

На правах рукописи



Корзов Дмитрий Николаевич

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С
ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», кафедра «Электроэнергетики и автоматики»

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент
Авербух Михаил Александрович

Официальные оппоненты:

Наумов Игорь Владимирович –
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО Иркутский национальный
исследовательский технический
университет, кафедра «Электроснабжения
и электротехники», профессор

Бастрон Андрей Владимирович –
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО Красноярский
государственный аграрный университет,
кафедра «Электроснабжения сельского
хозяйства», заведующий кафедрой

Ведущая организация

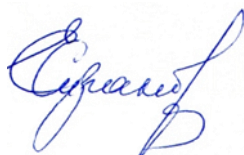
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Новосибирский государственный
технический университет»

Защита диссертации состоится «25» ноября 2015 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 на базе Сибирского федерального университета по адресу: 666049, ул. Ленина, д. 70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

Актуальность проблемы. В настоящее время в РФ широко используются электроустановки индукционного нагрева (ЭИН) для поверхностной закалки, гибки труб, высокочастотной пайки и т.д. Принцип индукционного нагрева основан на создании электромагнитного поля высокой частоты, которое индуцирует в нагреваемом теле вихревые токи. Для создания индуцированных токов используются высокочастотные генераторы на базе статических силовых полупроводниковых преобразователей. В зависимости от вида электротехнологической нагрузки применяются статические преобразователи различной конфигурации и построенные на разнообразной элементной базе. Статические полупроводниковые преобразователи являются генераторами высших гармоник тока и напряжения в электрическую сеть, входящую в состав системы электроснабжения промышленного предприятия. В связи с этим особую значимость имеют проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) как способности технических средств нормально функционировать в условиях электромагнитных воздействий, не создавая при этом недопустимых помех для других технических средств.

Проблеме ЭМС в системах электроснабжения промышленных предприятий посвящены работы российских и зарубежных ученых: Шваб А., Бадер М.П., Хабигер Э., Вагин Г.Я., Жежеленко И.В., Железко Ю.С, Аррилага Д. и др. В этих трудах установлена природа генерирования высших гармоник в питающую сеть, влияние высших гармоник на элементы сети и предложены средства для их компенсации. Особенности работы установок индукционного нагрева, такие как различные режимы нагрева заготовок, широкий диапазон изменения мощности нагрева в зависимости от геометрических размеров заготовок, не позволяют автоматически применять полученные решения для оценки ЭМС в электрических сетях, «запитывающих» такие установки. ЭИН могут быть построены с применением различных типов полупроводниковых преобразователей токов и напряжений, но все они относятся к потребителям с нелинейными вольт-амперными характеристиками и, тем самым, являются генераторами высших гармоник тока и напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Диссертационные работы Довгуна В.П., Лютаревича А.Г., Боярской Н.П., Темербаева С.А., Коваль А.А. в разной степени посвящены изучению систем управления активными и гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами. Авторы сходятся во мнении, что активные и гибридные фильтры целесообразно применять для компенсации высших гармоник тока и напряжения нелинейных электроприемников с широким диапазоном нагрузок. Перспективным направлением компенсации высших гармоник тока и напряжения в сети является использование ГПФ.

Таким образом, исследования в области обеспечения ЭМС в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева (СЭПП с ЭИН) являются актуальными.

Цель работы: обеспечение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий путем компенсации токов искажения с применением гибридных параллельных фильтров с системой управления на базе нечеткого вывода (на примере трубогибочного стана УЗТМ-465).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

1. Анализ электроустановок индукционного нагрева как электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками, генерирующих в систему

электрообеспечения промышленных предприятий высшие гармонических составляющие токов и напряжений.

2. Анализ существующих способов компенсации высших гармонических составляющих тока и напряжения для обеспечения электромагнитной совместимости электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками в системах электрообеспечения промышленных предприятий.

3. Экспериментальное исследование гармонического состава напряжения сети и тока в питающей сети электрообеспечения, потребляемого электроустановками индукционного нагрева, для различных технологических процессов гибки труб.

4. Разработка имитационных моделей систем электрообеспечения промышленных предприятий для оценки показателей качества электроэнергии, характеризующих электромагнитную совместимость в системе электрообеспечения электроустановок индукционного нагрева.

5. Обоснование структуры и конфигурации элементов фаззи-регулятора в составе системы управления гибридного параллельного фильтра.

6. Разработка алгоритма формирования массива нечетких правил как структурного элемента фаззи-регулятора в составе системы управления гибридного параллельного фильтра.

7. Сравнительная оценка эффективности использования гибридного параллельного фильтра с разработанной системой управления на базе фаззи-регулятора в системах электрообеспечения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева.

Объектом исследования являются системы электрообеспечения промышленных предприятий с мощными электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками в виде электроустановок индукционного нагрева.

Предметом исследования являются средства обеспечения электромагнитной совместимости в системах электрообеспечения промышленных предприятий.

Методы исследований. При решении поставленных задач были использованы основные положения теории индукционного нагрева, теоретической электротехники, методы расчетов и построения схем замещения систем электрообеспечения, теория вероятностей и математической статистики и теория нечеткого вывода, элементы современной экономической теории. Исследование электромагнитной совместимости в системах электрообеспечения промышленных предприятий проводилось на основе имитационного моделирования с помощью современного программного обеспечения. Для подтверждения оценки электромагнитной совместимости в системах электрообеспечения промышленных предприятий, полученной в результате теоретических исследований, проведены экспериментальные исследования на объекте с помощью поверенных сертифицированных средств измерений.

Научная новизна заключается в том, что впервые:

1. Экспериментально установлен характер изменения напряжений и токов высших гармоник, генерируемых в сеть электроустановкой индукционного нагрева, в зависимости от параметров технологического процесса гибки труб на примере трубогибочного стана УЗТМ-465.

2. Сформирована база нечетких правил для трех входных и одной выходной лингвистических переменных на основании статистического анализа режимов работы электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками электроустановки индукционного нагрева, позволяющая получить выходной сигнал фаззи-регулятора в системе управления активным фильтром.

3. Разработан алгоритм получения задающего сигнала системы управления активной частью гибридного параллельного фильтра, позволяющий реализовать управление переключением ключей инвертора посредством сравнения опорного пилообразного сигнала опорного и выходного сигнала фаззи-регулятора.

4. Обоснована возможность применения гибридного фильтра, состоящего из резонансного пассивного фильтра пятой гармоники и параллельного активного фильтра со свойствами источника несинусоидального тока, для компенсации высших гармоник тока в системе электроснабжения электроустановки индукционного нагрева на примере трубогибочного стана УЗТМ-465.

Практическая значимость:

1. Программно реализован алгоритм определения параметров схемы замещения системы «индуктор – нагреваемое тело» и углов управления выпрямителя и инвертора в составе преобразователя частоты электроустановки индукционного нагрева.

2. Разработана имитационная модель системы электроснабжения электроустановки индукционного нагрева в составе трубогибочного стана УЗТМ-465 с учетом электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

3. Разработанные база правил нечеткого вывода и структура системы управления гибридным параллельным фильтром с применением фаззи-регулятора могут быть использованы в различных отраслях промышленности в системах электроснабжения электроустановок индукционного нагрева для компенсации высших гармоник тока и напряжения.

4. Средствами языка программирования *Pascal* синтезирован нечеткий регулятор, на базе которого осуществляется получение управляющего сигнала в систему управления автономного инвертора напряжения в составе активной части гибридного параллельного фильтра.

Практическая значимость полученных результатов подтверждена свидетельством регистрации программы для ЭВМ (№ 2015613018), актом внедрения в производство соединительных элементов трубопроводов на ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ» (приложение 2 и приложение 3). Результаты научных исследований могут быть использованы в учебном процессе в дисциплинах, читаемых для магистров направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника» специальности 140400.68.04 «Энергосбережение и энергоэффективность».

Реализация результатов работы. Результаты диссертационного исследования приняты к использованию в производстве соединительных элементов трубопроводов на ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ», что подтверждено актом внедрения.

На защиту выносятся положения, составляющие научную новизну работы, а также алгоритм получения управляющего воздействия для гибридного параллельного фильтра на базе нечеткого вывода.

