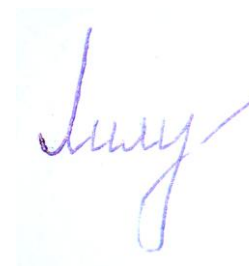


На правах рукописи



ЛИМАРОВ ДЕНИС СЕРГЕЕВИЧ

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЦЕХОВЫХ
СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ
ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ С НЕЛИНЕЙНЫМИ
ВОЛЬТ-АМПЕРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

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 **Горелов Валерий Павлович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет водного транспорта», кафедра «Электроэнергетические системы и электротехника», профессор

Боярская Наталия Петровна, кандидат технических наук, доцент, и. о. доцента кафедры теоретических основ электротехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Красноярский государственный аграрный университет".

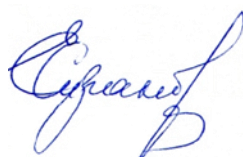
Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «16» декабря 2015 г., в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660049 г. Красноярск, ул. Ленина, д. 70, ауд. А-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. На современных промышленных предприятиях Российской Федерации к общей шине цеховых систем электроснабжения подключается значительное число электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Это регулируемый электропривод динамических нагнетателей, металлорежущих станков, крановых механизмов. Так как электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками могут работать при различных режимах, так например, крановые механизмы. То характерной особенностью таких электроприемников является резкопеременный режим работы, обусловленный возможностью одновременной работы трех основных механизмов крана: подъем – спуск груза, перемещение тали и перемещение крана. Это обстоятельство приводит к тому, что преобладают переходные режимы, которые могут составлять до 60 % одного цикла работы крановых механизмов. Так как в основе регулируемого электропривода лежит принцип преобразования электроэнергии, за счет использования статических преобразователей, то такие установки являются электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками, а значит генераторами высших гармоник напряжения и тока в питающую систему электроснабжения. В связи с этим возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) электроприемников с питающей сетью и возможное нарушение работы других электроприемников, подключенных к общей шине цеховой системы электроснабжения.

Проблема ЭМС широко освещена в работах отечественных и зарубежных ученых, таких как: Арриллага Дж., Бадер М.П., Вагин Г.Я., Жежеленко И.В., Железко Ю.С. и др. Авторы устанавливают природу возникновения высших гармонических составляющих на сеть, а также предлагают методы и средства их компенсации. Однако во всех работах рассматриваются стационарные режимы работы нелинейных электроприемников и не учитывается резкопеременный характер нагрузки.

В связи с этим, исследования, проводимые для обеспечения ЭМС в цеховых системах электроснабжения, где применяются электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками, работающие в динамических режимах, являются актуальными.

Цель работы. Обеспечение электромагнитной совместимости электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками в цеховой системе электроснабжения за счёт использования активных фильтров гармоник (АФГ) с системой управления на базе нечеткой логики.

Для достижения цели работы требуется решить следующие **основные задачи:**

1. Выполнить анализ гармонического состава напряжений и токов в узле нагрузки цеховой системы электроснабжения электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками и различных способов компенсации высших гармонических составляющих на примере системы электроснабжения мостовых кранов.

2. Экспериментально исследовать гармонический состав напряжений и токов, генерируемых в сеть электроприёмниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками при динамических режимах работы на примере системы электроснабжения мостовых кранов.

3. Разработать имитационную модель цеховой системы электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками (на примере мостового крана), для оценки электромагнитной совместимости в узле нагрузки цеховой системы электроснабжения.

4. Разработать систему управления активным параллельным фильтром гармоник на базе нечеткой логики, в том числе базы нечетких правил для формирования сигнала управления фаззи – регулятором.

5. Провести оценку эффективности применения разработанного активного фильтра и правильности выбора системы управления на базе нечеткой логики для управления регулятором.

Объект исследования. Цеховая система электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками на примере системы электроснабжения мостовых кранов.

Предмет исследования. Методы и средства обеспечения электромагнитной совместимости при работе электроприёмников с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

Методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы методы анализа систем электроснабжения, гармонического анализа, основные положения теоретической электротехники, теории нечетких множеств и теории вероятностей и математической статистики. Проведены исследования ЭМС электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками на примере системы электроснабжения мостовых кранов с помощью имитационной модели с использованием современного прикладного программного обеспечения .

Научная новизна заключается в том, что впервые:

1. Установлены уровни высших гармонических составляющих напряжений и токов, генерируемых в цеховую систему электроснабжения, в зависимости от динамических режимов работы электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками на примере системы электроснабжения мостовых кранов.

2. Доказана возможность применения нечетких множеств для формирования алгоритма управления АФГ при динамических режимах работы электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

3. Разработана база правил нечеткого вывода и определены параметры терм на основе экспертных оценок и статического анализа для формирования системы управления АФГ.

4. Разработан алгоритм, для проектирования фаззи-регуляторов, применяемых в системах управления активным фильтром гармоник (АФГ) на базе нечеткой логики.

Практическая значимость. Разработан комплексный подход к обеспечению ЭМС в соответствии требований ГОСТ 32144-2013 для цеховой системы электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками. При работе таких электроприемников большую часть времени рабочего цикла составляют переходные режимы. Обеспечение ЭМС в этом случае достигается за счет применения АФГ с системой управления на базе нечеткого вывода, которая позволяет улучшить качество напряжения и снизить энергозатраты потребления электрической энергии в

отраслях промышленности, где применяются различные электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками крановых механизмов.

Реализация результатов работы. Разработанная модель АФГ, построенная на базе нечеткого вывода, предложена для внедрения в систему электроснабжения мостового однобалочного крана «ООО Цитробел» г. Белгорода, грузоподъемностью 15 тонн и результаты внедрения подтверждаются актом. Результаты работы, также использованы в учебном процессе энергетического института БГТУ им. В.Г. Шухова в курсах «Силовая электроника» и «Качество электроэнергии».

На защиту выносятся положения, составляющие научную новизну выполненной работы, которая позволяет обеспечить ЭМС электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками и цеховой системы электроснабжения, за счет использования АФГ с системой управления на базе нечеткой логики на примере системы электроснабжения мостовых кранов.

Достоверность результатов. Эксперименты на исследуемом объекте проводились с помощью приборов, сертифицированных и поверенных для соответствующих измерений. Достоверность результатов научных исследований подтверждается корректным проведением экспериментов на мостовом однобалочном кране, совместно с инженерно-техническим персоналом энергетической службы предприятия и в соответствии установленной программы для проведения измерений показателей качества электроэнергии. Также стоит отметить, что все теоретические результаты получены на основании теории вероятности и математической статистики, методов построения и расчета схем замещения, теоретической электротехники и теории нечеткого вывода.

