

На правах рукописи

Иванов Александр Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ В УСТРОЙСТВАХ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ОТ ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Специальность: 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)», на кафедре Безопасности жизнедеятельности.

Научный руководитель: Буканин Владимир Анатольевич
канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, доцент, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ), доцент кафедры Безопасности жизнедеятельности

Официальные оппоненты: Дресвин Сергей Вячеславович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», Институт энергетики и транспортных систем, кафедра «Электротехника и электроэнергетика»

Растворова Ирина Ивановна
канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», доцент кафедры Электронных систем

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт токов высокой частоты имени В. П. Вологодина» (ФГУП ВНИИТВЧ)

Защита состоится «26» марта 2014 г. в _____ час. на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «24» января 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.238.05

М. П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Диссертационная работа посвящена исследованию проблемных вопросов силового воздействия электромагнитного поля и электрического тока в индукционных нагревателях, методов снижения интенсивности такого воздействия, возможности использования сил в полезных для индукционных электротехнологий целях, а также выработке критериев испытаний индукционных установок на электромагнитно-механическую совместимость (ЭММС) и разработке методологии таких испытаний.

Из практики использования индукционных нагревателей известно, что в некоторых случаях механические силы, создаваемые электромагнитным полем и током, действуя на конструкции и элементы системы “индуктор – магнитопровод – элементы крепления – нагрузка”, приводят к серьёзным последствиям и препятствуют внедрению прогрессивного индукционного нагрева во многие технологические процессы. В связи с этим детальное исследование вопросов ЭММС, определение методов и путей снижения негативного влияния усилий до допустимых или приемлемых для практики значений, является актуальным.

При разработке индукционного электротехнологического процесса и оборудования для его реализации первостепенное значение имеет не только получение качественного и эффективного нагрева, то есть технологическая надёжность, но и безопасность или безвредность этого процесса для персонала. Наряду с обеспечением технологической надёжности процесса, которая может быть нарушена электродинамическими усилиями (ЭДУ), достаточно большое внимание следует уделять механической опасности, создаваемой в системах индукционного нагрева, поскольку некоторые процессы в них ещё недостаточно хорошо изучены и требуют надлежащего внимания как со стороны разработчиков, так и со стороны заводских специалистов. ЭДУ способны вызвать непосредственное травмирование обслуживающего персонала от самопроизвольно движущихся заготовок, нарушение таких конструктивных элементов индуктирующих катушек как контактные соединения и межвитковая электрическая изоляция с вытекающими отсюда опасными последствиями.

Степень разработанности темы.

Несмотря на то, что ЭДУ изучались многими авторами, имеется ограниченное число работ, в которых электродинамические усилия в некоторых устройствах индукционного нагрева исследовались целенаправленно. Практически отсутствовал системный подход к проектированию индукционных установок, при котором ЭДУ должны рассматриваться уже на первых этапах проектирования, а созданные установки должны подвергаться специальным испытаниям на ЭММС. Требование обеспечения высшего приоритета проблемам безопасности по сравнению с другими электротехнологическими задачами является настоящей необходимостью разработчиков и исследователей.

Цель работы: получение качественных и количественных зависимостей основных параметров электродинамических усилий в индукционных системах, определение возможности их снижения или рационального использования при проектировании и эксплуатации устройств индукционного нагрева для различных электротехнологических процессов, выработка критериев электромагнитно-механической совместимости, на которые следует проверять такие системы.

Для достижения поставленной цели в диссертации сформулированы и решены следующие задачи:

1 Разработаны метод и предметно ориентированная программа расчёта параметров электродинамических усилий с учётом изменения температуры загрузки, её электрических и теплофизических свойств во время нагрева.

2 Определён комплекс параметров, влияющих на усилия для немагнитной и ферромагнитной цилиндрической загрузки.

3 Определены критерии выбора основных параметров индукционных нагревателей цилиндрической загрузки одновременного и полунепрерывного действия, при которых наступают критические силовые эффекты самопроизвольного перемещения загрузки с учётом величины заглубления, частоты тока, электро- и теплофизических свойств нагреваемого материала.

4 Исследованы электродинамические усилия, приводящие к выбросу цилиндрических заготовок из индуктора при несимметричном расположении или зазорах между соседними заготовками.

5 Рассмотрен комплекс проблемных вопросов электромагнитно-механической совместимости цилиндрических индукционных нагревательных систем.

6 Разработаны критерии электромагнитно-механической совместимости, на которые необходимо проверять и испытывать индукционные нагревательные системы различного технологического назначения.

7 Рассмотрены вопросы возможности создания специализированного индукционного электромагнитного привода цилиндрических заготовок для направленного перемещения их внутри нагревателей при одновременном и непрерывно-последовательном режимах нагрева.

Научная новизна проведённых исследований состоит в следующем:

1 Сформулирована и обоснована математическая модель совместного расчёта электромагнитных, тепловых параметров индукционных нагревателей цилиндрических заготовок и электродинамических усилий, создаваемых в таких системах, разработана предметно ориентированная программа расчёта на ЭВМ.

2 Предложена ранее не сформулированная классификация методов управления электродинамическими усилиями, получена новая информация о влиянии режимов питания и конструктивного исполнения нагревателей на электродинамические усилия. Установлено, что, увеличивая напряжение на индукторе, можно добиться изменения направления силы, действующей на ферромагнитную загрузку.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1 Разработана программа двумерного электротеплового анализа и расчёта электродинамических усилий в индукционных нагревателях различного технологического назначения с учётом изменяющихся в процессе нагрева основных параметров и использованием двух или более частот источников питания.

2 Получены зависимости распределения электродинамических усилий для наиболее распространённых конструкций промышленных индуктирующих систем, позволяющих оценить возможные проблемы, которые могут встретиться при их разработке и внедрении.

3 Предложены новые методы управления электромагнитным полем и электродинамическими усилиями для снижения негативных эффектов, возникающих при работе или испытаниях индукционных нагревателей.

