

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Комсомольский – на – Амуре государственный университет»

*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 (промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Соловьев В.А.

Комсомольск-на-Амуре – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
<b>ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖАЮЩИХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Показатели качества электроэнергии и их влияние на оборудование промышленных предприятий.....	11
1.2 Специфика работы электрооборудования металлургического предприятия.....	17
1.3 Эффективность мероприятий, выполняемых на металлургических предприятиях для повышения качества электроэнергии.....	19
1.4 Пути повышения качества электроэнергии в точке подключения металлургического предприятия.....	24
1.5 Выводы по главе 1.....	27
<b>ГЛАВА 2 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТК В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....</b>	<b>29</b>
2.1 Разработка имитационной модели системы электроснабжения металлургического предприятия.....	29
2.2 Разработка математической модели дуговой сталеплавильной печи.....	33
2.3 Исследование влияния переменной нагрузки на питающие сети в системе без компенсатора.....	46
2.4 Настройка параметров классического регулятора в системе управления статическим тиристорным компенсатором.....	57
2.5 Выводы по главе 2.....	69
<b>ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИМ ТИРИСТОРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ.....</b>	<b>72</b>
3.1. Синтез нечеткого регулятора в системе управления статическим тиристорным компенсатором по алгоритму Мамдани.....	72

3.2 Синтез нечеткого регулятора по алгоритму Мамдани с дополнительной входной переменной.....	79
3.3. Нечеткий регулятор, учитывающий изменение рабочих режимов электроприемника.....	92
3.4 Синтез нечеткого регулятора в системе управления статическим тиристорным компенсатором по алгоритму Сугено.....	96
3.5 Выводы по главе 3.....	105
<b>ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВО</b> .....	<b>107</b>
4.1 Разработка программы нечеткого регулятора для ПР 200.....	107
4.2 Отладка программы нечеткого регулятора в среде OwenLogic.....	117
4.3 Проверка работоспособности программы в контроллере с замкнутым входом-выходом без нагрузки.....	120
4.4 Исследование работы нечеткого регулятора на макете с переменной активно-индуктивной нагрузкой.....	122
4.5 Выводы по главе 4.....	131
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>132</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>135</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> .....	<b>150</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b> .....	<b>163</b>

## Список сокращений и условных обозначений

- ВАХ – вольт-амперная характеристика;
- ДСП – дуговая сталеплавильная печь;
- КБ – конденсаторная батарея;
- КР – компенсирующий реактор;
- КУ – компенсирующее устройство;
- КЭ – качество электроэнергии;
- ЛАТр – лабораторный автотрансформатор;
- НР – нечеткий регулятор;
- ПКЭ – показатели качества электроэнергии;
- СТК – статический тиристорный компенсатор;
- СУ – система управления;
- СЭС – система электроснабжения;
- ТВ – тиристорный вентиль;
- Тр – трансформатор;
- ТРГ (TCR) – тиристорно-реакторная группа;
- ФКЦ (TSC) – фильтрокомпенсирующая цепь;
- ФП – функции принадлежности;
- ФР – фильтровый реактор;
- ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

## ВВЕДЕНИЕ

### **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 схемотехникой, 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 электропитания искажающего электроприемника.

**Предмет исследований** – алгоритмы управления компенсирующим устройством в системе электропитания 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 натурного 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.

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 неспециализированного программируемого реле ПР 200.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена использованием стандартных методов имитационного и натурного 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 публикаций 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 – 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.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖАЮЩИХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ НА ПИТАЮЩИЕ СЕТИ

## 1.1 Показатели качества электроэнергии и их влияние на оборудование промышленных предприятий

С момента создания энергетических систем одной из важнейших проблем является обеспечение надежного и эффективного электроснабжения потребителей, поэтому большое внимание уделяется вопросам электромагнитной совместимости оборудования и качества электрической энергии в точках подключения промышленных предприятий. В условиях развития технологий эта проблема продолжает оставаться актуальной, т.к. большинство современных технологических установок можно отнести к искажающим электроприемникам, оказывающим негативное влияние на показатели качества электроэнергии (ПКЭ).

На территории Российской Федерации качество электроэнергии регламентируется в ГОСТ 32144-2013 [22], согласно которому устанавливаются и нормируются показатели, связанные с характеристиками напряжения электропитания. По длительности отклонения характеристик напряжения от номинальных значений разделяют продолжительные изменения характеристик и случайные события. Случайные события зачастую обусловлены повреждениями оборудования, погодными условиями и т.п. Влияние потребителей электрической энергии в большей степени оценивается показателями, которые описывают продолжительные изменения характеристик напряжения. К ним относятся: отклонение частоты  $\Delta f$ , отклонения напряжения  $\delta U_{( )}$  и  $\delta U_{(*)}$ , кратковременная  $P_{st}$  и длительная  $P_{lt}$  дозы фликера, коэффициенты гармонических составляющих  $K_{U(n)}$  и суммарный коэффициент гармонических составляющих  $K_U$ , коэффициенты несимметрии напряжения по обратной  $K_{2U}$  и нулевой  $K_{0U}$  последовательностям.

