке с помощью плоского индуктора возможна, как сварка с расплавлением, так и диффузионная сварка [51, 75, 92]. При сварке с расплавлением свариваемых поверхностей не требуется их специальная подготовка, поскольку возникающая при нагреве оксидная плёнка вместе с возможными загрязнениями выдавливаются из шва в грат при сжатии с давлением 20 – 50 МПа. Диффузионная сварка требует более тщательной подготовки свариваемых поверхностей посредством их механической обработки, очистки от инородных загрязнений и возможного нанесения подслоёв.

На интервале нагрева свариваемых поверхностей его максимальная температура также зависит от выбранного вида сварки. При сварке с расплавлением поверхностного слоя его температура может достигать температуры плавления или быть близкой к ней с последующим внесением дополнительного тепла за счёт пластической деформации при давлении 50 МПа. Диффузионную сварку рационально проводить при нагреве поверхностей до $(0,5 - 0,7) T_{пл}$. При этом проблему образования оксидной плёнки решают использованием вакуумных камер, наполнением их инертными и другими газами или нанесением подслоёв [42].

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 остывания поверхностного слоя при отключении индуктора было проведено моделирование этих процессов для изделия с параметрами, указанными в таблице 3.3. При этом температура нагрева оставалась постоянной для всех вариантов и равнялась 1400°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 остывания определялась как интервал времени снижения температуры от начального (1400°C) до конечного (900°C), при котором ещё возможна сварка в диффузионном режиме. Динамика нагрева и снижения температуры представлена на рис. 5.2.

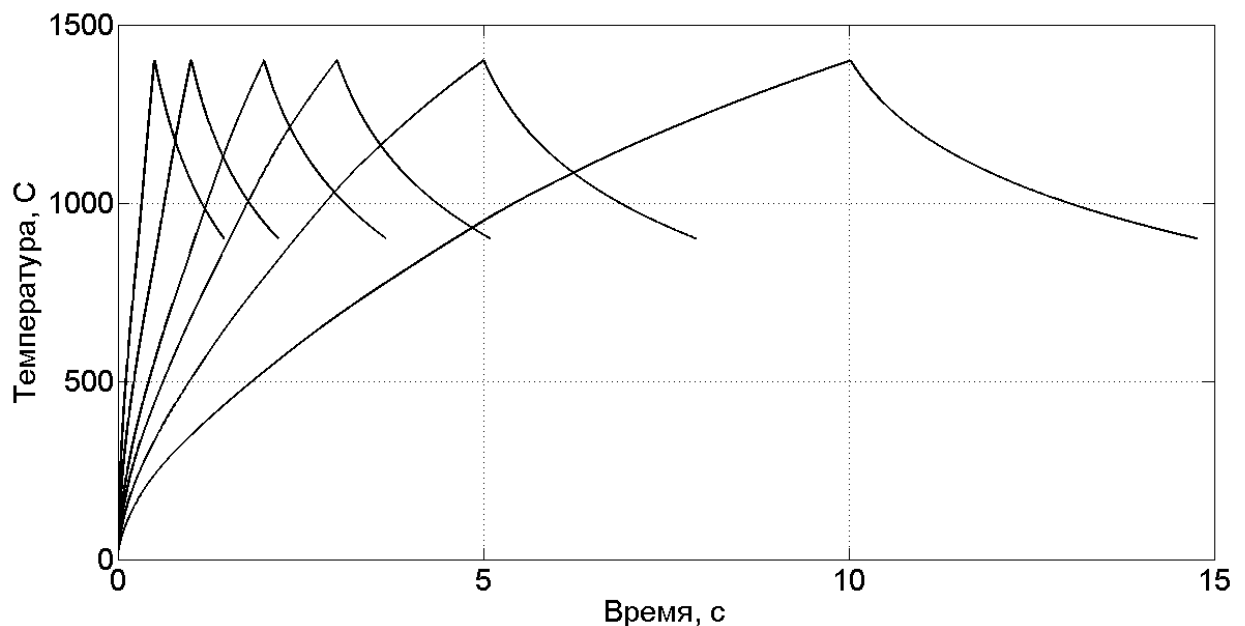


Рис. 5.2.. Графики, характеризующие процессы нагрева и остывания при различном времени нагрева

Анализ полученных графиков показывает, что при реализации индукционно-стыковой сварки интенсивный нагрев (0,5 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, передаваемого во внутренние слои в соответствии с (2.10).

Более длительный нагрев ведёт к прогреву внутренних слоёв и, соответственно, к уменьшению темпа остывания поверхностного слоя. Обобщённый график зависимости времени остывания от времени нагрева представлен на рис. 5.3. Очевидно, что полученная зависимость должна учитываться при разработке автоматизации оборудования для индукционно-стыковой сварки на интервале извлечения индуктора и срабатывания устройства сдавливания поверхностей.

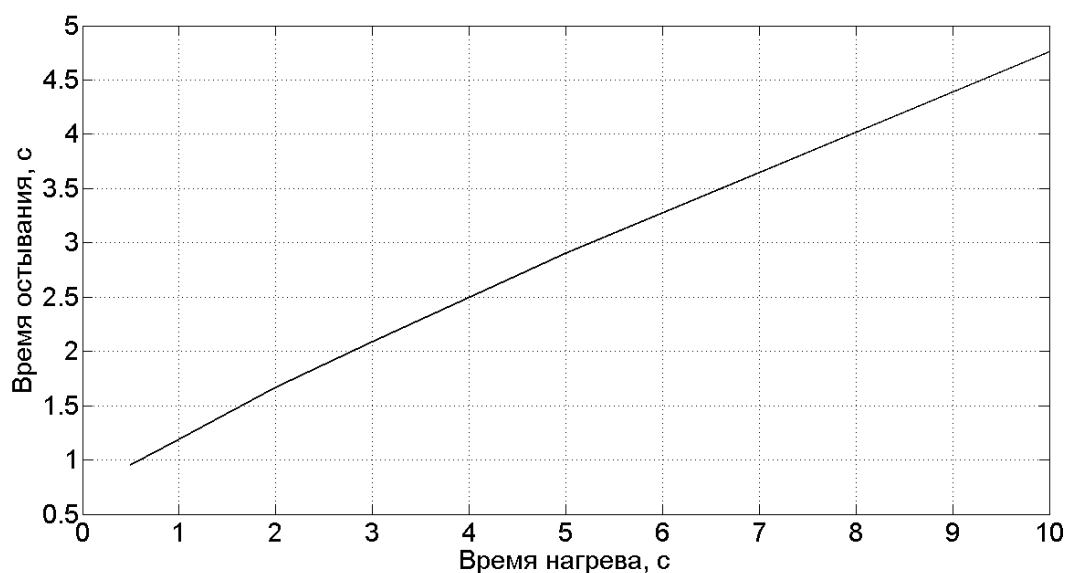


Рис. 5.3. Зависимость времени остывания от времени нагрева

Однако, другой стороной длительности нагрева поверхностного слоя является затраты энергии на этот этап технологического процесса. На рис 5.4 приведена зависимость потребляемой энергии на нагрев от его длительности.

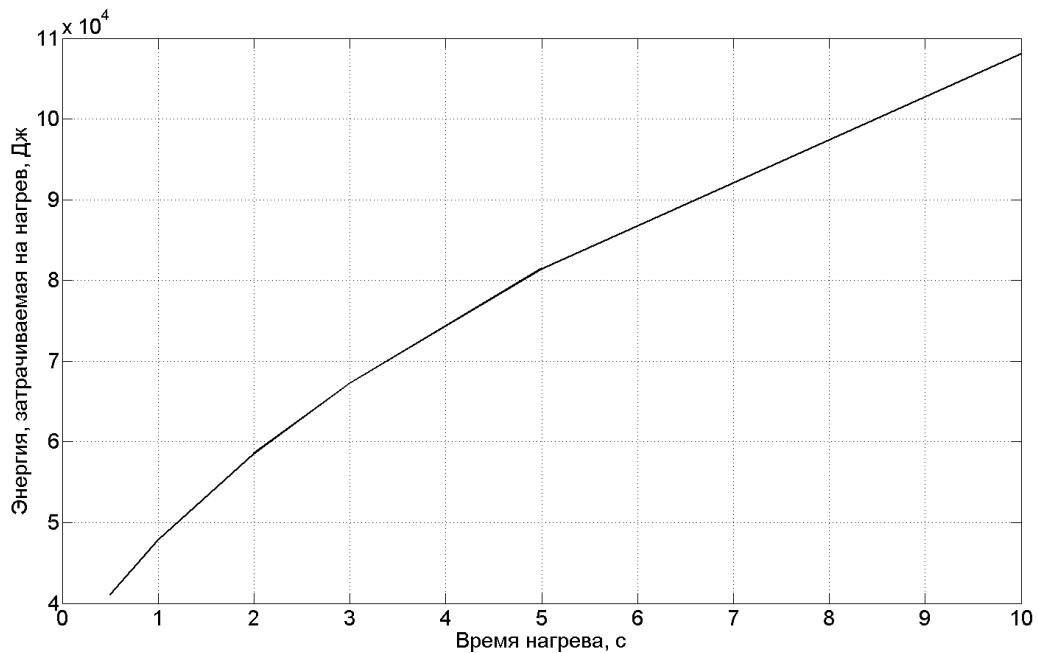


Рис. 5.4. Характеристика зависимости потребления энергии на нагрев от его длительности

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 находить компромиссное решение при проектировании оборудования с учётом энергопотребления и минимизации времени извлечения индуктора из пространства между нагреваемыми поверхностями.

5.2. Экспериментальное исследование характеристик ферромагнитных материалов при различных частотах тока и температурах нагрева

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. Порядок проведения экспериментов, расчётные формулы и полученные результаты приведены в Приложении 7.

Полученная зависимость активного сопротивления от частоты при неизменной температуре (рис. П.7.3) подтверждает имеющиеся в литературе данные. В то же время важным при моделировании является характер изменения индуктивности и индуктивного сопротивления в функции частоты (рис. 5.5, 5.6), которые неразрывно связаны с изменением глубины проникновения тока (рис. 5.7). Очевидно, что это определяется влиянием внутренней индуктивности ферромагнитного образца, снижающейся при увеличении частоты.

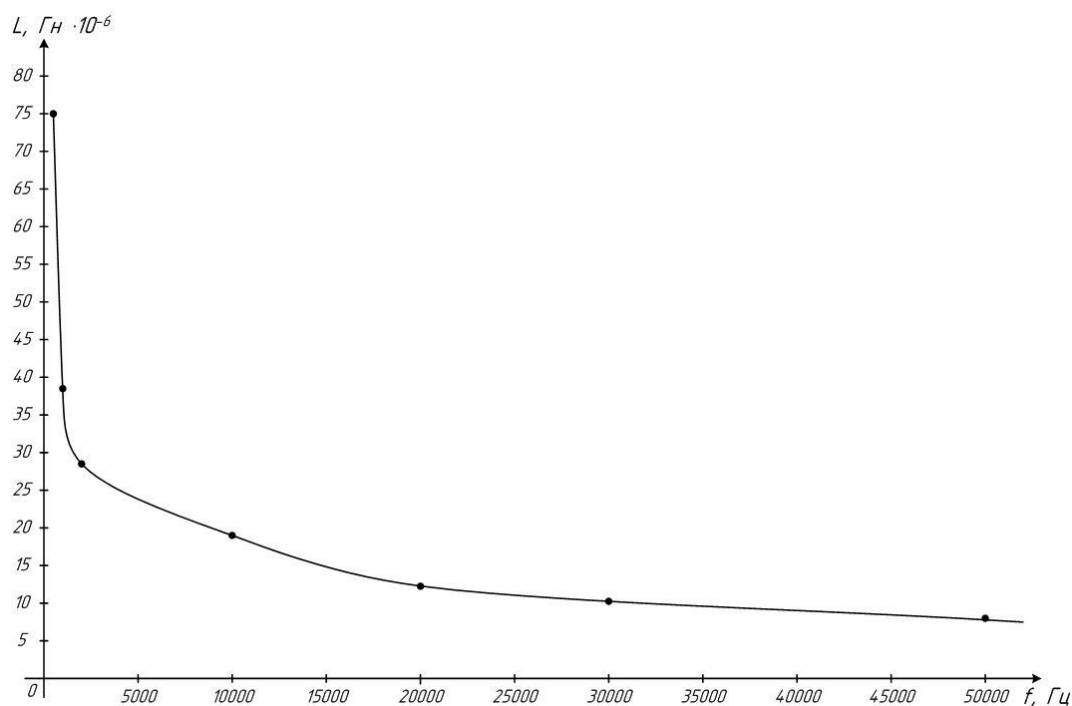


Рис. 5.5. График изменения индуктивности ферромагнитного образца в функции частоты

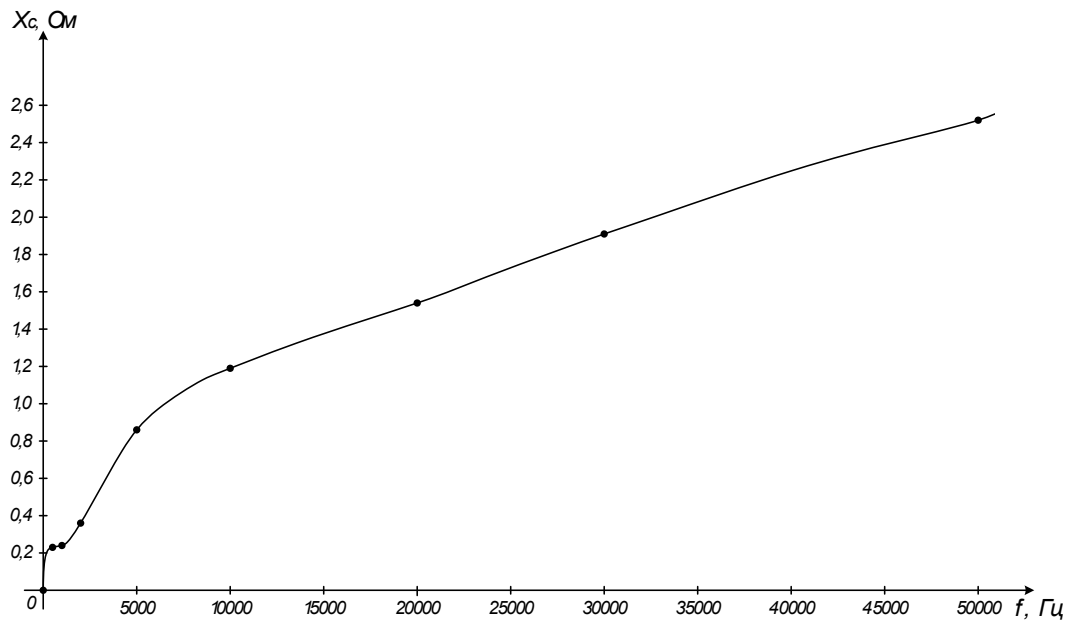


Рис. 5.6. График изменения индуктивного сопротивления ферромагнитного образца в функции частоты

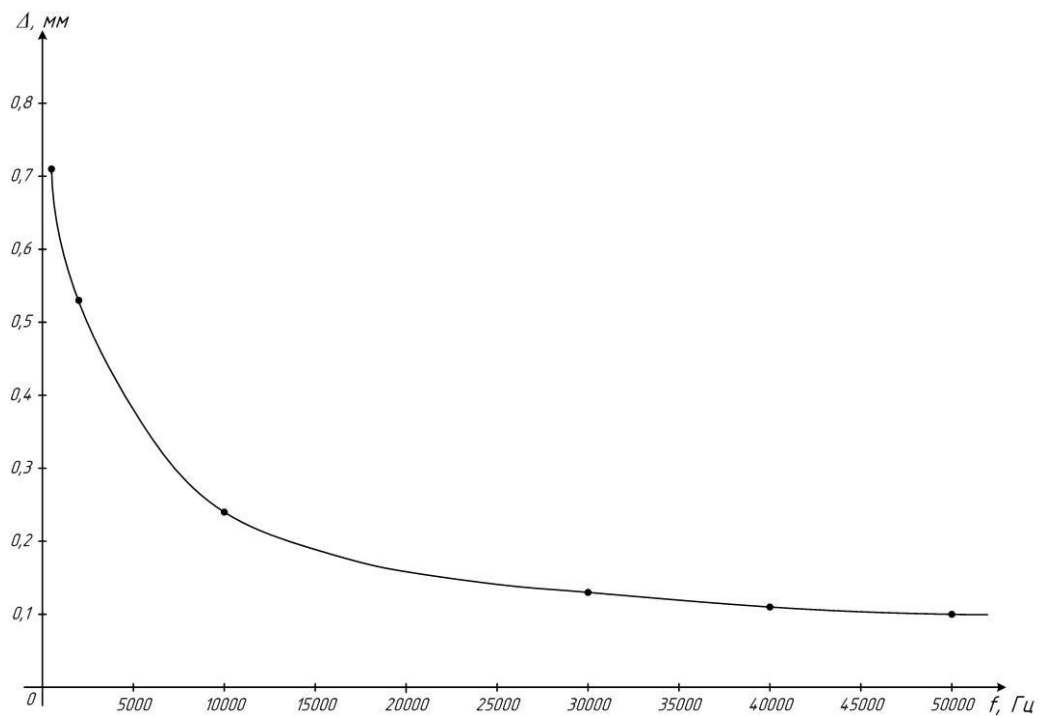


Рис. 5.7. График изменения глубины проникновения тока в функции частоты

Результаты экспериментального исследования характеристик ферромагнитного образца при различной температуре нагрева и токах различной частоты представлены в виде графиков (рис. 5.8, 5.9 и 5.10).