4 Получены рекомендации по практическому применению и проектированию индукционных систем для нагрева утяжелённых бурильных труб сбалансированных, мерных цилиндрических заготовок из меди и её сплавов, алюминия и его сплавов, титана, немагнитной и ферромагнитной стали, позволяющие обеспечить их электромагнитно-механическую совместимость.

5 Разработана научно-обоснованная методика проведения испытаний индукционных установок на соответствие требованиям электромагнитно-механической совместимости.

Методология и методы исследования:

Исследование электромагнитных, тепловых и электродинамических процессов проводится с использованием математического моделирования, основанного на теории индукционного нагрева, методах математической физики и вычислительной математики, а также физического моделирования для проверки результатов расчётов.

При математическом моделировании использовались численные методы и программы расчёта, основанные на методе импедансных граничных условий и методе конечных элементов.

Данная диссертационная работа является частью исследований, выполненных автором на кафедре Безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина).

На защиту выносятся следующие основные положения:

- метод и предметно ориентированная программа расчёта электротепловых параметров и электродинамических усилий индукционных нагревателей для цилиндрических заготовок;

- результаты исследования электродинамических усилий, действующих на цилиндрические заготовки, индуктирующие катушки и магнитопроводы целого ряда промышленных индукционных установок;

- средства управления электродинамическими усилиями индукционных нагревательных систем;
- рекомендации по снижению электродинамических усилий нагревателей;
- критерии электромагнитно-механической совместимости индукционных нагревателей;
- результаты исследований по созданию индукционного электромагнитного привода для перемещения заготовок в индукционных нагревателях.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с экспериментальными данными и результатами, полученными по программам расчёта, достоверность которых не вызывает сомнения.

Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 63-й, 64-й, 65-й и 66-й конференциях профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” в 2010, 2011, 2012 и 2013 гг., 9-ом Международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, 13-16 сентября 2011 г., СПб, на XVII UIE Congress May 21– 25, 2012, St. Petersburg, Международной конференции Heating by Electromagnetic Sources HES – 13, Padua, May 21 – 24.

Публикации. Результаты выполненных исследований по теме диссертационной работы изложены в 10 научных работах, в том числе в 5 статьях в научно-технических журналах, рекомендованных ВАК, а также в материалах научно-технических, международных конференций, симпозиума и конгресса (5 публикаций).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающей 106 наименований, и 5 приложений. Основная часть работы изложена на 140 страницах машинописного текста. Работа содержит 67 рисунков и 10 таблиц.

Внедрение результатов работы. Программа двумерного расчёта внедрена в практику проектирования индукционных систем различного технологического назначения ведущих отечественных научно-производственных фирм: ФГУП ВНИИ ТВЧ, ООО НПФ “Фреал и Ко”, ООО “Градиент”. Результаты диссертационной работы используются для обучения в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете бакалавров по дисциплине “Безопасность жизнедеятельности” и магистров по дисциплинам “Специальные вопросы проектирования безопасной приборной техники” и “Системы обеспечения безопасности технических средств управления”. Экономический эффект от внедрения результатов работы оценивается в 254600 руб. в год.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержатся обоснование актуальности темы, формулировка целей и решаемых задач, подчеркивается научная новизна и практическая значимость работы.

В главе 1 даётся общая характеристика решаемых задач.

Исследованию электродинамических усилий, возникающих в устройствах индукционного нагрева и плавления металла, посвящено достаточно много работ. Основными организациями, в которых начали проводить и в настоящее время продолжают проводить эти исследования, являются ВНИИЭТО, ФГУП ВНИИТВЧ, Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет “МЭИ”), Ленинградский электротехнический институт (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет), Куйбышевский политехнический институт (Самарский государственный технический университет) и некоторые другие.

Электромагнитные силы по разным причинам и с разных точек зрения изучались многими российскими учёными и исследователями – Болтиным В. Г., Смирновым В. В., Максимовым С. И., Дедюлей И. И., Буканиным В. А., Клещёвым В. В., Немковым В. С., Немковым С. С., Демидовичем В. Б., Северяниным А. К., Зиминым Л. С., Сутягиным А. Ф., Кувалдиным А. Б., Джапаровой Р. К., Губаревым А. А., Иевлевым Е. М., Блиновым Ю. И., Галуниным С. А., Шороховым А. Ю., Никаноровым А. Н., Тимофеевым В. Н., Первухиным М. В., Фризенным В. Э., Сарапуловым Ф. Н. и другими, а из зарубежных исследователей – Di Pieri С., Lupi S., Dughiero F., Forzan M., Mulbauer A., Baake E., Nacke B., Jakovics A., Kolesnichenko A., Barglik J. и другими.

Анализ методов расчёта и коммерческих пакетов программ, разработанных различными коллективами авторов, показал, что применить их чаще всего не достаточно знакомыми с программированием и самими программами разработчиками индукционного нагревательного оборудования и конструкторами напрямую для исследования необходимых вопросов электромагнитно-механической совместимости (ЭММС) при использовании традиционных вопросов электротехнологий проблематично по многим причинам.

В настоящее время разработано большое число программ для ЭВМ, позволяющих достаточно точно рассчитывать параметры индукторов, в том числе реактивную мощность, или индукцию магнитного поля и плотности токов, которые могут быть использованы для определения усилий. Можно выделить работы В. Б. Демидовича, В. С. Немкова, Н. А. Павлова, Б. С. Полеводова, А. Н. Никанорова, С. Г. Гуревича, И. И. Иохиной, О. И. Карпенковой, Казьмина В. Е., А. Б. Кувалдина, И. П. Сальниковой, Л. С. Зимина, Э. Я. Рапопорта, Л. П. Смольникова и др.