Личный вклад автора. Постановка задач научных исследований и их решение, разработка виртуальной модели узла нагрузки, структуры системы управления гибридным параллельным фильтром и проведение измерений на объекте принадлежат автору. Личный вклад в каждой работе, опубликованной в соавторстве, описывается следующим образом:

[2, 3, 13, 16] – выполнение имитационного моделирования и экспериментальных измерений, анализ полученных результатов;

[1, 5, 7, 11, 12] – обзор литературы по теме статьи, поиск и анализ информации по объекту исследования, разработка методики расчетов;

[4] – разработка программы проведения экспериментальных измерений, анализ полученных результатов.

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается корректным использованием положений теоретической электротехники, теории нечеткого вывода, теории вероятностей и математической статистики и методов расчета и построения схем замещения систем электроснабжения. Экспериментальные исследования проводились с использованием приборов и оборудования, поверенного и сертифицированного для соответствующих измерений.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: II Международной научно-практической конференции «Современная наука: теория и практика», г. Ставрополь, 2011 год; Международной молодежной научной конференции «Поколение будущего: взгляд молодых ученых», г. Курск, 14-20 ноября 2012 г; X Международной научно-практической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации», Курск, 19-23 марта 2013 г; XVI Международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике", г. Санкт-Петербург, 5-6 декабря 2013 г; Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс», г. Губкин, 10 апреля 2014 г; Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергетика и энергоэффективные технологии», г. Белгород, 2014 год; XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство», г. Старый Оскол, 3-5 декабря 2014 г; XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность», г. Томск, 5-7 декабря 2012 г; Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Б.П. Соустина «Управление и информатика в технических системах», г. Красноярск, 15-18 мая 2013 г.

Публикации. По материалам проведенных исследований опубликовано 16 печатных работ, в том числе пять – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получено одно свидетельство Российской Федерации о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа содержит 19 таблиц, 66 рисунков и списка литературы из 91 наименования. Общий объем работы составляет 137 страниц машинописного текста.

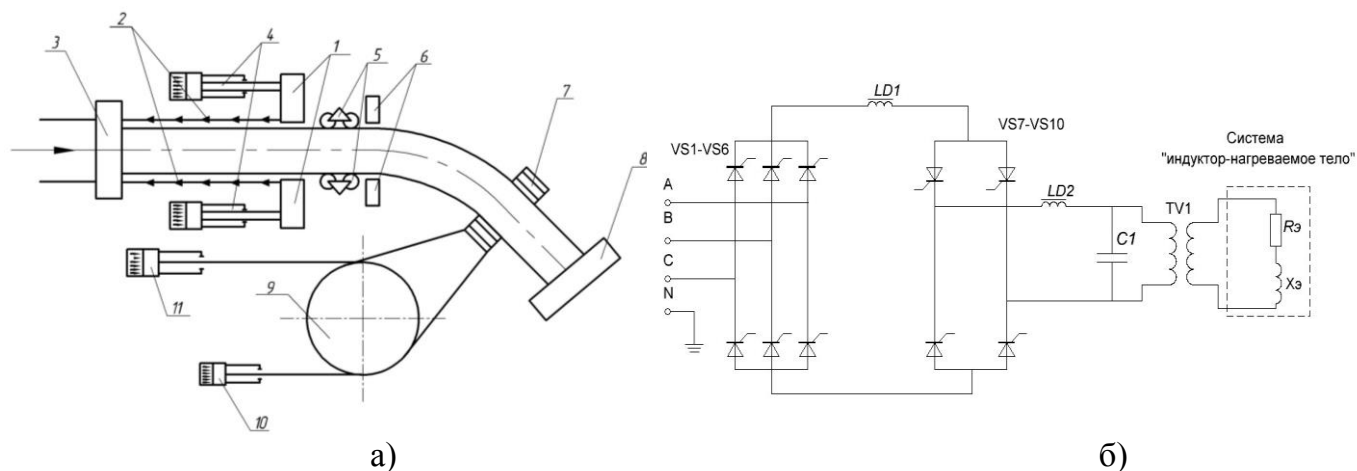
Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность проблемы обеспечения электромагнитной совместимости установок индукционного нагрева, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В первой главе приводится анализ состояния проблемы обеспечения ЭМС нелинейных потребителей в системах электроснабжения промышленных предприятий.

На современных промышленных предприятиях применяются ЭИН, основу которых составляют преобразователи частоты различных конфигураций. В качестве примера рассмотрим трубогибочный стан УЗТМ ТВЧ-465, предназначенный для гибки стальных труб в горизонтальной плоскости с местным нагревом токами высокой частоты и

одновременной осевой осадкой на участке гибки. На рисунке 1 представлены эскизная компоновка трубогибочного стана УЗТМ-465 и принципиальная схема преобразователя частоты с индуктором и нагреваемой трубой. К нелинейным электроприемникам стана относятся тиристорный преобразователь частоты ТПЧ-800 и система электропривода подачи труб, построенная по схеме ТП-Д.



а) – эскизная компоновка трубогибочного стана УЗТМ-465: 1 - траверса механизма продольной подачи; 2 – гребенчатые тяги; 3 – задний упор; 4 – гидроцилиндры продольной подачи (рабочие цилиндры); 5 – направляющие ролики; 6 – электроустановка индукционного нагрева; 7 – гибочная головка; 8 – передний торцевой упор; 9 – водило; 10 – цилиндр холостого хода; 11 – тормозной цилиндр; б) - функциональная схема преобразователя частоты ТПЧ-800: QF₁ - автоматический выключатель; VS₁-VS₆ - выпрямитель; LD₁ – LD₂ - сглаживающий реактор; VS₇ – VS₁₀ - инвертор; C₁ – батарея конденсаторов; R_э, X_э – эквивалентное активное и реактивное сопротивление системы «индуктор – нагреваемое тело»

Рисунок 1. Трубогибочный стан УЗТМ-465

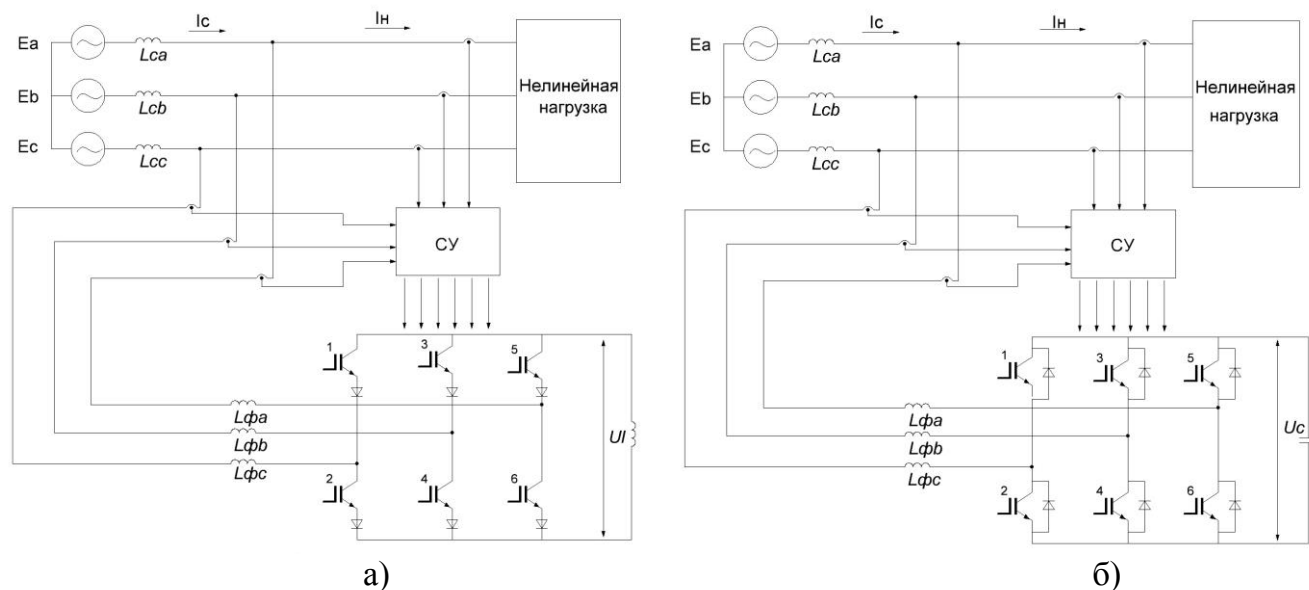
Режим гибки каждой трубы характеризуется следующим набором технологических параметров: угол гiba с диапазоном изменения 10÷90 градусов, радиус гiba с диапазоном изменения 375÷1000 мм, наружные диаметры трубы с диапазоном изменения 219÷465 мм, температура нагрева с диапазоном изменения 940÷1050 °С и толщина стенки трубы с диапазоном изменения 13÷32 мм. Каждому режиму гiba соответствует строго определенное значение мощности нагрева для обеспечения требуемых показателей качества изогнутой трубы. При этом в процессе гiba труб в зависимости от марки стали и радиуса гiba изменяется скорость подачи. Изменение скорости подачи осуществляется электроприводом постоянного тока, который также является электроприемником с нелинейной вольт-амперной характеристикой и генератором высших гармоник в питающую сеть.