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.; III Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития», Курск, 29 июня 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.; II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом», г. Новосибирск, февраль 2015 г.; 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.

Публикации. По материалам проведенных исследований опубликовано 15 печатных работ, в том числе четыре – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора. Постановка и решение задач исследования, разработка имитационной модели узла нагрузки, системы управления АФГ, проведение экспериментов на реальном объекте принадлежат автору. Вклад в опубликованных работах, написанных в соавторстве в изданиях рекомендованных ВАК РФ: в 1 статье – проведено освещение проблемы ЭМС при работе частотно-регулируемых электроприводов механизмов кранов и предложены различные методы решения этой проблемы; во 2 статье – участие в проведении экспериментов и анализа результатов; в 3 статье – описание проведенных экспериментов для оценки качества электроэнергии, разработка и описание работы имитационной модели; в 4 статье – представлено построение нечеткого регулятора в системе управления активным фильтром для компенсации высших гармоник генерируемых в цеховую систему электроснабжения нелинейными электроприемниками на примере частотных электроприводов мостового крана.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 19 таблиц, 75 рисунков и список литературы из 88 наименований. Общий объем работы составляет 135 страниц машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цели и задачи диссертации, обоснована актуальность проблемы электромагнитной совместимости в цеховой системе электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

В первой главе проводится описание проблемы обеспечения ЭМС для различных электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Вопросам улучшения качества электроэнергии посвящены труды таких специалистов как Абрамович Б.Н., Арриллага Дж., Вагин Г.Я., Войнов С.Л., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Кузнецов В.Г., Хабигер Г.Я., Шидловский А.К., Шваб А. и др.

Стоит отметить, что работы Вагина Г.Я., Кузнецова В.Г., Хабигера Г.Я., Шваба А. рассматривают виды помех в системах электроснабжения, влияние помех на потребителей, системы защит и автоматики, а также связь между источниками и приемниками электромагнитного излучения. Соответственно задачей обеспечения ЭМС – это удовлетворительная работа приборов и оборудования в заданном окружении, не создавая при этом электромагнитных помех для других устройств.

Труды Арриллага Дж., Войнова С.Л., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Шидловского А.К. позволяют разобраться в причинах возникновения высших гармоник в системах электроснабжения, а также в методах их подавления и моделировании этих процессов.

Более детально методы подавления высших гармонических составляющих напряжений и токов, основным из которых является применение фильтрокомпенсирующих устройств и разработки систем управления АФГ представлены в диссертационных работах Боярской Н.П., Лютаревича А.Г., Темербаева С.А. В них обосновывается целесообразность применения активных фильтров для компенсации высших гармоник напряжений и токов, а также их

преимущества над пассивными фильтрами и другими средствами компенсации высших гармонических составляющих.

На основании вышеизложенного следует отметить, что перспективным методом подавления высших гармонических составляющих является применение АФГ, в том числе и для исследуемых цеховых сетей электроснабжения, к которым подключены электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

Объектом исследования является система электроснабжения мостового однобалочного электрического крана, грузоподъемностью 15 тонн, эксплуатирующегося в ООО Цитробел г. Белгород. Электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками, для рассматриваемого крана являются частотно-регулируемые электроприводы подъема, передвижения крана и передвижения тали. Для объяснения режимов электропотребления мостового крана на рисунке 4 представлен один из вариантов нагрузочных характеристик электродвигателей подъема, передвижения крана и передвижения тали.

Воздействие статических полупроводниковых преобразователей (ПП) на электрическую сеть и электрооборудование проявляется в генерировании в сеть высших гармоник напряжения и тока и потреблении из сети дополнительной реактивной мощности.

Так как для электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками (крановых механизмов) до 60% времени работы составляют переходные режимы, то очевидна трудность определения показателей электромагнитной совместимости при совместной работе отдельных электроприемников. С учетом нестационарности режимов работы крановых электроприемников происходит значительное увеличение уровня гармоник напряжения и тока в сети электроснабжения.

Существует множество методов и средств, для решения проблем, связанных с возникновением высших гармонических составляющих токов и напряжений. Их можно объединить в две большие группы – первая группа - это решения схемного характера, вторая группа - применение оборудования, для снижения уровня гармонических составляющих. Одним из наиболее эффективных примеров такого оборудования являются фильтрокомпенсирующие устройства.

В свою очередь по наличию активных элементов различают активные и пассивные фильтры.

В качестве пассивных фильтров широко применяются LC-фильтры, т. е. цепи, содержащие реактивности разных знаков. Благодаря резонансным явлениям в таких цепях выделяются колебания, находящиеся в полосе пропускания.

Пассивные фильтры настраиваются на компенсацию определенных гармоник токов и напряжений.

Активные фильтры гармоник (АФГ) предназначены для обеспечения синусоидальной формы тока, потребляемого от первичного источника при нелинейной нагрузке. АФГ анализирует гармонический состав тока на входе преобразователя и генерирует в точке его подключения высшие гармоники тока в противофазе с высшими гармониками входного тока преобразователя. В результате высшие гармоники компенсируются (нейтрализуются) и ток в общей цепи (потребляемый от источника) сохраняет синусоидальную форму.

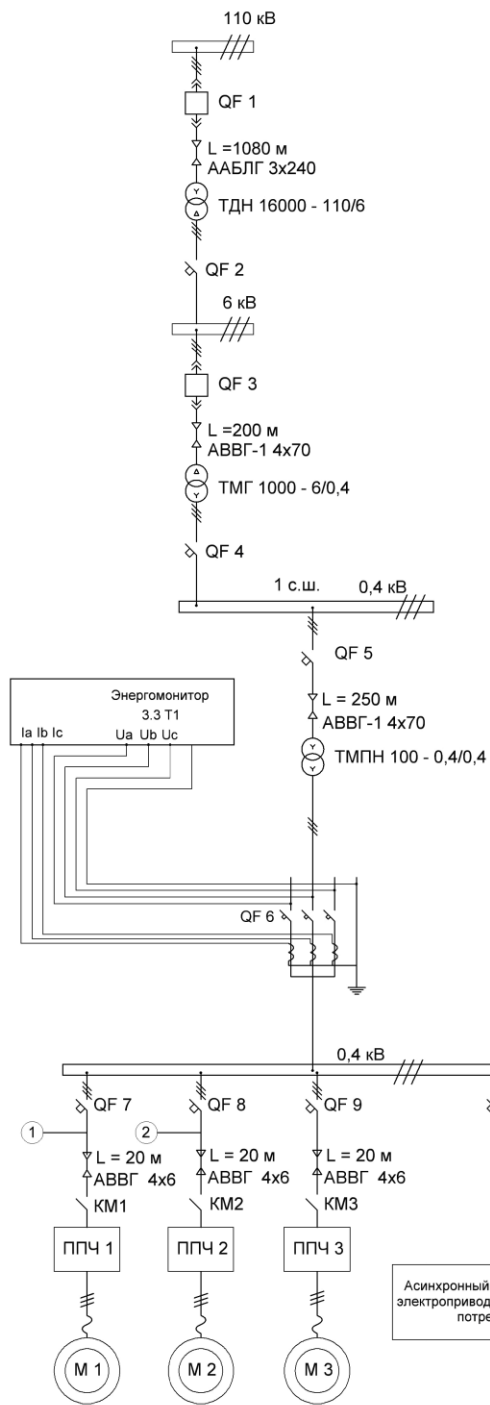
Стоит отметить, что пассивные фильтры гармоник эффективны для компенсации гармонических искажений, создаваемых стационарными