Анализ состояния вопроса по силовому влиянию ЭМП в устройствах индукционного нагрева показал ряд нерешённых задач, основными из которых являются следующие:

- определение критериев выбора основных параметров индукционных нагревателей цилиндрической загрузки, при которых наступают критические силовые эффекты самопроизвольного перемещения загрузки с учётом величины заглубления, частоты тока, электро- и теплофизических свойств материала при одновременном и полунепрерывном режимах нагрева;

- детальное исследование особенностей электродинамических усилий, приводящих к выбросу цилиндрических заготовок из индуктора при несимметричном расположении или технологических зазорах между соседними заготовками;
- изучение комплекса вопросов электромагнитно-механической совместимости цилиндрических индукционных нагревательных систем и разработка критериев и уровней ЭММС, на которые необходимо проверять индукционные нагревательные системы различного технологического назначения и некоторые другие.

Глава 2 посвящена анализу методов и программ расчёта электродинамических усилий в устройствах индукционного нагрева, которые были использованы в работе при проведении исследований.

Для исследования и анализа ЭДУ может быть использован дифференциальный подход к решению электромагнитных задач и некоторые коммерческие пакеты программ на ЭВМ. Из доступных автору программ использовались программа ELCUT, разработанная российским производственным кооперативом ТОР и программный комплекс FLUX, разработанный французской компанией CEDRAT, которые основаны на решении задач для уравнений в частных производных методом конечных элементов.

В связи с тем, что применить их напрямую для решения поставленных в работе задач проблематично по многим причинам, была разработана предметно-ориентированная программа двумерного электротеплового анализа и анализа электродинамических усилий в цилиндрических индукционных нагревателях ELTA²⁰ с использованием хорошо проверенного на практике интегрального метода расчёта, основанного на учёте токов намагничивания и получивший название метод намагничивающих сил. Расчётная схема системы, состоящей из двух индукторов с магнитопроводами и двух заготовок, приведена на рисунке 2.1.

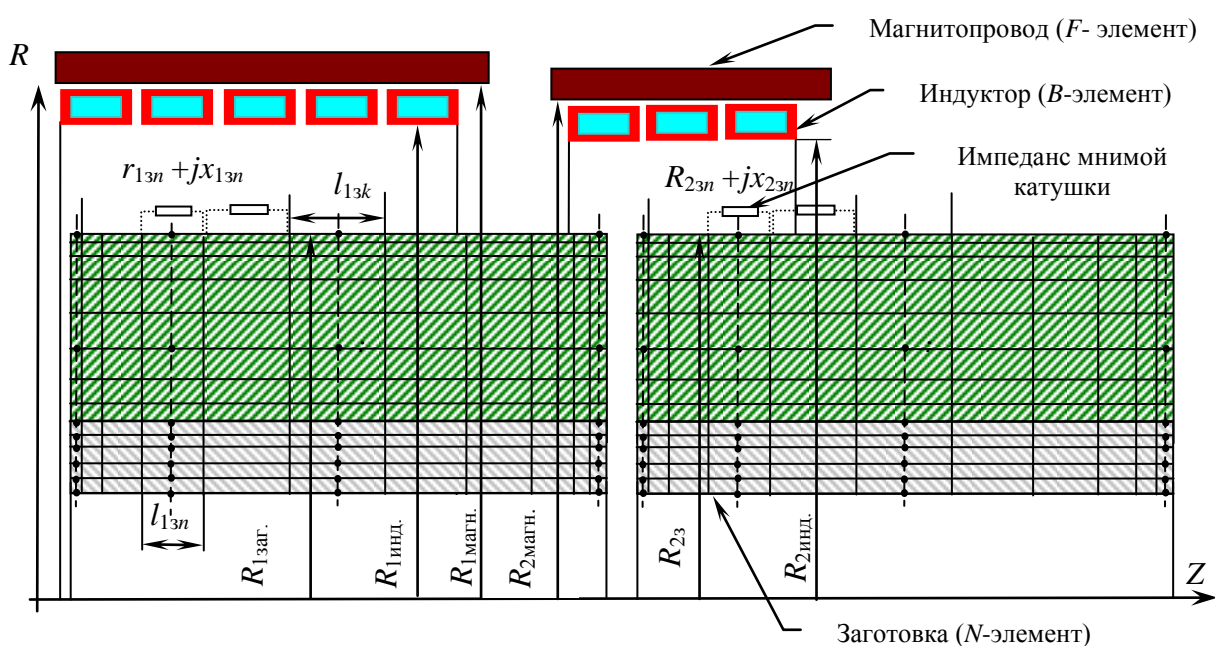


Рисунок 2.1 – Схема рассчитываемой индукционной системы

Внутренняя электротепловая задача, в результате которой находились сопротивления на поверхности элементов загрузки, решалась с помощью метода конечных разностей. Результаты расчёта внутреннего поля используются в виде импедансных граничных условий для решения внешней части задачи. Проведены исследования по выбору модели для тел с импедансными граничными условиями, на основе которых показана необходимость использования только одного из двух возможных подходов при решении внешней электромагнитной задачи, рекомендованных В. С. Немковым, а именно:

$$\left. \begin{aligned} Q \in B, \quad \dot{Z}_Q \dot{I}_Q + j \sum_P x_{QP} \dot{I}_P = \dot{U}_Q; \\ Q \in N_k, \quad \dot{Z}_Q \dot{I}_Q + j \sum_P x_{QP} \dot{I}_P = 0; \\ Q \in N_f, \quad \dot{I}_Q - \sum_P N_{QP} W_P \dot{I}_P = 0; \\ Q \in F, \quad S_Q \dot{I}_Q - \sum_P N_{QP} W_P \dot{I}_P = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.1)$$

В системе уравнений (2.1) \dot{Z}_Q , x_{QP} – сопротивление взаимной индуктивности, \dot{I}_Q и \dot{I}_P – токи элементов Q и P , \dot{U}_Q – напряжение на элементе Q , N_{QP} – коэффициент магнитодвижущих сил, W_P – число витков элемента P , S_Q – коэффициент, зависящий от магнитной проницаемости магнитопровода. Импеданс элементов загрузки длиной l_{ni} и радиусом R_{Nie} определяется по формуле $\dot{Z}_{Ni} = \dot{Z}_{0Ni} 2\pi R_{Nie} / l_{ni}$, где $\dot{Z}_{0Ni} = \dot{E}_i / \dot{H}_{ii}$ – сопротивление единичного квадрата, \dot{E}_i – напряжённость электрического поля и $\dot{H}_{ii} = \dot{I}_{zn} / l_{ni}$ – напряжённость магнитного поля, создаваемых фиктивными обмотками n на поверхности загрузки.