Изменение мощности нагрева в широком диапазоне обуславливает необходимость установки соответствующих углов управления выпрямителем и инвертором в составе ТПЧ-800. От режимов работы индуктора зависит уровень гармонических составляющих тока в системе электроснабжения узла нагрузки с электроустановкой индукционного нагрева.

Способы снижения уровня гармоник тока и напряжения можно разделить на три группы: схемные решения; применение специального оборудования, характеризующегося пониженным уровнем генерации высших гармоник; использование фильтрокомпенсирующих устройств.

В условия большого диапазона изменения потребляемой мощности нагрузки установки индукционного нагрева оправданным является использование гибридных фильтров. Основным признаком, по которому классифицируют активные части

гибридных фильтров, является тип используемого пассивного накопителя. При параллельном подключении к питающей сети и использовании емкостного накопителя он представляет собой источник несинусоидального тока и используется для компенсации гармоник тока, потребляемого нелинейным потребителем. При параллельном подключении к питающей сети и использовании индуктивного накопителя он представляет собой источник несинусоидального напряжения и используется для снижения влияния гармоник напряжения на потребители, подключенные после себя. Принципиальные электрические схемы активных частей гибридных параллельных фильтров с емкостным и индуктивным накопителем представлены на рисунке 2.



а) с индуктивным накопителем; б) с емкостным накопителем

Рисунок 2. Принципиальные электрические схемы активной части ГПФ

Исходя из вышесказанного, целью последующих исследований является научное обоснование структуры ГПФ с системой управления на базе нечеткого вывода для обеспечения ЭМС в СЭПП с ЭИН.

Во второй главе проведена оценка уровня высших гармоник тока и напряжения в СЭПП с ЭИН экспериментальным путем, посредством имитационного моделирования в пакете Matlab и аналитическими расчетами.

Измерения активной и реактивной потребляемой мощности, показателей электромагнитной совместимости проводились на высокой стороне цехового понижающего трансформатора ТМЗ-1000/10 (точка И1) и на входе преобразователя частоты установки индукционного нагрева (точка И2) приборами «Энергомонитор - 3.3Т1» и *Chavin Arnoux CA8335* (рисунок 3).

Измерения проводились по программе, соответствующей стандартам и отраслевым рекомендациям, непрерывно в течение 24 ч ежедневно в течение недели. Результаты измерений оформлены в виде протоколов, содержащих таблицы и осциллограммы и утвержденных главным специалистом предприятия.

На рисунке 4 представлен график изменения суммарного коэффициента гармонических составляющих по току (K_I) от времени, из которого следует, что K_I изменяется в пределах от 25% до 31% и не зависит от технологического процесса гнба труб. Тем не менее уровень гармоник тока изменяется в широких пределах.

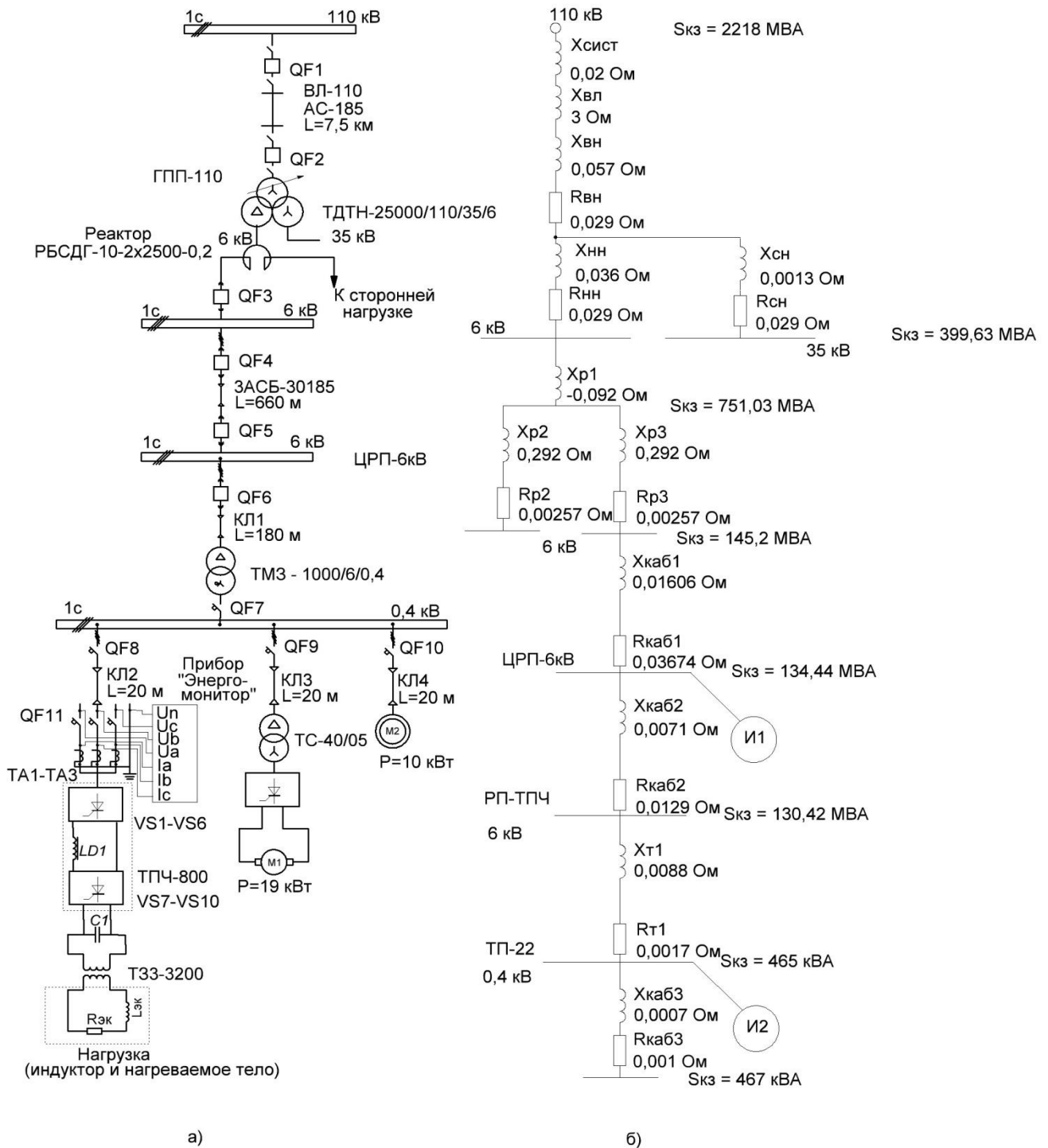


Рисунок. 3. Однолинейная схема электроснабжения и схема замещения потребителей стана УЗТМ-465

Для построения виртуальной модели узла нагрузки в СЭПП с ЭИН рассчитаны параметры схемы замещения системы «индуктор – нагреваемая труба». С этой целью разработана методика определения электрических параметров схемы замещения «индуктор – нагреваемое тело» для установки связи между углами управления выпрямителя и инвертора (α и β) от параметров нагреваемой трубы. Результатом разработанной методики расчета является эквивалентное активное и индуктивное сопротивление Т-образной схемы замещения системы «индуктор – нагреваемое тело».