потребителями, с практически неизменным режимом работы. Принцип работы активного фильтра заключается в том, что система управления анализирует гармонический состав потребляемого тока, затем активный фильтр инжектирует в сеть ток искажения, находящийся в противофазе с потребляемым. Это обосновывает основное преимущество выбора активного фильтра для компенсации высших гармоник токов и напряжений в динамике. Тем не менее при одновременной работе нескольких электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками в динамических режимах применение стандартной системы управления АФГ, построенной на строгих аналитических зависимостях не представляется возможным. Исходя из вышесказанного, целью исследований является построение адекватной системы управления АФГ на базе нечеткой логики для обеспечения ЭМС в цеховой системе электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

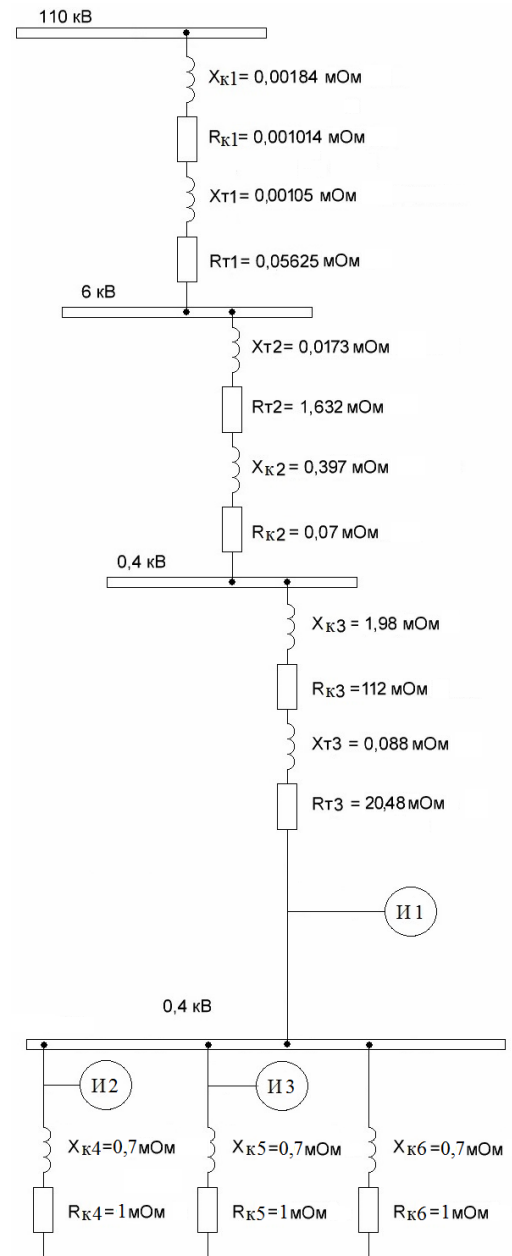
Во второй главе определены экспериментальным и аналитическим путем показатели качества электроэнергии и энергетические величины, характеризующие электромагнитную совместимость (ЭМС) и режимы работы цеховой системы электроснабжения. Также разработана имитационная модель цеховой системы электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками (электроприемники мостового крана) в пакете Matlab Simulink, для определения достоверности полученных результатов реальных экспериментов.

Измерения активной и реактивной потребляемой мощности, гармонического состава тока и напряжения на входе преобразователей частоты и цеховой шине электроснабжения, к которой подключены электроприемники крана с нелинейными вольт-амперными характеристиками, проводились при помощи прибора «Энергомонитор - 3.3Т1» в соответствии с методикой, указанной в инструкции по эксплуатации прибора и регистрировали параметры нормируемые ГОСТ 32144-2013 и в соответствии разработанной программы измерений, утвержденной главным энергетиком предприятия. Точки измерения указаны на рисунке 1 (а) цифрами 1 – перед частотно-регулируемым ЭП подъема крана и 2 – перед частотно-регулируемым ЭП передвижения тали. Результаты измерений оформлены в виде протоколов и утверждены главным энергетиком предприятия. В протоколах указаны условия проведения, продолжительность экспериментов и параметры окружающей среды. Приведены результаты экспериментов в виде таблиц и осциллограмм

Для построения имитационной модели узла нагрузки, к которому подключены электроприёмники крана была построена схема замещения системы цехового электроснабжения (рисунок 1) и рассчитаны её параметры.



а) схема электроснабжения

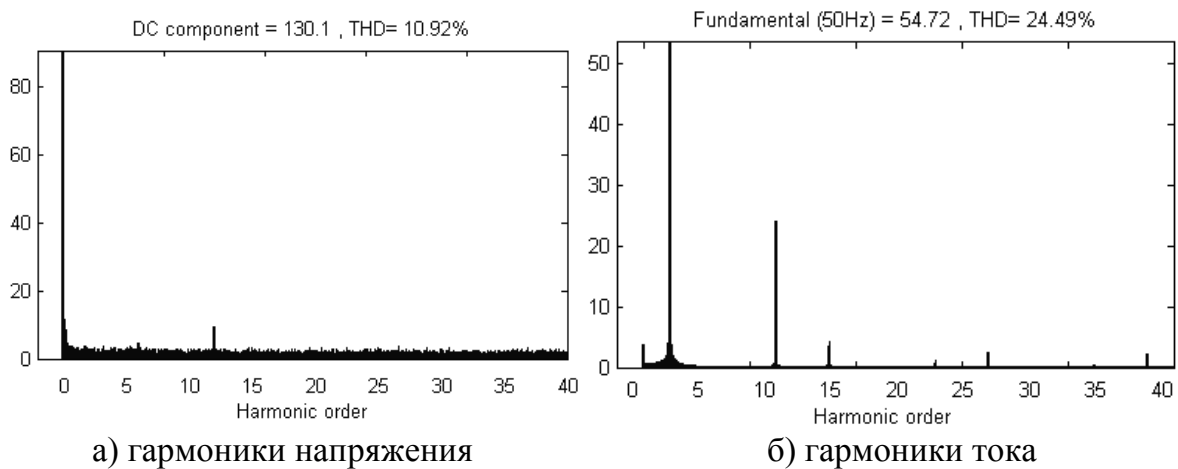


б) схема замещения

Рисунок 1. Система электроснабжения и схема замещения электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками (для мостового крана)

На основании рисунка 1 а, б построена имитационная модель системы электроснабжения крановых электроприемников в пакете Matlab Simulink без АФГ (смотри рисунок б). Результаты имитационного моделирования без использования АФГ приведены на рисунке 2. По оси абсцисс приведены

гармоники, с номерами от 1 до 40, по оси ординат – изменение коэффициента несинусоидальности напряжения и тока (THD)



а) гармоники напряжения
б) гармоники тока
Рисунок 2. Спектр гармоник тока и напряжения после понижающего трансформатора.