Показано, что использование уравнения $\sum_P (jx_{QP} - Z_Q N_{QP} W_P) \dot{I}_P = 0$ при $Q \in N$ для нахождения токов в элементах загрузки при другом рекомендуемом подходе в решении внешней электрической задачи оказалось принципиально невозможным при совместном решении тепловой задачи.

Внутренняя электротепловая задача, в результате которой находились сопротивления на поверхности элементов загрузки, решалась с помощью метода конечных разностей.

Нелинейное одномерное дифференциальное уравнение для напряжённости магнитного поля \dot{H} выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\rho R \frac{\partial \dot{H}}{\partial R} \right) = -j\omega \mu_0 \dot{H}, \quad (2.2)$$

где R – радиус.

Нелинейное дифференциальное уравнение для температуры T представлено как:

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} (\lambda R \frac{\partial T}{\partial R}) - \frac{\partial T}{\partial Z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial Z}) = w, \quad (2.3)$$

Приведён алгоритм расчёта электродинамических усилий, основанный на взятии производной от электромагнитной энергии по координате при изменении геометрического параметра исследуемой системы. К примеру, выражение для силы F_Z , действующей на загрузку в проходном нагревателе полунепрерывного типа в направлении оси Z , имеет вид

$$F_Z = \left| \frac{\partial W}{\partial Z} \right| = \frac{\partial(LI^2)}{2\partial Z} = \frac{\partial(\omega LI^2)}{2\omega\partial Z} = \frac{\partial Q}{2\omega\partial Z}, \quad (2.4)$$

где W – электромагнитная энергия системы; L – индуктивность системы, I – ток индуктора, ω – круговая частота, Q – реактивная мощность системы.

Проведено сравнение результатов ЭДУ, полученных по ELTA²⁰, ELCUT и FLUX 2D, показавших, что расхождение между ними имеется, однако по основным интересующим параметрам оно относительно небольшое.

В главе 3 с помощью разработанной программы расчёта и программ ELCUT и FLUX 2D проведены исследования проблемных вопросов силового воздействия электромагнитного поля и тока в индукционных установках промышленных типов, в частности трёхфазных ИНМ-500П-40/80Н-И1, ИНМ-75П-40/100НБ, ИНМ-130П-36/42Н-И1 и однофазных установках ИНМ-50П-10/12Н-И1 и КИН2-750/1К.

В качестве одного из примеров подробного исследования на рисунке 3.1 приведены сравнительные кривые ЭДУ для трёхфазных установок с совмещёнными индукторами-фазами при расчётной активной мощности трёх индукторов около 1 МВт.

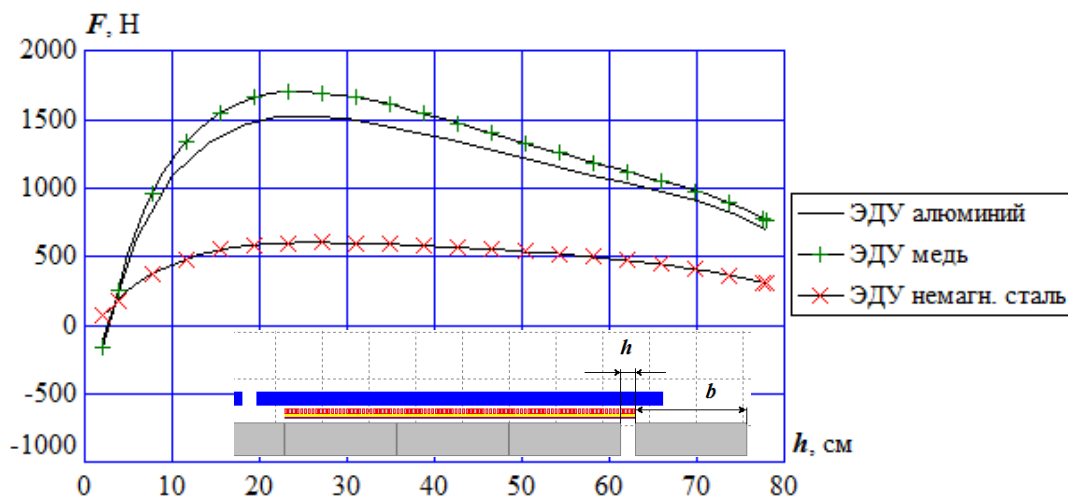


Рисунок 3.1 – ЭДУ, действующие на крайнюю заготовку из различных материалов

При прочих равных условиях электродинамические усилия зависят от удельного сопротивления материалов заготовок. Чем больше удельное сопротивление, тем меньше ЭДУ.

Исследованы электродинамические усилия, действующие в промышленной индуктирующей системе, имеющей 112 витков (основная катушка 100 витков индукторе с внутренним диаметром по меди 0,3 м и две торцевых 3 и 9 витков соответственно) для

нагрева концов утяжелённых бурильных сбалансированных труб наружным диаметром 0,229 м, внутренним диаметром 0,09 м из стали 40ХН2МА. На рисунке 3.2 показаны зависимости ЭДУ в конце нагрева конца УБТС до 1000 °С.