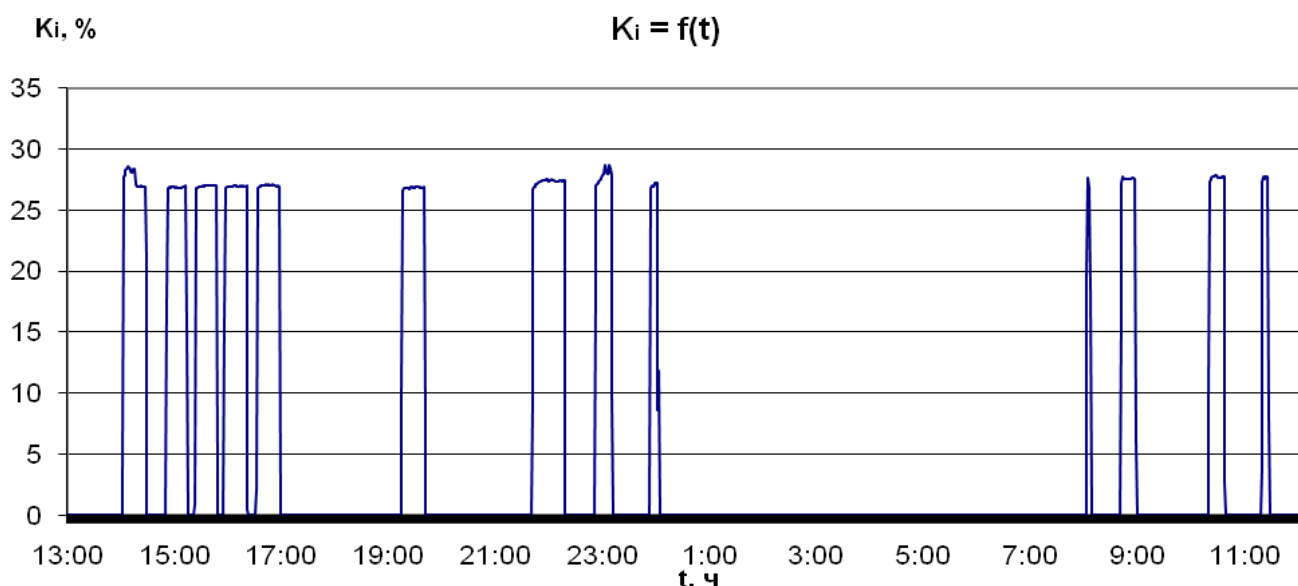
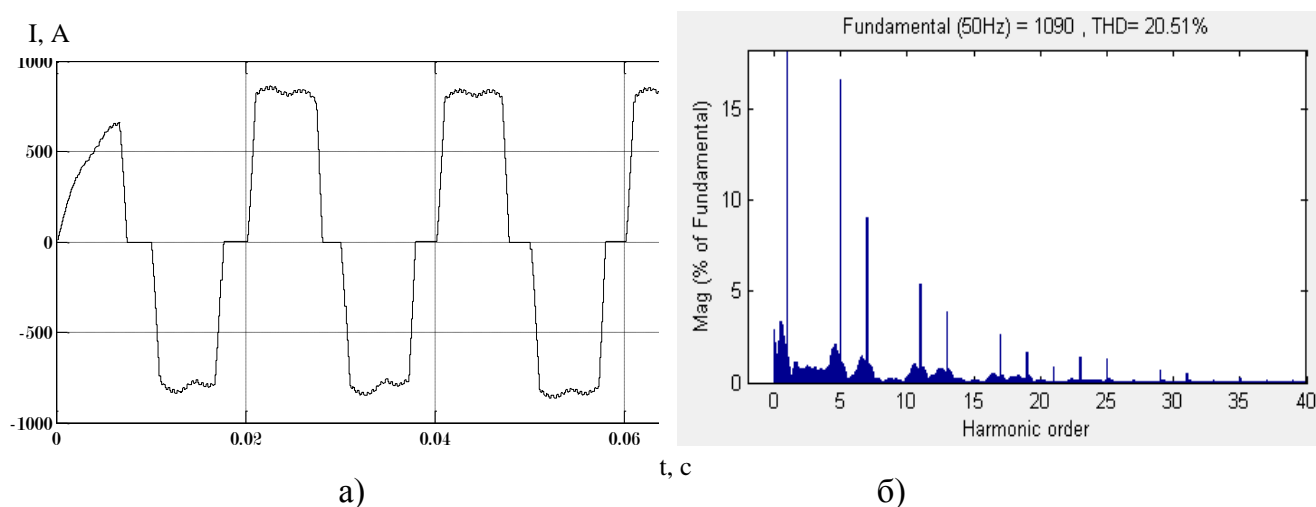


Рисунок 4. Суточная зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих по току (K_i)

Разработана виртуальная модель узла нагрузки СЭПП с ЭИН в пакете *Matlab Simulink* для оценки ЭМС без использования фильтрокомпенсирующих устройств. Виртуальная модель с добавлением ГПФ представлена в главе 4. В качестве примера на рисунке 5 представлена осциллограмма кривой тока и спектр гармоник на низкой стороне понижающего трансформатора ТМЗ – 1000/10/0,4 при гйбе трубы с внешним диаметром 219 мм и толщиной стенки 13 мм.



а) – осциллограмма кривой потребляемого тока на низкой стороне понижающего трансформатора ТМЗ-1000/10; б) – спектр гармоник потребляемого тока на низкой стороне понижающего трансформатора ТМЗ-1000/10.

Рисунок 5. Результат моделирования тока в СЭПП с ЭИН

Как следует из рисунка 5, суммарный коэффициент гармонических составляющих по току $THD=30,37\%$, что свидетельствует о высоком уровне гармоник тока в СЭПП с ЭИН.

Расчетное значение суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению определяется по формуле:

$$K_U = \frac{S_{np}}{S_{кз}} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sin \varphi}{\pi \cdot \left(\frac{S_{np}}{S_{кз}} + x_{np} \right)} - \frac{9}{\pi^2}}, \quad (1)$$

где x_{np} – реактивное сопротивление преобразователя частоты, которое определяется по формуле $x_{np} = \frac{U_k \cdot S_{np}}{S_{mp} \cdot 100}$, S_{np} – полная мощность преобразователя частоты, S_{mp} – полная мощность понижающего трансформатора, U_k – напряжение короткого замыкания понижающего трансформатора, $\cos \varphi = 0,9$, $S_{кз}$ – мощность короткого замыкания в точке подключения преобразователя частоты. Результаты моделирования, измерений и расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Значения параметров энергопотребления СЭП с ЭИН

Размеры трубы (DxS, мм)	Значения параметров, полученные в результате:							
	измерений/ моделирования							расчетов
	U_L , В	$I_A(1)$, А	P , кВт	Q , квар	k_U , %	k_I , %	k_M	k_U , %
219x13	397/	720/	273/	390/	11,5/	30,5/	0,6/	17,2
	365	660	394	530	24,5	36	0,596	
273x24	397/	729/	366/	339/	9,4/	28/	0,73/	17,5
	376	683	442	548	22,7	37	0,63	
325x38	397/	777/	438/	408/	6,5/	27,7/	0,88/	18,8
	363	723	553	423	20,7	37	0,79	
426x19	396/	612/	381/	165/	4,8/	28/	0,95/	14,8
	370	610	341	206	26,3	34	0,86	
530x25	396/	651/	429/	131/	5/	28/	0,95/	15,7
	378	637	410	163	25,4	36	0,93	

Анализ таблицы 1 показывает, что суммарный коэффициент гармонических составляющих по току практически постоянен, а суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению заметно снижается для больших труб. Это объясняется меньшим зазором между индуктором и нагреваемой трубой. Разница в результатах измерений и моделирования суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения объясняется более низкой чувствительностью измерительного прибора по сравнению с шагом дискретизации в модели *Matlab Simulink* и сглаживающим действием реактора LD_1 в звене постоянного тока. Таким образом, в результате технологического процесса гнба труб в установке индукционного нагрева уровень гармоник тока и напряжения превышает значения установленные стандартом ($K_U=9,4\%-11,5\%$ и $K_I=27,7\%-30,5\%$). Для повышения уровня ЭМС в СЭП с ЭИН целесообразно использовать ГПФ.