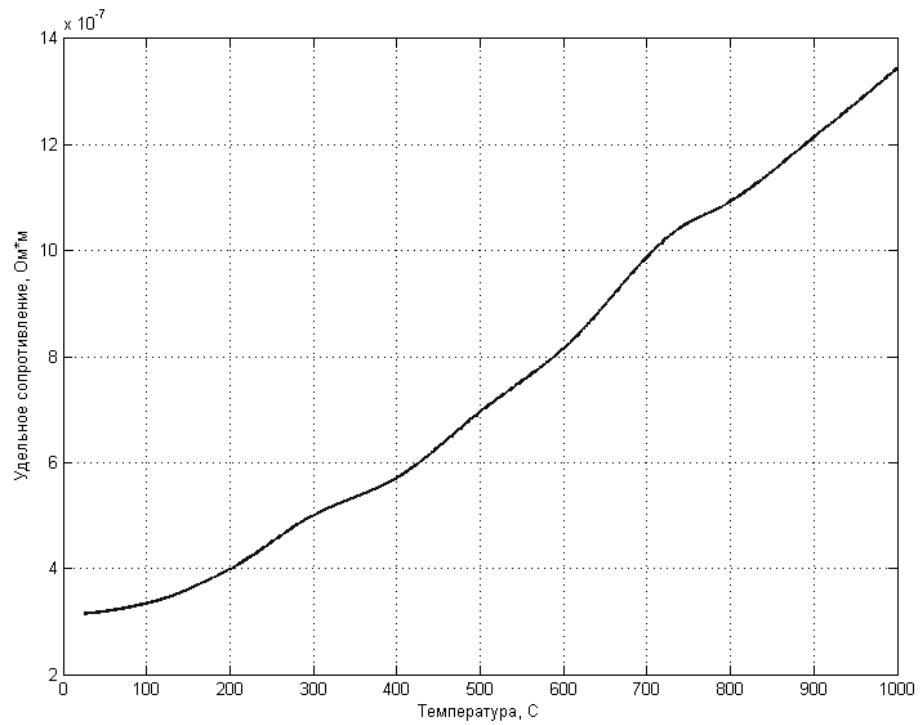


Рис. 5.8. Зависимость удельного сопротивления ферромагнитного образца от температуры

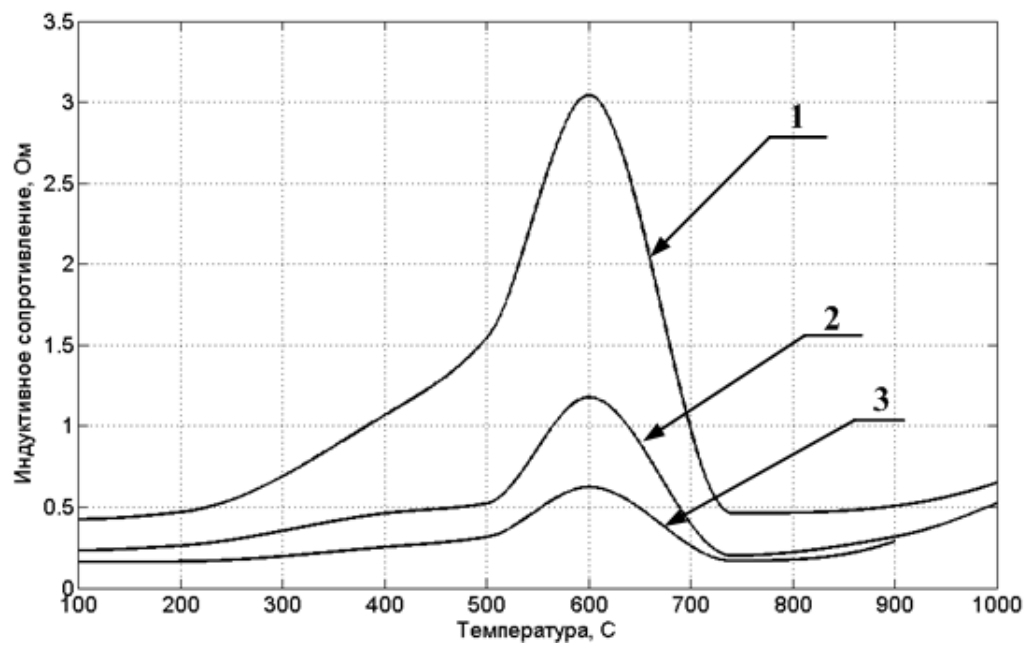


Рис. 5.9. Зависимость индуктивного сопротивления ферромагнитного образца от температуры: 1 – частота 2 кГц; 2 – частота 500 Гц; 3 – частота 100 Гц

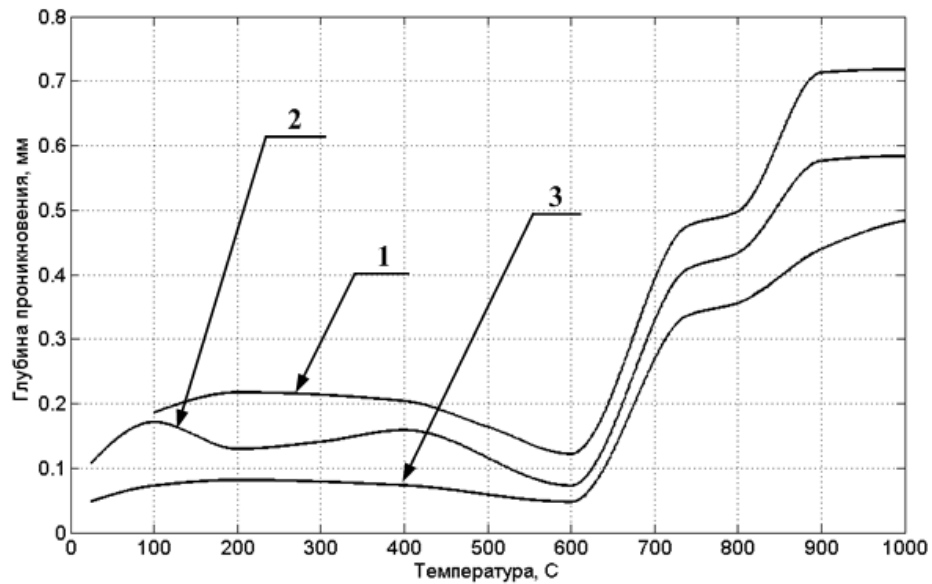


Рис. 5.10. Зависимость глубины проникновения тока от температуры:

1 – частота 10 кГц; 2 – частота 25 кГц; 3 – частота 50 кГц

На рис. 5.9 и 5.10 представлены зависимости индуктивного сопротивления стального проводника и глубины проникновения тока от температуры при различных значениях частоты тока. Анализ кривых указывает на увеличение индуктивного сопротивления при нагревании, что компенсирует рост удельного сопротивления проводника и приводит к практически постоянному значению глубины проникновения тока до точки структурных изменений стали (точка Кюри). При превышении температурой этой точки индуктивное сопротивление проводника резко падает из-за потери сталью магнитных свойств, и глубина проникновения тока начинает резко возрастать.

В целом проведённое экспериментальное исследование ферромагнитных образцов показало существенное изменение удельного сопротивления стального проводника с ростом температуры и частоты, влияющее на глубину проникновения тока. Проведённая обработка результатов экспериментов указывает на значительное изменение внутренней индуктивности при нагреве проводника выше точки Кюри, приводящее к изменению характера зависимости глубины проникновения тока от температуры и частоты.

5.3. Разработка структурной схемы системы реализации энергетически эффективного режима

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 (табл. 4.6). В то же время этот режим не предъявляет повышенных требований к диапазону изменения напряжения на индукторе и может быть реализован с помощью достаточно простых средств.

Функциональная схема системы стабилизации тока индуктора по принципу подчинённого регулирования [31, 70, 85] представлена на рис. 5.11.

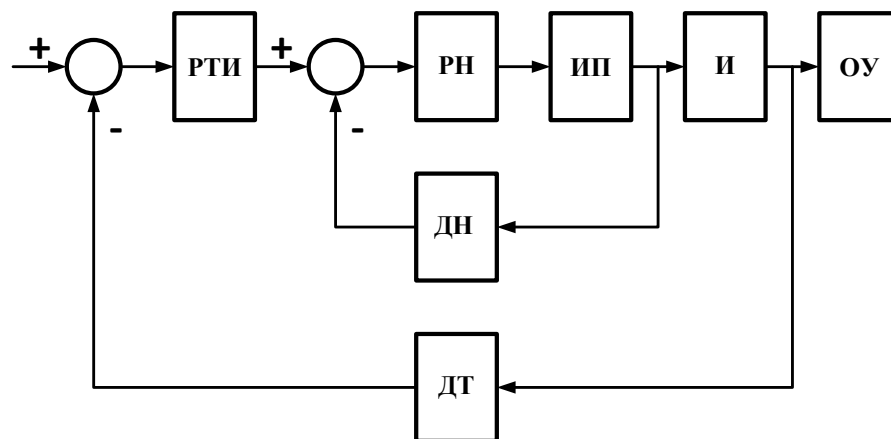


Рис. 5.11. Функциональная схема системы стабилизации тока индуктора
 РТИ – регулятор тока индуктора; РН – регулятор напряжения на индукторе;
 ИП – высокочастотный источник питания; И – индуктор; ОУ – объект управления
 (индукционного нагрева); ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока

В соответствии с принципом подчинённого регулирования настройка всей системы осуществляется поэтапно, начиная с внутренних контуров. Организация контура регулирования напряжения связана с тем, что от него потребляются большие токи, в результате которых напряжение на выходе источника характеризуется выраженной неустойчивостью. При этом источник питания имеет передаточную функцию:

$$H_{un}(p) = \frac{k_{un}}{\tau_{un}p + 1}, \quad (5.1)$$

где k_{un} , τ_{un} – коэффициент передачи и постоянная времени источника питания.

Постоянная времени источника питания связана с установкой в нём фильтров высоких частот и является малой величиной, в компенсации которой необходимости нет. Поэтому в контуре регулирования источника питания можно применить интегральный регулятор. При настройке на технический оптимум его передаточная функция имеет вид:

$$H_{pn}(p) = \frac{1}{k_{un}a\tau_{un}p}, \quad (5.2)$$

где $a=2$.

Замкнутый контур напряжения источника в целом при пренебрежении квадратом малой постоянной времени имеет следующую передаточную функцию:

$$H_{zn}(p) = \frac{1}{2\tau_{un}p + 1}. \quad (5.3)$$

Передаточную функцию индуктора можно найти из последовательной схемы замещения трансформатора с разомкнутым магнитопроводом, которая имеет следующий вид.

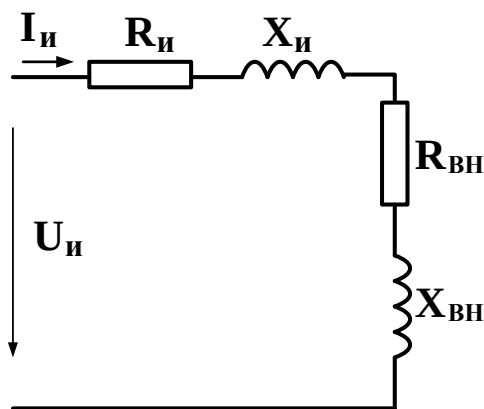


Рис 5.12. Последовательная схема замещения трансформатора $R_{и}$, $X_{и}$ – активное и реактивное сопротивление индуктора; $R_{вн}$, $X_{вн}$ – вносимое в цепь индуктора активное и реактивное сопротивление нагреваемых поверхностей изделия

В целом комплексное сопротивление индуктора определяется выражением:

$$\begin{aligned} Z_u &= R_u + \frac{X_m^2 R_c}{R_c^2 + X_c^2} + j \left(X_u - \frac{X_m^2 X_c}{R_c^2 + X_c^2} \right) = \\ &= R_u + R_{\text{вн}} + j(X_u - X_{\text{вн}}) = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma} . \end{aligned} \quad (5.4)$$

В соответствии с этим передаточная функция индуктора имеет вид:

$$H_u(p) = k_u , \quad (5.5)$$

где $k_u = \frac{1}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}}$ – коэффициент передачи индуктора.

Передаточная функция объекта в контуре регулирования тока индуктора имеет вид:

$$H_o(p) = \frac{k_u}{2\tau_{\text{ин}} p + 1} . \quad (5.6)$$

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

$$H_{\text{пт}}(p) = \frac{1}{k_u a \cdot 2\tau_{\text{ин}} p} , \quad (5.7)$$

где $a=4$ при настройке на симметричный оптимум.

В результате передаточная функция замкнутого контура регулирования тока индуктора при исключении малых величин высокого порядка имеет вид:

$$H_{\text{зт}}(p) = \frac{1}{8\tau_{\text{ин}} p + 1} . \quad (5.8)$$

На рис. 5.13 представлена структурная схема управления при стабилизации тока индуктора на основе выбранных регуляторов.

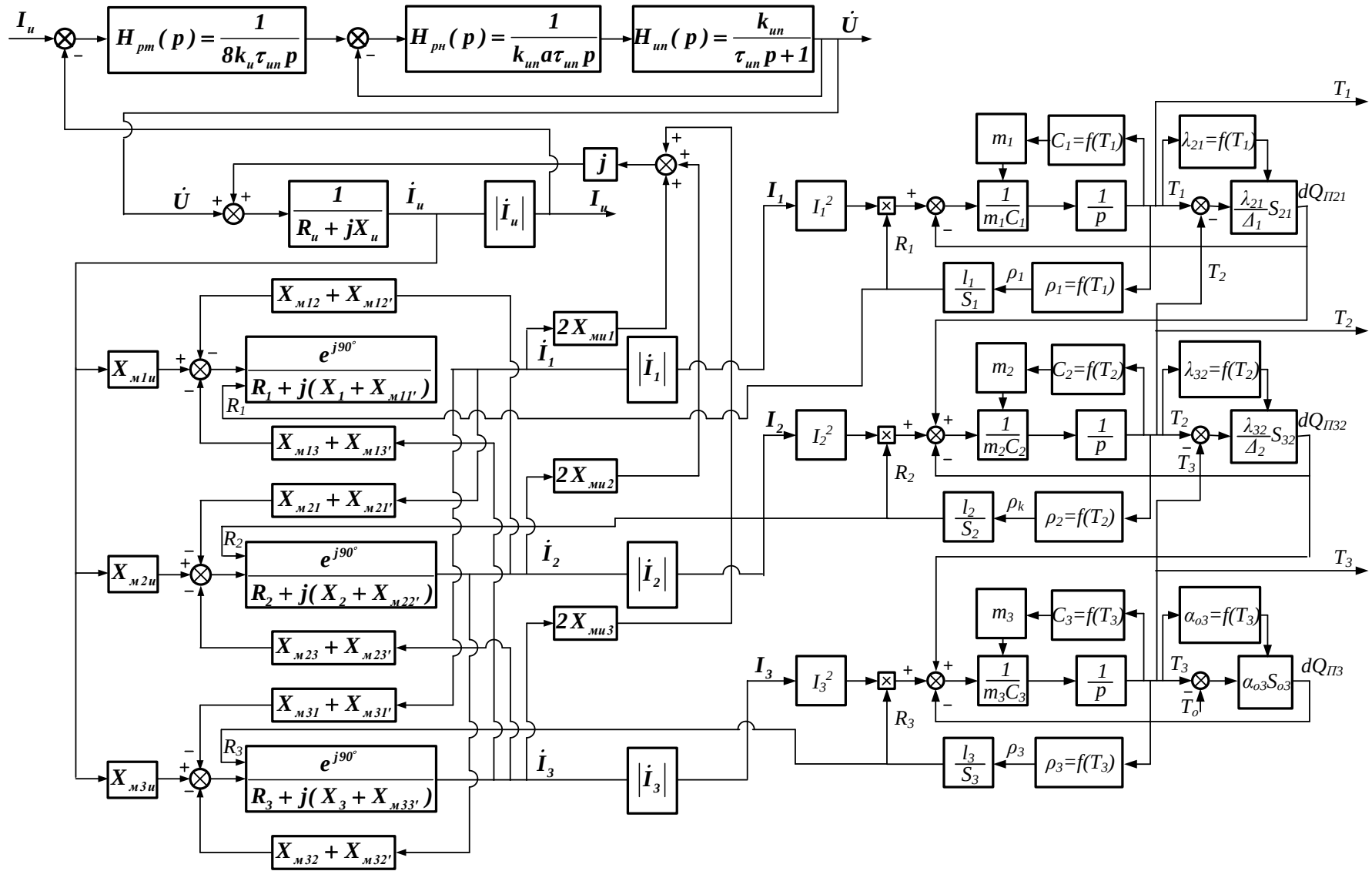


Рис. 5.13. Структурная схема контура регулирования тока индуктора

Кривые, характеризующие динамику изменения основных характеристик индукционного нагрева, представлены на рис. 5.14-5.17.

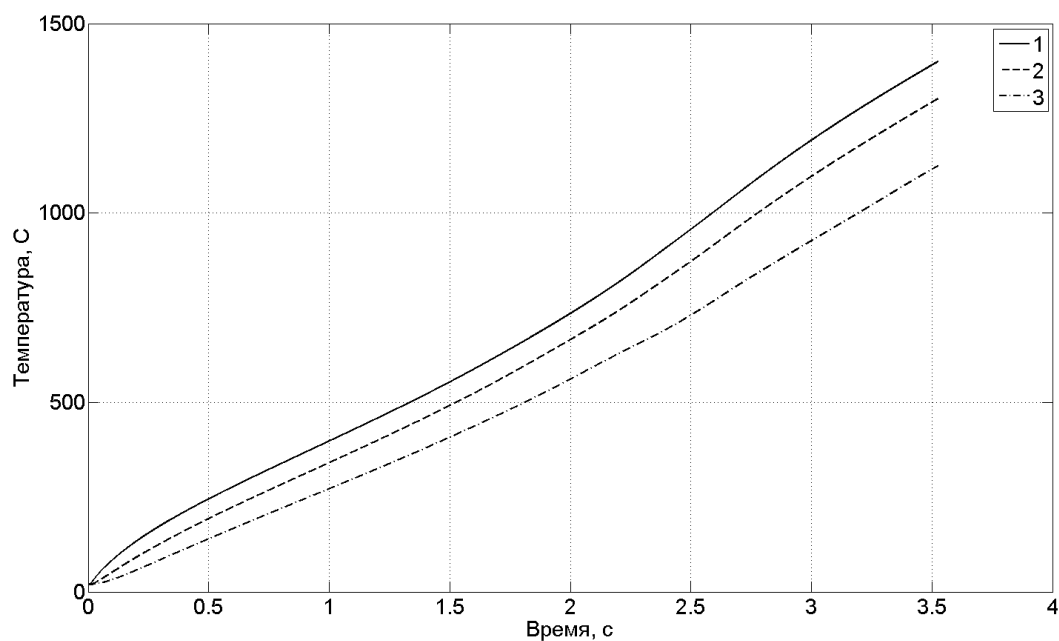


Рис. 5.14. Динамика изменения температуры в слоях изделия

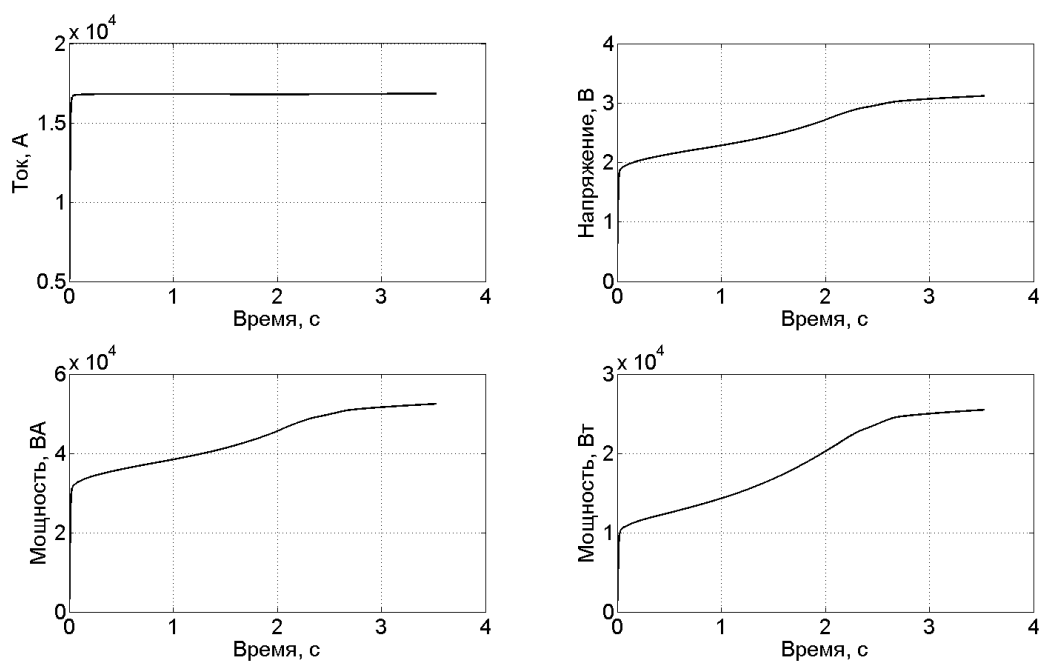


Рис. 5.15. Динамика изменения технологических параметров индуктора:
а — ток; б — напряжение; в — полная мощность; г — активная мощность