Из полученных экспериментальных данных и результатов моделирования построена суммарная диаграмма работы крановых электроприемников с наложением суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения. Диаграмма приведена на рисунке 3.

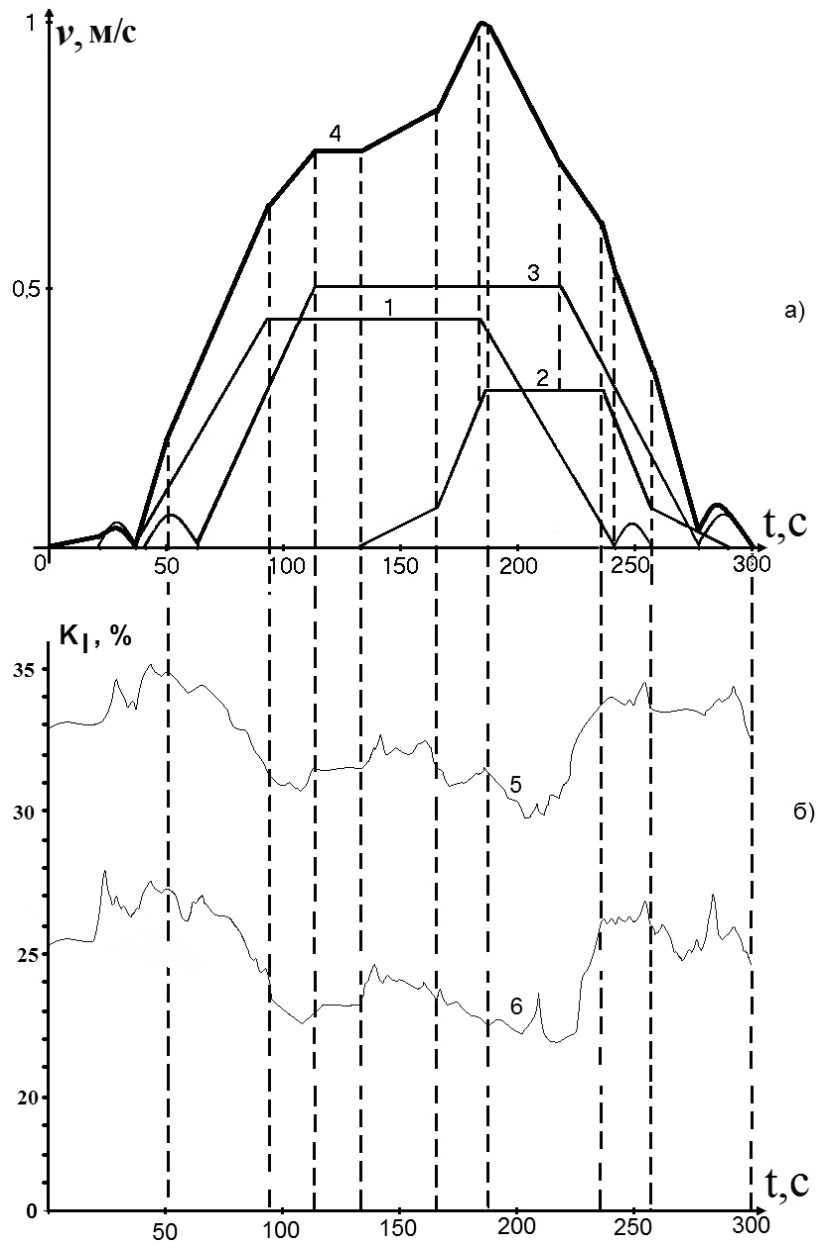
Как видно из сравнительного анализа гармонического состава напряжений и токов суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения превышает нормируемые значения даже для установившихся режимов, а по результатам измерений суммарный коэффициент гармонических составляющих тока изменяется от 29% до 35 %, что, очевидно, плохо сказывается на работе оборудования, подключенного к этой же цеховой системе электроснабжения.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в точке измерения И1 определялся согласно стандартных расчетов.

Далее был произведен анализ полученных результатов имитационного моделирования, эксперимента и аналитического расчета основных показателей качества электроэнергии, нормируемых ГОСТ 32144-2013, с целью определения мер по улучшению качества электроэнергии для потребителей, подключенных к цеховой системе электроснабжения (таблица. 1).

Разницу в результатах измерений и моделирования суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения объясняется более низкой чувствительностью измерительного прибора и погрешностью измерений, вызываемую трансформаторами тока при параллельном измерении ПКЭ.

Для уменьшения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока необходимо применять фильтрацию гармоник. Простейшим методом фильтрации гармоник является применение пассивных сетевых фильтров. С учетом того, что в работе кранового электропривода преобладают нестационарные режимы, установка пассивного фильтра гармоник, не решит проблемы компенсации высших гармонических составляющих, поэтому целесообразнее использовать активный фильтр гармоник (АФГ).



(а): 1 - диаграмма механизма подъема, 2 - диаграмма механизма перемещения тали, 3 - диаграмма механизма перемещения крана, 4 - совмещенная диаграмма работы крана. (б): совмещенная диаграмма изменения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока 5 - результат эксперимента, 6 - результат моделирования.