**Отклонение частоты** определяется разностью значений основной частоты напряжения  $f_m$  и номинальной частоты  $f_{nom} = 50$  Гц

$$\Delta f = f_m - f_{nom}.$$

В синхронизированных системах электроснабжения  $\Delta f$  не должно превышать значений  $\pm 0.2$  Гц, но допускаются кратковременные отклонения до  $\pm 0.4$  Гц, для изолированных систем –  $\pm 1$  Гц и  $\pm 5$  Гц, соответственно.

Частота напряжения в электрических сетях определяется частотой вращения генераторов. Однако любое нарушение баланса между потребляемой и вырабатываемой мощностями приводит к изменению скорости вращения роторов турбин и, соответственно, изменению частоты сети. Влияние этого показателя на электрооборудование в основном проявляется в снижении активной мощности в системе и изменении скорости вращения асинхронных двигателей, что в свою очередь приводит к снижению производительности оборудования и нарушениям технологического процесса [84, 34]. Так как при этом снижается производительность оборудования и на самой электростанции, то без регулирования этого показателя возможно ухудшение ситуации и появления эффекта «лавина частоты», который в свою очередь может привести к «лавине напряжения» [86].

Положительное  $\delta U_{( )}$  и отрицательное  $\delta U_{(*)}$  **отклонения напряжения** характеризуют медленные изменения напряжения и определяются выражениями

$$\delta U_{( )} = \left[ \frac{U_0 - U_{m( )}}{U_0} \right] \cdot 100;$$

$$\delta U_{(*)} = \left[ \frac{U_{m(*)} - U_0}{U_0} \right] \cdot 100.$$

где  $U_{m( )}$  и  $U_{m(*)}$  – значения напряжения электропитания, меньше  $U_0$  и больше  $U_0$ , усредненные в интервале времени 10 минут,  $U_0$  – номинальное напряжение (или согласованное напряжение в сетях среднего и высокого напряжения). Значения  $\delta U_{( )}$  и  $\delta U_{(*)}$  не должны превышать 10%. Для потребителей электрической энергии значения показателей  $\delta U_{( )}$  и  $\delta U_{(*)}$  могут быть установлены ресурсоснабжающей организацией, но значение показателей определяется таким, чтобы в точках передачи электроэнергии выполнялись нормы ГОСТ 32144 – 2013 [22].

Отклонение уровня напряжения от номинального значения даже в допустимых пределах приводит к снижению производительности, повышению расхода

электроэнергии и сокращению срока службы практически для всех видов электроприемников, что не может не оказывать влияние на качество технологических процессов [31, 32, 39, 106, 108, 109].

В [108, 109] приводятся результаты исследований о влиянии отклонения напряжения в пределах допустимых значений на производительность оборудования и выпуск продукции на различных промышленных предприятиях. Так, например, на метизно-металлургическом заводе снижение напряжения более чем на 5 % приводит к существенному снижению производительности накатных автоматов, повышение более чем на 5 % – к снижению качества продукции. В еще одном примере говорится: «при отжиге заготовок из цветного металла в печах сопротивления общей мощностью 675 кВт в случае снижения напряжения на 7% технологический процесс продолжался 5ч вместо 3 ч при номинальном напряжении. При снижении напряжения на 10% и более технологический процесс был невозможен».

Колебания и одиночные быстрые изменения напряжения приводят к появлению **фликера**. Кратковременная (измеренная в интервале 10 минут) доза фликера  $P_{st}$  не должна превышать значения 1.38, а длительная (в интервале 2 часа) доза  $P_{lt}$  – значения 1.

Как правило, негативное влияние фликера рассматривают в контексте его воздействия на осветительное оборудование и, соответственно, зрение человека. Однако в [108] приводятся следующие примеры влияния колебаний напряжения: снижение качества работы многоточечной машины контактной сварки, установленной на автозаводе, при повышении фликера до 10%; отключение синхронных двигателей, разрушение сердечников индукционных плавильных печей и появления брака продукции установок высокочастотного нагрева при подключении к общей шине одновременно высокочастотных преобразовательных агрегатов, дуговой и индукционных печей; нарушение устойчивого режима работы системы управления при подключении печей сопротивления к питанию через тиристорные преобразователи и др.

Одиночные быстрые изменения напряжения появляются в результате резкого изменения нагрузки и характеризуются быстрым переходом от одного значения

напряжения к другому. Обычно такие изменения происходят в пределах 4 – 5 % от номинального значения и при превышении уровня 10% «классифицируются как провалы напряжения или перенапряжения» [22, с7]. Влияние провалов напряжения на электрооборудование проявляется как воздействие на помехочувствительные элементы и может приводить к отказам оборудования [31].

Подключение потребителей с нелинейной нагрузкой приводит к появлению **несинусоидальности напряжения**. Допустимые значения показателей несинусоидальности устанавливаются в [22]. Значения  $K_{U(n)}$  зависят от напряжения в сети и номера гармонической составляющей. Нормально допустимые значения коэффициентов  $K_{U(n)}$  для первых 21 гармонических составляющих приводятся в таблице 1.1.