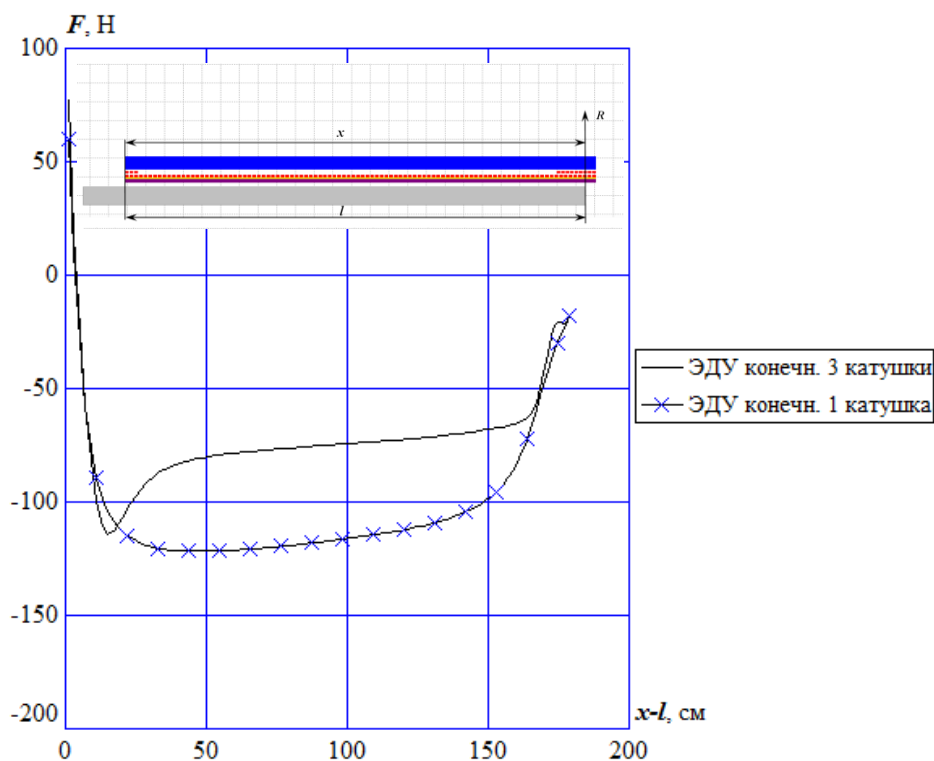


Рисунок 3.2 – ЭДУ, действующее на трубу, при различной её длине в индуктор

Установлено, что вместо ожидаемого выталкивания трубы из индуктора и отрицательной силы, ЭДУ оказалась положительной. Это ещё раз подтвердило, что реальный учёт распределения температуры имеет очень большое значение для достоверности получаемых результатов и правильности предлагаемых выводов.

ЭДУ, действующие на ферромагнитные заготовки, не всегда направлены внутрь индуктора, особенно на средних и повышенных частотах тока. Получены экспериментальные результаты, подтверждающие, что характер усилий именно такой, как получается в некоторых расчётах.

Проведены исследования сил Лоренца, действующих на 91 виток индуктора диаметром по меди 0,3 м для нагрева меди диаметром 0,242 м. Исследованы усилия, действующие на всю катушку индуктора (таблицы 3.1) и магнитопроводы (таблицы 3.2). При приблизительно одинаковых условиях по активной мощности трёхфазной системы 1 МВт электродинамические усилия, действующие на индуктирующие катушки, при нагреве разных металлов отличаются. Также как и для электродинамических усилий, действующих на нагреваемые заготовки, можно говорить о том, что с увеличением удельного сопротивления материала немагнитных заготовок ЭДУ, действующие на катушки индукторов уменьшаются.

Для ферромагнитной стальной загрузки ЭДУ почти в три раза меньше, чем для немагнитной.

Таблица 3.1 – Усилия, действующие на индукторы трёхфазной системы

Материал заготовки	Радиальные ЭДУ в индукторе, Н			Аксиальные ЭДУ в индукторе, Н		
	первом	втором	третьем	первом	втором	третьем
Алюминий	46610	45413	43109	7	18	732
Медь	49260	48270	46049	3	15	774
Сталь немагн.	19392	18541	17639	14	19	291
Сталь ферромагн.	6754	6132	6270	94	32	-2,42

Таблица 3.2 – Усилия, действующие на магнитопроводы трёхфазной системы

Материал заготовки	Радиальные ЭДУ в магнитопроводе, Н			Аксиальные ЭДУ в магнитопроводе, Н		
	первом	втором	третьем	первом	втором	третьем
Алюминий	-382,46	-345,07	-339,56	-5,23	-0,30	-2,39
Медь	-387,88	-350,93	-345,44	-5,24	-0,27	-2,62
Сталь немагн.	-303,42	-270,57	-270,20	-4,74	-0,35	0,47
Сталь ферромагн.	-148,27	-153,69	-141,29	-4,69	-1,80	3,51

Усилия, действующие на магнитопроводы, значительно меньше, чем на индуктор.

В разделе 4 приводится описание методов снижения ЭДУ и их рационального использования.

Предложена классификация методов и средств управления силовым воздействием (рисунок 4.1) и с помощью расчётов показана эффективность некоторых из них.

