

*на правах рукописи*



Купова Анастасия Викторовна

**НЕЧЕТКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИМ  
УСТРОЙСТВОМ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

*Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Комсомольск-на-Амуре – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

**Соловьев Вячеслав Алексеевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

**Официальные оппоненты:**

**Ким Константин Константинович**, доктор технических наук, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I», заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика»

**Шалобанов Сергей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», доцент высшей школы кибернетики и цифровых технологий

**Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск)

Защита диссертации состоится 29 ноября 2024 г. в 09:00 на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.140.02 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте [https://sovet.knastu.ru/diss\\_defense](https://sovet.knastu.ru/diss_defense)

Автореферат разослан \_\_\_\_ 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета  
99.2.140.02



к.т.н., доцент  
А.С. Гудим

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

На большинстве современных промышленных предприятий в технологических процессах задействованы электротехнические устройства, которые можно охарактеризовать как искажающие электроприемники. Их влияние на электрические сети приводит к снижению показателей качества электроэнергии (КЭ) и, как следствие, сказывается на работе электроустановок других потребителей. Это проявляется в снижении КПД и срока службы, а также некорректной работе технических устройств. Указанной проблеме снижения качества электроэнергии и негативного влияния на электрические сети и других потребителей посвящено большое количество работ отечественных ученых. Среди них можно выделить работы Федорова А.А., Железко Ю.С., Карташева И.И., Жежеленко И.В., Иванова В.С. и Соколова В.И., Корнилова Г.П., Николаева А.А.

Нормативные значения показателей качества электроэнергии устанавливаются ГОСТ 32144 – 2013. По вине потребителей происходит ухудшение таких показателей, как отклонение напряжения, фликер, несимметрия и несинусоидальность напряжения. Наибольший вклад в снижение качества электроэнергии вносят, так называемые, энергоемкие производства. Среди них можно выделить металлургические предприятия, на долю которых, по разным источникам, приходится от 15 до 30% потребляемой промышленностью электроэнергии. Ситуацию ухудшает то, что в технологических процессах металлургии задействованы установки, которые считаются наиболее «плохими» электроприемниками: дуговые печи, прокатные станы, электроприводы различных кранов, поворотников, конвейеров, агломерационных машин и т.п.

Проблема снижения качества электроэнергии перечисленными приемниками давно выявлена и для ее решения используются технические устройства, которые принято называть компенсаторами реактивной мощности. К этим устройствам относится рассматриваемый в данной работе статический тиристорный компенсатор (СТК). Кроме поддержания высокого коэффициента мощности в системе электропитания (СЭС) современные полупроводниковые компенсаторы позволяют фильтровать гармонические составляющие, выравнять баланс трехфазной системы и стабилизировать напряжение. Однако, несмотря на многолетний опыт применения компенсирующих устройств с различной схмотехникой, на данный момент можно говорить, что с поставленными задачами существующие устройства справляются не в полном объеме.

Особенно явно это проявляется при компенсации влияния таких приемников, как дуговые печи, которые характеризуются как резкопеременная нагрузка, или прокатные станы, для которых характерны периодические набросы и сбросы активной мощности. При компенсации влияния на сеть более «спокойных», по сравнению с ними, электроприемников может наблюдаться эффект наложения искажений, когда непосредственно в точках подключения отдельных устройств с помощью компенсаторов удается добиться поддержания уровня показателей качества электроэнергии в пределах допустимых значений, но в общих сетях искажения

складываются и показатели выходят за пределы норм, установленные в ГОСТ 32144 – 2013. Таким образом, работа над повышением качества электроэнергии в точке подключения конкретного электроприемника продолжает оставаться актуальной.

В настоящее время решение проблемы качества электроэнергии ведется в нескольких направлениях. Одним из которых является оптимизация алгоритмов работы компенсатора с целью повышения скорости и стабильности регулирования. Научную деятельность в этом направлении ведут Кузьменко В.П., Тропин В.В., Фомин А.В., Николаев А.А. и др.

**Объект исследования** – автоматизированная система управления компенсирующим устройством в системе электроснабжения искажающего электроприемника.

**Предмет исследований** – алгоритмы управления компенсирующим устройством в системе электроснабжения с резкопеременной нагрузкой.

**Цель и задачи диссертационной работы.**

Целью диссертационной работы является исследование и разработка методов, структур и алгоритмов, реализующих автоматическое управление компенсирующим устройством в системе электроснабжения с переменной нагрузкой. В соответствии с указанной целью в работе решаются следующие основные задачи:

1. Разработка имитационной модели системы энергоснабжения с искажающим электроприемником и компенсирующим устройством.
2. Исследование влияния переменной нагрузки на параметры СЭС.
3. Синтез параметров классического регулятора компенсирующего устройства в системе с переменной нагрузкой, и оценка эффективности работы системы управления компенсирующим устройством в СЭС
4. Структурный и параметрический синтез системы управления компенсирующим устройством с использованием аппарата нечеткой логики;
5. Исследование нечеткой системы управления компенсирующим устройством.

**Методы исследования.** Применялись методы теории электрических цепей и теории электромагнитных процессов в системах электроснабжения, методы теории нечеткой логики, имитационного и натурального моделирования, методы численного эксперимента.

**Научная новизна работы** заключается в следующих научных результатах:

1. Разработана имитационная модель СЭС металлургического предприятия, учитывающая параметры системообразующих элементов, особенности искажающего электроприемника и компенсирующего устройства и позволяющая выявить особенности влияния режимов работы приемника на качество электроэнергии в СЭС.
2. Разработан подход и выполнен структурный синтез нечеткой системы управления статическим тиристорным компенсатором в системе электроснабжения с ДСП, обеспечивающей снижение влияния режимов и параметров нагрузки на питающую сеть.

3. Для учета особенностей технологических режимов работы ДСП предложено усовершенствовать структуру нечеткого регулятора введением дополнительного информационного канала, облегчающего классификацию нечетких множеств.

4. Разработаны алгоритмы нечеткого управления компенсирующим устройством, обеспечивающие улучшение показателей качества электроэнергии в СЭС с резкопеременной нагрузкой.

#### **Практическая и теоретическая значимость работы.**

1. Разработана нечеткая система управления компенсирующим устройством в системе электроснабжения металлургического предприятия, обеспечивающая улучшение показателей качества электроэнергии.

2. Разработана и апробирована реализация нечеткого логического регулятора системы управления на базе программируемого реле ПР200 отечественного производства.

3. Результаты исследования приняты к использованию в ООО «Амурсталь», что подтверждается актом о внедрении от 21.11.2022, и внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ», акт о внедрении от 22.09.2022, а также в учебный процесс ФГБОУ ВО КнАГУ, акт о внедрении от 17.11.2022.

Полученные практические и теоретические результаты могут быть использованы при модернизации системы электроснабжения с резкопеременной нагрузкой, содержащей компенсирующее устройство, или при проектировании нового компенсирующего устройства.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Имитационная модель СЭС металлургического предприятия, учитывающая параметры системообразующих элементов, а также особенности искажающего электроприемника и компенсирующего устройства.

2. Результаты анализа влияния параметров переменной нагрузки на базовые показатели качества электроэнергии в СЭС, полученные на имитационной модели.

3. Разработанный подход и выполненный в соответствии с ним синтез нечеткой системы управления статическим тиристорным компенсатором.

4. Усовершенствованная структура нечеткой системы управления с дополнительным каналом, позволяющим учесть технологические режимы работы ДСП.

5. Разработанный принцип реализации нечеткого регулятора на базе специализированного программируемого реле ПР 200.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена использованием стандартных методов имитационного и натурального моделирования. Адекватность имитационной модели подтверждена сопоставлением результатов имитации с натурными данными объекта-прототипа, результаты натурных испытаний на макете системы электроснабжения с переменной нагрузкой ожидаемым образом отражают работу спроектированного нечеткого алгоритма регулирования напряжения; результатами внедрения, а также апробацией результатов на конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

**Апробация результатов.** Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на выступлениях на следующих научных конференциях: Eleventh international conference on Electrical machines,

drives and power systems ELMA (2005); Международный симпозиум «Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы» научно-техническая конференция «Электротехнические комплексы и системы» Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет (2010); V юбилейная международная научно-техническая конференция, посвященная памяти Г.А. Сипайлова, «Электромеханические преобразователи энергии» Томский политехнический университет (2011); «Энергия Евразии» Дальневосточный федеральный университет (2013); «70-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава» Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (2017); Международная научно-практическая конференция «Электротехнические комплексы и системы» Уфимский государственный авиационный технический университет (2017); Международная научно-практическая конференция «Электротехнические комплексы и системы» Уфимский государственный авиационный технический университет (2018); 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok (Asian-Pacific region) (2019).