В третьей главе разрабатывается и обосновывается структура системы управления ГПФ на базе нечеткого вывода. Применение теории нечеткого вывода для получения управляющего сигнала активной части гибридного фильтра обусловлено рядом факторов: ЭИН является потребителем с переменной нагрузкой, изменяющейся в широком диапазоне; в узле нагрузки с ЭИН присутствует второй нелинейный потребитель (электропривод по системе ТП-Д), и компенсация их взаимного влияния на ЭМС сети на основе известных методов формирования управляющего сигнала не

представляется возможным; на уровень высших гармоник, генерируемых ЭИН в питающую сеть, оказывают множество параметров технологического процесса гибки труб (размеры трубы, скорость подачи трубы, ширина индуктора, емкость батареи конденсаторов и т.д.).

Принимаем три входных лингвистических переменных, образующих входной вектор $\beta = [\beta_1, \beta_2, \beta_3]$, и одну выходную лингвистическую переменную β_4 , где β_1 – разность между током задания ЭИН и током фильтра, β_2 – производная тока задания ЭИН, β_3 – ток задания для регулируемого электропривода по системе ТП-Д и выходная переменная β_4 – значение управляющего сигнала в системе управления АИН с ШИМ.

Лингвистические переменные описываются следующими нечеткими терминами: очень большая отрицательная (*NVB*), большая отрицательная (*NB*), малая отрицательная (*NS*), ноль (*Z*), большая положительная (*PB*), малая положительная (*PS*), очень большая положительная (*P7B*), очень низкий (*VL*), низкий (*L*), достаточно низкий (*EL*), достаточно высокий (*EH*), очень высокий (*VH*), средний (*M*), высокий (*H*).

На рисунке 7 представлены функции принадлежности входных и выходных лингвистических переменных. Нечеткие термы лингвистических переменных найдены методом построения функций принадлежности лингвистических термов на основании статистических данных. В результате построена таблица 2 преобразованных статистических данных расчета и график функций принадлежности термов лингвистической переменной β_2 , представленный на рисунке 6.

Таблица 2.

Преобразованные статистические данные расчета переменной β_2

Лингвистический терм	Преобразованные значения v_{ij}							Макс. элемент в строке v_{imax}
	$(-4 \cdot 10^6; -10^6)$	$(-10^6; -0,6 \cdot 10^6)$	$(-0,6 \cdot 10^6; -0,2 \cdot 10^6)$	$(-0,2 \cdot 10^6; 0,2 \cdot 10^6)$	$(0,2 \cdot 10^6; 0,6 \cdot 10^6)$	$(0,6 \cdot 10^6; 10^6)$	$(10^6; 4 \cdot 10^6)$	
NB	12,3	0	0	0	0	0	0	12,3
NS	18,5	10,6	9,25	0	0	0	0	18,5
ZE	6,17	26,4	27,75	37	25,4	18,5	15,9	37
PS	0	0	0	0	11,6	18,5	10,6	18,5
PB	0	0	0	0	0	0	10,6	10,6

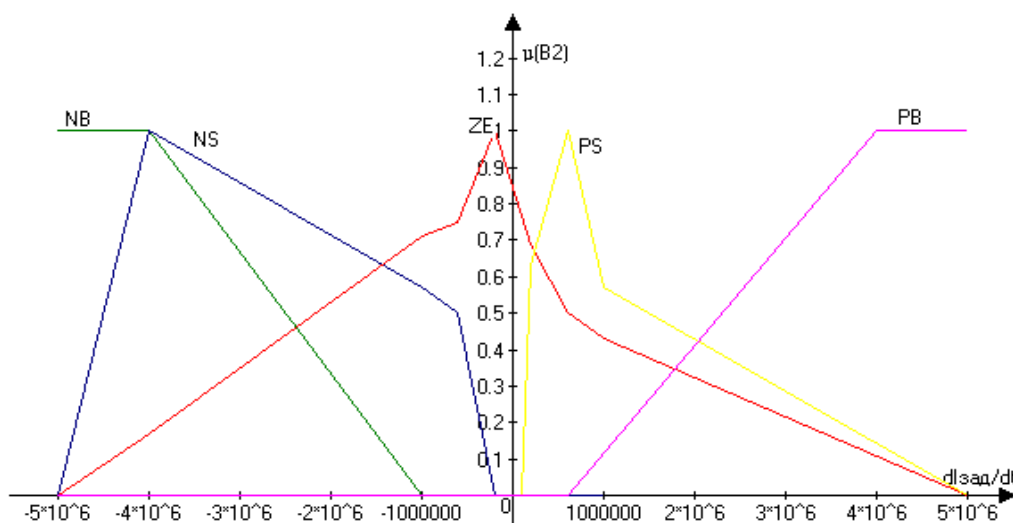


Рисунок 6. ФП лингвистической переменной β_2 .

Значения функций принадлежности вычисляются по формуле:

$$\mu_{ij} = \frac{U_{ij}}{U_{i\max}}. \quad (2)$$

В качестве метода нечеткого вывода при работе с базой правил применен алгоритм нечеткого вывода Мамдани, вид функций принадлежности нечетких лингвистических переменных принят в виде треугольников и трапеций и обоснован статистическими расчетами.

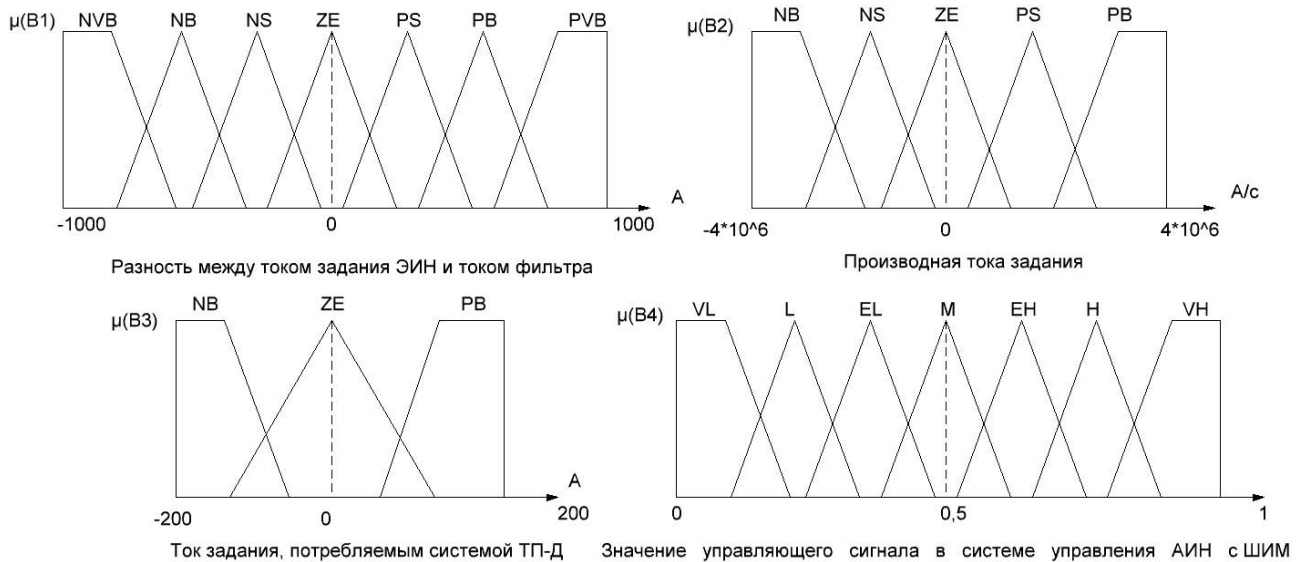


Рисунок 7. Функции принадлежности входных и выходной лингвистических переменных

В процессе фаззификации для каждого из подусловий базы нечетких правил « $G_j = a_{ji}$ » находятся степени истинности соответствующих высказываний по формулам:

$$b_{ij} = \mu_{a_{ij}}(G_j), \quad (3)$$

где $i = 1 \div n$, $n = 45$ – количество правил системы нечеткого вывода, $j = 1 \div k$, $k = 3$ – количество входных лингвистических переменных, $\mu_{a_{ij}}(\beta_k)$ – ФП терма входной нечеткой лингвистической переменной β_k .

Дефаззификация выходной переменной β_4 осуществляется с помощью метода центра площади из уравнения:

$$\int_{Min}^u \mu(\beta_4) d\beta_4 = \int_u^{Max} \mu(\beta_4) d\beta_4, \quad (4)$$

где Min и Max – левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества лингвистической переменной β_4 , u – результат дефаззификации.