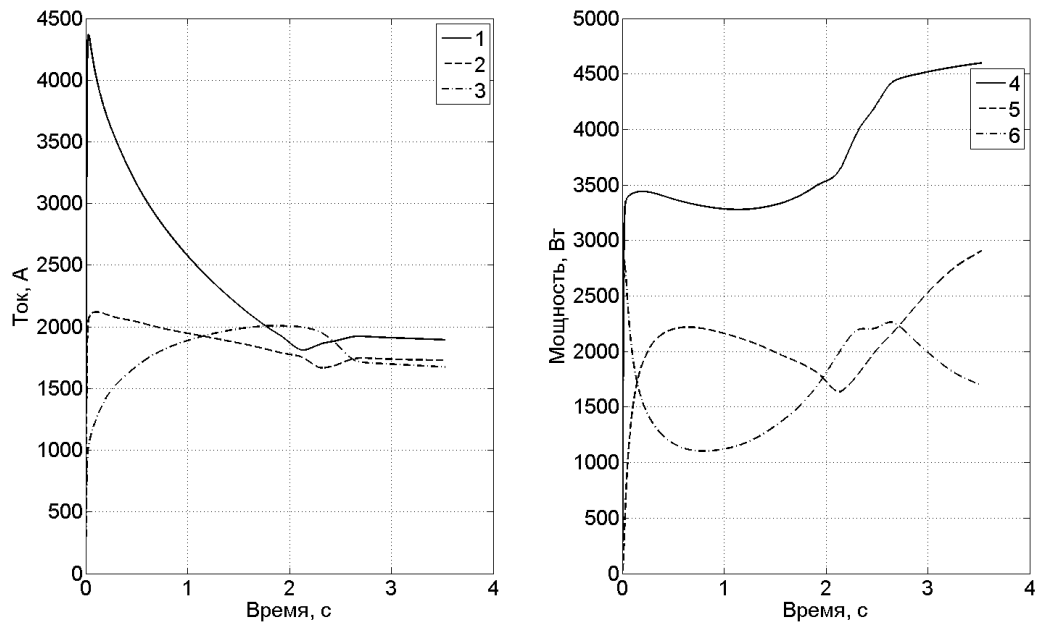


Рис. 5.16. Динамика изменения характеристик слоёв нагреваемого изделия:
1, 2, 3 – токи первого, второго и третьего слоёв соответственно; 4 – мощность, выделяемая в поверхностном слое; 5 – мощность, передаваемая во второй слой; 6 – мощность, оставшаяся в поверхностном слое

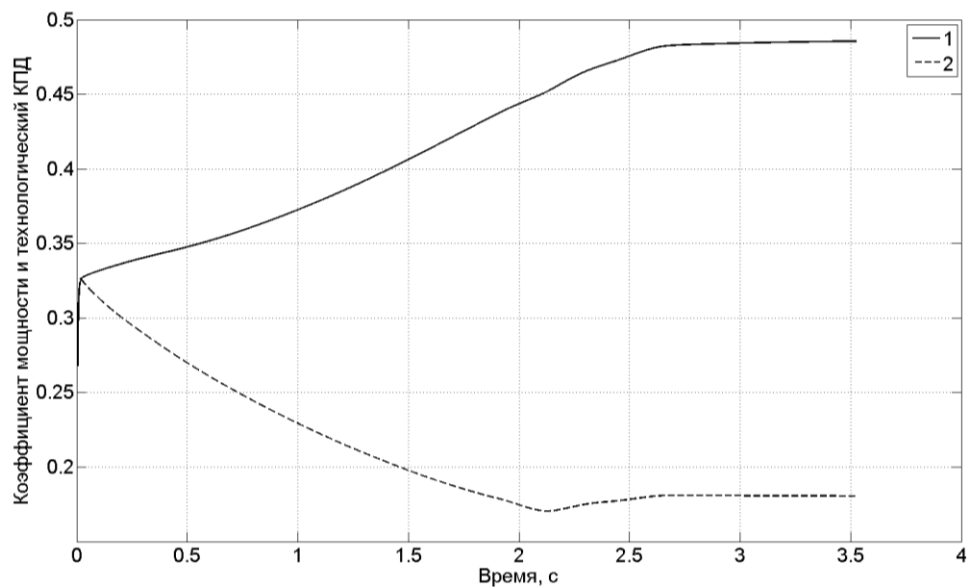


Рис. 5.17. Динамика изменения энергетических показателей процесса индукционного нагрева: 1 – коэффициент мощности; 2 – технологический КПД

Анализ полученных результатов показывает, что разработанная система стабилизации тока индуктора обеспечивает требуемый характер изменения параметров нагрева в полном соответствии с обеспечением энергетически эффективного режима (параграф 4.2.2). При этом длительность переходного процесса для электромагнитных переменных

составляет менее 0,05 с. По завершении его величина тока в индукторе достигает требуемого установившегося значения и в дальнейшем при увеличении за счёт нагрева вносимого сопротивления нагреваемого изделия поддерживается практически неизменной посредством соответствующего изменения напряжения.

Для более полного исследования разработанной системы управления целесообразно рассмотреть её реакцию на возмущающие воздействия. Одним из наиболее значительных является резкое изменение магнитной проницаемости нагреваемого слоя при переходе точки структурных преобразований (точка Кюри), происходящих в диапазоне температур 750-770 °С [73]. При этом магнитная проницаемость скачком изменяется до 1.

Для скачкообразного изменения магнитной проницаемости в структуру модели введены дополнительные блоки, изменяющие как индуктивное сопротивление нагреваемого слоя, так и коэффициенты взаимной индукции между слоями. Параметры слоёв приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Параметры модели для исследования перехода точки Кюри

Исходные данные опыта							
$l=1 \text{ м}; h=0,03 \text{ м}; \Delta=0,001 \text{ м}; f=2000 \text{ Гц}; \delta=5 \text{ мм}; \mu_1=20; \mu_2=20; \mu_3=20; \mu_4=20;$ $\gamma=6,25 \cdot 10^6 \text{ См/м}$							
	Индуктор	Изделие 1 слой	Изделие 2 слой	Изделие 3 слой	Изделие 1' слой	Изделие 2' слой	Изделие 3' слой
$R, \text{ Ом}$	$6,693 \cdot 10^{-6}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$
$R', \text{ Ом}$	$6,693 \cdot 10^{-6}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$	$1,612 \cdot 10^{-4}$
$X_{\text{сум}}, \text{ Ом}$	$3,121 \cdot 10^{-4}$	$4,648 \cdot 10^{-4}$	$6,389 \cdot 10^{-4}$	$7,573 \cdot 10^{-4}$	$4,648 \cdot 10^{-4}$	$6,389 \cdot 10^{-4}$	$7,573 \cdot 10^{-4}$
$X'_{\text{сум}}, \text{ Ом}$	$3,074 \cdot 10^{-4}$	$3,945 \cdot 10^{-4}$	$4,607 \cdot 10^{-4}$	$6,348 \cdot 10^{-4}$	$3,945 \cdot 10^{-4}$	$4,607 \cdot 10^{-4}$	$6,348 \cdot 10^{-4}$
Сопротивления взаимной индуктивности, $\cdot 10^{-3}$							
Индуктор	-	0,28977	0,27627	0,26406	0,28977	0,27627	0,26406
	-	0,28939	0,28234	0,26940	0,28938	0,28234	0,26940
Изделие 1 слой	0,28977	-	0,4638	0,42255	0,27308	0,26019	0,24869
	0,28939	-	0,37866	0,35358	0,27477	0,26777	0,25537
Изделие 2 слой	0,27627	0,4638	-	0,59565	0,26017	0,24838	0,23783
	0,28234	0,37866	-	0,45987	0,26776	0,26108	0,24924
Изделие 3 слой	0,26406	0,42255	0,59565	-	0,24869	0,23785	0,22814
	0,26940	0,35358	0,45987	-	0,25536	0,24924	0,23837

Примечание: параметры слоёв изделия при переходе температуры поверхностного слоя точки Кюри выделены жирным шрифтом.

Структурная схема для исследования возмущающего воздействия при переходе точки Кюри представлена на рис. 5.18.

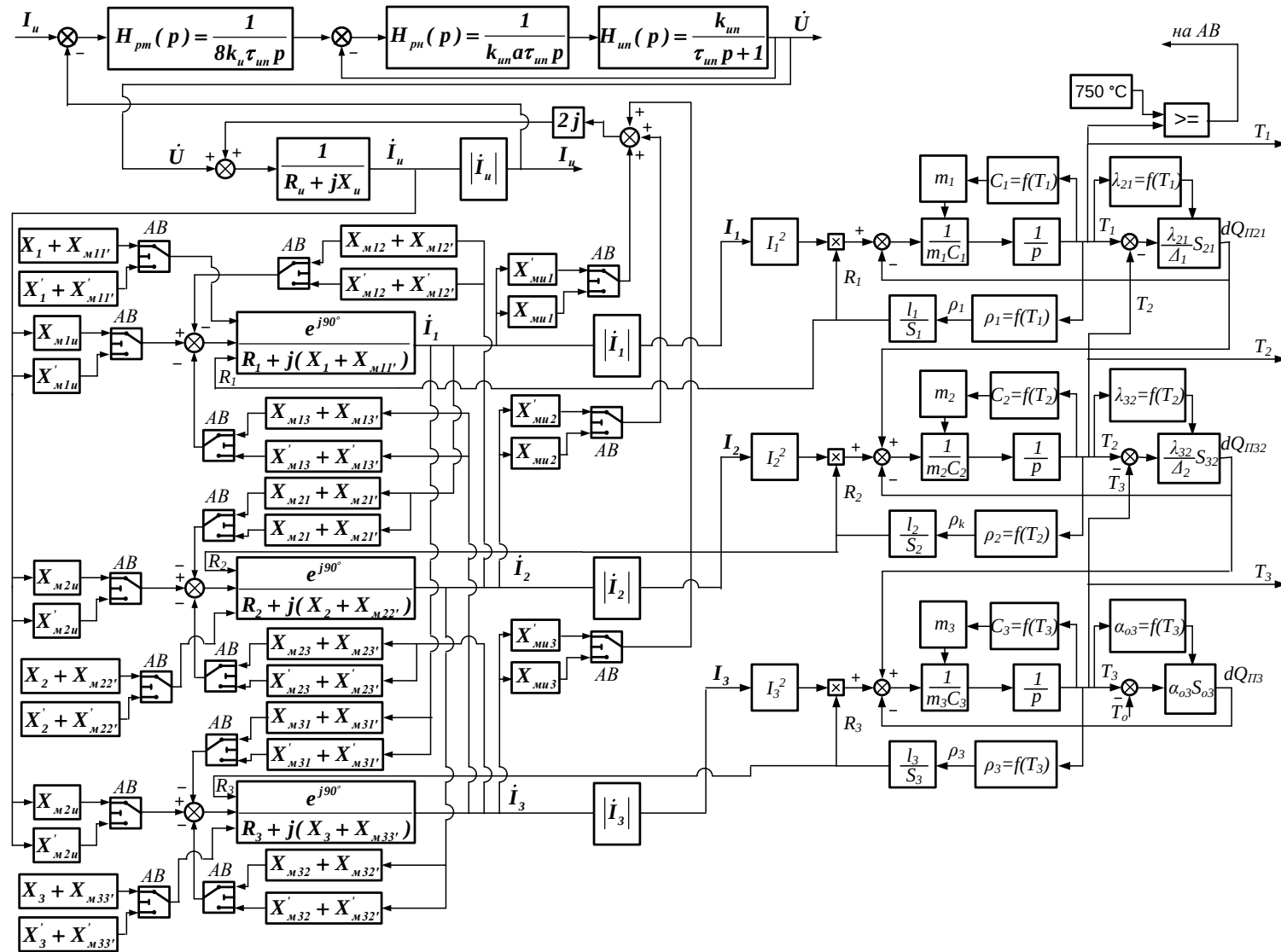


Рис. 5.18. Структурная схема для исследования возмущающего воздействия при переходе точки Кюри

На рис. 5.19-5.22 показаны переходные процессы – 2, полученные при изменении свойств в точке Кюри, в сравнении с аналогичными характеристиками без его учёта – 1.

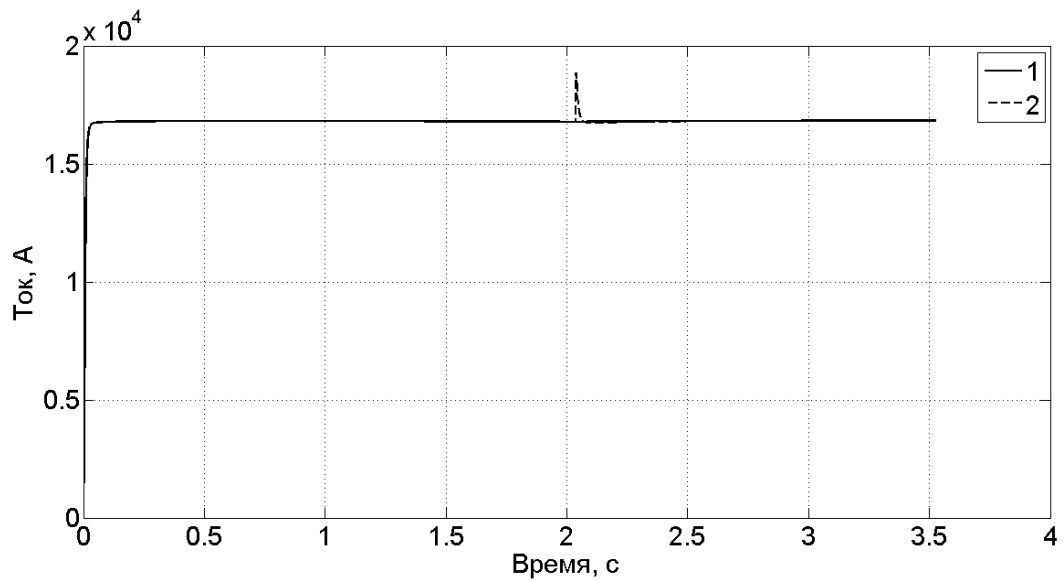


Рис. 5.19. Динамика изменения тока в индукторе

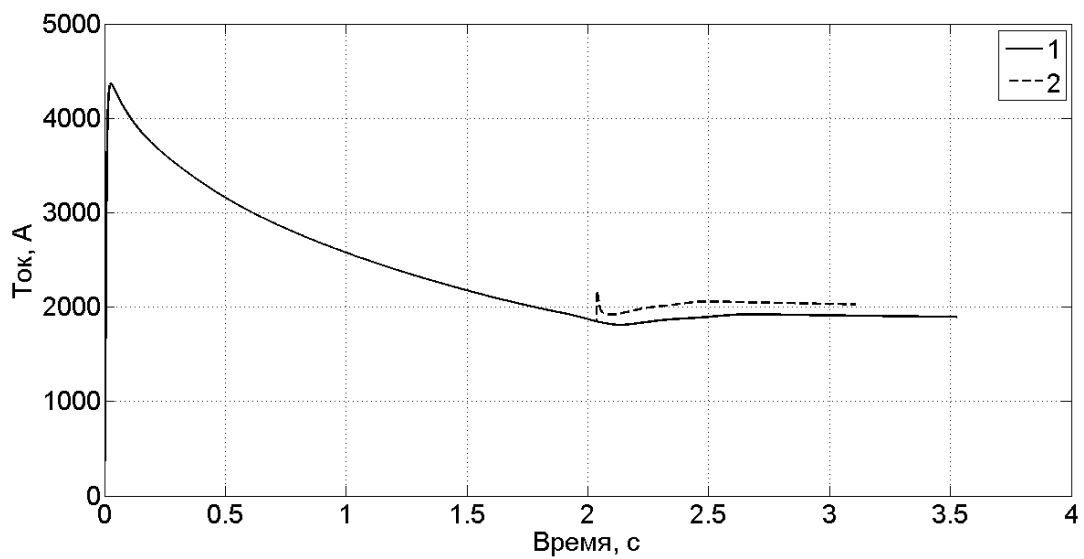


Рис. 5.20. Динамика изменения тока в поверхностном слое

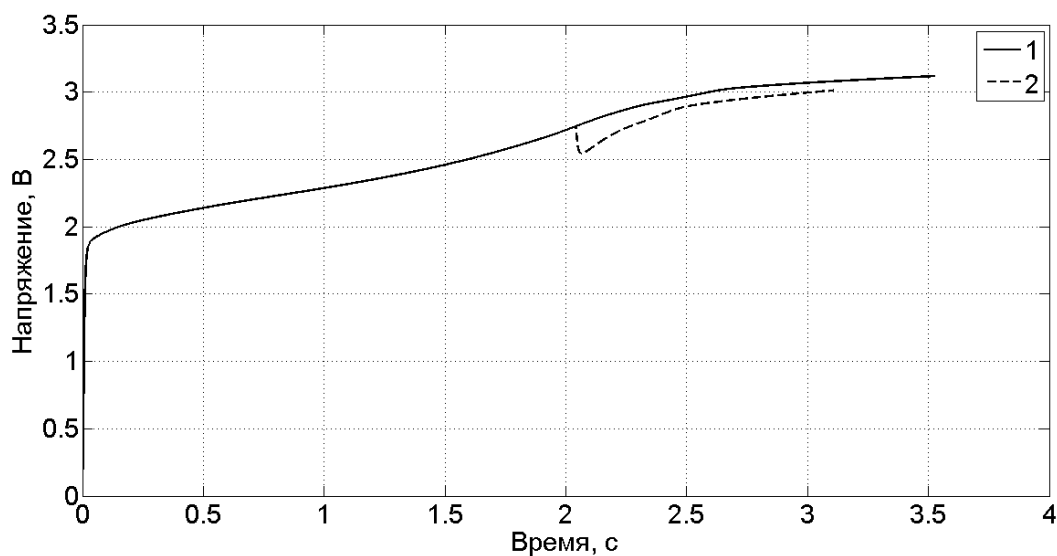


Рис. 5.21. Динамика изменения напряжения на индукторе

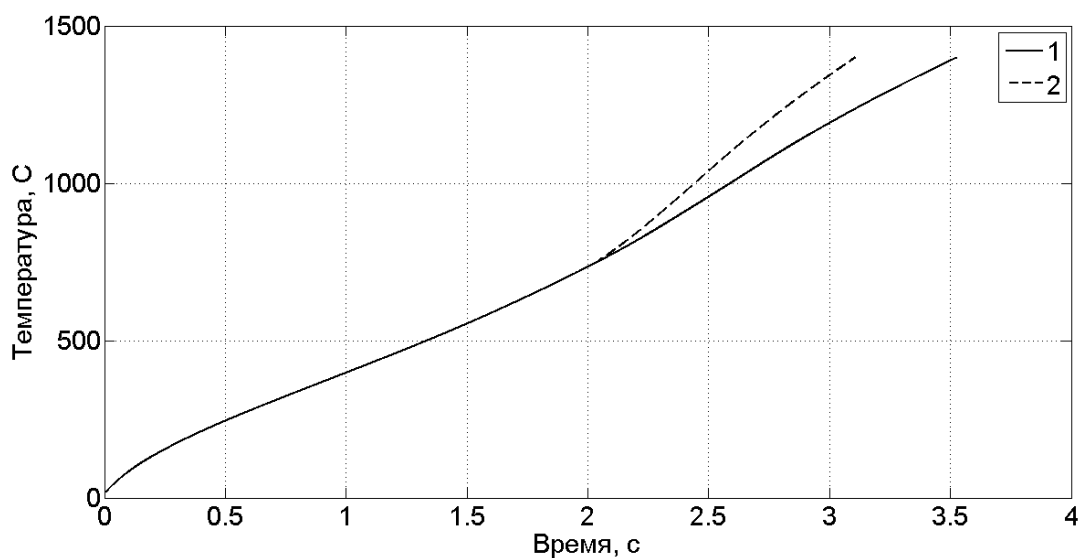


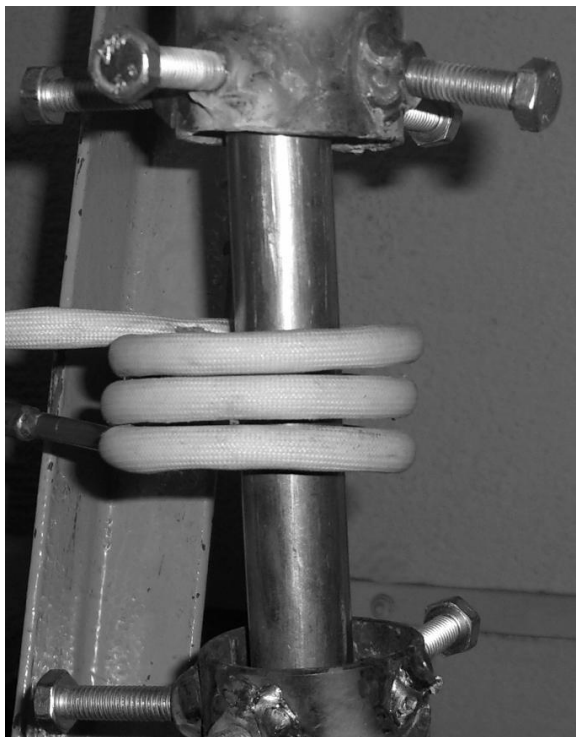
Рис. 5.22. Динамика изменения температуры в поверхностном слое

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что при превышении температуры поверхностного слоя в $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, возмущающее воздействие приводит к резкому изменению тока индуктора (рис. 5.19), которое обрабатывается системой управления в течение $0,05\text{ с}$. При этом ток поверхностного слоя возрастает по сравнению с током без учёта возмущающего воздействия на 18% (рис. 5.20). Это приводит к снижению напряжения на индукторе на 9% при сохранении характера его изменения (рис. 5.21) и более интенсивному нагреву (рис. 5.22).