**Личный вклад автора** состоит в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы и публикациях по теме исследования, в подготовке и проведении компьютерного моделирования с получением искомых зависимостей, в проведении натурных экспериментов с последующей обработкой данных, разработке алгоритмов нечеткого управления компенсирующим устройством в СЭС с резкопеременной нагрузкой.

**Публикации по работе.** Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 16 печатных работах, в том числе в 8 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus).

#### **Соответствие паспорту специальности**

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.3.3 по п. 3 «Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т.д.», п. 4 «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация» и п. 6 «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления».

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 118 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 109 рисунков и 10 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрено влияние искажающих электроприемников, используемых в технологических процессах металлургической отрасли, на качество электроэнергии в сетях электропередачи. Выявлено, что дуговые сталеплавильные печи и прокатные станы оказывают наибольшее влияние на снижение КЭ. Для компенсации этого влияния чаще всего используют СТК.

Выполнен анализ измерений показателей КЭ на линии, от которой питается металлургический завод. Установлено, что СТК с классическим регулятором не обеспечивает поддержание уровня напряжения, наблюдаются сильные отклонения и колебания напряжения ( $\delta U$  более 10 %;  $P_{st}$  до 8). Поэтому сделан акцент на принципиальной возможности применения аппарата нечеткой логики в системе управления СТК.

**Вторая глава** посвящена математическому моделированию СЭС металлургического предприятия с искажающим электроприемником (ДСП) и компенсирующим устройством (СТК), а также исследованиям влияния режимов работы электроприемника на электрические параметры СЭС. Моделирование выполнялось в системе визуального моделирования MatLab Simulink. Для имитации работы электротехнических устройств были использованы блоки библиотеки SimScape/SimPowerSystem. На рисунке 1 изображена функциональная схема модели СЭС предприятия на примере ООО «Амурсталь».

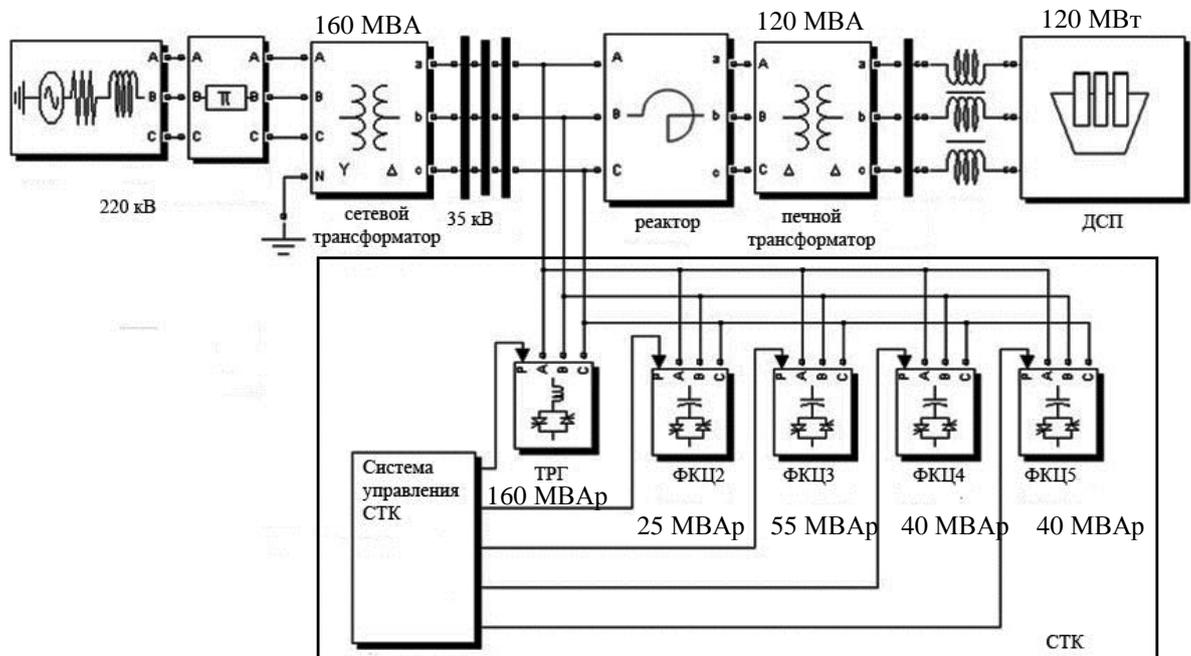


Рисунок 1 – Схема имитационной модели СЭС цеха с ДСП и СТК.

Модель статического тиристорного компенсатора (СТК) в MatLab Simulink составлена на основе модели-прототипа, разработанной Power System Laboratory, IREQ Hydro-Quebec (Pierre Giroux, Gilbert Sybille). Для адаптации модели-прототипа к рассматриваемому объекту потребовалось увеличить количество блоков фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ, TSC) и рассчитать параметры всех блоков.

ДСП – это сложное электротехническое устройство, в процессе работы которого протекает большое число различных по своей природе процессов. Способы моделирования этих процессов также различны. По результатам анализа работ других авторов был выбран способ моделирования ДСП по электрической схеме замещения с переменными значениями активно-индуктивных сопротивлений (рисунок 2).

Компоненты  $L$  и  $R_d$  переменного импеданса  $Z_d$  были реализованы в модели с помощью регулируемого источника однофазного напряжения в соответствии с выражением  $u_v = \frac{k-1}{k} u_d$ , где  $u_v$  – напряжение источника;  $u_d$  – напряжение дуги. На рисунке 3 показаны модели переменных сопротивления и индуктивности.

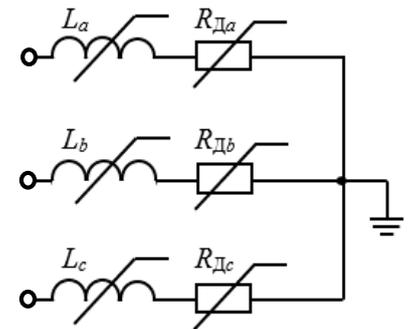


Рисунок 2 – Электрическая схема замещения ДСП

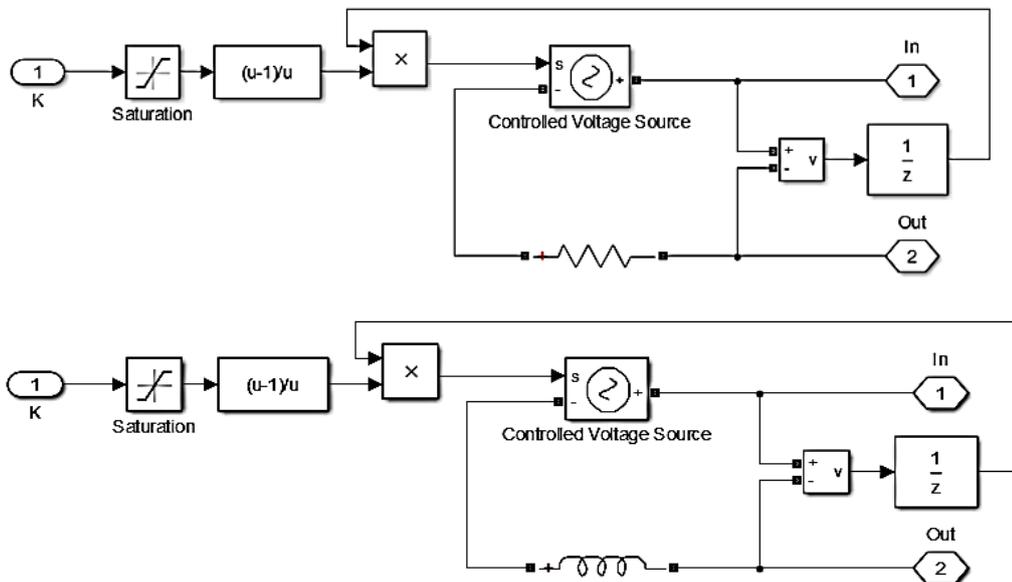


Рисунок 3 – Модель переменного сопротивления в MatLab

Результат математического моделирования с переменным импедансом показал, что расчетное изменение параметров питающей сети приблизительно соответствует таковому в реальной ДСП и данное представление позволяет моделировать характерные импульсные скачки напряжения и тока для печи, работающей на максимальной мощности.

В имитационной модели СЭС было проведено исследование влияния переменной нагрузки на питающую сеть без учета компенсатора СТК. При этом ограничили симметричным режимом работы ДСП в трехфазной сети.