Для системы управления фильтра составлены 45 правил нечеткой продукции, полученных в результате измерений и опыта эксплуатации установки индукционного нагрева. Все правила используются с весовым коэффициентом $k_6 = 1$.

В качестве примера приведем характерное правило нечеткого вывода.

ЕСЛИ $\beta_1 = NVB$ И $\beta_2 = ZE$ И $\beta_3 = NB$ ТО $\beta_4 = L$

Оно может быть интерпретировано на естественном языке следующим образом: если производная тока задания β_1 – «очень большая отрицательная» (NVB – *Negative Big*) и величина рассогласования между током задания и током фильтра β_2 – «ноль» (ZE – *Zero*) и ток задания регулируемого электропривода по системе ТП-Д, β_3 – «большой отрицательный» (NB – *Negative Big*), то значение управляющего сигнала в системе управления инвертором β_4 – «очень низкое» (VL – *Low*).

Результат расчета сигнала управления на основании нечеткого вывода проиллюстрирован на примере: производная тока искажения $\beta_1 = -1,44 \cdot 10^6$ – это свидетельствует о том, что ток задания носит быстро возрастающий характер; $\beta_2 = -199$ – ток фильтра больше, чем ток задания; $\beta_3 = 33,8$ – значения тока задания системы электропривода ТП-Д. В результате процесса нечеткого вывода получили, что $\beta_4 = 0,38$ – сигнал управления, подающий импульсы на силовые ключи фильтра и определяющий продолжительность их включения.

Для общего анализа разработанной нечеткой модели СУ АФ полезна визуализация соответствующей поверхности нечеткого вывода (рисунок 8).

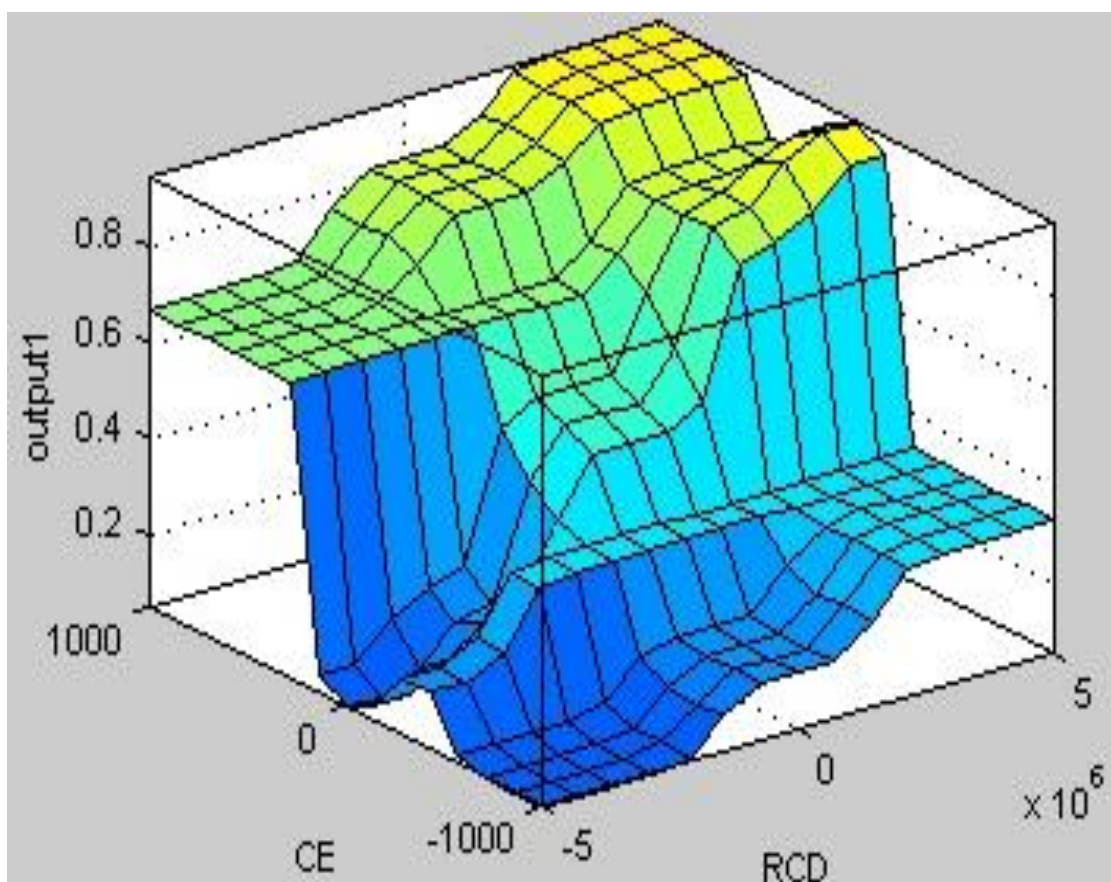


Рисунок 8. Поверхность нечеткого вывода

Следовательно, использование нечеткой продукции, что составляет ядро активной части гибридного фильтра (фаззи-регулятор), позволило получить сигналы управления для регулирования выходного тока, компенсирующего ток искажения в зависимости от технологического процесса гнба труб.

В четвертой главе построена система управления ГПФ на базе нечеткого вывода для компенсации высших гармоник тока и напряжения в узле нагрузки СЭПП с ЭИН.

Схема подключения ГПФ к питающей сети трубогибочного стана представлена на рисунке 9.

Согласование ГПФ с сетью осуществляется через дроссель. Для уменьшения установленной мощности ГПФ применяется пассивный фильтр, настроенный на пятую гармонику тока. В отличие от стандартной системы управления в данной схеме используются датчики тока только по одной фазе. В качестве активной части фильтра принят стандартный фильтр Comsys ADF P300 мощностью 140 кВА на линейное напряжение 380 В с емкостным накопителем, обеспечивающий ток искажения до 200 А.

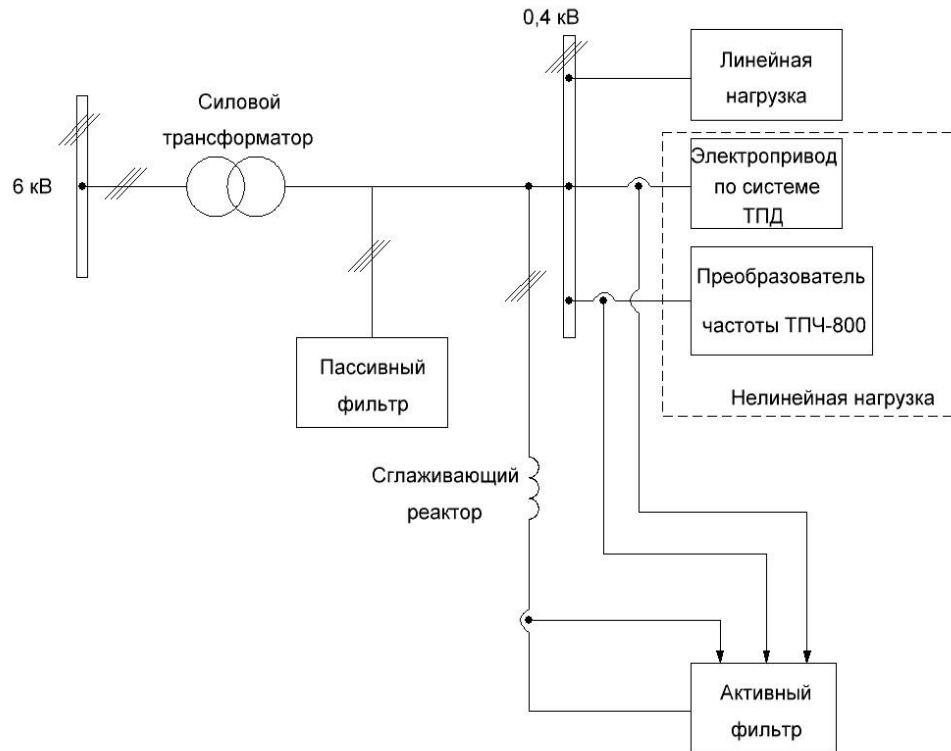


Рисунок 9. Схема подключения ГПФ к питающей сети трубогибочного стана
Мощность активного фильтра определяется следующим образом:

$$S_{A\Phi} = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot U_L, \quad (5)$$

где I_n' – ток искажения без учета тока пятой гармоники, U_L – линейное напряжение сети.