Таблица 1.1. – Коэффициенты гармонических составляющих  $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей $n$	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ , % $U_1$			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0.38	6 – 25	35	110 – 220
2	2	1.5	1	0.5
3	5	3	3	1.5
4	1	0.7	0.5	0.3
5	6	4	3	1.5
6	0.5	0.3	0.3	0.2
7	5	3	2.5	1
8	0.5	0.3	0.3	0.2
9	1.5	1	1	0.4
10	0.5	0.3	0.3	0.2
11	3.5	2	2	1
12	0.2	0.2	0.2	0.2
13	3	2	1.5	0.7
14	0.2	0.2	0.2	0.2
15	0.3	0.3	0.3	0.2
16	0.2	0.2	0.2	0.2
17	2	1.5	1	0.5
18	0.2	0.2	0.2	0.2
19	1.5	1	1	0.4
20	0.2	0.2	0.2	0.2
21	0.2	0.2	0.2	0.2

Значения нечетных гармонических составляющих, не кратных 3, для  $n = 23$  и выше соответствуют значениям при  $n = 19$ , кратных 3 – для  $n = 27$  и выше соответствуют значениям при  $n = 21$ . Значения четных гармонических составляющих для

$n = 16$  и выше соответствуют значениям при  $n = 12$ . Предельно допустимые значения определяются по увеличенным в 1.5 раза нормально допустимым значениям.

Значения коэффициентов  $K_U$  зависят от напряжения в сети. Нормально допустимые и предельно допустимые значения приводятся в таблице 1.2.

Таблица 1.2. – Коэффициенты суммарных гармонических составляющих  $K_U$

Значения нормально (предельно) допустимых коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_U$ , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0.38	6 – 25	35	110 – 220
8 (12)	5 (8)	4 (6)	2 (3)

При несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения появляются дополнительные потери активной мощности, которые особенно сильно проявляются в генераторах, двигателях, трансформаторах и конденсаторах. Дополнительные потери приводят к перегреву обмоток, усиливают процесс старения изоляции, влияют на погрешность приборов измерения и снижают качество выпрямления тока при работе вентильных преобразователей [30, 31, 108].

**Несимметрия напряжения** в трехфазной системе обусловлена неравномерной нагрузкой по фазам. Кратковременная несимметрия возникает в результате аварийных процессов: несимметричных коротких замыканий, обрывов проводов и т.п. Длительная несимметрия появляется в результате несимметрии в элементах электрических сетей (продольная несимметрия) или неравномерной по фазам нагрузки у потребителей электрической энергии (поперечная несимметрия) в результате применения мощных однофазных или мощных несимметричных трехфазных электроприемников [108].

Анализ несимметрии в трехфазной системе выполняется определением прямой, обратной и нулевой последовательностей напряжения по методу симметричных составляющих. Согласно установленным в [22] нормам коэффициенты несимметрии напряжения по обратной  $K_{2U}$  и нулевой  $K_{0U}$  последовательностям не должны превышать 2%, но возможны кратковременны превышения до 4%.

В результате несимметрии наблюдается снижение реактивной мощности в конденсаторных батареях и, следовательно, снижается эффективность их применения, появляются сильные вибрации вращающихся частей синхронных машин, что может привести к разрушению конструкции машины, снизится срок службы трансформаторов и др. Наиболее сильно негативный эффект несимметрии проявляется в асинхронных машинах, которые являются «наиболее распространенными приемниками электроэнергии» и «используются для привода самых разнообразных механизмов» [109, с. 46]. Согласно [108, с. 164] «при несимметрии напряжения в 4% срок службы полностью загруженного асинхронного электродвигателя сокращается в 2 раза. При несимметрии напряжений, равной 5%, располагаемая мощность двигателей уменьшается на 5 – 10%, а при несимметрии 10% – на 20 – 50% в зависимости от исполнения электродвигателя».

Для повышения энергетической эффективности предприятий особое внимание следует уделить также показателю, учитывающему **реактивную составляющую потребляемой мощности**. Этот показатель не описан в [22], но имеет важное значение, т.к. влияет на энергосбережение и энергетическую эффективность предприятия [41]. В [36, с. 37] утверждается: «практически все показатели качества электроэнергии по напряжению зависят от потребляемой промышленными электроприемниками реактивной мощности. Поэтому вопросы качества электроэнергии необходимо рассматривать в непосредственной связи с вопросами компенсации реактивной мощности». В результате перетоков реактивной мощности в системе электроснабжения наблюдается снижение уровня напряжения в узлах СЭС и увеличиваются потери активной мощности в системе [21, 34, 39, 41, 49].

Для оценки реактивной составляющей мощности используют коэффициент мощности  $\cos\varphi$  или коэффициент реактивной мощности  $tg\varphi$ , которые определяются следующими выражениями

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}, \quad tg\varphi = \frac{Q}{P},$$

где  $S$  – полная мощность,  $P$  – активная составляющая мощности,  $Q$  – реактивная составляющая мощности.

В таблице 1.3 приводятся допустимые диапазоны коэффициента реактивной мощности согласно нормам, установленным в [83], и рассчитанные по ним диапазоны  $\cos\varphi$ .

Таблица 1.3 – Диапазоны допустимых значений  $\operatorname{tg}\varphi$  и  $\cos\varphi$ .