Для проведения исследований влияния нагрузки на СЭС из возможных диапазонов значений  $R_d$  и  $X_L$  были выбраны следующие точки:

$$R_d = [0,1; 1; 3; 5; 7; 9; 11; 21; 35; 80] \text{ мОм}; \quad X_L = [1,7; 3; 5; 7; 9; 12] \text{ мОм}.$$

В СЭС дуговой сталеплавильной печи изменение импеданса наблюдается в том числе за счет переключения ступеней печного трансформатора и реактора. Ступени, которые были выбраны для проведения исследований: реактора – 2, 4, 6; трансформатора – 14, 16, 18.

Также были заданы базовые значения параметров:

- |   |  |
|---|--|
| a) $S_{\text{баз}} = 160 \text{ МВА}$ (соответствует мощности СТК); | c) $I_{35\text{баз}} = 2639,31 \text{ А};$ |
| b) $U_{35\text{баз}} = 35 \text{ кВ};$                              | d) $U_{DSP\text{баз}} = 1200 \text{ В};$   |
|   | e) $I_{DSP\text{баз}} = 76980 \text{ А}.$  |

По результатам измерения параметров в модели СЭС печи были построены поверхности, отражающие изменения параметров системы при изменении нагрузки. Вид поверхностей показывает, что при увеличении сопротивления  $R_d > 25 \text{ мОм}$  изменения параметров СЭС ДСП перестают быть видны. При всех остальных значениях  $R_d$ ,  $X_L$  и на всех переключаемых ступенях изменения электрических параметров питающей сети присутствуют.

С целью сохранения и возможного повышения производительности печи управление СТК производится на основании величины напряжения в точке его подключения. В качестве входного сигнала в систему управления используется сигнал, показывающий отклонение измеренного на линии 35 кВ напряжения  $V_{\text{meas}}$  от заданного значения  $V_{\text{ref}}$ :

$$e = V_{\text{ref}} - V_{\text{meas}}.$$

В общем виде систему управления СТК можно представить функциональной схемой, показанной на рисунке 4. В процессе работы регулятора вычисляется переменная величина реактивной проводимости  $B$ , которая должна быть получена в СТК переключением блоков ФКЦ и тиристорно-реакторной группой (ТРГ, TCR). Для формирования управляющих импульсов тиристоров этих блоков сигнал о вычисленной величине  $B$  подается в блок *Distribution Unit*, где происходит выбор группы элементов TSC и TCR. Затем импульсы генерируются в блоке *Pulse Generator* и подаются на соответствующие тиристоры.

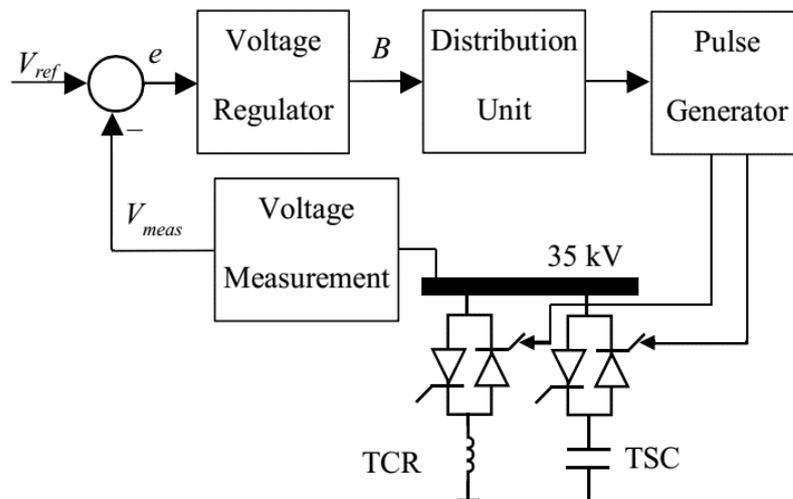


Рисунок 4 – Функциональная схема системы управления СТК

В блоке *Voltage Regulator* реализуется пропорционально-интегральный (ПИ) закон управления. Настройка параметров ПИ – регулятора выполнялась численными методами MatLab. В пределах одного режима работы СЭС параметры регулятора могут сильно изменяться при изменении нагрузки. В то же время, наблюдаются некоторые участки нечувствительности коэффициентов  $K_p$  и  $K_i$  к изменению значений сопротивлений  $R_d$  и  $X_L$ . Эти участки, как правило, соответствуют снижению потребляемой ДСП мощности, что в реальной системе характерно для «спокойных» режимов работы печи. Разброс числовых значений коэффициентов и некоторая нечувствительность регулятора к изменению нагрузки позволяют говорить о сложности качественного ПИ-регулирования напряжения в режиме реального времени в системе с переменной нагрузкой.

В третьей главе выполнен структурный и параметрический синтез нечетких регуляторов с выводом по Мамдани и по Сугено. Алгоритм работы СУ СТК с нечетким регулятором приводится на рисунке 5.

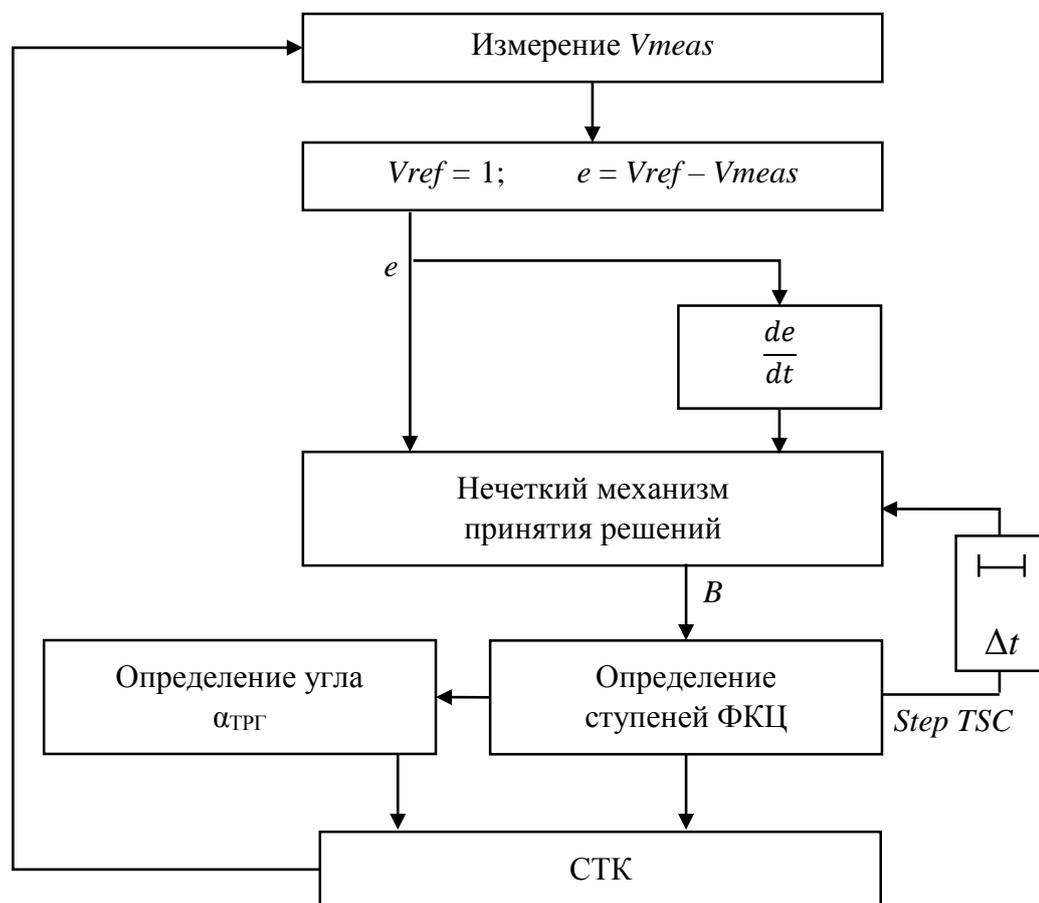


Рисунок 5 – Блок – схема нечеткого алгоритма стабилизации напряжения

На рисунке 6 показаны функции принадлежности выходной (проводимость  $B$ ) и входных (ошибка  $e$ , производная ошибки  $de/dt$  и  $Step TSC$ ) лингвистических переменных для НР с выводом по Мамдани. Переменная  $Step TSC$  принимает четкие значения, которые соответствуют включенным ФКЦ. Использование этой переменной позволяет избежать спонтанных переключений ФКЦ и сформировать расширенную базу правил НР (таблица 1).