Таким образом, мощность ГПФ, принятого к установке, позволяет скомпенсировать суммарную мощность искажения и реактивную мощность преобразователя нелинейной нагрузки в самом неблагоприятном режиме работы.

На рисунке 10 представлена имитационная модель узла нагрузки СЭПП с ЭИН в пакете *Matlab Simulink* с применением ГПФ. Моделирование проведено на основе реального объекта исследования – трубогибочного стана УЗТМ-465. Модель состоит из следующих блоков: источник трехфазного напряжения 110 кВ, трехфазный трансформатор ТДТН-25000/110, высоковольтная линия электропередачи, трансформатор ТМЗ-1000/10, ГПФ с системой управления на базе нечеткого вывода, ЭИН, линейная нагрузка в виде асинхронных электроприводов, трансформатор ТС-40/05 с электроприводом по системе ТП-Д. Спектры гармоник тока и напряжения в различных точках виртуальной модели получены благодаря использованию блока *Powergui*.

На рисунке 11 приведены осциллограммы напряжения сети (а), тока сети (б), тока, потребляемого активным фильтром, (в) и тока нагрузки по фазе А (г). Как следует из осциллограмм, ток и напряжения в сети практически синусоидальны. При этом суммарный коэффициент гармонических составляющих по току и напряжению не превышает 6%.

Для реализации проекта установки предлагаемого ГПФ необходимо осуществить капитальные затраты в размере 1461 тыс. руб. Расчетный срок окупаемости проекта составляет 4,86 лет.

В приложении представлены оригиналы протоколов и программы проведения измерений, акт о внедрении результатов диссертационного исследования, а также листинги разработанного программного обеспечения.

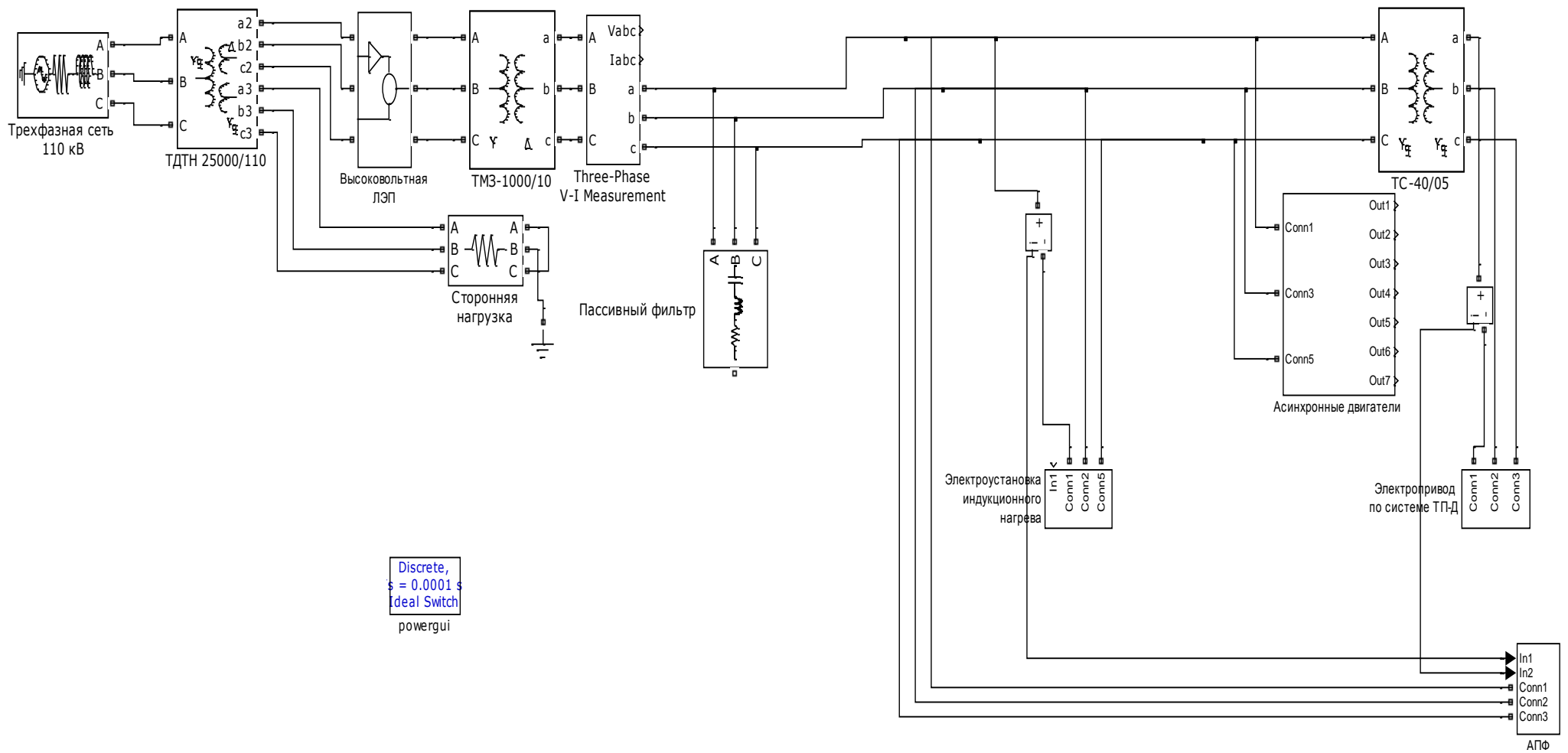


Рисунок 10. Имитационная модель СЭПП с ЭИН с подключенным ГПФ с системой управления на базе фаззи-регулятора в среде Matlab