В целом разработанная система автоматического управления показала свою устойчивость и требуемую точность поддержания тока индуктора.

5.4. Характеристики экспериментальных образцов индукционно-стыковой сварки

Сварка экспериментальных образцов осуществлялась с помощью сварочных источников типа СЧ-40АВ и ВЧ-40АВ. Паспортные данные источников приведены в Приложении 8. При этом проводилась сварка с помощью наружного и плоского индукторов. Общий вид индукторов со свариваемыми изделиями, закреплёнными в прессе, представлен на рис 5.23.



а)



б)

Рис. 5.23. Общий вид индукторов установки индукционно-стыковой сварки,

а – наружный индуктор, б – плоский индуктор

Фотографии сваренных стальных образцов представлены на рис 5.24. Их параметрический анализ сведён в табл. 5.2.

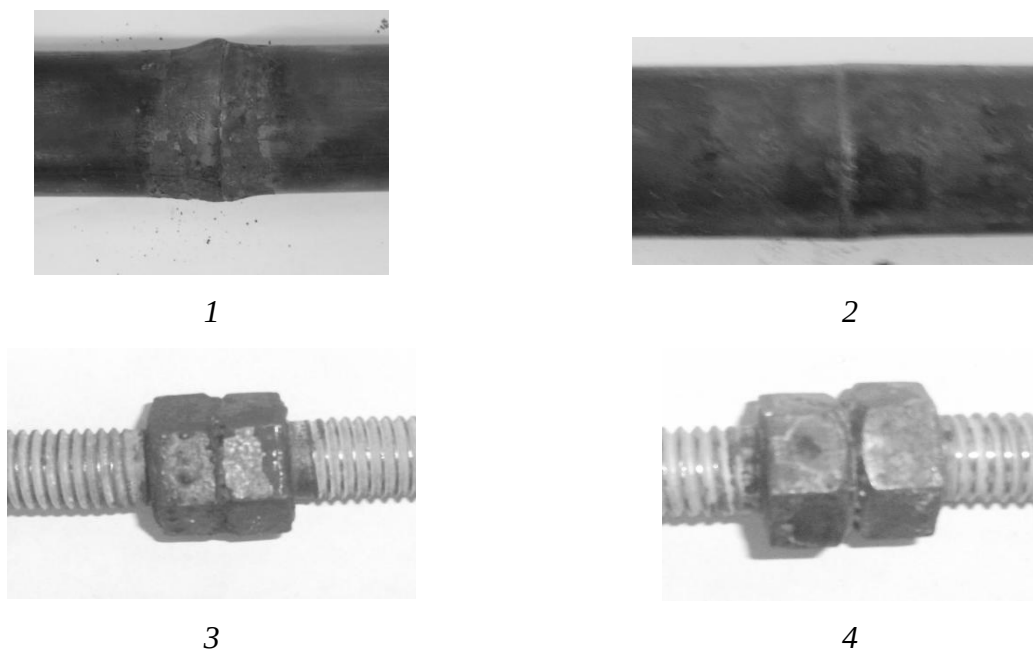


Рис. 5.24. Общий вид сваренных образцов

Табл. 5.2. Виды и параметры образцов индукционно-стыковой сварки

№ рисунка	Форма изделия	Материал	Вид индуктора	Искажение формы	Грат
1	Труба	Сталь 10 Наружный диаметр 32 мм, толщина стенки 3 мм)	Наружный	Утолщение изделия в месте сварки 6% Зона температурного влияния 26 мм	1,5 мм
2	Труба	Сталь 10 Наружный диаметр 32 мм, толщина стенки 3 мм)	Плоский	Утолщения изделия в месте сварки нет Зона температурного влияния 10 мм	нет
3	Шестигран- ник	Сталь 10 (площадь 36,4 мм ²)	Наружный	Зона температурного влияния 16 мм	2 мм
4	Шестигран- ник	Сталь 10 (площадь 36,4 мм ²)	Плоский	Зона температурного влияния 6 мм	нет

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 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 [51].

5.5. Результаты и выводы

1. Проведённое моделирование режимов нагрева плоским индуктором и остывания свариваемых поверхностей при его извлечении из зоны сварки позволили дать рекомендации по более экономичному по затратам энергии быстрому режиму нагрева. В то же время этот фактор необходимо учитывать при разработке автоматического управления всем процессом и подборе вида исполнительных механизмов.

2. Экспериментальное исследование ферромагнитных образцов указывает на изменение внутренней индуктивности при нагреве проводника выше точки Кюри, приводящее к изменению характера зависимости глубины проникновения тока от температуры и частоты.

3. Разработана структурная схема и проведён её синтез для режима стабилизации тока индуктора, обеспечивающего энергетически экономичный режим нагрева свариваемых поверхностей. Анализ результатов моделирования системы управления при выходе на заданный режим и при отработке возмущения, заключающегося в переходе точки Кюри, указывает на обеспечение требуемого качества переходных процессов.

4. Анализ влияния вида используемого индуктора на качественные показатели сварного соединения указывает на преимущества плоского индуктора по сравнению с наружным по виду влияния на форму изделия, наличия грата и величины зоны температурного воздействия.

Заключение

1. Проведённый анализ видов сварки указывает 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, показавший 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 указывает 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 диапазонам изменения напряжения и мощности. Разработана структурная схема реализации управления индукционно-стыковой сваркой со стабилизацией тока индуктора, проведён её синтез и оценка качества управления регулируемые переменными.

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

Библиографический список

1. Бабат, Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г.И. Бабат. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 552 с.
2. Банов, М.Д. Технология и оборудование контактной сварки / М.Д. Банов. – 4-е изд., стер. – М.: Академия, 2009. – 224 с.
3. Безручко, И.И. Индукционный нагрев для объёмной штамповки / И.И. Безручко. – Л.: Машиностроение, 1987. – 126 с.
4. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи: учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов / Л.А. Бессонов. – 7-е изд. – М.: Высш. школа, 1978. – 528 с.
5. Богданов, В.Н. Высокочастотная сварка металлов / В.Н. Богданов. – М.-Л.: Машиностроение, 1965. – 68 с.
6. Бодажков, В.А. Индукционный нагрев труб / В.А. Бодажков. – Л.: Машиностроение, 1969. – 151 с.
7. Болотов, А.В. Электротехнологические установки: учеб для вузов по спец. «Электроснабжение пром. предприятий» / А.В. Болотов, Г.А. Шепель. – М.: Высш. шк., 1988. – 336 с.
8. Брокмайер, К. Индукционные плавильные печи / пер. с нем. под ред. М.А. Шевцова и М.Я. Столова. – М.: Энергия, 1972. – 304 с.
9. Вайнберг, А.М. Индукционные плавильные печи: учеб. пособие для вузов / А.М. Вайнберг. – Изд. 2-е, переработ. и доп. – М.: Энергия, 1967. – 415 с.
10. Виноградов, В.М. Основы сварочного производства: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Виноградов, А.А. Черепяхин, Н.Ф. Шпунькин. – М.: Академия, 2008. – 272 с.
11. Волков, А.С. Разработка декомпозиционного метода исследования индукционно-стыковой сварки / А.С. Волков, И.Ю. Долгих //

Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьёва. – 2015. – № 2 (33). – С. 64-69.

12. Волков, В.В. Исследование многослойной модели индукционного нагрева / В.В. Волков, И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Энергия-2014: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных / ИГЭУ. – Иваново, 2014. – Т. 3. Ч. 2. – С. 3-7.

13. Волков, В.В. Исследование ферромагнитных материалов при нагреве / В.В. Волков, И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Энергия-2013: материалы Восьмой междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных / ИГЭУ. – Иваново, 2013. – Т. 3. Ч. 2. – С. 83-87.

14. Волков, В.В. Исследование энергетических характеристик индукционного нагрева в программе ELCUT / В.В. Волков, И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв // Энергия-2014: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных / ИГЭУ. – Иваново, 2014. – Т. 3. Ч. 2. – С. 7-11.

15. Вологдин, В.В. Индукционная пайка / В.В. Вологдин, Э.В. Куш. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 80 с.

16. Вологдин, В.П. Поверхностная индукционная закалка / В.П. Вологдин. – М.: Оборонгиз, 1947. – 291 с.

17. Гладков, Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Э.А. Гладков. – М.: Академия, 2006. – 432 с.

18. Глуханов, Н.П. Физические основы высокочастотного нагрева / Н.П. Глуханов; под. ред. А.Н. Шамова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1989. – 56 с.

19. Головин, Г.Ф. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева / Г.Ф. Головин, Н.В. Зимин. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 120 с.

20. Голубев, А.Н. Автоматизированный программный модуль для моделирования процессов индукционной заковки / А.Н. Голубев, Л.Б. Корюкин // Вестник научно-промышленного общества. – М.: Алев-В. – 2011. – Вып. 16. – С. 3-10.
21. Голубев, А.Н. Методика математического моделирования процесса индукционной заковки / А.Н. Голубев, С.Н. Кадников // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 2. – С. 61-64.
22. Гуляев, А.И. Технология и оборудование контактной сварки: учеб. для техникумов / А.И. Гуляев. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
23. Демичев, А.Д. Поверхностная заковка индукционным способом / А.Д. Демичев. – Л.: Машиностроение, 1979. – 80 с.
24. 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. – М.: МЭИ, 2013. – Т. 2. – С. 296.
25. 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: материалы Международной научно-технической конференции / ИГЭУ. – Иваново, 2013. – Т. 1. – С. 12-15.
26. 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: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2015. – С. 28-32.
27. Долгих, И.Ю., Королёв А.Н., Захаров В.М. Моделирование динамики температурных процессов при индукционном нагреве / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв, В.М. Захаров // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 5. – С. 57-63.

28. Зимин, Л.С. Применение индукционного нагрева в промышленных технологиях / Л.С. Зимин, А.В. Байкин // Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы Международной научно-технической конференции / ИГЭУ. – Иваново, 2013. – Т. 1. – С. 3-7.

29. Иванова, Л.И. Индукционные канальные печи: учеб. пособие / Л.И. Иванова, Л.С. Грובה, Б.А. Сокунов. – 2-е изд. доп. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. – 105 с.

30. Иванова, Л.И. Индукционные тигельные печи: учеб. пособие / Л.И. Иванова [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. – 87 с.

31. Ильинский, Н.Ф. Основы электропривода: учеб. пособие для вузов / Н.Ф. Ильинский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2003. – 224 с.

32. Кидин, И.Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве / И.Н. Кидин. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии, 1950. – 317 с.

33. Кисаримов, Р.А. Справочник сварщика / Р.А. Кисаримов. – 2-е изд., стереотип. – М.: ИП РфдиоСофт, 2010. – 288 с.

34. Козловский, С.Н. введение в сварочные технологии: учеб. пособие / С.Н. Козловский. – СПб.: Лань, 2011. – 416 с.

35. Козырев, Ю.Г. Применение промышленных роботов: учебное пособие / Ю.Г. Козырев. – М.: Кнорус, 2011. – 488 с.

36. Кошкарёв, Б.Т. Теория сварочных процессов: учеб. пособие / Б.Т. Кошкарёв. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2003. – 217 с.

37. Кузьмин, С.И. Плавка и литьё жаропрочных сплавов и сталей в вакууме / С.И. Кузьмин. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. – 129 с.

38. Кушнер, В.С. Технологические процессы в машиностроении: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / В.С. Кушнер, А.С. Верещака, А.Г. Схиртладзе. – М.: Академия, 2011. – 416 с.

39. Лившиц, Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Линецкий. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
40. Литвинов, А.П. Разработка технологии сварки узлов энергетических установок / А.П. Литвинов // XII Бенардосовские чтения: материалы Международной научно-технической конференции / ИГЭУ. – Иваново, 2005. – С. 13-15.
41. Лозинский, М.Г. Поверхностная закалка стали при нагреве токами высокой частоты / М.Г. Лозинский. – Л.-М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии, 1940. – 120 с.
42. Люшинский, А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А.В. Люшинский. – М.: Академия, 2006. – 208 с.
43. Манин, А.В. Электротехнологические процессы и установки: учеб. пособие / А.В. Манин. – Рыбинск: РГАТА имени П. А. Соловьёва, 2010. – Ч. 1. – 188 с.
44. Материаловедение и технология материалов: учеб. для бакалавров / Г.П. Фетисов [и др.]; под ред. Г.П. Фетисова. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2014. – 767 с.
45. Мацкевич, В.Д. Сборка и сварка корпусов судов / В.Д. Мацкевич. – Л.: Судостроение, 1968. – 402 с.
46. Медникова, В.А. Оптимальное проектирование индукционного нагревателя минимальной длины / В.А. Медникова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – № 2 (40). – С. 103-112.
47. Медникова, В.А. Численная двумерная ANSYS модель непрерывного процесса индукционного нагрева / В.А. Медникова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2013. – № 3. – С. 64-68.

48. Методы расчёта электрических и магнитных полей: учебный комплект / В.Э. Фризен [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 176 с.
49. Немков, В.С. Теория и расчёт устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат., 1988. – 280 с.
50. Николаев, Е.Н. Термическая обработка металлов токами высокой частоты / Е.Н. Николаев, И.М. Коротин. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1977. – 215 с.
51. Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением: учеб. пособие / Г.Г. Чернышов [и др.]; под ред. Г.Г. Чернышова и Д.М. Шашина. – СПб.: Лань, 2013. – 464 с.
52. Основы теории цепей: учеб. для вузов / Г.В. Зевеке [и др.]. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
53. Патент 2164846 Российская Федерация МПК В 23 К 11/24. Способ регулирования и контроля процесса контактной сварки / Н.П. Горун, В.М. Куликов, С.П. Манейкин, П.М. Руденко, В.М. Ягнятинский; опубл. 10.04.2001.
54. Патент 2296655 Российская Федерация МПК В 23 К 11/04. Способ контактной стыковой сварки оплавлением стальных рельсов / Д.И. Пасечник, А.В. Бондарук, А.В. Гудков, В.М. Федин, А.И. Николин; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10.
55. Патент 2311273 Российская Федерация МПК В 23 К 11/24. Способ автоматического измерения и регулирования тепловыделения при контактной точечной сварке / А.С. Климов, А.А. Герасимов, А.Н. Анциборов, М.С. Гончаров; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33.
56. Патент 2387524 Российская Федерация МПК В 23 К 20/14. Способ диффузионной сварки в вакууме многослойных изделий из разнородных нержавеющей сталей / А.Н. Семёнов, С.В. Онищенко, Е.Ю. Ривкин, М.И. Плышевский, С.Н. Новожилов, В.П. Гордо, Г.Н. Шевелёв; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.

57. Патент 2424095 Российская Федерация МПК В 23 К 11/24. Способ измерения сопротивления сварочного контакта / А.С. Климов, А.В. Комиренко, В.С. Климов, А.Н. Анциборов; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20.
58. Патент 2424097 Российская Федерация МПК В 23 К 11/24. Способ стабилизации тепловыделения при контактной точечной сварке / А.С. Климов, А.В. Комиренко, В.С. Климов, А.Н. Анциборов; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20.
59. Патент 2424099 Российская Федерация МПК В 23 К 11/24. Способ стабилизации тока контактной сварки / А.С. Климов, А.В. Комиренко, В.С. Климов, А.Н. Анциборов; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20.
60. Патент 2434722 Российская Федерация МПК В 23 К 11/02. Способ стыковой контактной сварки изделий сопротивлением / Н.В. Пасечник, Б.А. Сивак, А.Ф. Новицкий, А.В. Попов, В.Л. Лагереv; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33.
61. 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.
62. Патон, Б.Е. Электросварка плавлением – итоги, перспективы и проблемы развития / Б.Е. Патон // XII Бенардосовские чтения: материалы Международной научно-технической конференции, 2005. – С. 3-7.
63. Простяков, А.А. Индукционные печи и миксеры для плавки чугуна / А.А. Простяков. – М.: Энергия, 1977. – 217 с.
64. Процессы формообразования и инструменты: учеб. пособие / М.А. Федоренко [и др.]. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 440 с.
65. Романов, Д.И. Электроконтактный нагрев металлов / Д.И. Романов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 168 с.