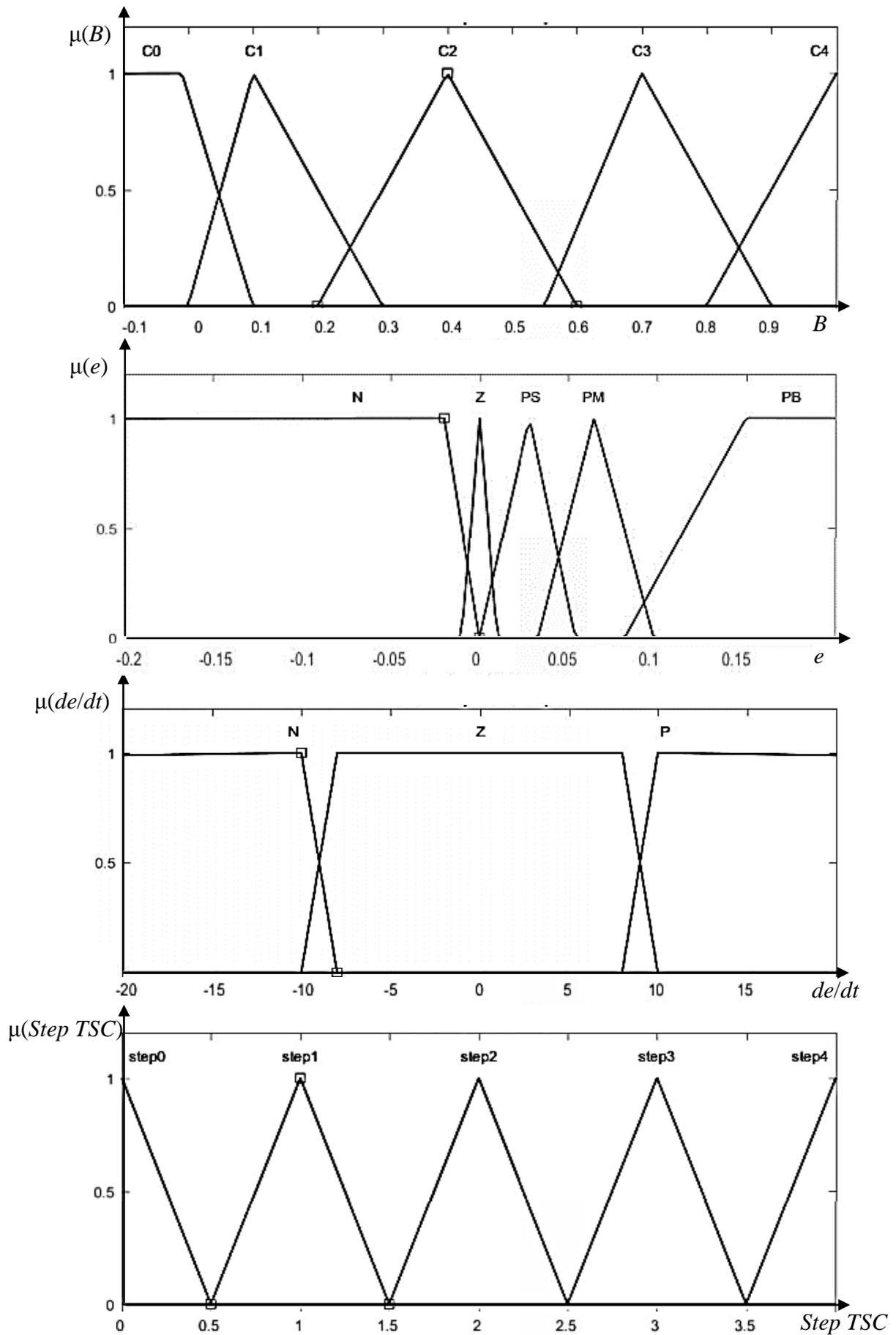


Рисунок 6 – Функции принадлежности выходной и входных переменных НР

Таблица 1 – База правил нечеткого регулятора с выводом по Мамдани

$de/dt$	$TSC$		Step0	Step1	Step2	Step3	Step4
	$e$						
<b>Z</b>	<b>N</b>		C0	C0	C1	C2	C3
	<b>Z</b>		C0	C1	C2	C3	C4
	<b>PS</b>		C1	C2	C2	C3	C4
	<b>PM</b>		C1	C2	C3	C4	C4
	<b>PB</b>		C4	C4	C4	C4	C4
<b>P</b>	<b>N</b>		C0	C1	C2	C3	C4
	<b>Z</b>		C0	C1	C2	C3	C4
	<b>PS</b>		C1	C2	C3	C3	C4
	<b>PM</b>		C1	C2	C3	C4	C4
	<b>PB</b>		C2	C3	C4	C4	C4
<b>N</b>	<b>N</b>		C0	C0	C0	C1	C2
	<b>Z</b>		C0	C0	C1	C2	C3
	<b>PS</b>		C0	C1	C2	C3	C3
	<b>PM</b>		C0	C1	C2	C3	C4
	<b>PB</b>		C0	C1	C2	C3	C4

Нечеткий регулятор с нечетким выводом по Сугено функционирует по алгоритму, показанному на рисунке 5. Исходное распределение функций принадлежности входных лингвистических переменных  $e$ ,  $de/dt$ ,  $Step$   $TSC$  представлено на рисунке 6. Для составления базы правил по алгоритму Сугено весь диапазон значений переменной  $B = [-0,1; 1]$  был поделен на уровни и обозначен от  $C-0.1$  до  $C1$ . По этим точкам была получена регулировочная характеристика СТК и составлена база правил, показанная в таблице 2.

В процессе настройки регулятора функции принадлежности входной переменной  $e$  приняли вид, показанный на рисунке 7

Таблица 2 – База правил по алгоритму нечеткого вывода Сугено

$de/dt$	$TSC$		Step0	Step1	Step2	Step3	Step4
	$e$						
<b>Z</b>	<b>N</b>		C-0.05	C0.1	C0.2	C0.25	C0.3
	<b>Z</b>		C0	C0.1	C0.3	C0.55	C0.75
	<b>PS</b>		C0.15	C0.3	C0.55	C0.8	C0.95
	<b>PM</b>		C0.45	C0.55	C0.65	C0.8	C0.95
	<b>PB</b>		C0.7	C0.75	C0.85	C0.95	C1
<b>P</b>	<b>N</b>		C0.2	C0.35	C0.45	C0.6	C0.75
	<b>Z</b>		C0.35	C0.45	C0.6	C0.7	C0.85
	<b>PS</b>		C0.55	C0.7	C0.8	C0.85	C0.95
	<b>PM</b>		C0.7	C0.75	C0.85	C0.9	C0.95
	<b>PB</b>		C0.8	C0.85	C0.9	C0.95	C1
<b>N</b>	<b>N</b>		C-0.1	C-0.05	C0	C0.05	C0.1
	<b>Z</b>		C-0.1	C0.1	C0.15	C0.25	C0.35
	<b>PS</b>		C0.05	C0.1	C0.15	C0.25	C0.4
	<b>PM</b>		C0.15	C0.25	C0.4	C0.5	C0.65
	<b>PB</b>		C0.25	C0.4	C0.55	C0.65	C0.75

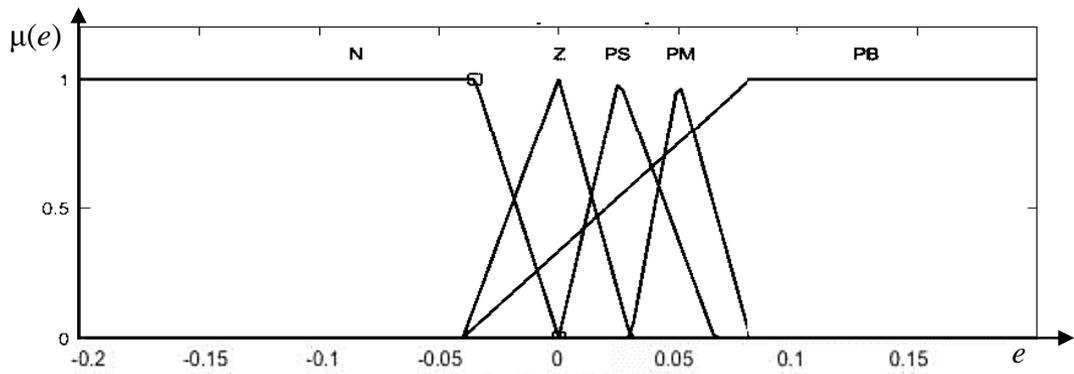


Рисунок 7 – Функции принадлежности переменной  $e$  для НР с выводом по Сугено

Основываясь на ограниченных вычислительных возможностях контроллера при технической реализации нечетких алгоритмов рассматривался нулевой порядок нечеткого вывода по Сугено. Поэтому для рассматриваемой СЭС алгоритм вывода по Мамдани обеспечивает более качественное регулирование. Результаты моделирования работы СТК с разными типами регуляторов при большой мощности нагрузки показаны на рисунке 8.