Уровень напряжения в точке поставки потребителя электрической энергии	$\operatorname{tg}\varphi$	$\cos\varphi$
110 кВ	0 – 0.5	0.89 – 1
35 кВ	0 – 0.4	0.92 – 1
1 – 35 кВ	0 – 0.4	0.92 – 1
менее 1 кВ	0 – 0.35	0.94 – 1

По приведенным выше примерам видно, что снижение качества электроэнергии отрицательно влияет на срок службы и режимы работы электрооборудования промышленных предприятий даже при условии соблюдения нормативов, установленных для ПКЭ. Поэтому целесообразно применение устройств, позволяющих компенсировать негативное влияние искажающих электроприемников на электрические сети и других потребителей ЭЭ.

## 1.2 Специфика работы электрооборудования металлургического предприятия

Любое металлургическое предприятие, с точки зрения электропотребления, можно рассматривать как потребителя, который существенно ухудшает качество электрической энергии в месте включения в общие сети. Это обусловлено наличием большого количества искажающих электроприемников, задействованных в технологическом процессе. Соотношение нагрузки между ними согласно [36] имеет следующий вид:

- электродвигатели 72%;
- электротермические приемники 11%;
- выпрямители 11%;
- сварочные аппараты 3%;
- освещение 3%.

В данном распределении большая часть отводится под электродвигатели, которые задействованы практически на каждом участке металлургического производства: в электроприводах прокатных станов, металлургических кранов, агломерационных машин, конвейеров и подъемников, механизмов загрузки печей, механизмов поворота и перемещения и т.п. В зависимости от поставленных задач используют различные типы двигателей постоянного и переменного тока. А их влияние на качество электроэнергии оценивается в совокупности, как влияние единого механизма, в котором они используются [109]. В наибольшей степени такое влияние проявляется при работе прокатных станов, которые можно охарактеризовать как ударную (циклическую резкопеременную) нагрузку [98], вызывающую отклонение напряжения, несинусоидальность и низкий коэффициент мощности [30]. Увеличению доли гармонических составляющих способствует использование для работы двигателей постоянного тока вентильных преобразователей, которые в случае ударных нагрузок также приводят к провалам и колебаниям напряжения [17, 37, 39, 80].

К электротермическим приемникам относятся различные виды электрических печей: дуговые, индукционные и печи сопротивления. Наиболее мощными из них являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП), которые характеризуются как электроприемники с резкопеременным характером нагрузки, а их влияние на питающие сети проявляется в отклонениях и колебаниях напряжения, появлении фликера, несинусоидальности и несимметрии [17, 39, 36, 43, 63]. Наиболее сильно снижение качества электроэнергии проявляется в начальном периоде плавки, когда в печь вводится максимальная мощность, т.к. для этого периода характерны частые короткие замыкания и обрывы дуг [115].

Из-за особенностей работы и меньшей мощности другие типы дуговых печей оказывают меньшее влияние на общие сети, тем не менее также требуют установки устройств компенсации.

По аналогии с дуговыми печами можно рассмотреть и сварочные аппараты, т.к. плавление металла ими осуществляется при помощи электрической дуги. Применение для включения сварки инверторов и выпрямителей приводит к появлению

несинусоидальности; применение сварочного трансформатора – к снижению коэффициента мощности до 0.3 – 0.7. Кроме того поджиг электрической дуги происходит в произвольные моменты времени, поэтому их можно также охарактеризовать как потребителей с неравномерной и несимметричной нагрузкой.

В сравнении с дуговыми печами другие термические установки оказывают меньшее влияние на качество электроэнергии. Это влияние может проявляться, например, в низком коэффициенте мощности (0.1 – 0.6) при использовании индукционных печей. Для повышения этого показателя используются компенсаторы реактивной мощности, устанавливаемые параллельно или последовательно с индуктором печи. В случае применения однофазных печей нагрева сопротивлением может наблюдаться несимметрия, которая частично устраняется тщательным подбором нагрузки по фазам.

Наряду с другим электрооборудованием, применяемым на промышленном предприятии, на качество электроэнергии влияют осветительные приборы, так как в основном для освещения используются различные виды разрядных ламп, пускорегулирующие аппараты которых содержат выпрямители, инверторы, а также дроссели для обеспечения стабильной работы лампы. При этом коэффициент мощности может снижаться до значения 0.5 [21]. В последние несколько лет люминесцентные лампы стали заменять на светодиодные с импульсным источником питания. Светодиодные источники характеризуются низким потреблением электроэнергии и не содержат токсичных веществ. Однако нелинейность светодиодных источников приводит к появлению гармонических составляющих напряжения [13, 14, 33]

### **1.3 Эффективность мероприятий, выполняемых на металлургических предприятиях для повышения качества электроэнергии**

Анализируя виды оборудования, применяемого в металлургической промышленности, можно сделать вывод о том, что более всего на качество электроэнергии влияют дуговые сталеплавильные печи и прокатные станы. Остальные виды электроприемников не оказывают такого значительного негативного эффекта

на питающие сети, поэтому для снижения их влияния на ПКЭ устанавливаются устройства групповой или централизованной компенсации [38]. В зависимости от характера нагрузки, вырабатываемых искажений и мощности электроустановки могут быть применены различные типы компенсирующих устройств: конденсаторные установки, шунтирующие реакторы, фильтро-компенсирующие устройства, синхронные двигатели и т.д. [19, 38, 46, 69, 104].