66. Сарапулов, Ф.Н. Расчёт мощностей и электромагнитных сил в установках индукционного нагрева / Ф.Н. Сарапулов. – Екатеринбург, 1998. – 89 с.
67. Сварка и свариваемые материалы. Технология и оборудование: справ. изд. / под ред. В.М. Ямпольского. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. – Т. II. – 574 с.
68. Селиванов, Ю.В. Современные методы сварки и восстановления рабочих поверхностей сварных соединений / Ю.В. Селиванов // Новые промышленные технологии. – 2005. – № 2. – С. 22-26.
69. Сидоренко, В.Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении / В.Д. Сидоренко. – Л.: Машиностроение, 1980. – 231 с.
70. Системы подчинённого регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский [и др.]. – М.: Энергоатомиздат., 1983. – 256 с.
71. Слухоцкий, А.Е. Индукторы / А.Е. Слухоцкий; под ред. А.Н. Шамова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1989. – 69 с.
72. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
73. Слухоцкий, А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунэр А.В. Установки индукционного нагрева: учеб. пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий [и др.]; под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат., 1981. – 328 с.
74. Современные энергосберегающие электротехнологии: учеб. пособие для вузов / Ю.И. Блинов [и др.]. – СПб: СПбГТЭУ «ЛЭТИ», 2000. – 564 с.
75. Теоретические основы и аспекты электротехнологий. Физические принципы и реализация. Интенсивный курс. Основы I. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 359 с.

76. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле: учеб. пособие / Г.И. Атабеков [и др.]; под ред. Г.И. Атабекова. – 6-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 432 с.
77. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов. / К.С. Демирчян [и др.]. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – Т. 3. – 377 с.
78. Технология и оборудование контактной сварки: учебник для вузов / под ред. Б.Д. Орлова. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
79. Фарбман, С.А. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов / С.А. Фарбман, И.Ф. Колобнев. – М.: Metallurgy, 1968. – 494 с.
80. Фомин, Н.И. Электрические печи и установки индукционного нагрева / Н.И. Фомин, Л.М. Затуловский. – М.: Metallurgy, 1979. – 247 с.
81. Чуларис, А.А. Технология сварки давлением: учеб. пособие / А.А. Чуларис, Д.В. Рогозин. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2005. – 226 с.
82. Шамов, А.Н. Высокочастотная сварка металлов / А.Н. Шамов, И.В. Лунин, В.Н. Иванов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Политехника, 1991. – 240 с.
83. Шамов, А.Н. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок / А.Н. Шамов, В.А. Бодажков. – Изд. 2-е. – Л.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
84. Шепеляковский, К.З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве / К.З. Шепеляковский. – М.: Машиностроение, 1972. – 288 с.
85. Шрейнер, Р.Т. Системы подчинённого регулирования электроприводов. Электроприводы постоянного тока с подчинённым регулированием координат: учеб. пособие для вузов / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Урал. гос. проф.-пед. ун-т, 1997. – 279 с.
86. Щекин, В.А. Технологические основы сварки плавлением: учеб. пособие / В.А. Щекин. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2003. – 219 с.

87. Электротермические процессы и установки: учеб. пособие по теоретическому курсу / под ред. В.Н. Тимофеева, Е.А. Головенко, Е.В. Кузнецова. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007. – 360 с.
88. Dolgikh, I. Induction heating exploration / I. Dolgikh, A. Korolev, A. Orlov // 14th International Symposium «Topical problems in the field of electrical and power engineering». – Parnu, Estonia, 2014. – P. 7-10.
89. Dolgikh, I. Temperature processes of induction heating simulation / I. Dolgikh, A. Korolev, V. Zakharov // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. – Vol. 5. Technical Sciences. – San Francisco, California, USA, 2014. – P. 68-74.
90. Dolgikh, I.Yu. Decomposition method for induction heating simulation / I.Yu. Dolgikh, A.N. Korolev, Yu.O. Shapina // Russian Internet Journal of Electrical Engineering. – 2015. – Vol.2, no. 3. – P. 8-13.
91. ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.10: Руководство пользователя. – СПб.: ООО Топ, 2012.
92. Theoretical background and aspects of electrotechnologies. Physical principles and realization. Intensive Course Basic I. – St. Petersburg: Publishing house of ETU, 2012. – 356 p.

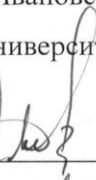
Приложение 1. Акт внедрения диссертационной работы Долгих И.Ю.

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по учебной работе



ФГБОУ ВПО "Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И. Ленина"

 А.В. Гусенков

 2016 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Долгих И.Ю.

В Ивановском государственном энергетическом университете (ИГЭУ) на кафедре «Теоретические основы электротехники и электротехнологии» (ТОЭЭ) старший преподаватель Долгих И.Ю. проводит научно-исследовательскую работу по изучению статических и динамических характеристик электромагнитных и температурных процессов индукционного нагрева.

Содержащиеся в диссертационной работе результаты научно-технической деятельности Долгих И.Ю., заключающиеся в разработке декомпозиционного метода исследования индукционного нагрева, а также в анализе полученных на её основе динамических характеристик с учётом изменяющихся физических свойств нагреваемого объекта, используются при проведении лабораторных занятий со студентами по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электротехнологические установки и системы». В соответствии с заявленной тематикой разработаны и внедрены в учебный процесс методические указания к учебно-исследовательским лабораторным работам по дисциплине «Электротехнологические установки и системы», направленные на изучение температурных процессов индукционного нагрева

посредством компьютерного моделирования, разработанным И.Ю. Долгих методом условной декомпозиции. На основе этого метода проводятся следующие лабораторные работы:

1. «Исследование индукционного нагрева при различных вариантах учёта нелинейных параметров нагреваемого изделия».
2. «Исследование индукционного нагрева при различных вариантах учёта неравномерного распределения тока в нагреваемом изделии».
3. «Исследование процессов нагрева и остывания при индукционном нагреве».

Декан электроэнергетического
факультета, к.т.н., профессор



А.Ф. Сорокин

Заведующий кафедрой ТОЭЭ,
д.т.н., профессор



В.А. Мартынов

Приложение 2. Проверка адекватности работы модели путём сравнения с инженерными методами расчёта

Рассмотрим пример расчёта одностороннего поверхностного нагрева плоской широкой пластины толщиной D , длиной l и шириной a (рис. П.2.1) в соответствии с методикой, изложенной в [73]. При этом считаем, что глубина нагреваемого слоя x_k равна глубине активного слоя ξ , в котором в соответствии с допущениями, принимаемыми в [73], выделяется вся тепловая энергия с равномерной плотностью. Пренебрегая потерями тепла во внешнее пространство, определим время нагрева до заданной температуры на поверхности T_0 , считая, что температура на границе нагреваемого слоя равна T_k .

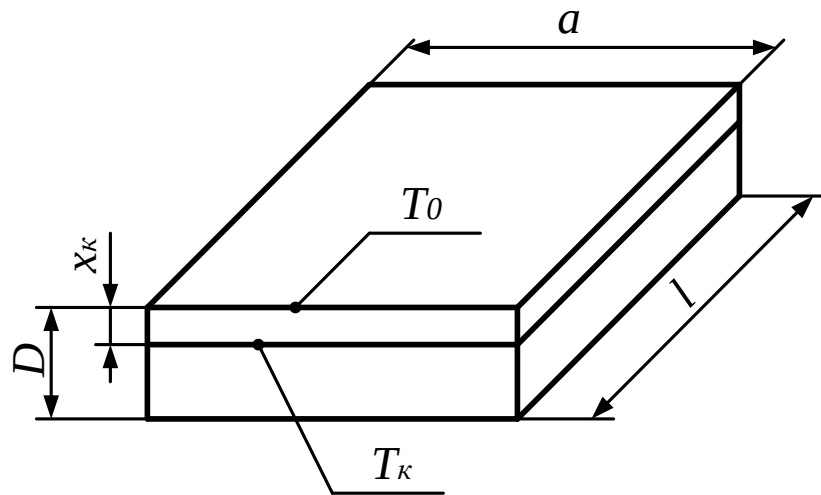


Рис. П.2.1. Эскиз нагреваемого изделия

В качестве исходных данных принимаем:

$$D=0,025 \text{ м}; l=0,1 \text{ м}; a=0,1 \text{ м}; x_k=0,005 \text{ м}; T_0=900 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_k=750 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Тепловой расчёт индукционного нагрева изделия с плоской поверхностью основывается на решении уравнения Фурье с правой частью:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{a}{\lambda} \omega. \quad (\text{П.2.1})$$

Здесь T – температура в заданной точке, $^{\circ}\text{C}$; t – время, с; a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$; ω – мощность источников тепла, $\text{Вт}/\text{м}^3$:

$$\omega = \frac{p_0}{\xi}, \quad (\text{П.2.2})$$

где p_0 – удельная мощность, Вт/м².

В соответствии с [73] для одностороннего нагрева плоского изделия при допущении об отсутствии с его поверхности тепловых потерь, решение уравнения (1) будет иметь вид:

$$T = \frac{p_0 D}{\lambda} (\tau + S(\alpha, \beta, \tau)), \quad (\text{П.2.3})$$

где D – толщина изделия, м; $\tau = at/D^2$ – критерий Фурье; $\alpha = \xi/D$ – относительная глубина активного слоя; $\beta = x/D$ – относительная координата рассматриваемой точки.

При принятых исходных данных имеем:

$$\alpha = \frac{\xi}{D} = \frac{0,005}{0,025} = 0,2,$$

$$\beta_k = \frac{x_k}{D} = \frac{0,005}{0,025} = 0,2.$$

Время нагрева пластины t_k при заданных значениях температуры на поверхности и на границе нагреваемого слоя может быть определено графически. Задаваясь несколькими значениями относительного времени τ (в промежутке от 0,05 до 0,3) при известных значениях относительной глубины закалённого слоя и относительной координаты в соответствии с [73] определяем значения вспомогательных функций $S(\alpha, l, \tau)$ и $S(\alpha, \beta_k, \tau)$. Далее для каждого значения τ в соответствии с выражением

$$\frac{T_0}{T_k} = \frac{\tau + S(\alpha, l, \tau)}{\tau + S(\alpha, \beta_k, \tau)}, \quad (\text{П.2.4})$$

рассчитываются отношения температур на поверхности и на границе нагреваемого слоя, и строится график

$$\frac{T_0}{T_k} = f(t).$$

В точке пересечения полученной кривой с заданным в исходных данных отношением T_0/T_k находится требуемое значение относительного времени нагрева и соответствующее ему время нагрева t_k .

В соответствии с исходными данными определяем требуемое соотношение температур на поверхности и на границе нагреваемого слоя:

$$\frac{T_0}{T_k} = \frac{900}{750} = 1,2$$

Задаёмся $\tau=0,05$. Указанному значению соответствует время нагрева

$$t = \frac{\tau \cdot D_2^2}{a} = \frac{0,05 \cdot 0,025^2}{6,25 \cdot 10^{-6}} = 5 \text{ с},$$

где $a=6,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – рекомендуемое [16, 73] значение температуропроводности стали, соответствующее приблизительно температуре 800 °С.

В соответствии с [73, табл. П-2] с помощью интерполирования определяем

$$S(\alpha, 0, \tau) = S(0, 2; 0; 0, 05) = 0,1187,$$

$$S(\alpha, \beta_k, \tau) = S(0, 2; 0, 2; 0, 05) = 0,0646.$$

Тогда

$$\frac{T_0}{T_k} = \frac{0,05 + 0,1187}{0,05 + 0,0646} = 1,472.$$

Задаёмся $\tau=0,1$. Указанному значению соответствует время нагрева

$$t = \frac{\tau \cdot D_2^2}{a} = \frac{0,1 \cdot 0,025^2}{6,25 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ с}.$$

С помощью интерполирования определяем

$$S(\alpha, 0, \tau) = S(0, 2; 0; 0, 1) = 0,1693,$$

$$S(\alpha, \beta_k, \tau) = S(0, 2; 0, 2; 0, 1) = 0,1028.$$

Тогда

$$\frac{T_0}{T_k} = \frac{0,1 + 0,1693}{0,1 + 0,1028} = 1,328.$$

Задаёмся $\tau=0,15$. Указанному значению соответствует время нагрева

$$t = \frac{\tau \cdot D_2^2}{a} = \frac{0,15 \cdot 0,025^2}{6,25 \cdot 10^{-6}} = 15 \text{ с.}$$

С помощью интерполирования определяем

$$S(\alpha, 0, \tau) = S(0, 2; 0; 0, 15) = 0,1986 ,$$

$$S(\alpha, \beta_{\varepsilon}, \tau) = S(0, 2; 0, 2; 0, 15) = 0,1251 .$$

Тогда

$$\frac{T_0}{T_{\kappa}} = \frac{0,15 + 0,1986}{0,15 + 0,1251} = 1,267 .$$

Задаёмся $\tau=0,2$. Указанному значению соответствует время нагрева

$$t = \frac{\tau \cdot D_2^2}{a} = \frac{0,2 \cdot 0,025^2}{6,25 \cdot 10^{-6}} = 20 \text{ с.}$$

С помощью интерполирования определяем

$$S(\alpha, 0, \tau) = S(0, 2; 0; 0, 2) = 0,2117 ,$$

$$S(\alpha, \beta_{\kappa}, \tau) = S(0, 2; 0, 2; 0, 2) = 0,1371 .$$

Тогда

$$\frac{T_0}{T_{\kappa}} = \frac{0,2 + 0,2117}{0,2 + 0,1371} = 1,221 .$$

Задаёмся $\tau=0,3$. Указанному значению соответствует время нагрева

$$t = \frac{\tau \cdot D_2^2}{a} = \frac{0,3 \cdot 0,025^2}{6,25 \cdot 10^{-6}} = 30 \text{ с.}$$

С помощью интерполирования определяем

$$S(\alpha, 0, \tau) = S(0, 2; 0; 0, 3) = 0,24 ,$$

$$S(\alpha, \beta_{\kappa}, \tau) = S(0, 2; 0, 2; 0, 3) = 0,16 .$$

Тогда

$$\frac{T_0}{T_{\kappa}} = \frac{0,3 + 0,24}{0,3 + 0,16} = 1,174 .$$

Результаты расчёта представлены в таблице П.2.1.

Таблица П.2.1. Результаты расчёта

τ	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3
t	5	10	15	20	30
T_0/T_k	1,472	1,328	1,267	1,221	1,174

График зависимости отношения температур на поверхности и на границе нагреваемого слоя от времени нагрева представлен на рис. П.2.2. Тогда требуемое время нагрева составит $t_k=23,4$ с.

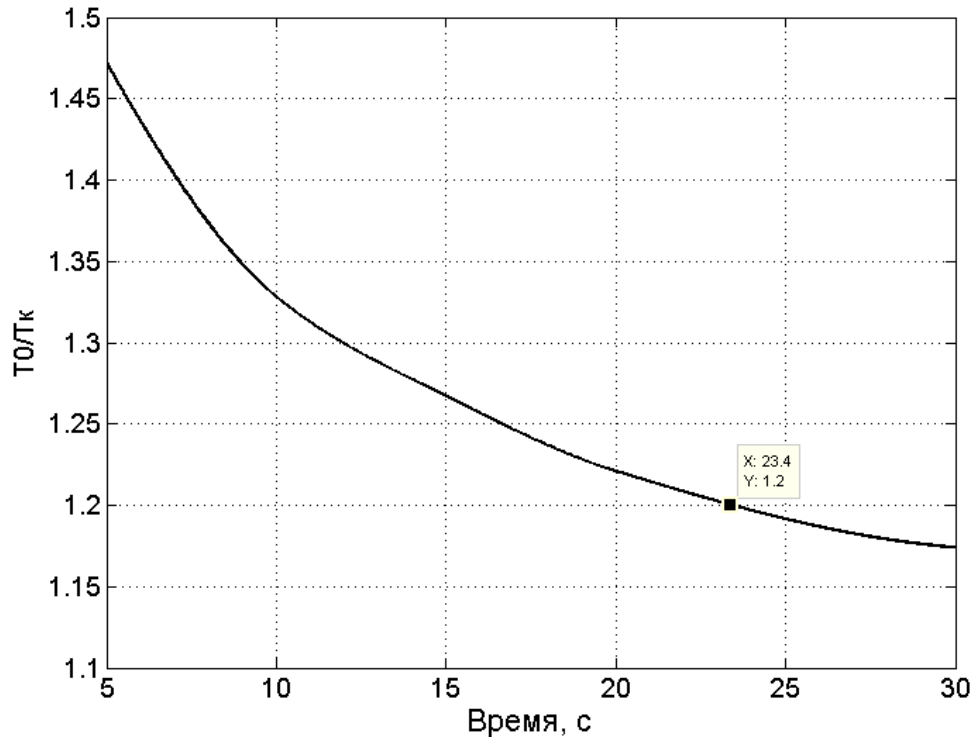


Рис. П.2.2. Определение времени нагрева

По известным времени нагрева и заданной температуре поверхности определяем удельную мощность, необходимую для нагрева подвергаемого закалке слоя цилиндрического изделия:

$$p_0 = \frac{\lambda \cdot T_0}{D \cdot (\tau_k + S(\alpha, 0, \tau_k))}. \quad (\text{П.2.5})$$

В приведённой формуле $\lambda=40,46 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – среднее значение теплопроводности стали марки Ст-40 в интервале температур $0 \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$; τ_k – относительное время нагрева, определяемое как

$$\tau_k = \frac{a \cdot t_k}{D^2} = \frac{6,25 \cdot 10^{-6} \cdot 23,4}{0,025^2} = 0,234$$

Определяем с помощью интерполирования

$$S(\alpha, 0, \tau_k) = S(0, 2; 0; 0, 234) = 0, 2213$$

Тогда удельная мощность будет равна

$$p_0 = \frac{40,46 \cdot 900}{0,025 \cdot (0,234 + 0,2213)} \approx 3,2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$$

Мощность, передаваемая в нагреваемую деталь, равна

$$P_1 = S_1 \cdot p_0 = l \cdot a \cdot p_0 = 0,1 \cdot 0,1 \cdot 3,2 \cdot 10^6 = 32000 \text{ Вт}$$

где S_1 – площадь нагреваемой поверхности, м^2 .

Полученные результаты могут быть использованы для проверки адекватности работы математической модели тепловых расчётов методом послойной декомпозиции. Рассматриваемая двухслойная структура модели, реализованная средствами компьютерной программы Matlab в пакете Simulink, представлена на рис. П.2.3. Входной величиной разработанной модели является мощность, выделяемая в первом слое, толщина которого соответствует глубине нагреваемого слоя x_k , равной глубине активного слоя ξ , в котором выделяется вся тепловая энергия. В соответствии с принятыми выше допущениями, величина греющей мощности остаётся постоянной в процессе нагрева. Первый слой, нагреваясь, отдаёт часть своей тепловой энергии во второй слой, толщиной $D - x_k$, вследствие теплопроводности. Потерями тепла с поверхности пластины в окружающее пространство по условию предыдущего метода пренебрегаем (коэффициент теплоотдачи $\alpha = 0$).

Таким образом, в соответствии с разработанной теорией уравнения расчёта температуры слоёв в динамике для рассматриваемого случая имеют вид:

$$T_1 = \left(P_1 - \frac{\lambda_{21}}{x_k} S_{21} (T_1 - T_2) \right) \frac{1}{m_1 C_1 p}. \quad (\text{П.2.6})$$

$$T_2 = \frac{\lambda_{21}}{x_k} (T_1 - T_2) \cdot \frac{1}{m_2 C_2 p}. \quad (\text{П.2.7})$$

Здесь $\lambda_{21}=40,46 \text{ Вт/(м·К)}$ – среднее значение теплопроводности стали марки Ст-40 в интервале температур $0...800 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $C_1=C_2=674 \text{ Дж/(кг·}^{\circ}\text{C)}$ – значение теплоёмкости стали марки Ст-40, соответствующее приблизительно $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$; m_1, m_2 – массы первого и второго слоёв соответственно, значение которых определяется как произведение плотности материала слоя (для стали $\rho=7850 \text{ кг/м}^3$) на его объём.