Рисунок 3. Диаграммы изменений скоростей механизмов крана

Таблица 1. Результаты экспериментов и моделирования

t, с (согласно тахограмме движения)	Измерения и моделирование								Расчет
	I, А	S, кВА	P, кВт	Q, квар	I(1), А	K _М	K _ц , %	K _г , %	K _ц , %
50	<u>3,95</u>	<u>2,6</u>	<u>1,869</u>	<u>1,304</u>	<u>3,86</u>	<u>0,698</u>	<u>12,77</u>	<u>34,7</u>	3,3
	4,121	2,712	2,305	1,42	4,01	0,62	10,62	27,74	
100	<u>19,078</u>	<u>12,554</u>	<u>11,55</u>	<u>4,92</u>	<u>18,17</u>	<u>0,43</u>	<u>12,83</u>	<u>32,02</u>	3,71
	19,211	12,644	11,885	4,31	18,71	0,36	10,69	23,3	
150	<u>25,947</u>	<u>17,077</u>	<u>14,857</u>	<u>8,42</u>	<u>24,67</u>	<u>0,566</u>	<u>12,93</u>	<u>32,59</u>	3,54
	26,36	17,350	15,286	8,24	25,43	0,53	10,8	27,3	
200	<u>29,696</u>	<u>19,545</u>	<u>17,786</u>	<u>8,103</u>	<u>28,83</u>	<u>0,456</u>	<u>12,73</u>	<u>30,7</u>	3,72
	30,79	20,26	18,64	7,94	29,67	0,42	10,5	27,7	
250	<u>9,231</u>	<u>6,075</u>	<u>5,285</u>	<u>2,995</u>	<u>8,72</u>	<u>0,567</u>	<u>12,82</u>	<u>34,74</u>	3,53
	9,657	6,356	5,529	3,13	9,41	0,56	10,6	23,0	

Примечание 1. В числителе приводятся значения параметров, полученные путем измерения, в знаменателе – моделированием.

В третьей главе принимается принципиальная схема силовой части активного фильтра и обосновывается выбор, и разрабатывается структура системы управления АФГ на базе нечеткой логики.

С учетом работы электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками, их параметрическая неопределенность и непредсказуемые в аварийных ситуациях изменения их режимов работы существенно затрудняют задачу синтеза согласованного управления. Для учета подобных особенностей в условиях, когда информация о системе, в основном, имеет качественный характер, хорошо подходят методы нечеткой логики.

При выборе типа управляющего устройства – контроллера – выбирается такой, в основе которого лежат механизмы нечеткого логического вывода вида «если...то...» – это тип контроллеров, построенных на базе нечеткой логики (*Fuzzy Logic Controller, FLC*).

Так как с увеличением тока нагрузки необходима максимальная компенсация амплитуды высших гармонических составляющих токов и напряжений, то с учётом входных переменных была составлена база правил нечеткого вывода для токов потребляемых тремя крановыми механизмами. Для этого введены следующие обозначения каждого лингвистического термина: «(L1) -ток потребления двигателя подъема крана», «(L2) - ток потребления двигателя передвижения тали», «(L3) - ток потребления двигателя передвижения крана». В качестве нечеткого вывода (выходная переменная) нечеткого регулятора – это лингвистический терм «(L4) - ток искажения, для формирования сигнала управления АФГ». Для построения функций принадлежности был произведен их расчет на основании статистических данных, полученных в результате экспериментов. Далее определены области значений для каждого лингвистического термина и построены графики функций принадлежности. С учетом свойств работы системы в динамике, повторно-кратковременные режимы работы кранового электропривода был выбран механизм нечеткого вывода – алгоритм Мамдани.

Значения переменных определялись по формулам:

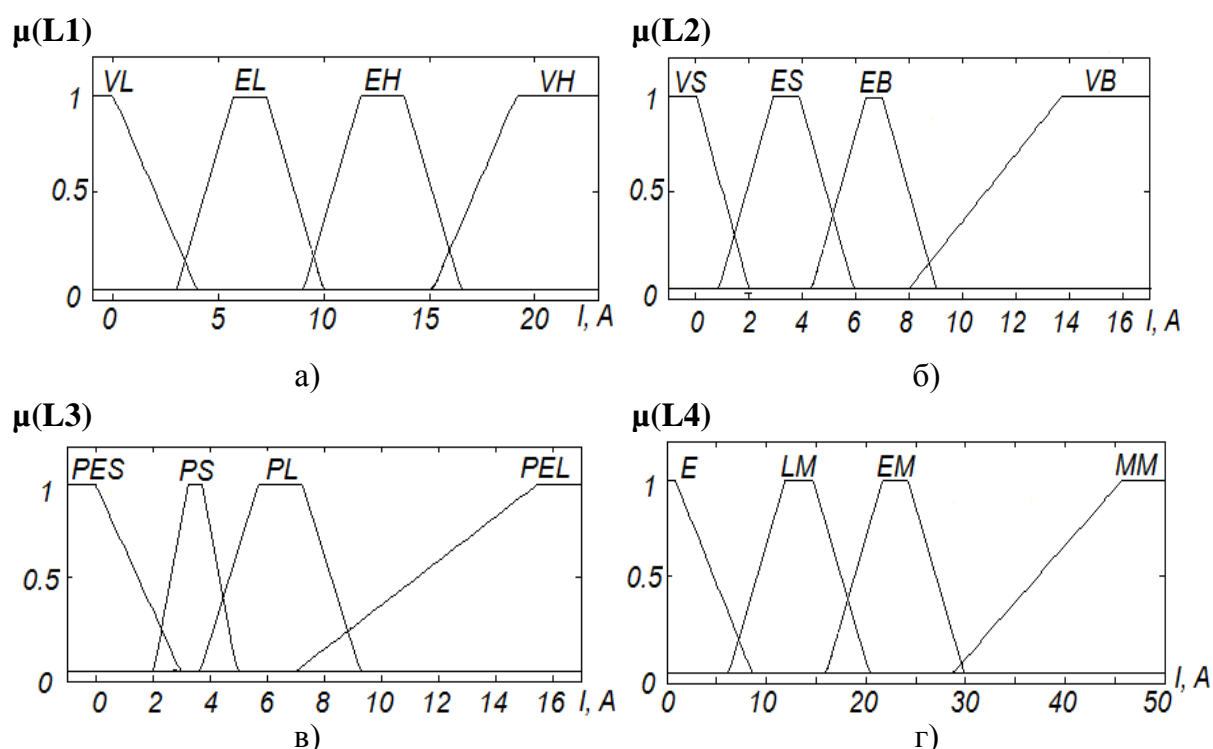
$$I_{зад} = I_H - I_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_1); \quad (2)$$

где I_1 и ψ_1 – амплитуда и начальная фаза первой гармоники тока нагрузки, $\omega = 2\pi f$, где f - частота тока в сети, I_H - ток нагрузки

$$I(1)_A = I_m(1)_A \sin(\omega \cdot t); \quad (3)$$

где $I_m(1)_A$ – амплитудное значение тока первой гармоники в фазе

Далее определены области значений для каждого лингвистического термина и построены сами графики функций принадлежности, для входных переменных представлены на рисунках 4,а, б, в, и для выходной переменной рисунке 4,г. Для приведенных терм по оси абсцисс приведено изменение значений потребляемого тока механизмами крана и амплитуда тока компенсации сигнала управления инвертором, по оси ординат откладывается характеристическая функция.