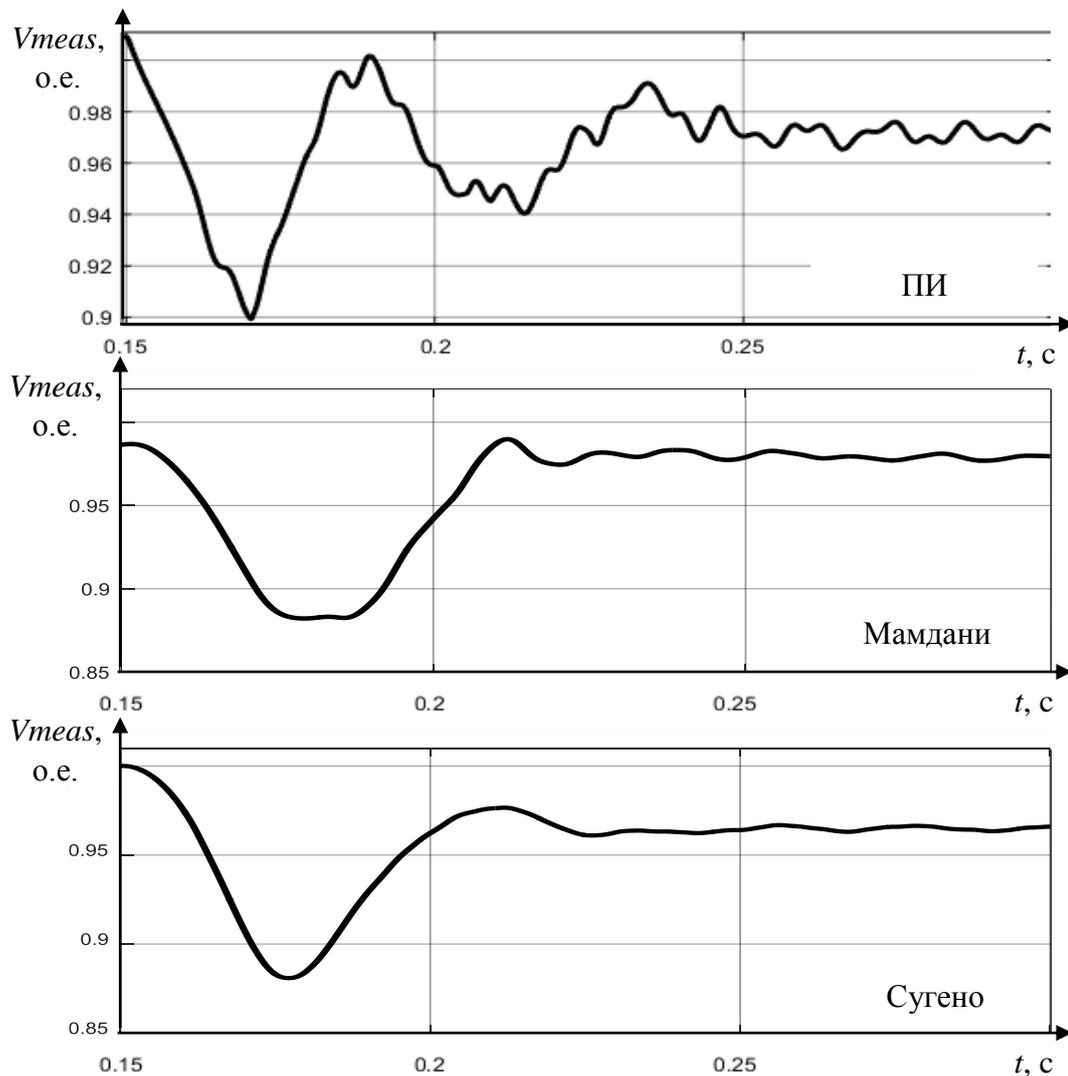


Рисунок 8 – Кривые, иллюстрирующие реакцию СЭС с СТК при большой мощности нагрузки

Переключение режимов работы нагрузки приводит к провалам напряжения. При программном управлении режимами плавки система управления СТК может быть дополнена входным сигналом, сообщаящим, что в ближайшее время произойдет изменение потребляемой мощности. Для этого подходит переменная  $de/dt$ , т.к. при переключении режимов печи происходит быстрое изменение нагрузки и, соответственно, быстро изменяется напряжение сети. Т.к. моменты переключения режимов печи известны заранее, то в систему управления СТК должен поступать упреждающий сигнал (рисунок 9), который позволит вывести переменную  $de/dt$  в области быстрых изменений (термы  $N$  и  $P$ ) до того, как эти изменения наступят. На рисунке 10 показан алгоритм, по которому работает блок коррекции сигнала.  $Step S1$  – текущий энергетический режим СЭС,  $Step S2$  – ожидаемый режим. Значение параметра  $Ch e$  определяется шириной ФП  $Z$  переменной  $de/dt$ . На рисунке 11 представлены результаты моделирования, показывающие влияние упреждающего сигнала на работу нечеткого регулятора.

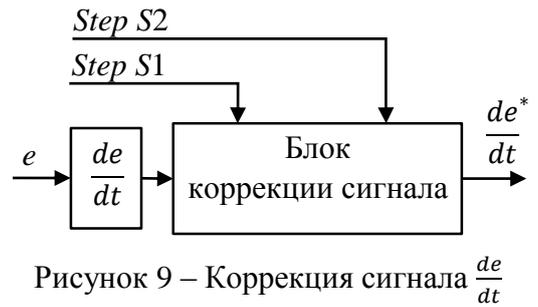


Рисунок 9 – Коррекция сигнала  $\frac{de}{dt}$

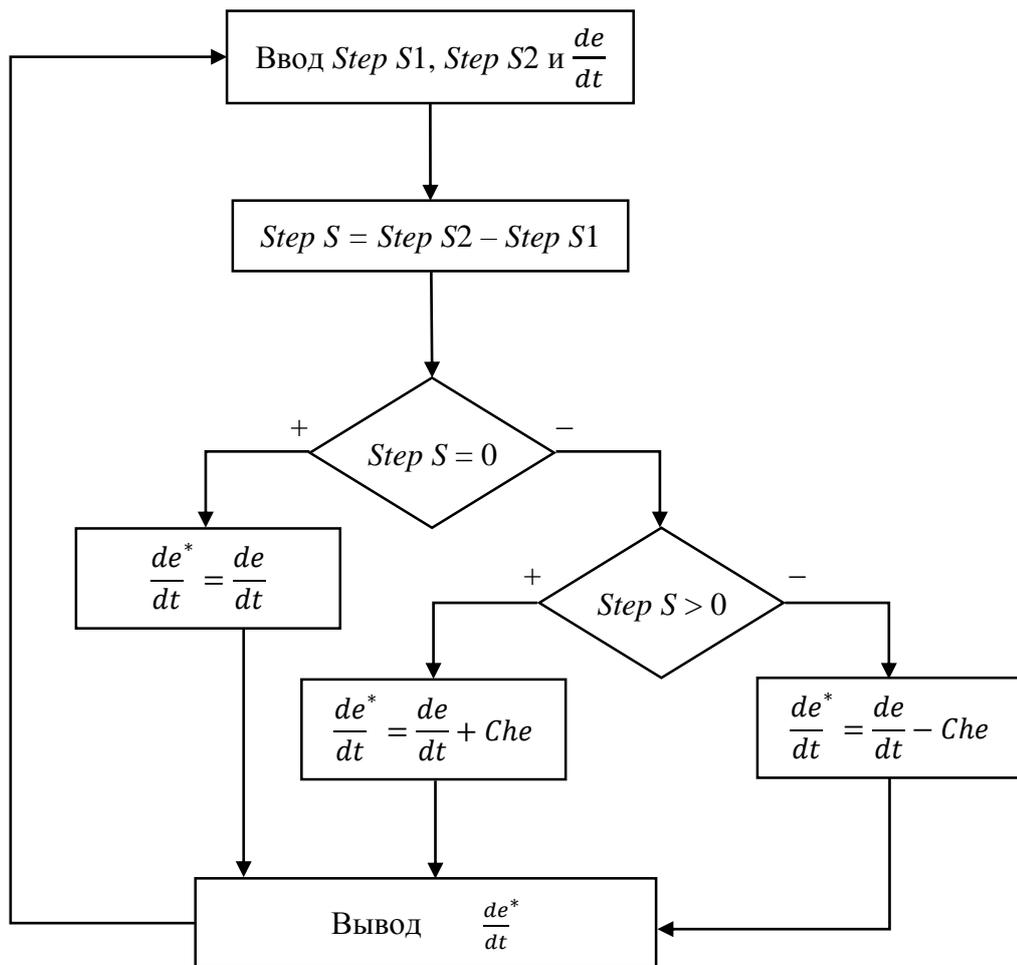


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма коррекции переменной  $de/dt$