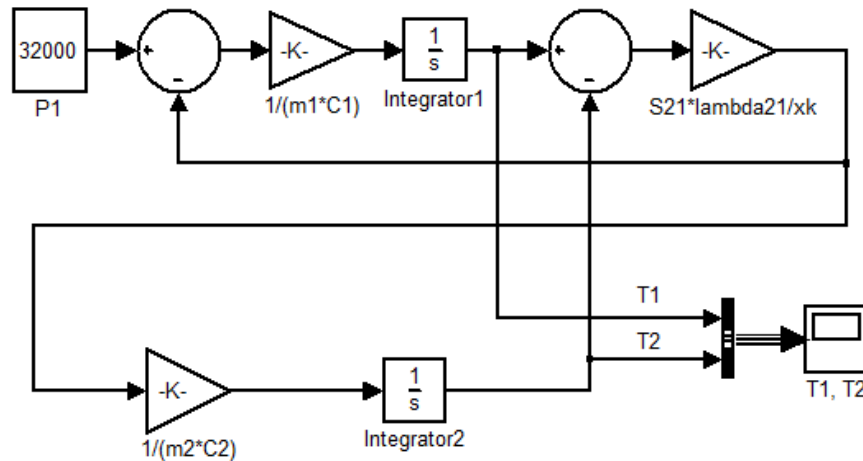


Рис. П.2.3. Структурная схема модели, выполненная в Simulink

Анализ результатов расчёта модели (рис. П.2.4) показывает, что к концу времени нагрева первый слой нагревается до температуры $839 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Учитывая, что получаемое значение является средней температурой в слое, её ожидаемое значение составляет около $825 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, относительная погрешность расчёта составляет менее 2%.

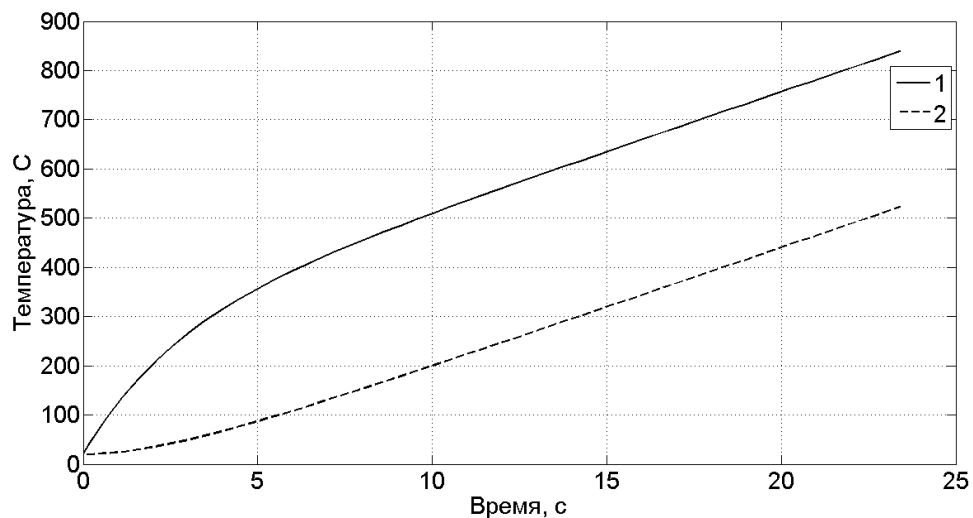


Рис. П.2.4. Результаты расчёта

Приложение 3. Анализ адекватности разработанной тепловой модели путём сравнения результатов расчёта с её помощью и по программе Comsol Multiphysics

Для проверки предлагаемой теории расчёта динамики температурных процессов была разработана модель индукционного нагрева в программе Comsol Multiphysics, основанная на совместном параллельном расчёте электромагнитных и тепловых полей в соответствующих модулях. Геометрия модели (рис. П.3.1) включает в себя индуктор – 1, выполненный в виде плоской шины, нагреваемое изделие – 2 и расчётную область – 3, ограниченную со всех сторон линией окружности – 4. При этом на поверхности изделия, подвергаемой электромагнитному воздействию со стороны индуктора, выделены три слоя, рассчитываемые значения токов в которых используются в качестве входных величин в предлагаемой декомпозиционной модели.

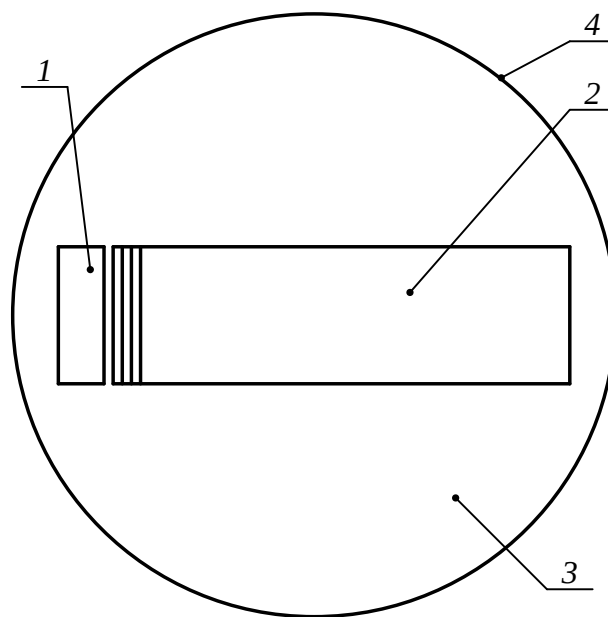


Рис. П.3.1. Геометрия модели

Исходными данными модели являются физические свойства используемых материалов (медный индуктор и стальное нагреваемое изделие), а также окружающего воздуха. При этом в соответствии с принятыми допущениями их величины (таблица П.3.1) равны средним

значениям в интервале применяемых температур и остаются постоянными в процессе нагрева. В качестве граничных условий в электромагнитном модуле принимается равенство нулю векторного магнитного потенциала, а в тепловом – температура окружающего воздуха, равная 20 °С.

Таблица П.3.1. Физические свойства используемых материалов

	Индуктор	Изделие	Расчётная область
Удельное сопротивление, Ом·м	$17,54 \cdot 10^{-9}$	$750 \cdot 10^{-9}$	-
Магнитная проницаемость	1	20	1
Теплоёмкость, Дж/(кг·°С)	340	674	1010
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	384	40,46	0,026
Плотность, кг/м ³	8930	7850	1,293

В качестве входной величины используется стабилизированное значение напряжения в индукторе, что при условии неизменного удельного электрического сопротивления индуктора и изделия соответствует также случаям постоянства в процессе нагрева токов в индукторе и слоях изделия.

Картина распределения температуры в расчётной области представлена на рис. П.3.2. Численные значения рассчитанных параметров, необходимых для подстановки в декомпозиционную модель, а также для сравнения результатов, представлены в таблице П.3.2.

Таблица П.3.2. Результаты расчёта при приложенном к индуктору напряжении $U=90$ В

	Первый слой	Второй слой	Третий слой
Величина тока, А	2740.138519	1811.397958	1230.042531
Активное сопротивление, Ом	~0,013	~0,013	~0,013
Средняя температура в момент окончания нагрева, °С	1306,1	1241,7	1150,8

Полученные результаты сравнивались с разработанной на основе декомпозиции моделью температурных процессов, разделённой на сто слоёв,

с допущением, что токи, являющиеся причиной нагрева, наводятся лишь в трёх поверхностных слоях, что, как было показано, не вносит существенной погрешности в расчёт. При этом активное сопротивление слоя и другие параметры, характеризующие физические свойства нагреваемого изделия были взяты из программы Comsol.

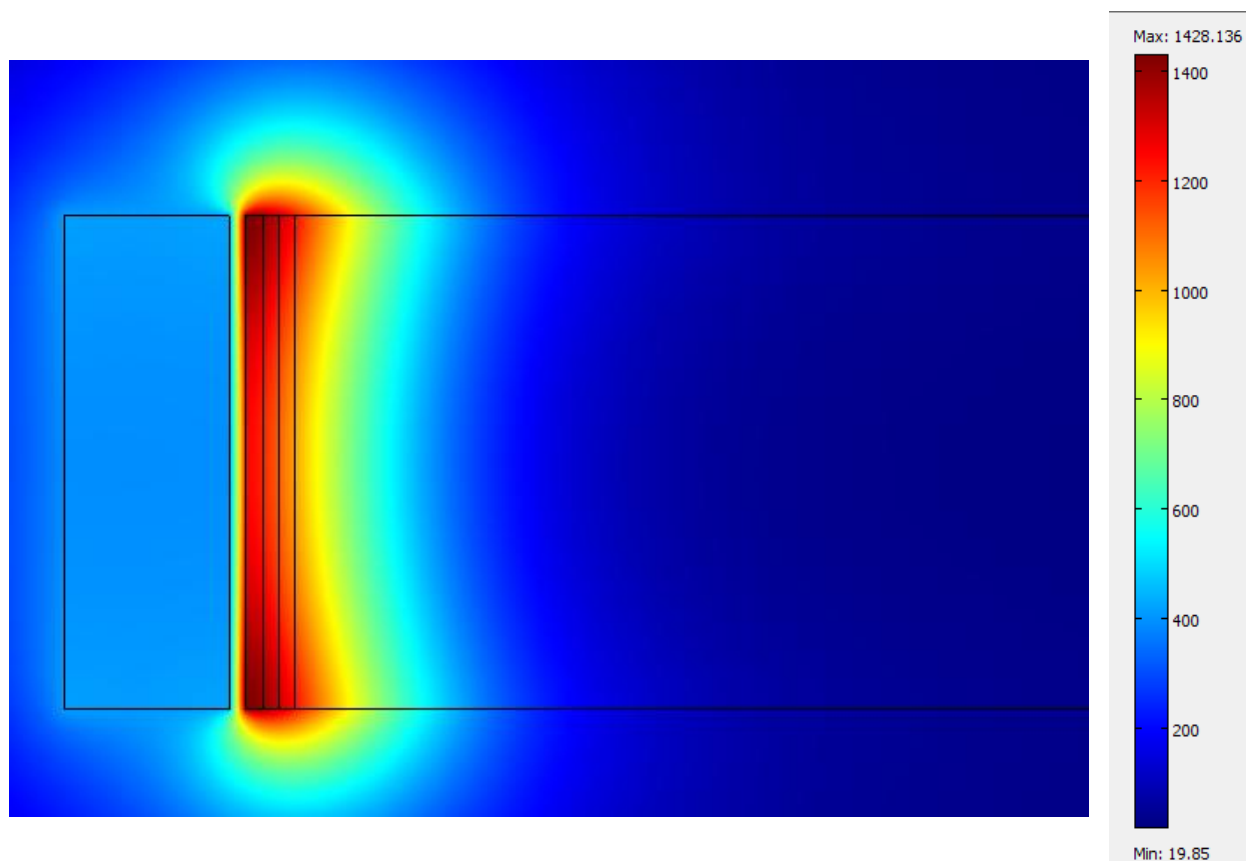


Рис. 2.3.2. Картина распределения температуры в расчётной области

Результаты исследования динамики нагрева поверхностных слоёв изделия, полученные с помощью двух моделей, были представлены ранее на рис. 2.10. Их анализ говорит об аналогичном характере нагрева, рассчитанном обоими методами. При этом расхождение наблюдается в основном на финальной стадии нагрева. Так относительная разность для наиболее важного для сварки поверхностного слоя в конце нагрева находится ниже 8 %. В глубинном, третьем от поверхности слое, она несколько превышает 10 %. Всё это указывает на адекватность разработанной на основе декомпозиции модели тепловых процессов и возможности её использования для их анализа и разработки систем управления.

Приложение 4. Алгоритм работы системы управления по заданной температуре

В начальный момент времени положение переключателя Switch соответствует режиму включения блока Constant1 с постоянным заданным по величине входным сигналом. Преобразованный в объекте управления Subsystem сигнал подаётся на блок Relation Operator, выполняющим сравнение текущего значения сигнала с заданным значением (блок Constant2). Выходным сигналом блока является либо 1, если условие операции сравнения выполняется, либо 0, если условие не выполняется. Блок умножения Product совместно с блоком Constant3 предназначен для автоматического перевода сигнала логического типа (boolean) в числовой массив удвоенной точности (double). Преобразованный числовой сигнал подаётся на блок интегрирования Integrator с начальным значением равным 1 и сравнивается с пороговым значением управляющего сигнала блока Switch, значение которого также принимается равным 1.

Таким образом, при температуре поверхностного слоя меньше заданного значения на выходе блока сравнения Relation Operator будет 0, а значит блок интегрирования будет выдавать сигнал соответствующий своему начальному значению, то есть 1. В этом случае положение переключателя Switch будет соответствовать начальному. При достижении или превышении температурой поверхностного слоя заданного значения на выходе блока сравнения будет 1 и выходной сигнал блока интегрирования превысит своё начальное значение, вследствие чего переключатель Switch переключится в положение, соответствующее включению блока Constant с нулевым значением, что соответствует режиму отключения тока в индукторе.

Приложение 5. Методика определения параметров модели для расчёта электромагнитных процессов в индукторе и нагреваемом изделии

Геометрия математической модели индукционного нагрева плоской поверхности, представленная на рис. П.5.1, включает в себя индуктор – 1, выполненный в виде плоской шины, нагреваемое изделие – 2 и границу расчётной области – 3, задаваемую линией окружности. В каждой части изделия выделено четыре слоя, различной толщины, кратной глубине проникновения тока. С целью обоснования принимаемых допущений расчёт проводился при постоянной частоте первичного тока в индукторе $f=2000 \text{ Гц}$ и при различном виде учёта магнитной проницаемости в слоях. При этом в соответствии с принимаемыми допущениями будем считать, что наиболее значимый для нагрева ток сконцентрирован в пределах трёх поверхностных слоёв каждой из двух частей изделия, суммарная толщина которых соответствует трём глубинам проникновения.

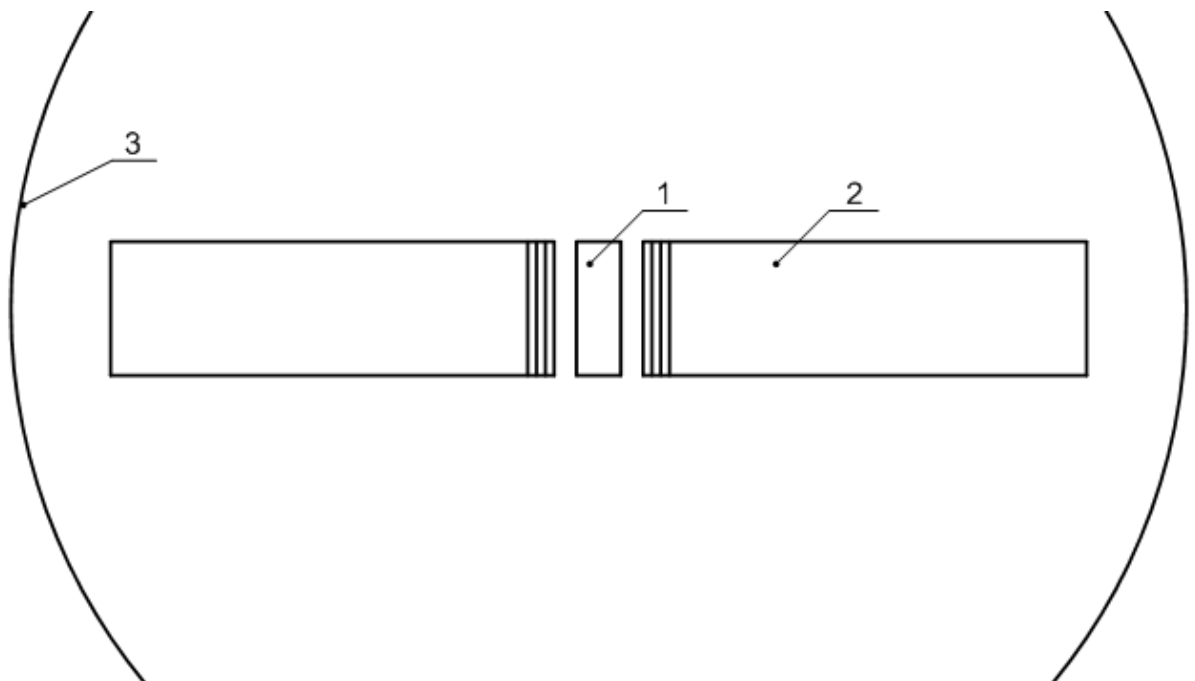


Рис. П.5.1. Геометрия модели для определения параметров системы индуктор-изделие

При расчёте приняты следующие геометрические размеры моделируемых объектов:

- высота слоя изделия и индуктора $h=0,03$ м;
- длина слоя изделия и индуктора $l=1$ м;
- ширина слоя изделия $\Delta_{изд}=0,001$ м;
- ширина индуктора $\Delta_{инд}=0,01$ м.

Помимо представленной геометрии с указанием заданных физических свойств объектов, представленная модель включает в себя функциональную схему замещения (рис. П.5.2) индуктора и нагреваемого изделия.

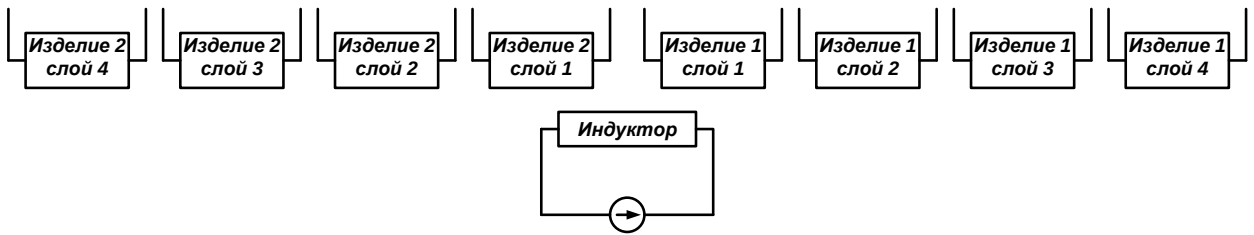


Рис. П.5.2. Функциональная схема замещения индуктора и нагреваемого изделия

Исходными данными модели являются физические свойства материалов индуктора (удельное электрическое сопротивление меди $\rho_m=2 \cdot 10^8$ Ом·м) и изделия (магнитная проницаемость μ и удельное электрическое сопротивление стали $\rho_{ст}=160 \cdot 10^{-9}$ Ом·м), а также напряжение на индукторе и его ток.

Параметры математической модели трансформатора определяются путём поочерёдного включения в индуктор и нагреваемые слои изделия источника тока при различных вариантах задания свойств остальных объектов. Так, например, сопротивления взаимной индуктивности между индуктором и слоями определяется при включённом в нём источнике тока и заданной магнитной проницаемости в слоях изделия. Кроме того, задаётся величина проводимости того слоя, взаимную индуктивность с которым требуется определить. В этом случае интересующим результатом расчёта модели является значение ЭДС, возникающей в слое. Тогда сопротивление взаимной индуктивности X_{uk} определится из выражения:

$$E_1 = j\omega M_{uk} I_u = X_{uk} I_u. \quad (\text{П.5.1})$$

Аналогичным образом определяются сопротивления взаимной индуктивности слоёв между собой.