а) термы для механизма подъема крана б) термы для механизма передвижения крана в) термы для механизма передвижения тали г) термы сигнала управления для блока управления инвертором.

Рисунок 4 Графики функций принадлежности входных и выходной переменных

Структура нечеткого вывода реализуется следующим образом:

1. Процедура фаззификации (нахождение степени истинности входных переменных для каждого правила)	$\mu^1(L_1^*), \mu^2(L_1^*), \mu^2(L_2^*), \mu^1(L_2^*)$, где $\mu^1(L_1^*), \mu^2(L_1^*)$ - функции принадлежности для переменной L_1 , $\mu^2(L_2^*), \mu^1(L_2^*)$ функции принадлежности для переменной L_2	(4)
--	--	-----

2. Процедура агрегирования (нахождение степени истинности условий каждого из правил)	$\left. \begin{aligned} A &= \mu^1(L_1^*) \wedge \mu^1(L_2^*); \\ B &= \mu^2(L_1^*) \wedge \mu^2(L_2^*), \end{aligned} \right\} \text{ где } \wedge \text{ - операция} \\ &\text{логического минимума}$	(5)
3. Процедура активации (определение функции принадлежности для выходной переменной)	$\left. \begin{aligned} \mu_{\bar{N}}^1(L) &= A \wedge \mu^1(L_{\bar{N}}); \\ \mu_{\bar{N}}^2(L) &= B \wedge \mu^2(L_{\bar{N}}), \end{aligned} \right\} \text{ где } \mu_{\bar{N}}^1(L) \text{ и } \mu_{\bar{N}}^2(L) \\ &\text{функции принадлежности переменной } L_{\bar{N}}$	(6)
4. Процедура аккумуляции (Объединение найденных функций и получение итогового нечеткого множества)	$\mu_{\bar{N}}(L) = \mu_{\bar{N}}^2(L) \vee \mu^1(L_{\bar{N}}), \text{ где } \vee \text{ операция} \\ \text{логического максимума}$	(7)
5. Процедура фаззификации (нахождение четкого значение выходной переменной)	$L_{\bar{N}}^* = \frac{L_{C_{\max 1}} + L_{C_{\max 2}}}{2}, \text{ где } L_{\bar{N}}^* \text{ выходная} \\ \text{переменная}$	(8)

Для системы управления АФГ были составлены 65 правил нечеткого вывода, на основе данных, полученных в результате эксперимента на объекте и анализа специфики работы кранового электропривода. В качестве примера рассмотрим одно из правил нечеткого вывода:

ЕСЛИ L1 есть VH И L2 есть VS И L3 VL есть PES ТО L4 LM.

Это правило может быть объяснено следующим образом: если L1 - функция принадлежности входной переменной ток двигателя подъема крана «большая положительная» (VH) и L2 – функция принадлежности входной переменной ток двигателя передвижения тали «малая положительная» (VS) и L3 – функция принадлежности входной переменной ток двигателя передвижения крана «положительная очень маленькая» (VL), то L4 – значение сигнала для формирования амплитуды тока сравнения в систему управления АФГ «достаточно малая положительная» (LM).

Такое построение правил наглядно показывает структуру работы фаззи-регулятора. А использование методов нечеткого вывода для управления АФГ, за счет регулирования выходного тока, компенсирующего ток искажения, позволяет обеспечивать ЭМС цеховой системы электроснабжения в зависимости от динамики в работе крана.

В четвертой главе был произведен расчет основных параметров АФГ, к которым относятся ток искажения, мощность фильтра, мощность искажения, емкость конденсатора и выбран стандартный тип фильтра с рассчитанными параметрами.

Для сравнения построены система управления АФГ на базе нечеткой логики и система управления реализованная на методах теории мгновенной мощности, с целью определения наиболее эффективно компенсирующей высшие гармоники тока и напряжения в узле нагрузки с электроприемниками с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

Расчет основных параметров фильтра производился по следующим выражениям:

Мощность искажения T_u	$\int_0^T T_u dt = \frac{1}{2} C [U_{dc} + \Delta U_{dc}]^2 - \frac{1}{2} C U_{dc}^2;$	(9)
Ёмкость конденсатора	$C = 2 \frac{\int_0^T T_u dt}{\Delta U_{dc} [2U_{dc} + \Delta U_{dc}]};$	(10)
Мощность искажения	$T_u = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2};$	(11)
Мощность активного фильтра	$S_{АФГ} = T_u + Q;$	(12)

Схема подключения АФГ к узлу нагрузки представлена на рисунке 5:

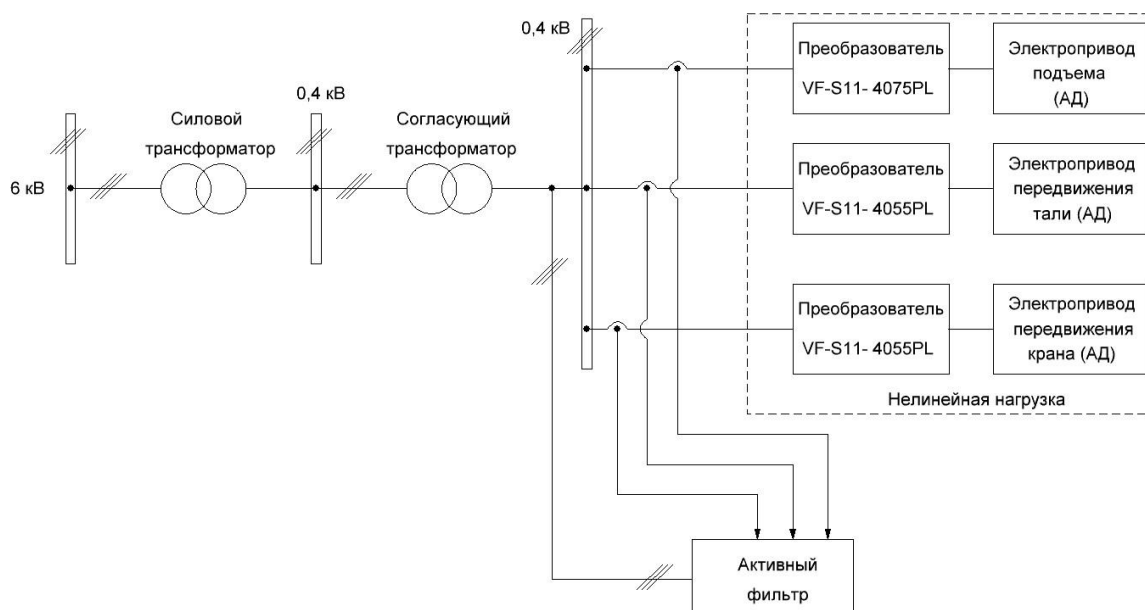


Рисунок 5. Схема подключения активного фильтра к цеховой системе электроснабжения мостового крана

Основным параметром активного фильтра, является его мощность, которая определяет значение генерируемого в сеть компенсационного тока. Соответственно, на основании рассчитанных параметров, для установки принимается стандартный активный фильтр мощностью 70 кВА, напряжением 380 В с емкостным накопителем и обеспечивающий ток искажения $I=100$ А.