Для нагрузки, потребляющей большие мощности и резко изменяющейся во времени, требуется применять более сложные устройства компенсации. В качестве таких устройств хорошо зарекомендовали себя статические тиристорные компенсаторы (СТК) [69, 104, 105]. Многолетний опыт их применения на предприятиях металлургической промышленности доказывает эффективную работу СТК для стабилизации напряжения, снижения фликера, снижения гармонических составляющих и несимметрии, повышения коэффициента мощности. Пример стабилизации уровня напряжения в процессе работы ДСП приводится в [105] и показан на рисунке 1.1.

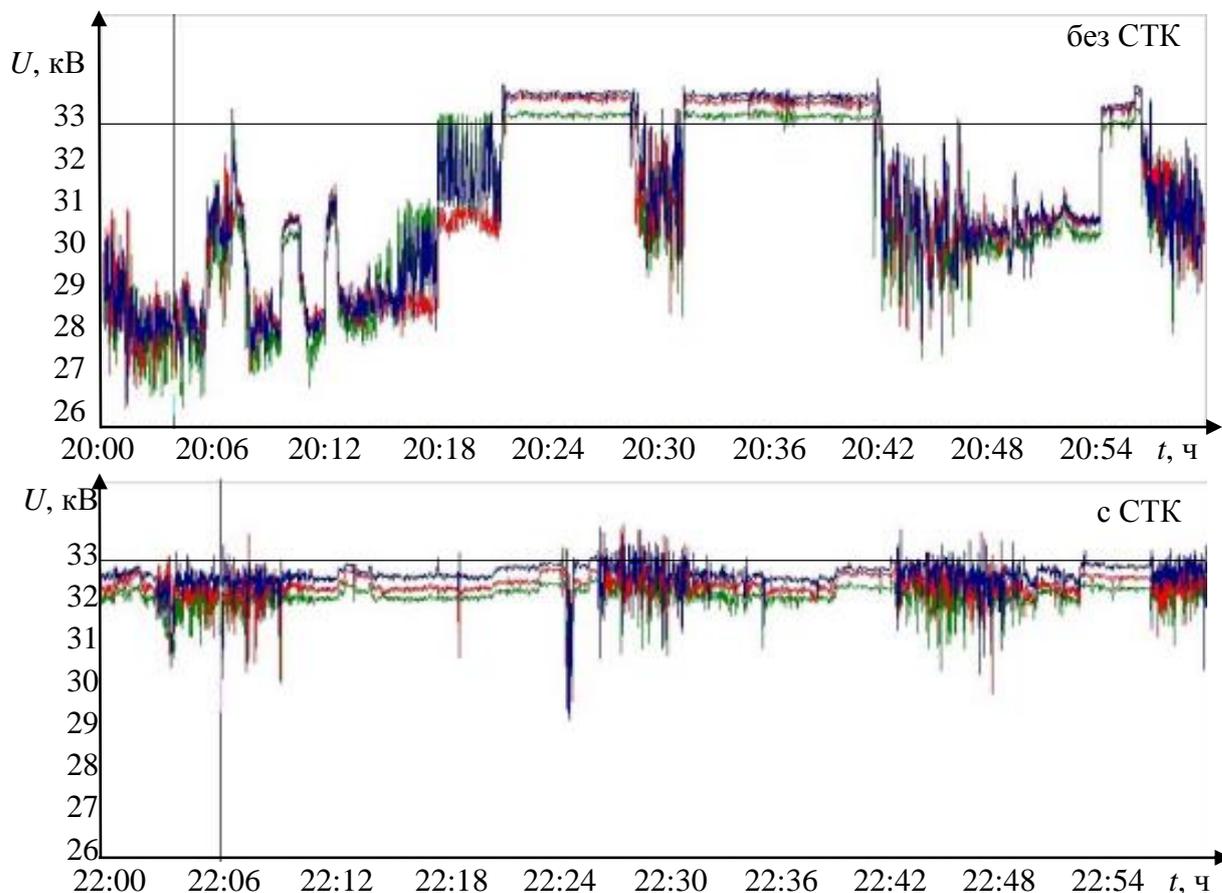


Рисунок 1.1 – Стабилизация напряжения на линии 33 кВ сталеплавильного цеха Белорусского металлургического завода [105, с.15]

Другие устройства компенсации, например, шунтовые реакторы с комбинацией конденсаторных батарей или синхронные компенсаторы, также позволяют добиться некоторого улучшения характеристик сети, но в сравнении с ними СТК позволяет обеспечить непрерывное и более быстрое регулирование для получения требуемых показателей качества электроэнергии и, соответственно, обеспечить оптимальную работу приемников, а также снизить затраты на потребление ими электроэнергии. В качестве альтернативы СТК по быстродействию регулирования параметров питающего напряжения может рассматриваться статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ). Однако высокая цена этого компенсатора не всегда бывает оправдана для применения на промышленных предприятиях. Таким образом, с учетом стоимости установки, ремонтпригодности и надежности устройства экономический эффект применения СТК выше, чем у других компенсаторов.