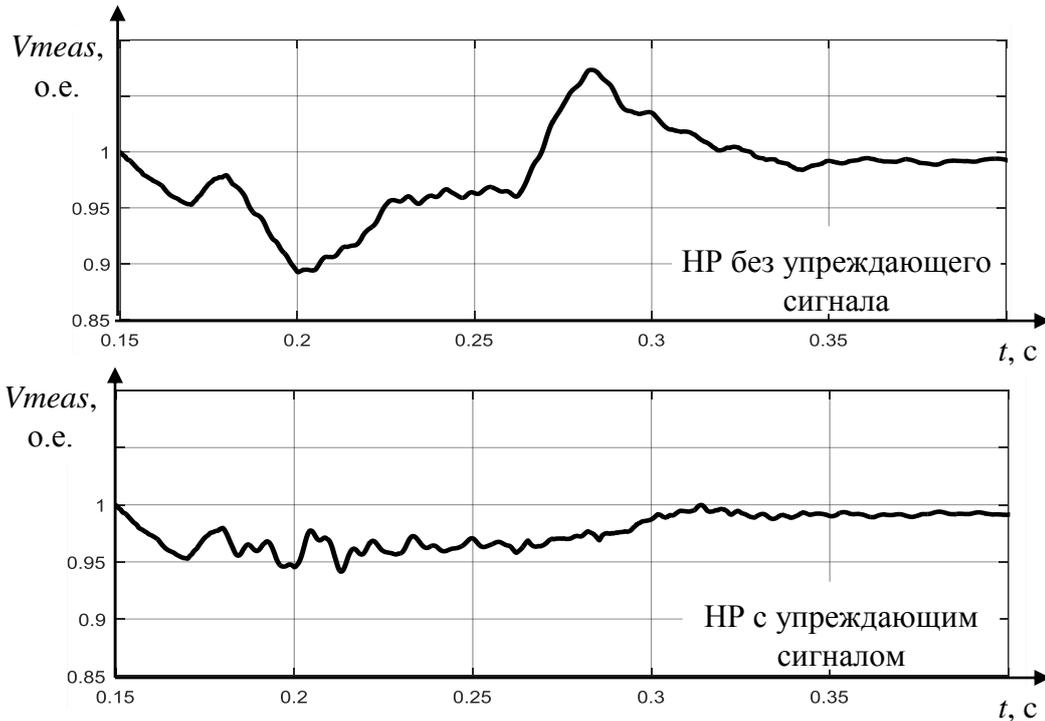


Рисунок 11 – Влияние упреждающего сигнала на работу нечеткого регулятора

**В четвертой главе** представлены результаты натурных испытаний макета электротехнической установки, содержащего в контуре регулирования напряжения программно-аппаратный нечеткий логический регулятор.

Макет представляет собой схему управления конденсаторами, компенсирующими влияние переменной нагрузки в цепи. Макет построен по одноканальной схеме, показанной на рисунке 12.

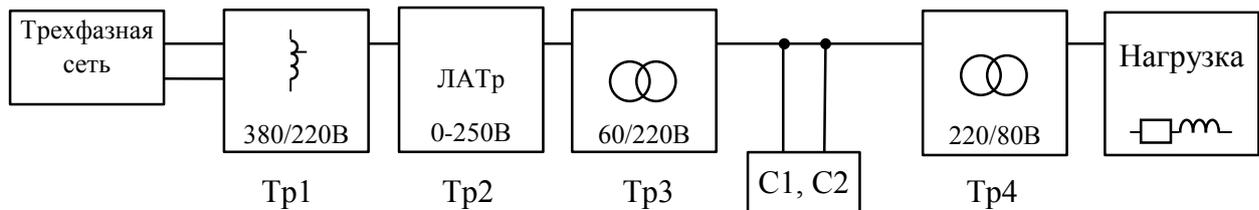


Рисунок 12 – Функциональная схема макета

Питание нагрузки производится от двух фаз через автотрансформатор  $Tr1$  с отводом 380/220В для обеспечения фазового сдвига, существующего в трансформаторе с обмотками  $Y/D$ .  $Tr3$  и  $Tr4$  имитируют соответственно трансформаторы 220/35кВ и (печной) понижающий трансформатор нагрузки 35000/1200В.

Система компенсации в макете представляет собой двухступенчатую конденсаторную батарею  $C1$  и  $C2$ , одна из которых имитирует ступень  $TSC1$ , вторая имитирует работу  $TCR$ . Коммутация конденсаторов осуществляется оптосимисторами. Смысл работы двухступенчатой батареи состоит в компенсации индуктивного тока нагрузки в две ступени, так что уменьшается падение напряжения на трансформаторах  $Tr3$  и  $Tr4$ . Структура программы, реализующей нечеткий регулятор в ПР200 показана на рисунке 13.

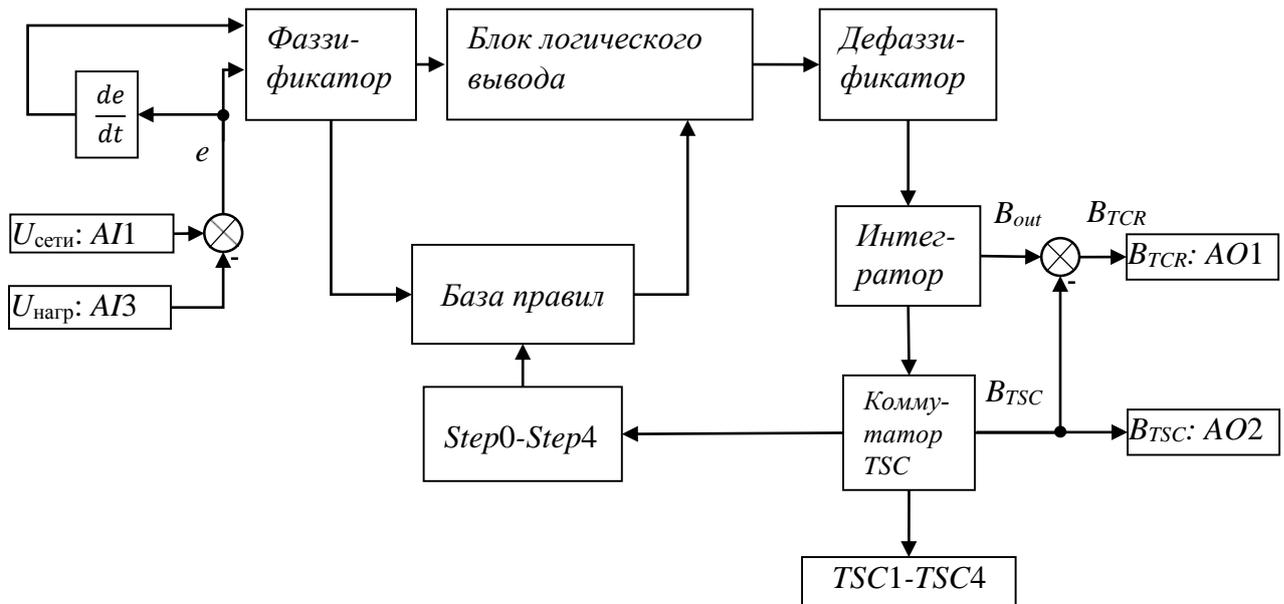


Рисунок 13 – Структурная схема нечеткого регулятора для ПР200

В блоке *Фаззификатор* формируются треугольные функции принадлежности (ФП):

- РВ, РМ, РS, Z, N для фаззификации сигнала ошибки  $e$ ;
- P, Z, N для фаззификации сигнала производной ошибки по времени  $de/dt$ .

Нечеткий вывод и процедура дефаззификации реализованы соответственно в *Блоке логического вывода* и в блоке *Дефаззификатор*. Процедура дефаззификация осуществляется по методу центра тяжести, поэтому в составе дефаззификатора присутствуют однотипные макросы, определяющие значение числителя и знаменателя центра тяжести площади, который формирует чёткое значение выходной величины

$$B = \frac{\int x \cdot z(x) dx}{\int z(x) dx}.$$

Поскольку фактически регулирующая величина проводимости  $B_{svc}$  находится в пропорциональной зависимости от величины ошибки  $e$  и её производной  $de/dt$ , то в канал регулирования введён *Интегратор*, специально разработанный из блоков элементарных функций OwenLogic. Коэффициент интегрирования был подобран на этапе отладки на натурном макете.