При определении собственных активного и реактивного сопротивлений слоёв проводится два опыта. В первом случае слою задаётся ток при проводимости других слоёв $\gamma = 0$ и при их магнитной проницаемости $\mu = 1$. При этом получаем активное сопротивление слоя. Дополняя модель соответствующими значениями магнитной проницаемости соседних слоёв $\mu \neq 1$, получаем внешнее индуктивное сопротивление слоя. Задавая магнитную проницаемость рассматриваемого слоя $\mu \neq 1$, имеем его полное индуктивное сопротивление, с помощью которого можно найти внутреннее сопротивление (П.5.2), и которое в модели изменяется при нагреве выше точки Кюри.

$$X_{\text{внутр}} = X_{\text{сум}} - X_{\text{нар}} . \quad (\text{П.5.2})$$

Для определения параметров модели с учётом кривой намагничивания необходимо провести прикидочный расчёт токов в слоях при постоянном для всех слоёв значении магнитной проницаемости $\mu \neq 1$. Далее по кривой намагничивания материала изделия $B(H)$ на основе выражений (П.5.3), (П.5.4) строят график зависимости дифференциальной магнитной проницаемости от величины тока слоя и определяют её значение для каждого слоя.

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} , \quad (\text{П.5.3})$$

$$H l_n = I . \quad (\text{П.5.4})$$

Здесь μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; B – магнитная индукция, Тл; H – напряжённость магнитного поля, А/м; I – ток в слое, А; $l_n = 2(h + \Delta)$ – периметр слоя.

На рис. П.5.3 представлены зависимости индукции и магнитной проницаемости от величины протекающего по слою тока для стали Ст-40.

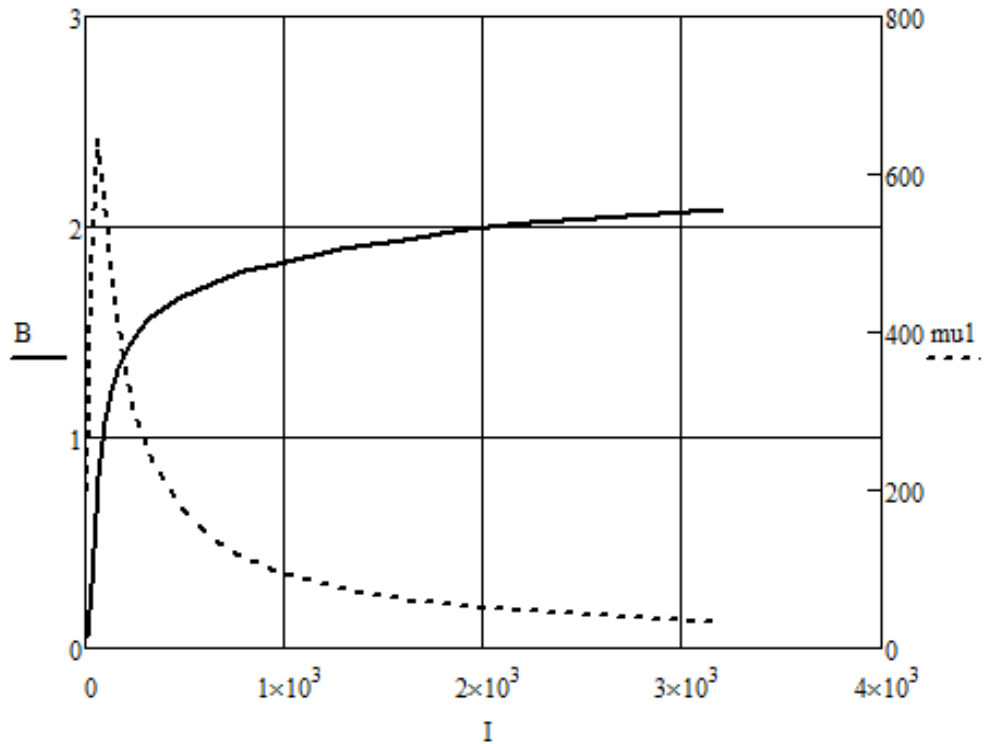


Рис. П.5.3. Зависимость индукции и магнитной проницаемости от величины протекающего по слою тока

При полученных значениях магнитной проницаемости определяют параметры модели аналогично предыдущим этапам.

Результаты расчёта параметров модели для различных случаев учёта магнитной проницаемости представлены в табл. П.5.1-П.5.2.

Таблица П.5.1. Параметры модели и токи слоёв изделия при постоянной для них магнитной проницаемости

Исходные данные опыта		Индуктор	Изделие 1 слой	Изделие 2 слой	Изделие 3 слой	Изделие 4 слой	Изделие 1' слой	Изделие 2' слой	Изделие 3' слой	Изделие 4' слой
$l=1\text{ м};$ $h=0,03\text{ м};$ $\Delta=0,001\text{ м};$ $f=2000\text{ Гц};$ $\delta=5\text{ мм};$ $\mu_1=20;$ $\mu_2=20;$ $\mu_3=20;$ $\mu_4=20;$ $\gamma=6,25\cdot 10^6\text{ См/м}$ <u>Два изделия</u>	$R, \text{ Ом}$	0,0002231	0,005373	0,005373	0,005373	0,0002175	0,005373	0,005373	0,005373	0,0002166
	$X_{\text{сум}}, \text{ Ом}$	0,010403	0,015494	0,021298	0,025243	0,005136	0,015489	0,021295	0,02524	0,005132
	$X_{\text{нар}}, \text{ Ом}$	-	0,013228	0,017616	0,020001	0,005076	0,013226	0,01761	0,019999	0,005072
	$X_{\text{внутр}}, \text{ Ом}$	-	0,002266	0,003682	0,005242	0,00006	0,002263	0,003685	0,005241	0,00006
	Сопротивления взаимной индуктивности, $\cdot 10^{-3}$									
	Индуктор	-	9,659	9,2089	8,802	3,4475	9,6591	9,2097	8,8025	3,4449
	Изделие 1 слой	9,659	-	15,46	14,085	3,8862	9,1027	8,6729	8,2895	3,2757
	Изделие 2 слой	9,2089	15,46	-	19,855	4,2775	8,6724	8,2792	7,9278	3,198
	Изделие 3 слой	8,802	14,085	19,855	-	4,6911	8,2895	7,9282	7,6048	3,1268
	Изделие 4 слой	3,4475	3,8862	4,2775	4,6911	-	3,2783	3,2006	3,1293	1,6332
	Изделие 1' слой	9,6591	9,1027	8,6724	8,2895	3,2783	-	15,46	14,084	3,8828
	Изделие 2' слой	9,2097	8,6729	8,2792	7,9282	3,2006	15,46	-	19,854	4,2735
	Изделие 3' слой	8,8025	8,2895	7,9278	7,6048	3,1293	14,084	19,854	-	4,6866
	Изделие 4' слой	3,4449	3,2757	3,198	3,1268	1,6332	3,8828	4,2735	4,6866	-
	Рассчитанные значения токов в программе Elcut					Рассчитанные значения токов в программе Matlab				
	$I_u=1000\text{ А}$ и $U_u=3,4374\text{ В}$ $I_1=291,73\text{ А}; I_2=117,78\text{ А}; I_3=52,146\text{ А};$					$I_u=1000\text{ А}$ и $U_u=3,7044\text{ В}$ $I_1=271,1687\text{ А}; I_2=121,0765\text{ А}; I_3=58,3729\text{ А};$				

Таблица П.5.2. Параметры модели и токи слоёв изделия при учёте кривой намагничивания

Исходные данные опыта		Индуктор	Изделие 1 слой	Изделие 2 слой	Изделие 3 слой	Изделие 4 слой	Изделие 1' слой	Изделие 2' слой	Изделие 3' слой	Изделие 4' слой
$l=1\text{ м};$ $h=0,03\text{ м};$ $\Delta=0,001\text{ м};$ $f=2000\text{ Гц};$ $\delta=5\text{ мм};$ $\mu_1=20;$ $\mu_2=86;$ $\mu_3=167;$ $\mu_4=198,9;$ $\gamma=6,25\cdot 10^6\text{ См/м}$ <u>Два изделия</u>	R, Ом	0,0002231	0,005373	0,005373	0,005373	0,0002175	0,005373	0,005373	0,005373	0,0002166
	$X_{\text{сум}}, \text{ Ом}$	0,010672	0,016798	0,030582	0,060863	0,005218	0,016792	0,030532	0,06082	0,005213
	$X_{\text{нар}}, \text{ Ом}$	-	0,01379	0,018914	0,026826	0,005122	0,013789	0,018906	0,02682	0,005118
	$X_{\text{внутр}}, \text{ Ом}$	-	0,003008	0,011668	0,034037	0,000096	0,003003	0,011626	0,034	0,000095
	Сопротивления взаимной индуктивности, $\cdot 10^{-3}$									
	Индуктор	-	10,113	9,8564	9,4205	3,19	10,113	9,8568	9,4201	3,1877
	Изделие 1 слой	10,113	-	17,348	15,744	3,3976	9,818	9,5647	9,1297	3,0839
	Изделие 2 слой	9,8564	17,348	-	30,713	3,6597	9,5639	9,322	8,9079	3,0507
	Изделие 3 слой	9,4205	15,744	30,713	-	4,5613	9,1304	8,9092	8,5282	2,9929
	Изделие 4 слой	3,19	3,3976	3,6597	4,5613	-	3,0863	3,0532	2,9952	1,4757
	Изделие 1' слой	10,113	9,818	9,5639	9,1304	3,0863	-	17,346	15,742	3,3948
	Изделие 2' слой	9,8568	9,5647	9,322	8,9092	3,0532	17,346	-	30,709	3,6558
	Изделие 3' слой	9,4201	9,1297	8,9079	8,5282	2,9952	15,742	30,709	-	4,5567
	Изделие 4' слой	3,1877	3,0839	3,0507	2,9929	1,4757	3,3948	3,6558	4,5567	-
	Рассчитанные значения токов в программе Elcut					Рассчитанные значения токов в программе Matlab				
	$I_u=1000\text{ А}$ и $U_u=3,5132\text{ В}$ $I_1=328,38\text{ А}; I_2=96,597\text{ А}; I_3=2,138\text{ А};$					$I_u=1000\text{ А}$ и $U_u=3,9045\text{ В}$ $I_1=316,128\text{ А}; I_2=111,3497\text{ А}; I_3=10,2363\text{ А};$				

Таблица П.5.3. Параметры модели и токи слоёв изделия при $\mu_1 = 1$

Исходные данные опыта		Индуктор	Изделие 1 слой	Изделие 2 слой	Изделие 3 слой	Изделие 4 слой	Изделие 1' слой	Изделие 2' слой	Изделие 3' слой	Изделие 4' слой
$l=1$ м; $h=0,03$ м; $\Delta=0,001$ м; $f=2000$ Гц; $\delta=5$ мм; $\mu_1=1$; $\mu_2=86$; $\mu_3=167$; $\mu_4=198,9$; $\gamma=6,25 \cdot 10^6$ См/м <u>Два изделия</u>	R, Ом	0,0002231	0,005373	0,005373	0,005373	0,0002175	0,005373	0,005373	0,005373	0,0002166
	$X_{сум}$, Ом	0,010512	0,013703	0,022678	0,055521	0,005214	0,013701	0,022625	0,055482	0,005209
	$X_{нар}$, Ом	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$X_{внутр}$, Ом	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Сопротивления взаимной индуктивности, $\cdot 10^{-3}$									
	Индуктор	-	9,9614	9,786	9,3718	3,1973	9,9611	9,7852	9,3713	3,195
	Изделие 1 слой	9,9614	-	13,274	12,433	3,3627	9,6062	9,4194	9,0126	3,087
	Изделие 2 слой	9,786	13,274	-	24,877	3,5715	9,4195	9,2379	8,8472	3,0619
	Изделие 3 слой	9,3718	12,433	24,877	-	4,5058	9,0131	8,8476	8,4868	3,0054
	Изделие 4 слой	3,1973	3,3627	3,5715	4,5058	-	3,089	3,0643	3,0076	1,481
	Изделие 1' слой	9,9611	9,6062	9,4195	9,0131	3,0893	-	13,271	12,43	3,3601
	Изделие 2' слой	9,7852	9,4194	9,2379	8,8476	3,0643	13,271	-	24,862	3,5678
	Изделие 3' слой	9,3713	9,0126	8,8472	8,4868	3,0076	12,43	24,862	-	4,5013
	Изделие 4' слой	3,195	3,087	3,0619	3,0054	1,481	3,3601	3,5678	4,5013	-
	Рассчитанные значения токов в программе Elcut					Рассчитанные значения токов в программе Matlab				
	$I_u=1000$ А и $U_u=2,5881$ В $I_1=334,27$ А; $I_2=126,38$ А; $I_3=11,714$ А;					$I_u=1000$ А и $U_u=3,0041$ В $I_1=313,0631$ А; $I_2=143,4431$ А; $I_3=24,1885$ А;				

Приложение 6. Расчёт вносимых сопротивлений слоёв в электрическую цепь индуктора

Из системы уравнений (3.7) для трёхслойного изделия из четвертого уравнения выразим ток I_3 и подставим полученное выражение в два предыдущих:

$$\dot{I}_3 = \frac{\underline{Z}_{m3u}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_u - \frac{\underline{Z}_{m3l}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_l - \frac{\underline{Z}_{m32}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_2, \quad (4')$$

$$0 = -\underline{Z}_{m1u} \dot{I}_u + \underline{Z}_l \dot{I}_l + \underline{Z}_{m12} \dot{I}_2 + \frac{\underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m3u}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_u - \frac{\underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m3l}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_l - \frac{\underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m32}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_2, \quad (2')$$

$$0 = -\underline{Z}_{m2u} \dot{I}_u + \underline{Z}_{m2l} \dot{I}_l + \underline{Z}_2 \dot{I}_2 + \frac{\underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m3u}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_u - \frac{\underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m3l}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_l - \frac{\underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m32}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_2, \quad (3')$$

Преобразованные уравнения (2') и (3') имеют вид:

$$(\underline{Z}_{m1u} \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m3u}) \dot{I}_u = (\underline{Z}_l \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m3l}) \dot{I}_l + (\underline{Z}_{m12} \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m32}) \dot{I}_2, \quad (2'')$$

$$(\underline{Z}_{m2u} \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m3u}) \dot{I}_u = (\underline{Z}_{m2l} \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m3l}) \dot{I}_l + (\underline{Z}_2 \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m32}) \dot{I}_2. \quad (3'')$$

В уравнениях (2'') и (3'') сделаем замену:

$$\begin{aligned} a &= \underline{Z}_{m1u} \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m3u} = jX_{m1u} \cdot (R_3 + jX_3) - jX_{m13} \cdot jX_{m3u} = \\ &= (X_{m13} X_{m3u} - X_{m1u} X_3) + jX_{m1u} R_3 = A_1 + jA_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b &= \underline{Z}_l \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m3l} = (R_l + jX_l)(R_3 + jX_3) - jX_{m13} \cdot jX_{m3l} = \\ &= (R_l R_3 - X_l X_3 + X_{m13} X_{m3l}) + j(X_3 R_l + X_l R_3) = B_1 + jB_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= \underline{Z}_{m12} \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m13} \underline{Z}_{m32} = jX_{m12} \cdot (R_3 + jX_3) - jX_{m13} \cdot jX_{m32} = \\ &= (X_{m13} X_{m32} - X_{m12} X_3) + jX_{m12} R_3 = C_1 + jC_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d &= \underline{Z}_{m2u} \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m3u} = jX_{m2u} \cdot (R_3 + jX_3) - jX_{m23} \cdot jX_{m3u} = \\ &= (X_{m23} X_{m3u} - X_{m2u} X_3) + jX_{m2u} R_3 = D_1 + jD_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e &= \underline{Z}_{m2l} \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m3l} = jX_{m2l} \cdot (R_3 + jX_3) - jX_{m23} \cdot jX_{m3l} = \\ &= (X_{m23} X_{m3l} - X_{m2l} X_3) + jX_{m2l} R_3 = E_1 + jE_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f &= \underline{Z}_2 \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{m23} \underline{Z}_{m32} = (R_2 + jX_2)(R_3 + jX_3) - jX_{m23} \cdot jX_{m32} = \\ &= (R_2 R_3 - X_2 X_3 + X_{m23} X_{m32}) + j(X_3 R_2 + X_2 R_3) = F_1 + jF_2. \end{aligned}$$

Решая систему уравнений (2''), (3'') находим ток I_1 :

$$\dot{I}_1 = \frac{af - dc}{bf - ec} \dot{I}_u.$$

В полученном выражении выделим действительную и мнимую части:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{af - dc}{bf - ec} \dot{I}_u = \frac{(A_1 + jA_2)(F_1 + jF_2) - (D_1 + jD_2)(C_1 + jC_2)}{(B_1 + jB_2)(F_1 + jF_2) - (E_1 + jE_2)(C_1 + jC_2)} \dot{I}_u = \\ &= \frac{(A_1F_1 - A_2F_2 - D_1C_1 + D_2C_2) + j(F_2A_1 + A_2F_1 - C_2D_1 - D_2C_1)}{(B_1F_1 - B_2F_2 - E_1C_1 + E_2C_2) + j(F_2B_1 + B_2F_1 - C_2E_1 - E_2C_1)} \dot{I}_u = \\ &= \frac{G_1 + jG_2}{G_3 + jG_4} \dot{I}_u = \left(\frac{G_1G_3 + G_2G_4}{G_3^2 + G_4^2} + j \frac{G_2G_3 - G_4G_1}{G_3^2 + G_4^2} \right) \dot{I}_u, \end{aligned}$$

где $G_1 = A_1F_1 - A_2F_2 - D_1C_1 + D_2C_2$,

$G_2 = F_2A_1 + A_2F_1 - C_2D_1 - D_2C_1$,

$G_3 = B_1F_1 - B_2F_2 - E_1C_1 + E_2C_2$,

$G_4 = F_2B_1 + B_2F_1 - C_2E_1 - E_2C_1$.