Тем не менее, в работе СТК можно выделить и некоторые недостатки. По приведенным на рисунке 1.1 диаграммам видна положительная динамика средних значений рассматриваемых параметров в результате работы СТК, но в то же время, видно, что сигналы остаются нестационарными. Это объясняется тем, что скорость реакции СТК недостаточна при резких изменениях параметров нагрузки. Очевидно, что такие отклонения также влияют на питающие сети и других потребителей электроэнергии, имеющих с искажающим электроприемником общие точки присоединения.

На рисунках 1.2 – 1.4 приводятся результаты измерений ПКЭ, выполненные в октябре 2012 г. на линии 220 кВ. К линии подключены два крупных потребителя: завод «РН – Комсомольский-на-Амуре нефтеперерабатывающий завод» и ОАО «Амурметалл». Данные снимались во время работы дуговой сталеплавильной печи мощностью 120 МВт с включенным СТК. По результатам замеров можно сделать вывод об эффективности мероприятий по повышению качества электроэнергии, выполняемых на металлургическом заводе.

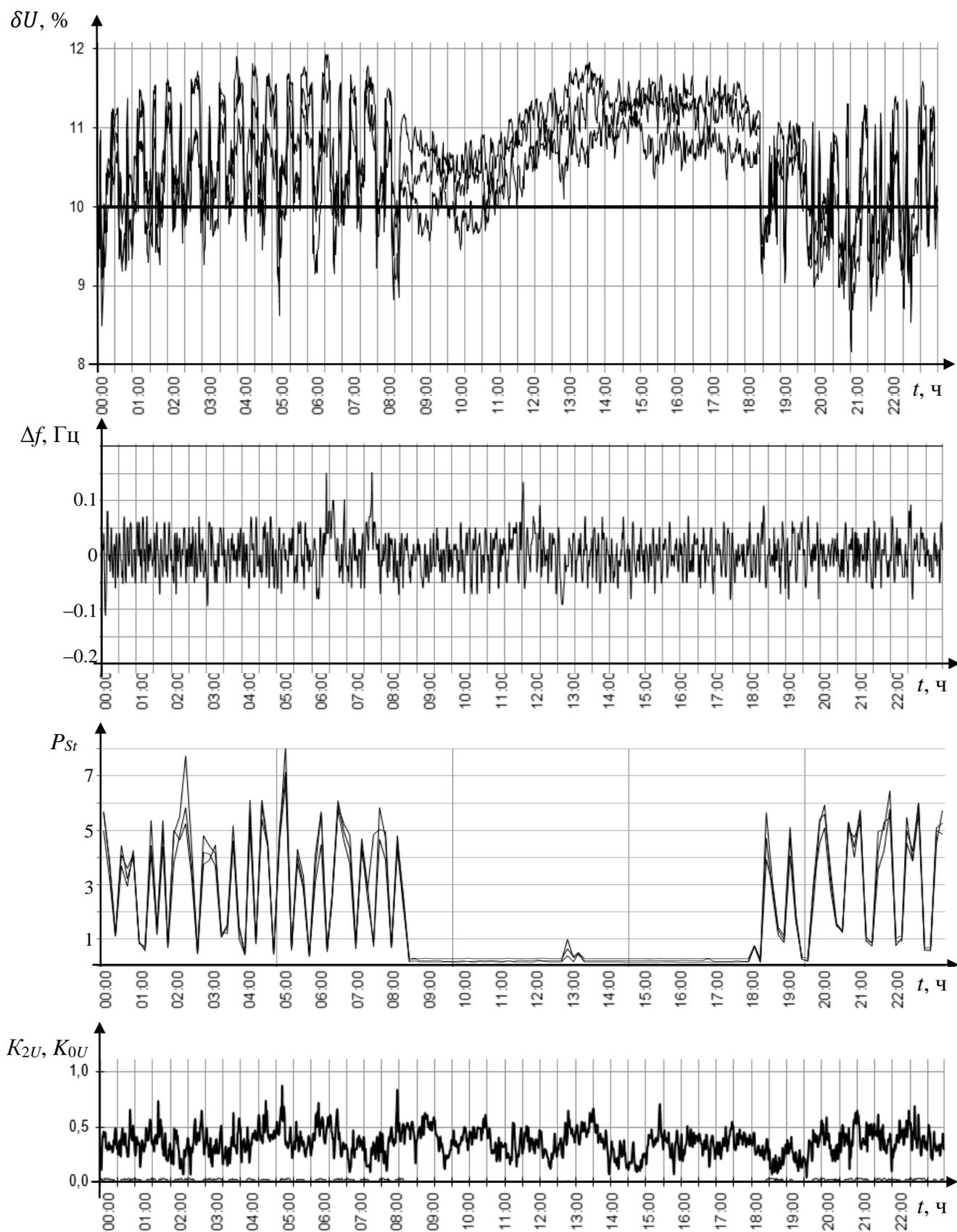


Рисунок 1.2 – Отклонения напряжения и частоты, кратковременная доза фликера, коэффициенты по обратной и нулевой последовательностям на линии 220 кВ при работающей ДСП