Полученный в результате дефаззификации сигнал  $B$  интегрируется далее в величину  $B_{out-I}$ . Метод центра тяжести не позволяет получить максимальное значение вычисленной величины  $B = 1$ . В процессе отладки было получено значение  $B = 0.933$ , поэтому достижение максимального значения для управления коммутатором конденсатора, равного единице, обеспечивается установкой предела интегрирования  $B_{out-I} = 1$ .

Интегрированное значение  $B_{out-I}$  подаётся в схему управления включением ступеней конденсаторных батарей *TSC*. Непосредственно для включения ступеней предназначены сигналы  $TSC1 - TSC4$ , которые поступают на вход дешифратора

DC4\_41. Дешифратор формирует сигналы  $STEP0 - STEP4$  по количеству включенных ступеней, которые используются в базе правил НР, скорректированной при отладке программы.

Для корректной работы интегратора в отрицательной области величины ошибки  $e$  потребовалось принудительное переключение вычислителя  $B_{svc}$  на ФП С0 и С1 для отрицательных и около нулевых значений выходной переменной дефаззификатора и был инвертирован знак ошибки на входе интегратора.

На рисунке 14 представлены осциллограммы, которые отображают два характерных сигнала регулятора: выходной сигнал требуемой величины мощности компенсатора (3) и ошибка регулирования (6).

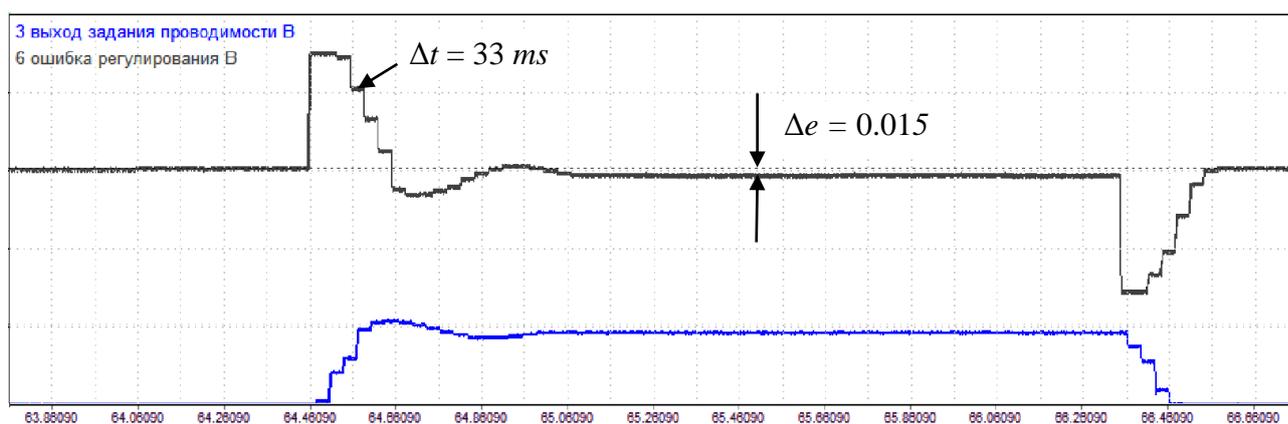


Рисунок 14 – Осциллограммы работы ПР200, замкнутого с выхода на вход.

В процессе отладки обнаружилось, что при замкнутой работе регулятора аналоговые входы и выходы ПР200 обеспечивают дискретизацию по времени с периодом  $\Delta t = 33$  мс, как это видно на осциллограммах. Это значение позволяет сымитировать в ПР200 задержку измерителя-вычислителя реактивной мощности и отклик срабатывания тиристорного коммутатора SVC.

Таким образом была проверена адекватность работы программы и методом подбора определен коэффициент интегратора.

В отличие от режима работы регулятора, замкнутого «на себя» без нагрузки, работа ПР200 в составе макета потребовала коррекцию коэффициента интегрирования программно-аппаратного регулятора. Для оптимизации быстродействия и уменьшения количества переключающих сигналов ступеней была подобрана оптимальная величина  $K_i = 0.1$ .

На осциллограмме (рисунок 15) показана работа коммутатора и соответствующие изменения угла сдвига фаз напряжения и тока в точке присоединения конденсаторной батареи. Для осциллограммы 1 – соответствует состоянию подключения конденсатора 1 ступени С1 (1), имитирующей ступень TSC1, 2 – конденсатора 2 ступени С2 (4), имитирующей включение дросселя ФКЦ TCR.

Конденсаторы ступеней С1 и С2 подобраны так, что каждый из них компенсирует примерно половину индуктивной мощности нагрузки. Соответственно снижению реактивной составляющей тока снижается и падение напряжения на трансформаторе Тр3.

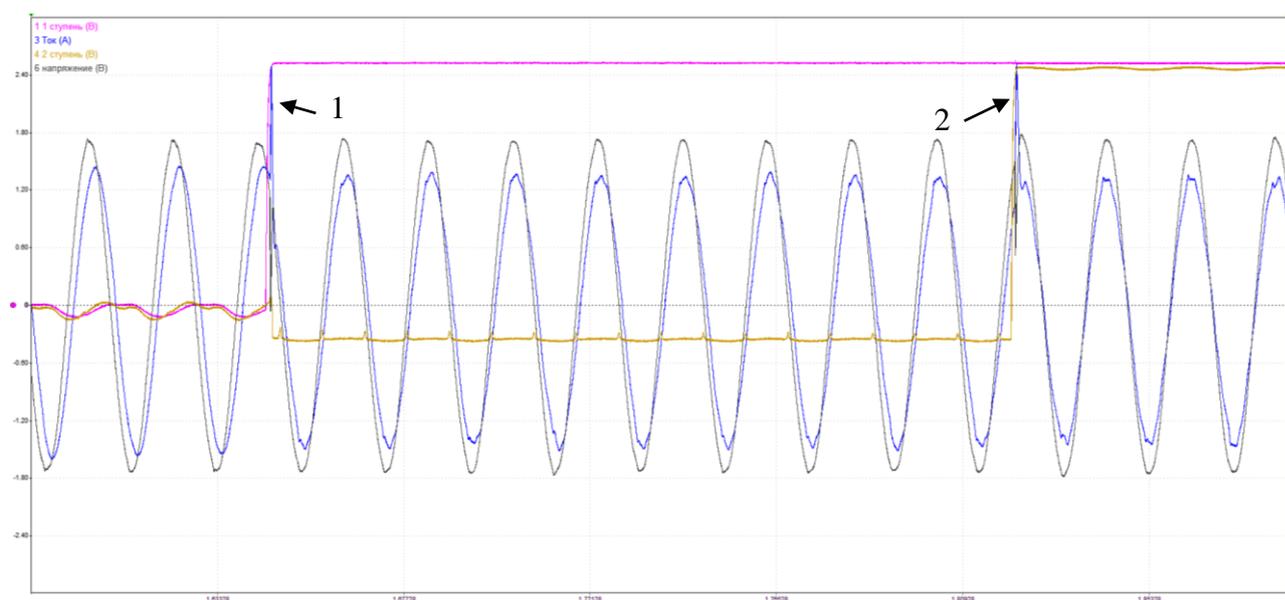


Рисунок 15– Осциллограммы напряжений и токов при компенсации РМ нагрузки конденсаторами  $C1$  и  $C2$ .

На приведенной осциллограмме видно изменение фазового угла между током (3) и напряжением (6), но не видно увеличение амплитуды напряжения при включении конденсаторов  $C1$  и  $C2$ . Цифровой мультиметр в режиме измерения напряжения True RMS показывал возрастание напряжения примерно на 2%.

Следует отметить, что в макете моменты отпирания оптосимисторов не привязаны к сети из-за отсутствия возможности ввести в программу ПР200 сигнала синхронизации с сетью. Поэтому на осциллограммах бывают всплески напряжения и тока в моменты отпирания оптосимисторов. По той же причине невозможно ввести данные об измеренных напряжениях по каждому полупериоду. Для обеспечения корректного восприятия работы макета в целом была построена схема усреднения сигналов о величине измеряемого синусоидального напряжения.