Для построения системы управления необходимо подключение трех датчиков тока на одну из фаз каждого кранового электроприемника с нелинейной вольт-амперной характеристикой и одного датчика тока для измерения трехфазного значения тока, потребляемого механизмами крана в целом. Далее в блоке Impulse Creator происходит выделение текущего значения тока компенсации, а затем происходит сравнение двух входных величин в блоке Hist Control – полученного значения компенсирующего тока фильтра с текущим значением тока на общей секции шин. Таким образом, реализуется управления ключами инвертора АФГ, что позволяет получить ток фильтра в противофазе току искажения для компенсации высших гармонических составляющих. Имитационная модель цеховой системы электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой однобалочного мостового крана, грузоподъемностью 15 тонн, с применением АФГ представлена на рисунке 6:

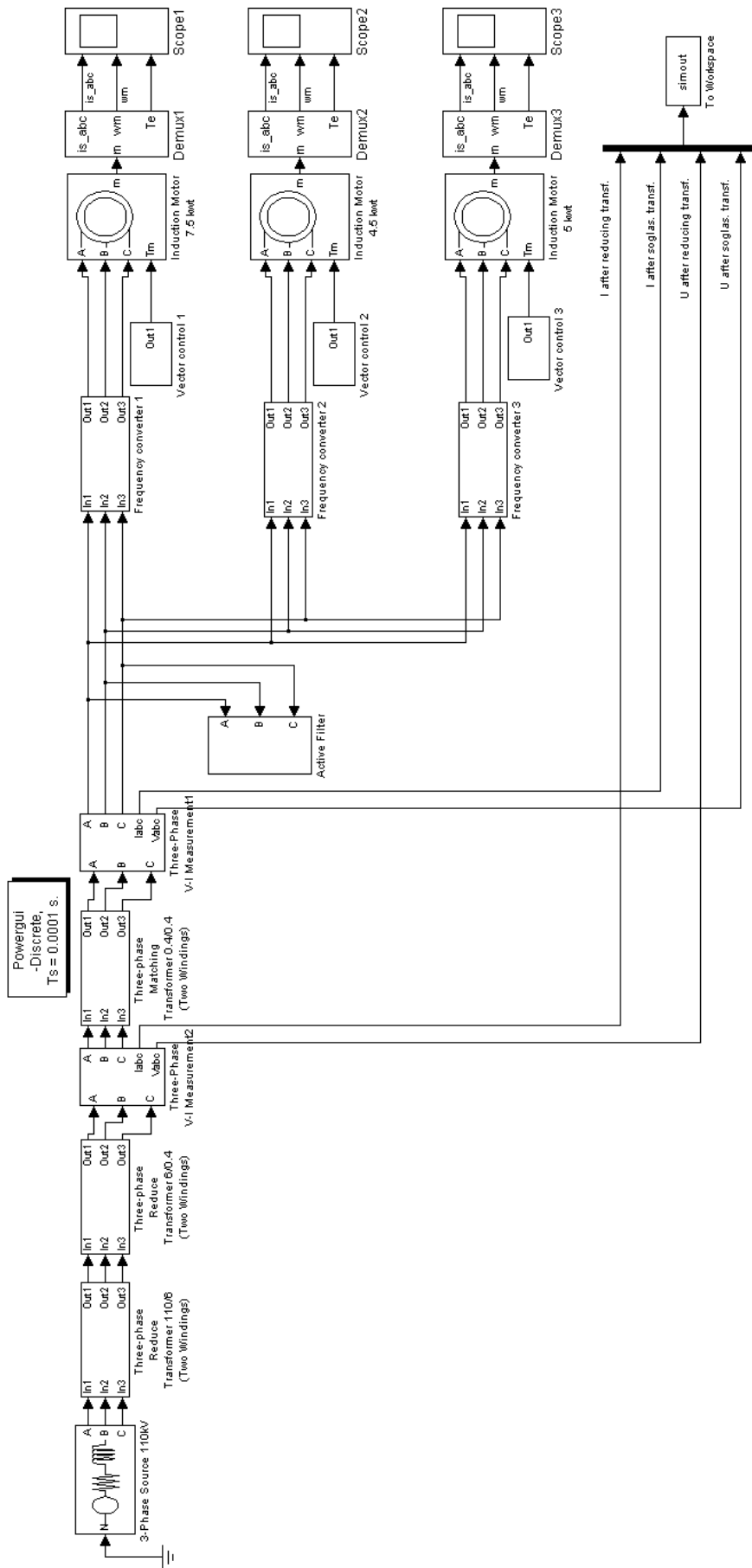


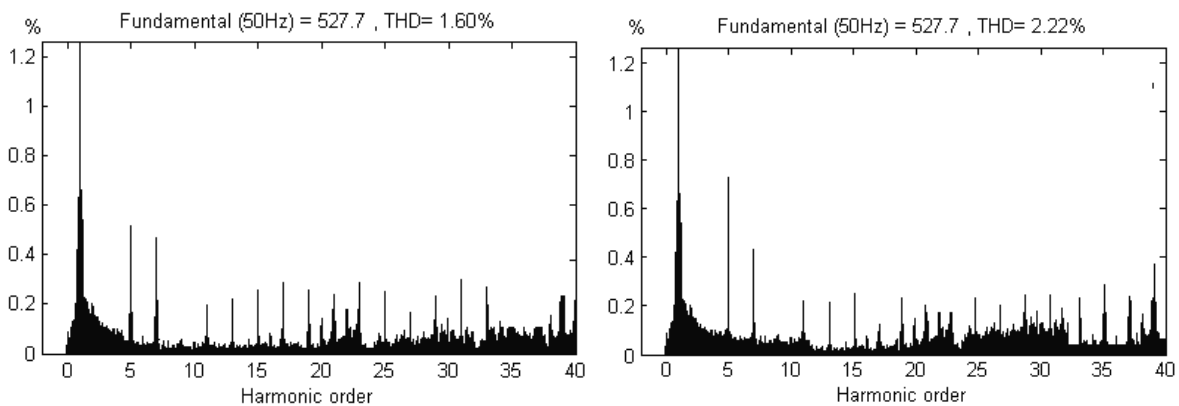
Рисунок 6 . Имитационная модель реальной цеховой системы электроснабжения мостового одноблочного электрического крана с активным фильтром гармоник

В случае использования активного фильтра с системой управления, построенной с применением теории мгновенной мощности, полученные значения параметров суммарного коэффициента несинусоидальности тока лучше, чем до установки активного фильтра (снижение с 24,49% до 11,23%), но при этом снижение недостаточно, так как все равно имеют место большие потери мощности.