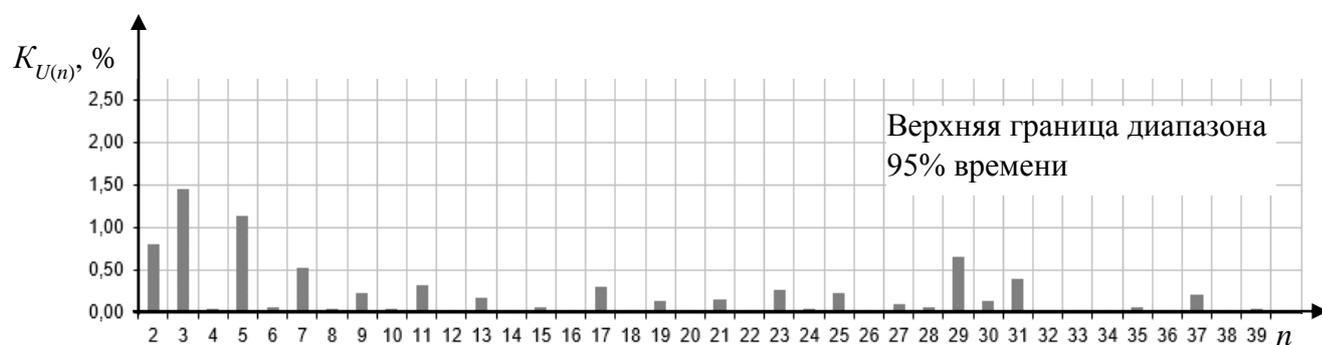
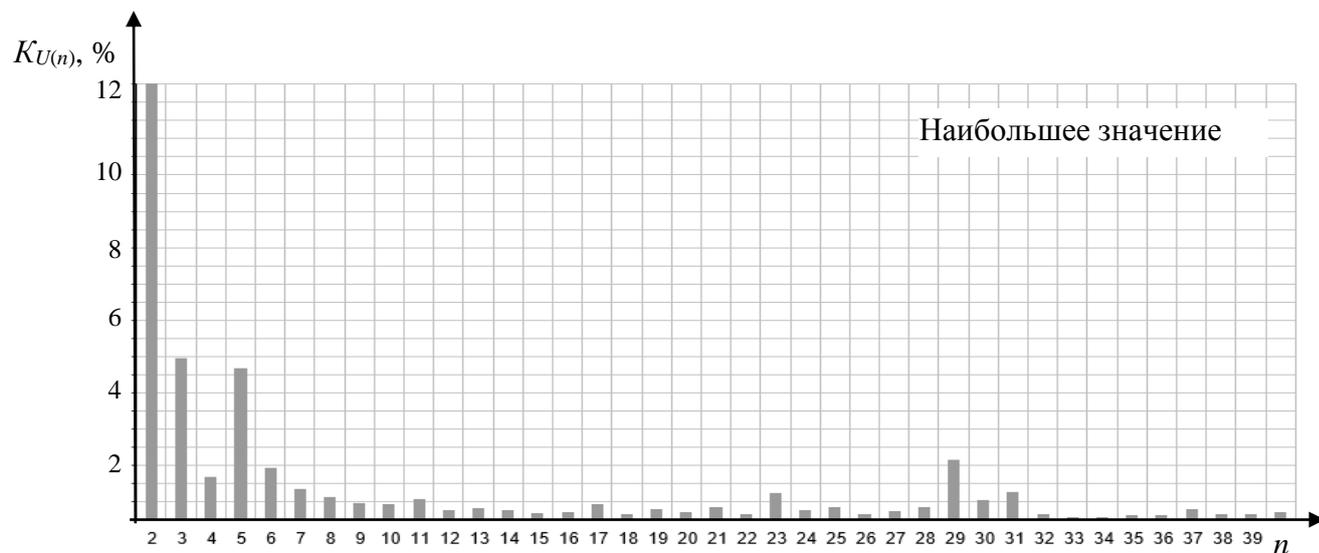


Рисунок 1.3 – Коэффициенты гармонических составляющих на линии 220 кВ при работающей ДСП