Таким образом, ток в первом слое определится из выражения:

$$\dot{I}_1 = (K_{1u Re} + jK_{1u Im}) \dot{I}_u = \sqrt{K_{1u Re}^2 + K_{1u Im}^2} e^{j \arctg \frac{K_{1u Im}}{K_{1u Re}}} \cdot \dot{I}_u,$$

где $K_{1u Re} = \frac{G_1G_3 + G_2G_4}{G_3^2 + G_4^2}$,

$$K_{1u Im} = \frac{G_2G_3 - G_4G_1}{G_3^2 + G_4^2}.$$

Аналогичным образом определяем ток I_2 :

$$\dot{I}_2 = \frac{db - ae}{bf - ec} \dot{I}_u.$$

Выделяем действительную и мнимую части:

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{db - ae}{bf - ec} \dot{I}_u = \frac{(D_1 + jD_2)(B_1 + jB_2) - (A_1 + jA_2)(E_1 + jE_2)}{(B_1 + jB_2)(F_1 + jF_2) - (E_1 + jE_2)(C_1 + jC_2)} \dot{I}_u = \\ &= \frac{(D_1B_1 - D_2B_2 - A_1E_1 + A_2E_2) + j(B_2D_1 + D_2B_1 - E_2A_1 - A_2E_1)}{(B_1F_1 - B_2F_2 - E_1C_1 + E_2C_2) + j(F_2B_1 + B_2F_1 - C_2E_1 - E_2C_1)} \dot{I}_u = \end{aligned}$$

$$= \frac{H_1 + jH_2}{H_3 + jH_4} \dot{I}_u = \left(\frac{H_1 H_3 + H_2 H_4}{H_3^2 + H_4^2} + j \frac{H_2 H_3 - H_4 H_1}{H_3^2 + H_4^2} \right) \dot{I}_u,$$

где $H_1 = D_1 B_1 - D_2 B_2 - A_1 E_1 + A_2 E_2$,

$$H_2 = B_2 D_1 + D_2 B_1 - E_2 A_1 - A_2 E_1,$$

$$H_3 = G_3 = B_1 F_1 - B_2 F_2 - E_1 C_1 + E_2 C_2,$$

$$H_4 = G_4 = F_2 B_1 + B_2 F_1 - C_2 E_1 - E_2 C_1.$$

Таким образом, ток во втором слое определится из выражения:

$$\dot{I}_2 = (K_{2u Re} + jK_{2u Im}) \dot{I}_u = \sqrt{K_{2u Re}^2 + K_{2u Im}^2} e^{j \arctg \frac{K_{2u Im}}{K_{2u Re}}} \cdot \dot{I}_u,$$

$$\text{где } K_{2u Re} = \frac{H_1 H_3 + H_2 H_4}{H_3^2 + H_4^2},$$

$$K_{2u Im} = \frac{H_2 H_3 - H_4 H_1}{H_3^2 + H_4^2}.$$

При определении тока в третьем слое введём замену:

$$k = \frac{\underline{Z}_{M3u}}{\underline{Z}_3} = \frac{jX_{M3u}}{R_3 + jX_3} = \frac{X_{M3u} X_3}{R_3^2 + X_3^2} + j \frac{X_{M3u} R_3}{R_3^2 + X_3^2} = K_1 + jK_2,$$

$$l = \frac{\underline{Z}_{M3l}}{\underline{Z}_3} = \frac{jX_{M3l}}{R_3 + jX_3} = \frac{X_{M3l} X_3}{R_3^2 + X_3^2} + j \frac{X_{M3l} R_3}{R_3^2 + X_3^2} = L_1 + jL_2,$$

$$m = \frac{\underline{Z}_{M32}}{\underline{Z}_3} = \frac{jX_{M32}}{R_3 + jX_3} = \frac{X_{M32} X_3}{R_3^2 + X_3^2} + j \frac{X_{M32} R_3}{R_3^2 + X_3^2} = M_1 + jM_2.$$

Из уравнения (4') определяем ток I_3 :

$$\begin{aligned} \dot{I}_3 &= \frac{\underline{Z}_{M3u}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_u - \frac{\underline{Z}_{M3l}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_l - \frac{\underline{Z}_{M32}}{\underline{Z}_3} \dot{I}_2 = \\ &= (K_1 + jK_2) \dot{I}_u - (L_1 + jL_2) (K_{lu Re} + jK_{lu Im}) \dot{I}_u - (M_1 + jM_2) (K_{2u Re} + jK_{2u Im}) \dot{I}_u = \\ &= (K_1 - L_1 K_{lu Re} + L_2 K_{lu Im} - M_1 K_{2u Re} + M_2 K_{2u Im}) \dot{I}_u + \\ &+ j(K_2 - L_1 K_{lu Im} - L_2 K_{lu Re} - M_1 K_{2u Im} - M_2 K_{2u Re}) \dot{I}_u = (K_{3u Re} + jK_{3u Im}) \dot{I}_u. \end{aligned}$$

Таким образом, ток в третьем слое определится из выражения:

$$\dot{I}_3 = \sqrt{K_{3u Re}^2 + K_{3u Im}^2} e^{j \arctg \frac{K_{3u Im}}{K_{3u Re}}} \cdot \dot{I}_u.$$

Из первого уравнения системы (3.7) определяем ток в индукторе при заданном напряжении:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \underline{Z}_u \dot{I}_u - \underline{Z}_{mu1} \dot{I}_1 - \underline{Z}_{mu2} \dot{I}_2 - \underline{Z}_{mu3} \dot{I}_3 = \\ &= (R_u + jX_u) \dot{I}_u - jX_{mu1} (K_{1u Re} + jK_{1u Im}) \dot{I}_u - jX_{mu2} (K_{2u Re} + jK_{2u Im}) \dot{I}_u - \\ &- jX_{mu3} (K_{3u Re} + jK_{3u Im}) \dot{I}_u = (R_u + X_{mu1} K_{1u Im} + X_{mu2} K_{2u Im} + X_{mu3} K_{3u Im}) \dot{I}_u + \\ &+ j(X_u - X_{mu1} K_{1u Re} - X_{mu2} K_{2u Re} - X_{mu3} K_{3u Re}) \dot{I}_u = (R_{сум} + jX_{сум}) \dot{I}_u\end{aligned}$$

Таким образом, при стабилизации входного напряжения ток в индукторе определится из выражения:

$$\dot{I}_u = \frac{\dot{U}}{\sqrt{R_{сум}^2 + X_{сум}^2} e^{j \arctg \frac{X_{сум}}{R_{сум}}}}.$$

На основе выведенных выражений строится структурная схема (рис. 3.8) для определения тока в индукторе и слоях нагреваемого изделия при заданных параметрах, характеризующих электромагнитные процессы, происходящие в системе индуктор-изделие, и условии постоянства входного напряжения.

Приложение 7. Экспериментальное определение характеристик нагреваемых изделий

П.7.1. Методика расчёта

На рисунке П.7.1 представлена структурная схема экспериментальной установки.

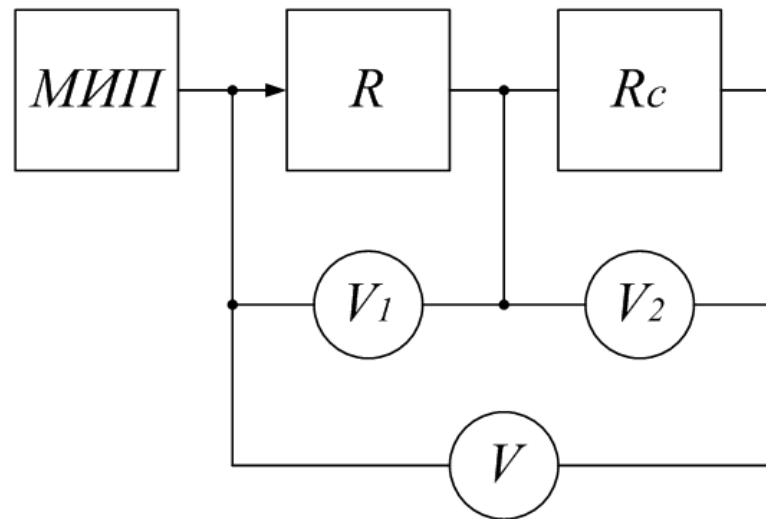


Рис. П.7.1. Структурная схема экспериментальной установки: МИП – многофункциональный источник питания; R – резистор; R_c – стальной ферромагнитный образец; V , V_1 , V_2 – вольтметры

На основе измеренных вольтметрами V , V_1 и V_2 полного напряжения, напряжения на резисторе и напряжения на исследуемом ферромагнитном образце, представляющего из себя круглый проводник, выполнен расчёт активного и индуктивного сопротивления, глубины проникновения тока и индуктивности по нижеприведённой методике.

При пропускании в электрической цепи постоянного тока определяется удельное сопротивление исследуемого ферромагнитного образца при заданной температуре:

$$\rho = \frac{R_c \cdot S}{l}, \quad (\text{П.7.1})$$

где R_c – сопротивление ферромагнитного образца, определяемое по закону Ома, S – площадь поперечного сечения ферромагнитного образца, м^2 , l – длина ферромагнитного образца, м .

На основе измеренного напряжения U_1 при известном сопротивлении R определяем величину переменного тока:

$$I_{\approx} = \frac{U_1}{R}. \quad (\text{П.7.2})$$

В соответствии с векторной диаграммой (рис. П.7.2) определяются активное и индуктивное сопротивление исследуемого ферромагнитного образца:

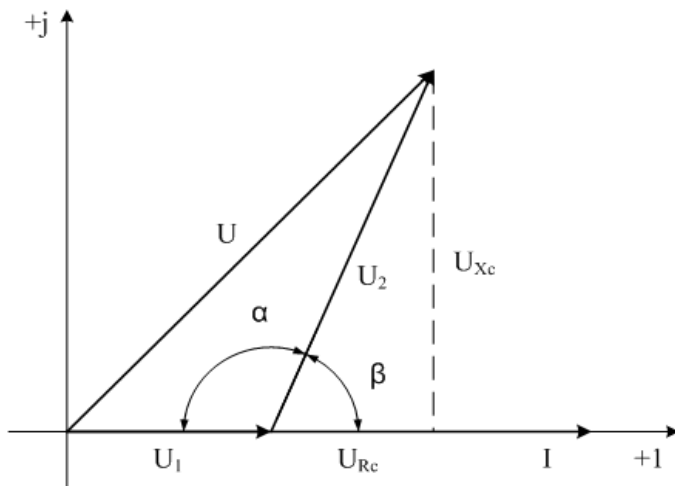


Рис. П.7.2. Векторная диаграмма

$$\alpha = \arccos\left(\frac{U_1^2 + U_2^2 - U^2}{2 \cdot U_1 \cdot U_2}\right),$$

$$\beta = 180^\circ - \alpha,$$

$$U_{Rc} = U_2 \cdot \cos \beta,$$

$$U_{Xc} = U_2 \cdot \sin \beta,$$

$$R_c = \frac{U_{Rc}}{I_{\approx}}, \quad X_c = \frac{U_{Xc}}{I_{\approx}}.$$

Формула для определения активного сопротивления ферромагнитного образца:

$$R_C = \frac{U_2 \cdot R \cdot \cos\left(180 - \arccos\left(\frac{U_1^2 + U_2^2 - U^2}{2 \cdot U_1 \cdot U_2}\right)\right)}{U_1} \quad (\text{П.7.3})$$

Определяем площадь поперечного сечения ферромагнитного образца, пропускающую переменный ток:

$$S_{\approx} = \rho \cdot \frac{l}{R_c}. \quad (\text{П.7.4})$$

Тогда глубина проникновения тока определится из выражения:

$$\Delta = r - \sqrt{r^2 - \frac{S_{\approx}}{\pi}}, \quad (\text{П.7.5})$$

где r – радиус ферромагнитного образца.

Формула для определения индуктивного сопротивления ферромагнитного образца:

$$X_C = \frac{U_2 \cdot R \cdot \sin\left(180 - \arccos\left(\frac{U_1^2 + U_2^2 - U^2}{2 \cdot U_1 \cdot U_2}\right)\right)}{U_1} . \quad (\text{П.7.6})$$

Определяем индуктивность ферромагнитного образца:

$$L_C = \frac{X_C}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$L_C = \frac{U_2 \cdot R \cdot \sin\left(180 - \arccos\left(\frac{U_1^2 + U_2^2 - U^2}{2 \cdot U_1 \cdot U_2}\right)\right)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_1} \quad (\text{П.7.7})$$

П.7.2. Исследование характеристик ферромагнитных материалов при постоянной температуре и различных частотах питающего тока

В исследуемой электрической цепи используется стальной проводник R_C диаметром $d = 1,5$ мм и длиной $l = 5$ м, соединённый последовательно с резистором R . Многофункциональный источник питания МИП обеспечивает подачу в исследуемую электрическую цепь постоянного и переменного тока в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц.

Питание электрической цепи постоянным током позволило определить сопротивление резистора R и стального образца R_C , а также его удельное сопротивление $\rho = 3,1503 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. При подаче в электрическую цепь переменного тока сопротивление стальной проволоки определялось по формуле (П.7.3), которое позволяет рассчитать глубину проникновения тока Δ (П.7.5). Для расчета индуктивного сопротивления проводника и его индуктивности были получены формулы (П.7.6) и (П.7.7).

Зависимость активного сопротивления проводника представлена на рис. П.7.3. Зависимости индуктивного сопротивления проводника, глубины проникновения тока и индуктивности от частоты были представлены ранее рис. 5.5-5.7.

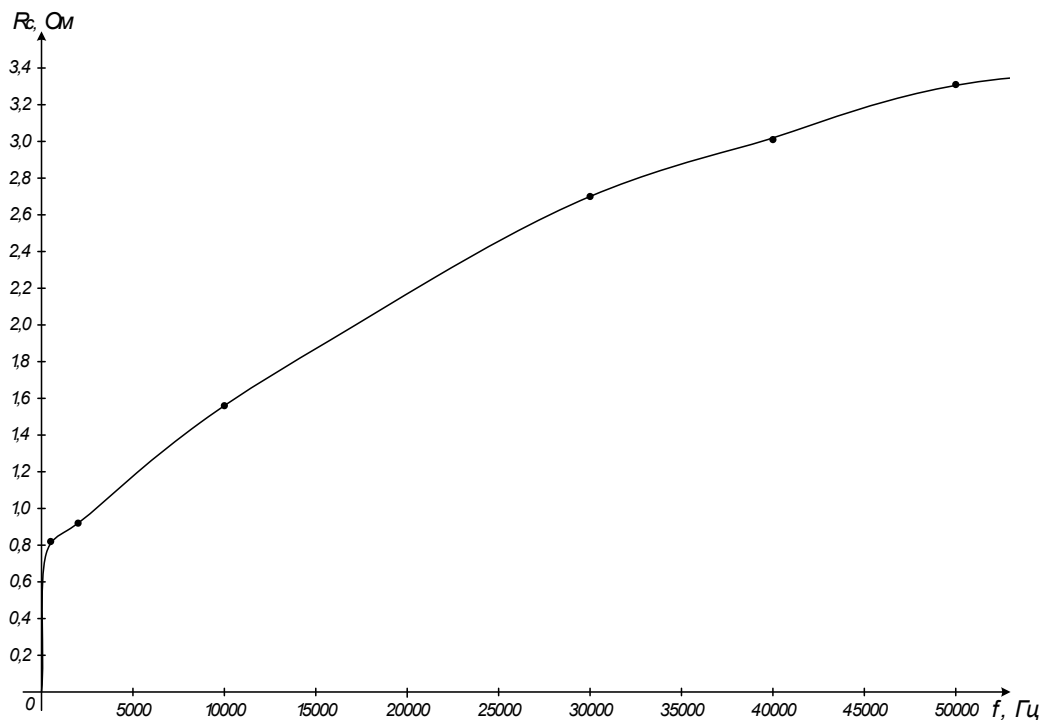


Рис. П.7.3. График изменения активного сопротивления ферромагнитного образца в функции частоты.

Анализ кривых подтверждает известную зависимость глубины проникновения тока в ферромагнитный образец и индуктивного сопротивления от частоты. Очевидно, что последнее определяется влиянием внутренней индуктивности ферромагнитного проводника, снижающейся при увеличении частоты.

П.7.3. Исследование характеристик ферромагнитных материалов при различной температуре нагрева и токах различной частоты

На рисунке П.7.4 представлена структурная схема экспериментальной установки.

В исследуемой электрической цепи используется резистор R , соединенный последовательно с проводником R_C диаметром $d = 1,5$ мм и длиной $l = 5$ м. Исследуемый ферромагнитный образец помещен в камеру электрической печи и постепенно нагревается от комнатной температуры до 1000°C . Многофункциональный источник питания МИП обеспечивает

подачу в исследуемую электрическую цепь постоянного и переменного тока в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц.

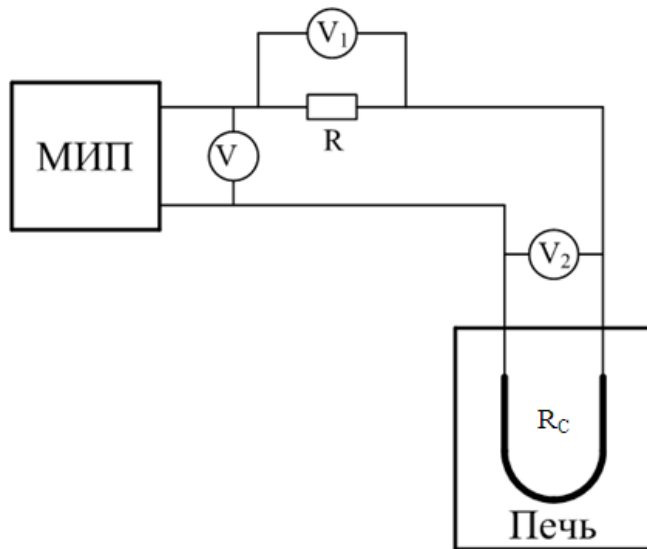


Рис. П.7.4. Структурная схема экспериментальной установки:

МИП – многофункциональный источник

питания; R – резистор; R_c –

ферромагнитный образец, помещенный в электрическую печь; V, V_1 , V_2 – вольтметры

Питание электрической цепи постоянным током позволило определить сопротивление резистора R и ферромагнитного образца R_c , а также его удельное сопротивление $\rho = 3,1503 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. При подаче в электрическую цепь переменного тока сопротивление ферромагнитного образца определялось по формуле (П.7.1), которое позволяет рассчитать глубину проникновения тока Δ (П.7.2). Для расчета индуктивного

сопротивления проводника и его индуктивности были получены формулы (П.7.6) и (П.7.7).

Зависимости удельного и индуктивного сопротивления проводника, и глубины проникновения тока от температуры и частоты были представлены в пятой главе на рис. 5.8-5.10. Анализ кривых показывает на увеличение индуктивного сопротивления при нагревании, что компенсирует рост удельного сопротивления проводника и приводит к практически постоянному значению глубины проникновения тока до точки структурных изменений стали (точка Кюри). При превышении температурой этой точки индуктивное сопротивление проводника резко падает из-за потери сталью магнитных свойств, и глубина проникновения тока начинает резко возрастать.

Приложение 8. Технические характеристики индукционных нагревателей СЧ-40АВ и ВЧ-40АВ

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>	
<i>Модель</i>	<i>СЧ-40 АВ</i>	<i>ВЧ-40АВ</i>
<i>Мощность</i>	<i>40 кВт</i>	<i>26 кВт</i>
<i>Напряжение питания</i>	<i>380 В</i>	<i>380 В</i>
<i>Входной ток</i>	<i>60 А</i>	<i>40 А</i>
<i>Диапазон частот</i>	<i>1-20 кГц</i>	<i>30-80 кГц</i>
<i>Таймеры (Нагрев, Выдержка, Охлаждение)</i>	<i>1-99 секунд</i>	<i>1-99 секунд</i>
<i>Вода для охлаждения</i>	<i>0,2-0,5 МПа 60 л/мин t<40 °С</i>	<i>0,15 МПа 10 л/мин t<40 °С</i>
<i>Рабочий цикл</i>	<i>100 %</i>	<i>100 %</i>
<i>Вес преобразователя</i>	<i>39 кг</i>	<i>25 кг</i>
<i>Вес трансформатора</i>	<i>33 кг</i>	<i>28 кг</i>
<i>Размеры преобразователя</i>	<i>650*300*555 мм</i>	<i>560*230*480 мм</i>
<i>Размеры трансформатора</i>	<i>530*265*440 мм</i>	<i>460*265*440 мм</i>