Применяя систему управления АФГ на базе нечеткой логики, суммарный коэффициент гармонических составляющих тока (ТНД) с учетом работы АФГ за цикл работы обобщенной тахограммы движения крановых двигателей снижается с 24,49% до 3,74%.

Полученные значения коэффициента высших гармонических составляющих по напряжению для двух систем управления АФГ ТНД = 1,60 % после понижающего трансформатора и ТНД = 2.22 % после согласующего трансформатора соответствуют требованиям, нормируемым по ГОСТ 32144-2013.

Из анализа полученных данных видно, что применение СУ на базе нечеткой логики является более эффективным методом решения проблемы электромагнитной совместимости (рисунок 7). По оси абсцисс приведены гармоники, от 1 до 40, по оси ординат – изменение коэффициента несинусоидальности напряжения.



а) гармоники напряжения с СУ АФГ на базе нечеткой логики б) гармоники напряжения с релейной СУ АФГ

Рисунок 7. Гармонический состав напряжения после понижающего трансформатора.

Использование подобной системы управления позволит улучшить коэффициент высших гармонических составляющих напряжения в 5 раз, а коэффициент высших гармонических составляющих тока в 6 раз.

Экономическая оценка эффективности использования АФГ определялась исходя из следующих критериев:

1.Определение единовременных затрат	$\mathcal{E}_{\text{зам}} = C_{\text{фильтра}} \cdot K_3$; где $C_{\text{фильтра}}$ - стоимость АФГ, K_3 - дополнительные затраты	(13)
2.Определение экономии активной и реактивной энергии	$W = W_{\text{ак}} \left(\frac{I_1^2 - I_1'^2}{I_1^2} \right) K_n$, где $W_{\text{ак}}$ – текущее потребление активной и реактивной энергии, I_1 и I_1' - ток потребления до и после внедрения АФГ, K_n - коэффициент потерь	(14)

3. Расчет окупаемости	срока $T = \frac{\mathcal{E}_{\text{зат.}}}{\mathcal{E}_o}$, где $\mathcal{E}_o = W \cdot T_a$ - экономия по оплате электроэнергии, T_a - тариф на электроэнергию	(15)
-----------------------	---	------

Расчеты показали, что срок окупаемости установки АФГ, с выбранными параметрами составит 22 месяца (около 1.83 года).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проанализированы особенности работы электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой, на примере крановых механизмов, как источника генерирования в цеховую систему электроснабжения высших гармоник тока и напряжения. Выявлено, что уровень гармоник зависит от работы крановых механизмов в динамических режимах, которые могут составлять до 60% за 1 цикл технологических операций крана.

2. Экспериментально, имитационно и аналитически подтверждено наличие высших гармонических составляющих тока и напряжения в цеховой системе электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой (на примере однобалочного мостового крана). При этом уровень электромагнитной совместимости не соответствует требованию стандарта.

3. Обосновано применение АФГ для компенсации высших гармонических составляющих напряжения и тока в цеховой системе электроснабжения с подключением электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками как технического решения, для обеспечения нормируемого уровня ЭМС.

4. Разработана и программно реализована методика построения системы управления АФГ на базе нечеткого вывода. При этом сформирована база правил на основании математической статистики экспертных оценок. Применение АФГ с системой управления на базе нечеткого вывода позволяет в полной мере эффективно решить проблему ЭМС и придает разработанной методике научную и практическую ценность.

5. Спроектирован нечеткий регулятор в виде алгоритмов и программного кода для контроллера в системе управления АФГ. Произведена экономическая оценка эффективности использования АФГ, которая показала, что срок окупаемости при установке АФГ не превышает 1.8 года.

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. 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.

3. Оценка высших гармоник в сетях с частотным крановым электроприводом / М. А. Авербух, Д.Н. Коржов, **Д. С. Лимаров** // – Энергетик. – 2015. - №5. - С. 31-34. – ISSN 0013-7278.

4. Активный фильтр с нечетким регулятором в цеховой системе электроснабжения с нелинейными электроприемниками / Авербух М. А., Лимаров Д. С. // – Научное обозрение. – 2015. - №15. - С. 196-199. - ISSN 1815-4972

В других изданиях

5. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости в промышленных электрических сетях напряжением 0,4 кВ/М. А. Авербух, **Д.С. Лимаров**, А.А. Пацев // Современная наука: теория и практика: материалы II Международной научно-практической конференции / под ред. Б. М. Синельникова. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2011. – С. 150-154.

6. Оценка электромагнитной совместимости при нестационарных режимах работы кранового электропривода/ **Д.С. Лимаров** // Поколение будущего: взгляд молодых ученых: материалы Международной молодежной научной конференции / под ред. Горохова А. А. – Курск: ЮЗГУ, 2012. - Т. 3. – С. 240-244.

7. Оценка гармонических составляющих тока и напряжения кранового частотного электропривода с помощью виртуальной модели/ **Д.С. Лимаров** // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: ТПУ, 2012. – С. 27-30.

8. Влияние динамики частотного электропривода мостового крана на электромагнитную совместимость / **Д.С. Лимаров**// Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы X Международной научно-практической конференции / под ред. Горохова А. А. – Курск: ЮЗГУ, 2013. – С. 178-182.

9. Выбор активного фильтра для кранового электропривода/ **Д.С. Лимаров** // Техника и технологии: пути инновационного развития: материалы III Международной научно-практической конференции / под ред. Горохова А. А. – Курск: ЮЗГУ, 2013. – С. 105-110.

10. 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.

11. Расчет гармонических составляющих напряжения и тока в питающей сети ППЧ-АД электропривода подъема мостового крана / М. А. Авербух, **Д.С. Лимаров** // 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. 85 – 88.

12. Анализ гармонических составляющих в пакете Matlab. / **Д.С. Лимаров** // Энергетика и энергоэффективные технологии: межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2014.

13. 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.

14. Особенности использования активного фильтра в системах электроснабжения с частотным крановым электроприводом / М. А. Авербух, Д.Н. Коржов, **Д. С. Лимаров** // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом: материалы II Международной научно-практической конференции. - Новосибирск, 2015.

15. Построение системы управления активным фильтром с применением нечеткой логики/ М. А. Авербух, Д.Н. Коржов, **Д. С. Лимаров** // Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке: материалы XV Международной научно-практической конференции. – Москва «Prospero», 2015

Подписано в печать 19.10.2015 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,