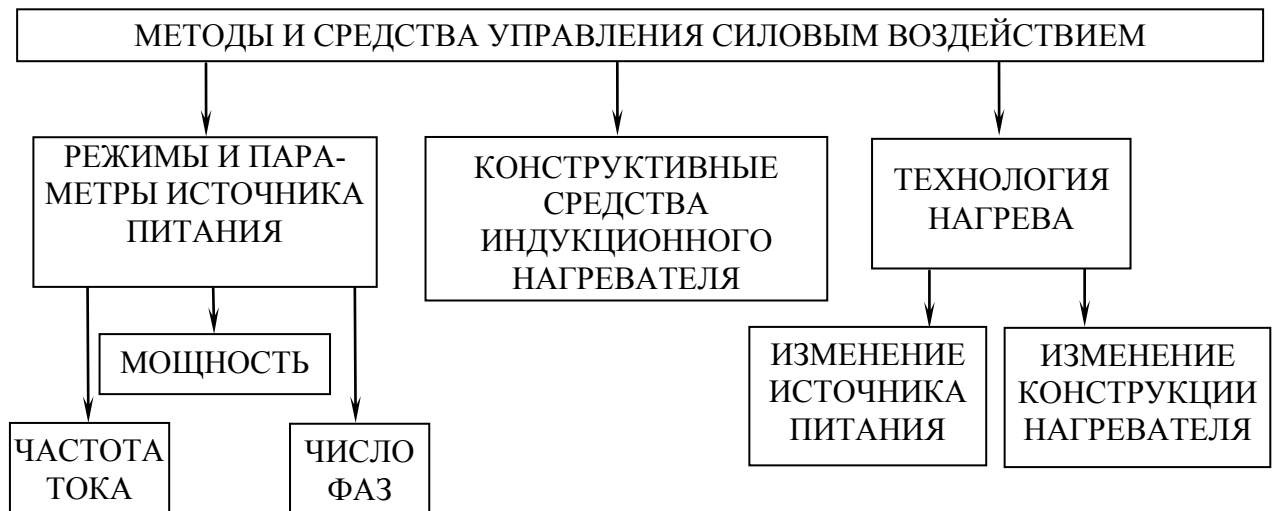


Рисунок 4.1 – Классификация методов и средств управления силовым воздействием при индукционном нагреве

В качестве примера рассмотрена система индукционного нагрева титановых заготовок диаметром 0,275 м, длиной 0,75 м до температуры 900 °С в индукторе при активной мощности, подводимой к индуктору, 250 кВт, приведённой в литературе. Внутренний диаметр индуктора по меди составляет 0,34 м, длина индуктора 1 м. На рисунке 4.2 показаны зависимости электродинамического усилия, действующего на заготовку от смещения центров при нагреве на разных частотах тока.

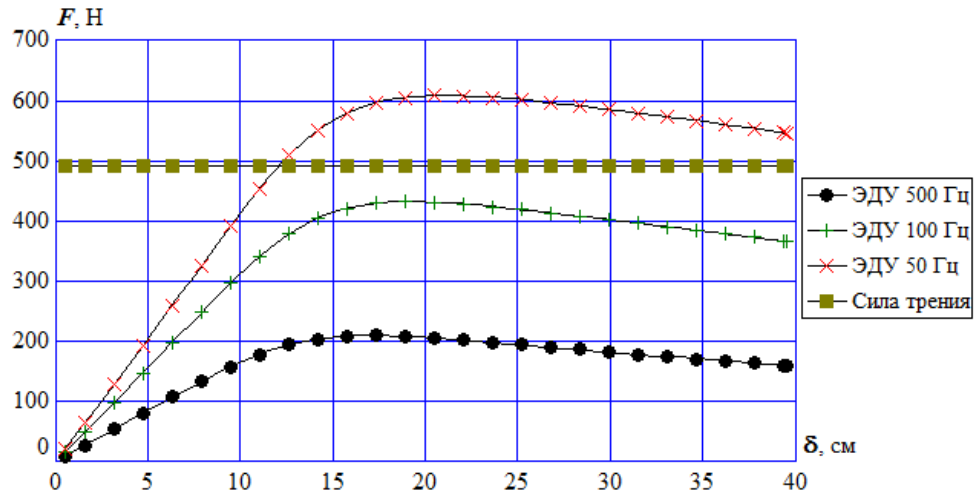


Рисунок 4.2 – Изменение ЭДУ при смещении центров заготовки и индуктора

Показано, что выбор разработчиком источника питания частотой 100 Гц оправдан не только с точки зрения равномерности нагрева, но и с точки зрения исключения проблем, связанных с возможностью самопроизвольного перемещения загрузки.

При исследовании методов управления ЭДУ (изменении мощности источника питания) получены новые научные результаты изменения значения полного усилия, действующего на стальную заготовку при возможных смещениях (рисунок 4.3).

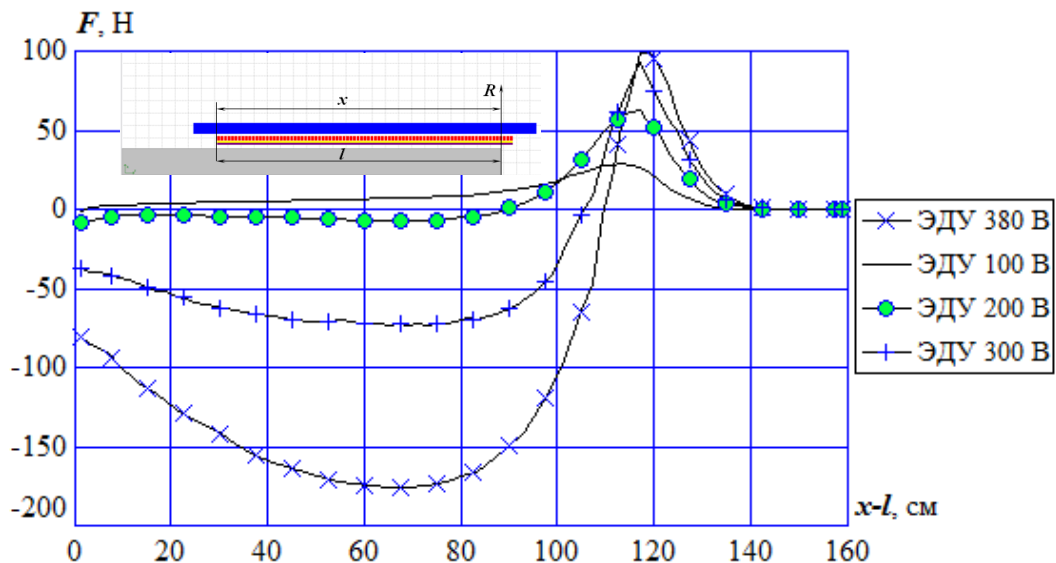


Рисунок 4.3 – Изменение ЭДУ, действующего на заготовку из ферромагнитной стали

Установлено, что ЭДУ становятся положительными и стремятся втянуть заготовку в индуктор при небольших значениях приложенного напряжения, в данном случае 100 В или ниже (при любых смещениях), или при бóльших напряжениях (до 380 В), когда правый торец заготовки приближается к левому торцу индуктора с уже ослабленным магнитным полем.