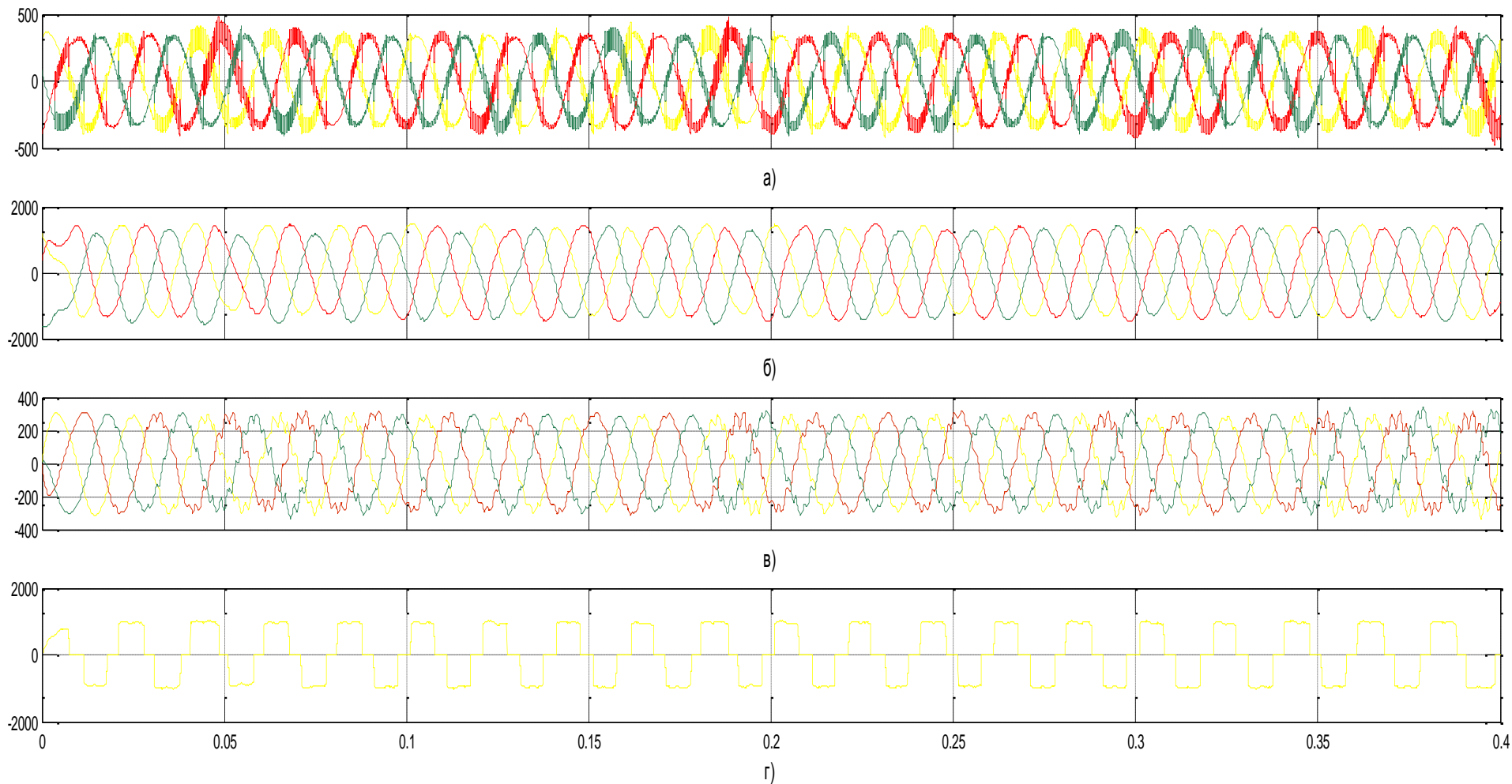


Рисунок 11. Осциллограммы напряжения сети (а), тока сети (б), тока, потребляемого активным фильтром, (в) и тока нагрузки по фазе А (г)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Электроустановки индукционного нагрева являются мощными электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками, генерирующими высшие гармоники тока и напряжения в питающую сеть. При этом уровень гармоник тока зависит от технологических параметров процесса нагрева: температура, размеры и скорость подачи заготовок, и меняется в широком диапазоне. В этих условиях для компенсации генерируемых высших гармонических составляющих наиболее эффективно использовать гибридные или активные фильтрокомпенсирующие устройства, обладающие свойствами несинусоидального источника тока.

2. Экспериментально подтверждено наличие высших гармонических составляющих тока и напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева. Установлено, что на низкой стороне понижающего трансформатора 6/0,4 кВ суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению находится в диапазоне 5-12 %, а суммарный коэффициент гармонических составляющих по току составляет 25-30%. Значение тока нагрузки при этом меняется в диапазоне 639 А – 819 А.

3. Разработанная имитационная модель системы электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева в пакете *Matlab Simulink* позволила оценить уровень высших гармоник тока, генерируемого в сеть, для различных режимов гибки труб. Результаты оценки уровня высших гармоник тока посредством имитационного моделирования коррелируются с результатами экспериментальных измерений.

4. Научно обосновано, что при изменяющихся режимах технологического процесса гибки труб эффективно применение системы нечеткого вывода для формирования фаззи-регулятора управляющего сигнала для активной части гибридного фильтра. Синтезирован фаззи-регулятор с тремя входными и одной выходной переменной. На основе статистических данных получена форма функций принадлежности для входных и выходных лингвистических переменных.

5. Сформирован алгоритм составления правил нечеткого вывода для построения фаззи – регулятора в системе управления гибридного параллельного фильтра. Предлагаемый фаззи-регулятор синтезирован в пакете *Fuzzy Logic Toolbox* среды *Matlab*, а также программно реализован на языке *Pascal*.

6. Обосновано применение параллельных гибридных фильтров для компенсации высших гармонических составляющих тока и напряжения в качестве эффективного технического решения обеспечения нормативного уровня электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева. Установлено, что применение предлагаемого гибридного параллельного фильтра с системой управления на базе нечеткого вывода позволяет решать проблемы повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева более эффективно, чем использование гибридного фильтра с уже известной системой управления.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в электроустановках промышленных предприятий / М. А. Авербух, В. А. Кузнецов, Д. Н. Коржов, А. А.

Коробкин, Д. С. Лимаров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. Транспорт и энергетика. – 2013. - №5 (36). – С. 203-208. – ISSN 2071-7318.

2. Анализ электродинамических процессов и электромагнитной совместимости частотного электропривода в пакете Matlab 7.12 / М.А. Авербух, Я.В. Лескина, **Д.Н. Коржов**, А.В. Чередников // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2014. - №4 (105). - С. 57-62. – ISSN 0136-3360.

3. Экспериментальная оценка уровня высших гармоник в схеме электроснабжения трубогибочного стана УЗТМ-465 / М. А. Авербух, **Д.Н. Коржов**, Д. С. Лимаров // – Промышленная энергетика. Качество электроэнергии. – 2015. - №1 (138). - С. 48-54. – ISSN 0033-1155.

4. Оценка высших гармоник в сетях с частотным крановым электроприводом / М. А. Авербух, **Д.Н. Коржов**, Д. С. Лимаров // – Энергетик. – 2015. - №5. - С. 48-54. – ISSN 0013-7278.

5. Гибридный фильтр в системах электроснабжения промышленных предприятий с установками индукционного нагрева / М. А. Авербух, **Д.Н. Коржов** // - Научное обозрение: теория и практика. – 2015. - №3. – С. 200-203. - ISSN 2226-0226.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613018 Расчет углов управления преобразователя частоты установки индукционного нагрева стальных труб / **Д.Н. Коржов**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – 2015610483; заявл. 03.02.15; опубл. 02.03.2015.

В других изданиях:

7. Особенности электромагнитной совместимости в распределительных сетях напряжением 6 кВ / М. А. Авербух, **Д.Н. Коржов** // Современная наука: теория и практика: материалы II Международной научно-практической конференции / под ред. Б. М. Синельникова. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2011. – С. 154-158.

8. Влияние процесса коммутации в автономном инверторе тока на гармонический состав тока и напряжения/ **Д.Н. Коржов** // Поколение будущего: взгляд молодых ученых: материалы Международной молодежной научной конференции / под ред. Горохова А. А. – Курск: ЮЗГУ, 2012. - Т. 3. – С. 231-235.

9. Анализ режимов работы преобразователя частоты ТПЧ-800 в составе трубогибочного стана УЗТМ-465 как нелинейного потребителя / **Д.Н. Коржов** // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: ТПУ, 2012. – С. 24-27.

10. Особенности моделирования динамических процессов в установке индукционного нагрева при помощи программного пакета Matlab 7 / **Д.Н. Коржов**// Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы X Международной научно-практической конференции / под ред. Горохова А. А. – Курск: ЮЗГУ, 2013. – С. 142-148.

11. Оценка электрических параметров нагрузки установки высокочастотного индукционного нагрева/ М. А. Авербух, **Д.Н. Коржов** // Управление и информатика в технических системах: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Б.П. Соустина / составитель С. В. Ченцов. – Красноярск: ИКИТ СФУ, 2013. – С. 64-68.

12. Основные особенности обеспечения электромагнитной и электромеханической совместимости в электроустановках промышленных предприятий / М. А. Авербух, **Д.Н.**

Коржов, А. А. Пацев, Д. С. Лимаров // Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике: материалы XVI международной научно-практической конференции / научный редактор А. П. Кудинов. – СПб: Политехнический университет, 2013. – С. 163 – 173.

13. Особенности протекания электроэнергетических процессов при гибке труб с применением индукционного нагрева / М. А. Авербух, **Д.Н. Коржов** // Молодежь и научно-технический прогресс: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / составители Т. С. Таничева, М. В. Уваров и др. – Губкин: ООО «Ассистент плюс», 2014. – Т. 1. – С. 78 – 81.

14. Методика определения электрических параметров индуктора и нагреваемого тела как нагрузки преобразователя частоты / **Д.Н. Коржов** // Научный аспект. – 2013. - №4. - С. 167-173. – ISSN 2226-5694.

15. Измерение показателей качества электроэнергии в промышленных сетях с нелинейными потребителями. / **Д.Н. Коржов** // Энергетика и энергоэффективные технологии: межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2014.

16. Особенности использования активного фильтра в узле нагрузки с нелинейным потребителем трубогибочного стана / М. А. Авербух, **Д.Н. Коржов**, Д. С. Лимаров // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / редколлегия Г. С. Подгородецкий, Ю. И. Еременко и др. - Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 2014. – Т. 2. – С. 133-138.

Подписано в печать 24.09.2015 г. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46