Для приближения к реальному режиму коммутации  $TSCR$  в программу был добавлен узел формирования ШИМ сигнала управления оптосимистором 1 ступени. Скважность ШИМ определяется процентным соотношением по условию

$$B_{TSCR} = B_{out} - B_{TSC}.$$

В схеме ШИМ задействованы аналоговые выходы ПР200 в качестве источника напряжения для светодиодов оптосимисторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научно-практической задачи – улучшить качество регулирования электрических величин СЭС с целью соблюдения показателей качества ЭЭ, установленных действующим ГОСТ 32144-2013.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Современные компенсирующие устройства, применяемые на металлургических предприятиях, недостаточно эффективно реагируют на резкие изменения параметров нагрузки, что приводит к превышению допустимых значений показателей качества электроэнергии: доза фликера превышает норму в 5 и более раз, отклонения напряжения доходят до 12%, наибольшие значения коэффициентов гармонических составляющих  $K_{U(2)}$  – до 12%,  $K_{U(3)}$  – до 5%,  $K_{U(5)}$  – до 4.5%,  $K_{U(29)}$  – до 2%. Показано, что одним из способов повышения скорости реакции является оптимизация алгоритмов работы системы управления компенсирующего устройства. В том числе с применением средств искусственного интеллекта.

2. Разработанная имитационная модель СЭС металлургического предприятия с ДСП и СТК позволяет учесть технологические особенности рассматриваемой системы. В модели учтены основные системообразующие блоки и такие неявные факторы, как взаимная индуктивность токоподводов, падение напряжения в линии, гистерезис магнитопроводов, нелинейные характеристики силовых ключей, инерционность вычислительного алгоритма измерителя синусоидального напряжения.

Электрическая дуга переменного тока как электромагнитный процесс формализована по схеме замещения, которая представляет последовательное соединение резистивного  $R_d$  и индуктивного  $X_L$  элементов. Переменный характер параметров реализуется на основе управляемых источников переменного напряжения, которые вырабатывают сигналы, соответствующие падениям напряжения на сопротивлении и индуктивности дуги.

По модели были определены диапазоны и выбраны точные значения параметров дуги для последующих имитационных экспериментов, что обеспечило релевантность сравнения результатов моделирования. Сопротивление дуги  $R_d$  изменяется от 0.1 мОм до 87 мОм, индуктивное сопротивление  $X_L$  – от 1.7 мОм до 12 мОм. Для выполнения исследований из указанных диапазонов были выбраны следующие точки  $R_d = [0,1; 1; 3; 5; 7; 9; 11; 21; 35; 80]$  мОм;  $X_L = [1,7; 5; 9; 12]$  мОм.

В модели учтена возможность переключения ступеней печного трансформатора и реактора, влияющих на режимы работы системы электроснабжения дуговой печи.

3. Результаты оценки влияния параметров дуговой печи ( $R_d$  и  $X_L$ ), параметров печного трансформатора и реактора на измеряемые (токи, напряжения) и рассчитанные (мощности, коэффициент мощности) параметры системы электроснабжения в точке подключения СТК и непосредственно на шинах питания печи на основе разработанной модели показали, что изменение параметров печного трансформа-

тора и реактора оказывает меньшее влияние на измеряемые и рассчитанные параметры СЭС, чем изменение параметров дуговой печи. Это позволило выявить наиболее чувствительные области СЭС к изменениям параметров дуги.

4. Показано, что построение системы стабилизации напряжения СЭС в точке подключения СТК на основе классических законов регулирования при резко переменной нагрузке не обеспечивает достижения желаемых результатов. Нечувствительность регулятора в некоторых зонах, неоднозначность коэффициентов регулирования, увеличение статической ошибки и времени регулирования при увеличении мощности нагрузки приводит к невозможности стабилизации уровня напряжения при резко переменной нагрузке.

5. Предложенный подход и реализованный на его основе структурный синтез нечеткой системы управления статическим тиристорным компенсатором в системе электроснабжения с ДСП, придал системе свойство робастности. Наблюдается снижение отклонений напряжения на 5 – 10 % и повышение коэффициента мощности на 20 – 30 % в сравнении с системой, содержащей ПИ регулятор.

6. Для учета специфических особенностей технологического режима работы ДСП предложено усовершенствовать структуру нечеткого регулятора введением дополнительного информационного канала. Это позволило достичь практически одинаковых показателей качества СЭС при работе ДСП на разных ступенях.

7. Разработанные алгоритмы нечеткого управления компенсирующим устройством, реализованные при построении нечеткого регулятора как по правилам вывода Мамдани, так и по Сугено, продемонстрировали улучшение показателей качества электроэнергии в СЭС с резкопеременной нагрузкой. Значение отклонения напряжения  $V_{meas}$  не превышает 5 – 6 % и большую часть времени укладывается в 3 – 4 %. Коэффициент мощности  $\cos\phi$  стремится к 1 с редкими падениями до 0.8 – 0.9.

8. Программно-аппаратная реализация НР на программируемом реле ПР200 (ООО «Овен», производство России) показала принципиальную возможность применения неспециализированных аппаратных платформ для ограниченного круга задач, требующих управления средствами нечеткой логики. Предложенный способ реализации нечеткого управления обеспечивает работу алгоритма Мамдани при регулировании напряжения в сети переменного тока с активно-индуктивной нагрузкой.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Соловьев В.А., Дерюжкова Н.Е., Купова А.В. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 2. С. 23-28.

2. Дерюжкова Н.Е., Купова А.В., Соловьев В.А. Нечеткий логический регулятор статического компенсатора / Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2017. Т. 1. № 4 (32). С. 11-18.

3. Купова А.В., Лановенко Е.В., Соловьёв В.А., Гудим А.С. Моделирование дуговой печи с управляемыми электродами в Matlab/ Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2019. Т. 1. № 4 (40). С. 22-27.

4. Дерюжкова, Н.Е., Купова А.В., Соловьев В. А. Нечеткие алгоритмы управления статическим тиристорным компенсатором в системе электроснабжения с переменной нагрузкой // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2020. – Т. 1. – № 1(41). – С. 51-58.

5. Купова А.В., Соловьев В.А., Светлаков А.В., Челухин В.А. Стабилизация напряжения статическим тиристорным компенсатором с нечетким регулятором в системе с переменной нагрузкой // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. - 2021. –№ VII(55). – С. 48-57.

6. Купова, А. В. Моделирование переменных параметров работы дуговой сталеплавильной печи / А. В. Купова, Е. В. Лановенко // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2022. – № 9. – С. 71-79. – DOI 10.32603/2071-8985-2022-15-9-71-79. – EDN IXXJVI.

7. Купова А.В. Программная реализация нечеткого регулятора компенсирующего устройства на языке функциональных блоков / А.В. Купова, А.В. Купов, В.А. Соловьев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. №V(77).

8. Купова А.В. Эффективность применения нечетких алгоритмов в системе управления компенсирующим устройством/ А.В. Купова, А.В. Купов, В.А. Соловьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 8.

### *Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:*

9. Deryuzhkova N.E., Solovyev V.A., Kupova A.V. Intelligent Control System for Static Var Compensator of Arc Furnace // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). - Russia, Vladivostok (Asian-Pacific region), October 1 – 4, 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934436

### *Другие публикации:*

10. Soloviov Vyacheslav, Kupov Alexandr, Khandoshko Konstantin, Kupova Anastasia MATHEMATICAL DESCRIPTION OF COMPLICATED POWER SUPPLY

SYSTEMS (Математическое описание сложных систем электроснабжения). / Eleventh international conference on Electrical machines, drives and power systems ELMA 2005, с. 487 - 490.

11. Соловьев В.А., Купов А.В., Купова А.В. Бардеева Л.С. Моделирование системы энергоснабжения «ГПП – дуговая печь» со статическим компенсатором / Международный симпозиум «Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы»: материалы международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (Комсомольск-на-Амуре, 21-22 октября 2010 г.): В 5т. Т.3 С. 103-106.

12. Соловьев В.А., Купова А.В. Исследование влияния параметров дуги ДСП на качество питающего напряжения / Электромеханические преобразователи энергии. Материалы V юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.А. Сипайлова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 112 - 115.

13. Купова А.В., Соловьев В.А О возможностях реализации SmartGrid в объединенных сетях / Энергия Евразии: мат-лы научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Владивосток, 18–20 декабря 2013 года /Дальневосточный федеральный университет. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2014. с. 27-28.

14. Купова А.В. «Fuzzy-регулятор компенсатора реактивной мощности» 70-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета: сборник докл. студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017- с. 167-170.

15. Купова А.В., Купов А.В. Параметры регулятора при управлении статическим тиристорным компенсатором в системе энергоснабжения дуговой печи / В сборнике: Электротехнические комплексы и системы. Материалы международной научно-практической конференции. В 2-х томах. г. Уфа, 19 октября 2017. С. 20-24.

16. Купова А.В., Купов А.В. Особенности автоматической настройки ПИ-регулятора в моделях Simscapе / Электротехнические комплексы и системы: Материалы Международной научно-практической конференции, Уфа, 24 октября 2018 года. – Уфа: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2018. С. 26-29.