За счёт некоторых конструктивных средств управления можно решить задачи по снижению ЭДУ в витках индуктора. В частности, исследования показали, что при отсутствии магнитопровода осевое усилие, равное 518 Н, несколько возрастает, если использовать гладкий магнитопровод без полюсов (до 639,6 Н), а при наличии торцевых башмаков осевые усилия в первых четырёх витках уменьшаются в среднем на 15...20 %. Это объясняется тем, что силовые линии магнитного потока стремятся замкнуться в торцевой башмак, создавая тем самым более равномерное магнитное поле под крайними витками. В тоже время радиальные усилия увеличиваются.

Электродинамические усилия, действующие на заготовки, при определённых условиях можно использовать и для положительных целей. Проведены исследования, показывающие, что для контролируемого перемещения УБТС можно существенно не менять индуктирующую систему, а использовать источник питания с регулируемой частотой: для перемещения 20...25 Гц, для нагрева 100 Гц или более. Тем самым, можно не только обеспечить перемещение труб по роликовым направляющим, но и повысить эффективность нагрева за счёт увеличения частоты по сравнению с промышленной, где эффективность оказывается недостаточной.

Вторым вариантом реализации индукционного электромагнитного привода является использование многофазных систем, создающих бегущее магнитное поле с достаточно большими усилиями, что может способствовать улучшению процесса контролируемого перемещения загрузки. Как показали исследования, для создания такой системы в большинстве случаев требуются дополнительные индуктирующие устройства, которые могут одновременно нагревать и перемещать загрузку. В общем случае для создания начального выталкивающего усилия потребуются дополнительные обмотки, исполняющие роль своеобразного линейного индукционного двигателя, включённые со сдвигом фаз 60° относительно друг друга. Пример и расчёт такой системы выполнен с целью определения возможности перемещения заготовки в прямом и обратном направлениях.

Раздел 5 посвящён проблемам электромагнитно-механической совместимости индукционных нагревателей и путям их решения.

Электромагнитно-механическая совместимость – это способность индукционных установок удовлетворительно функционировать, не создавая недопустимых электродинамических воздействий на конструктивные элементы самой установки и нагреваемые изделия, обслуживающий персонал и другие технические системы, находящиеся в непосредственном их окружении.

ЭММС является одной из разновидностей совместимостей технических систем. В отличие от электромагнитной совместимости или механической совместимости электромагнитно-механическая совместимость характерна в основном только для индукционных нагревателей и для ряда сильноточных электрических систем. Проблемы вызваны механическим воздействием на металлические части индукционной установки, нагреваемые заготовки, а также на другие металлические изделия и человека, находящиеся в непосредственном окружении этой установки, которое создаёт электромагнитное поле и ток.

Вопросам ЭММС индукционных установок до сих пор не уделяется должного внимания. Причинами этому являются следующие:

- отсутствие нормативной базы на проведение испытаний по ЭММС с выработанными критериями и степенями жёсткости испытаний;
- отсутствие разработанных методик проверки на соответствие требований по ЭММС;
- отсутствие достаточных знаний у разработчиков индукционного оборудования, позволяющих определить направления работ и виды испытаний;
- отсутствие у конструкторов простого и доступного в их работе программного обеспечения, позволяющего проводить необходимые исследования, и др.

Пути и направления решения задач, связанных с проблемами ЭММС, следует искать, исключая причины недостаточного внимания к этим вопросам, приведённым ранее, а именно:

- выработкой критериев и степеней жёсткости испытаний на ЭММС для определённых типов нагревательных систем;
- разработкой методик проверки индукционных установок на соответствие требований по ЭММС;
- накопления достаточных знаний и их использования разработчиками индукционного оборудования, позволяющих определить направления работ и виды испытаний;
- разработкой для конструкторов простого и доступного в их работе программного обеспечения на ЭВМ, позволяющего быстро выполнить необходимые предварительные исследования, проводимые на этапах разработки технического задания и выполнения эскизного проекта и др.

Часть из этих задач в той или иной степени решается в настоящей работе, другая часть требует участия других исполнителей, включая профильные организации и предприятия.

Комплексный подход в решении задач ЭММС предполагает последовательное изучение проблемных вопросов электродинамических усилий с использованием компьютерного моделирования с последующим испытанием индукционных установок по со-

ответствующим степеням жёсткости, аналогичным в практике испытаний на электромагнитную совместимость технических систем.

Разработаны критерии жёсткости испытаний индукционных нагревателей на ЭММС. Рекомендуются три основные степени жёсткости испытаний, выбираемые в зависимости от вида индуктирующей системы, технологического процесса, проводимого с её помощью, и параметров нагрева.

Предложена научно-обоснованная методика проверки индукционных нагревателей на соответствие требованиям электромагнитно-механической совместимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы.

1 Проведён анализ проблемных вопросов силового воздействия электромагнитного поля и тока, возникающего в устройствах индукционного нагрева. Показано, что и в настоящее время всё ещё встречаются достаточно сложные задачи, которые необходимо решать для обеспечения технологической надёжности и безопасности в процессе проектирования и эксплуатации таких систем.

2 Разработаны методика и программа электротеплового расчёта и расчёта электродинамических усилий для цилиндрических индукционных нагревательных систем, позволяющая определять усилия в отдельных заготовках, индукторах и магнитопроводах. Достоинством программы по сравнению с известными коммерческими программами, к примеру, ELCUT, FLUX или другими, является учёт реального распределения температуры в процессе нагрева и возможность моделировать двух- и более частотный режимы, что иногда используется в индукционных электротехнологических процессах.

3 Для целого ряда опытных и трёхфазных промышленных индукционных установок с совмещёнными и разнесёнными индукторами-фазами для нагрева слитков из меди и её сплавов (установка ИНМ-500П-40/80Н-И1), алюминия и её сплавов (установка ИНМ-75П-40/100НБ), стали (ИНМ-130П-36/42Н-И1) и однофазных установок для нагрева медных сплавов (ИНМ-50П-10/12Н-И1) и стали (КИН2-750/1К) определены критерии выбора основных параметров индукционных нагревателей одновременного и полунепрерывного действия, при которых могут наступить критические силовые эффекты самопроизвольного перемещения загрузки.

4 Выявлено, что не учёт реального распределения температуры при расчёте электродинамических усилий, действующих на концы утяжелённых бурильных труб при их нагреве для термообработки в индукторах сложной конструкции с торцевыми подогревающими катушками, может дать принципиально неправильный результат. При этом направление усилия может оказаться противоположным тому, что получается, если считать, что конец трубы полностью потерял ферромагнитные свойства.

5 Установлено, что ферромагнитные заготовки могут в некоторых случаях втягиваться в индуктор, а в некоторых, наоборот, выталкиваться из индуктора.

6 Предложена классификация средств и методов управления электродинамическими усилиями, а также предложены методы снижения и рационального использования ЭДУ. Исследование некоторых методов, особенно для ферромагнитной загрузки, показало, что можно достаточно эффективно влиять на характер их распределения, получая при этом требуемый эффект.

7 Предложены методы снижения электродинамических усилий, действующих на крайние витки индуктирующих катушек, которые в основном определяют вибрацию витков.

8 Предложено использовать электродинамические усилия для контролируемого перемещения некоторых заготовок, в частности концов утяжелённых бурильных труб, внутри индуктора, реализовав индукционный электромагнитный привод.

9 Определены основные проблемы электромагнитно-механической совместимости индукционных нагревателей и пути их решения. Разработаны и предложены степени жёсткости испытаний индукционного оборудования на ЭММС.

10 Предложена методика проверки индукционных нагревателей на соответствие требованиям электромагнитно-механической совместимости, которая может быть использована при пересмотре существующих или разработке новых государственных стандартов по частным требованиям безопасности индукционных нагревательных установок или разработке технических условий под конкретные нагреватели.

11 Дальнейшая разработка темы может быть направлена на разработку нормативных документов, в частности государственных стандартов по вопросам электромагнитно-механической совместимости мощных индукционных нагревателей или плавильных печей, работающих на промышленной частоте или средних частотах, или технических условий, в которых вопросы ЭММС должны быть подробно отражены. Следовало бы разработать государственные стандарты Российской Федерации, аналогичные ГОСТ Р по ЭМС, или же стандарты предприятий, в частности ВНИИ ЭТО, ВНИИ ТВЧ и других научно-исследовательских и опытно-конструкторских организаций, занимающихся разработкой индукционных установок, заводов по изготовлению индукционного нагревательного и плавильного оборудования (ЗАО “Завод РЭЛТЕК” г. Екатеринбург, Новозыбковский завод Индуктор, опытный завод ВНИИЭТО г. Истра, МОСИНДУКТОР г. Апрелевка и др.), обществ с ограниченной ответственностью, специализирующихся на разработке и изготовлении индукционных установок (ООО ФРЕАЛ и Ко, ООО ГРАДИЕНТ и др.).

12 Перспективными направлениями дальнейших работ по теме являются работы, связанные с уточнениями степеней жёсткости испытаний индукционных нагревателей на электромагнитно-механическую совместимость для нагревателей слябов, созданием доступных для разработчиков индукционных систем специализированных трёхмерных программ расчёта электродинамических усилий.

Публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

- 1 Иванов, А. Н. Методы расчёта электродинамических усилий в устройствах индукционного нагрева / А. Н. Иванов // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ" – 2013 – Том 8 – С. 43–48.
- 2 Буканин, В. А. Электромагнитно-механическая совместимость индукционных нагревателей / В. А. Буканин, А. Н. Иванов // Индукционный нагрев. – 2012. – № 1 (19) – С. 43 – 47.
- 3 Буканин, В. А. Электродинамические усилия в индукционных системах / В. А. Буканин, А. Н. Иванов // Индукционный нагрев. – 2012. – № 20 – С. 9–13.
- 4 Иванов, А. Н. Предметно-ориентированная программа двумерного электротеплового анализа устройств индукционного нагрева цилиндрических заготовок / А. Н. Иванов, В. А. Буканин, А. Е. Зенков // Индукционный нагрев. – 2012. – № 3 (21). – С. 41–43.
- 5 Буканин, В. А. Некоторые вопросы безопасности индукционных электротермических установок / В. А. Буканин, А. Н. Иванов // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 8. – С. 28–32.

Другие публикации:

- 1 Иванов, А. Н. Проблемные вопросы расчёта электромагнитных полей в устройствах индукционного нагрева / А. Н. Иванов, В. А. Буканин // Сборник докладов 63-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава университета 26 января – 6 февраля 2010 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2010. – С. 233 – 238.
- 2 Иванов, А. Н. Возможности программы ELTA²⁰ для исследования вопросов электромагнитно-механической совместимости устройств индукционного нагрева / А. Н. Иванов, В. А. Буканин, А. Е. Зенков // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета. Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых. 24 января – 4 февраля 2012. – С. 209-212.
- 3 Иванов, А. Н. Особенности проявления электромагнитных полей в индуктирующих системах / А. Н. Иванов, В. А. Буканин // Труды 9-го Международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, 13-16 сентября 2011. – СПб., 2011 – С. 537–541
- 4 Ivanov, A. N. Advancements in program ELTA for calculation of induction heating systems / A. N. Ivanov, V. A. Bukanin, A. E. Zenkov // Proceeding of the International Conference on Heating by Electromagnetic Sources. Padua, May 21-24, 2013. – P. 345 – 351.
- 5 Ivanov, A. Electromagnetic-mechanical compatibility of induction heating systems / A. Ivanov, V. Bukanin // XVII UIE Congress May 21– 25, 2012, St. Petersburg.