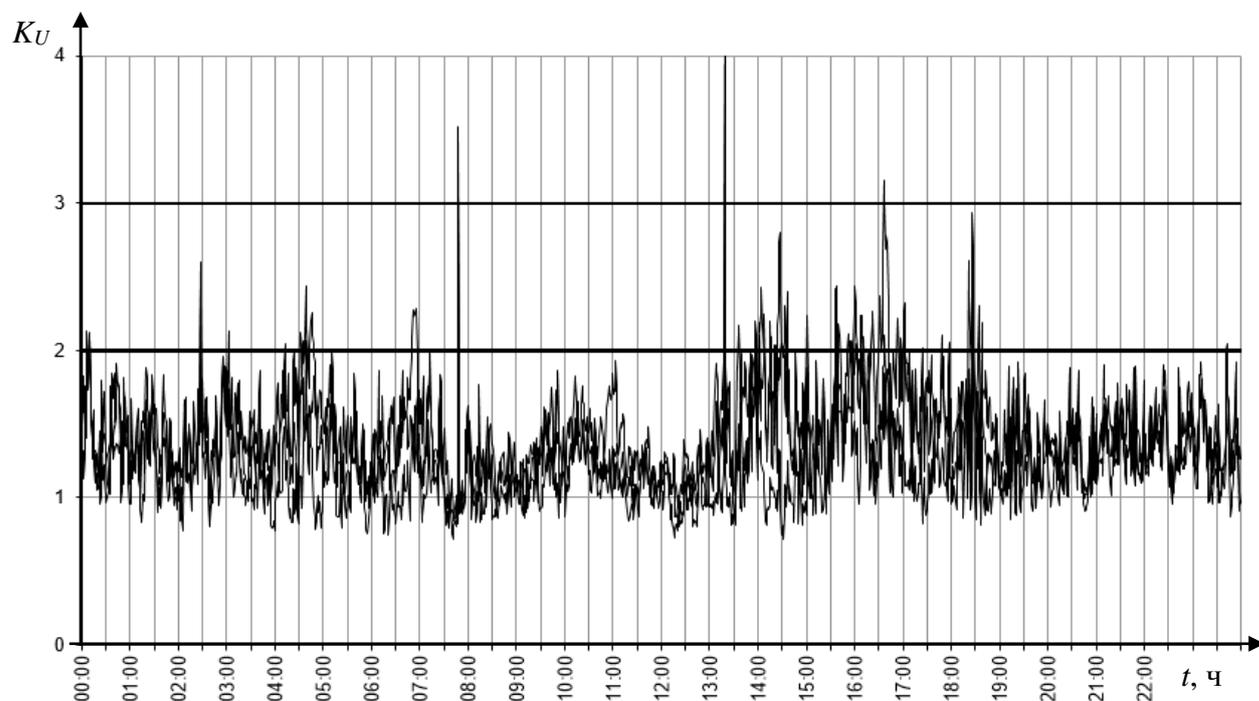


Рисунок 1.4 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих на линии 220 кВ при работающей ДСП

Несмотря на применение СТК для компенсации влияния ДСП на сети, по диаграммам, показанным на рисунке 1.2, наблюдаются сильные колебания напряжения, которым соответствуют достаточно высокие значения дозы фликера, превышающие допустимые более, чем в 5 раз. При этом можно видеть отклонение общего уровня напряжения от установленного значения на 9 – 12 %, что тоже превышает значения, допустимые по ГОСТ 32144 – 2013.

На рисунках 1.3 и 1.4 приводятся значения показателей, оценивающих несимметричность напряжения в точке подключения металлургического завода. По результатам сравнения значений коэффициентов  $K_{U(n)}$  на диаграммах и в таблице 1.1, можно увидеть превышение нормально допустимых значений по 2, 3, 5 и 29 гармоникам, а также значительные превышения предельно допустимых значений по 2 – 6 и 29 гармоникам. Сравнение значений на рисунке 1.4 и в таблице 1.2 показывает превышение нормально допустимых и предельно допустимых значений для суммарного коэффициента  $K_U$ .

Таким образом, анализируя полученные результаты можно говорить о необходимости повышения качества работы СТК по стабилизации напряжения во время работы ДСП. В то же время, следует отметить, что мероприятия, проводимые на заводе по симметрированию нагрузки, успешно выполняются, т.к. коэффициенты  $K_{2U}$  и  $K_{0U}$ , по которым оценивается несимметрия в трехфазной системе, не превышают уровня, соответствующего 1/2 от нормально допустимого значения. Это очень хорошее значение показателей для такого электроприемника, как дуговая сталеплавильная печь.

#### **1.4 Пути повышения качества электроэнергии в точке подключения металлургического предприятия**

Как показано выше, проблема качества электроэнергии в металлургической промышленности продолжает оставаться актуальной. В настоящее время существует несколько подходов к решению этой проблемы [18, 35]:

- оптимизация режимов работы электроприемников;

- схемотехническая модернизация устройств;
- оптимизация алгоритмов работы системы управления (СУ) компенсатором.

Мероприятия по **оптимизации режимов работы электроприемников** в первую очередь нацелены на снижение энергопотребления и повышения экономической эффективности работы установки. Однако такой подход позволяет также нормализовать показатели качества электроэнергии.

Так, например, для повышения экономической эффективности дуговых печей используют тепло отходящих газов и других источников энергии для подогрева шихты, снижают тепловые потери через футеровку печи, выполняют согласование по времени операций по рафинированию и нагреву до температуры слива, оптимизируют конструкцию токопроводов печи для снижения реактивного сопротивления, добиваются устойчивого горения электрических дуг, чтобы снизить затраты на электропотребление и, как следствие, уменьшить себестоимость выпускаемой продукции. Но выполняемые мероприятия также позволяют снизить потери активной мощности, отклонения и колебания напряжения [72, 95].

В качестве примеров мероприятий по оптимизации режимов работы можно привести также составление графиков работы параллельных дуговых печей, который позволяет развести во времени наиболее тяжелые периоды плавки [64], разделение операций на линии разливки металла с учетом параллельного включения дуговой печи [93, 94], усовершенствование алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) преобразователей частоты электроприводов прокатных станков [78, 79, 81] и др.

**Схемотехническая модернизация устройств** предполагает применение новых аппаратных решений для существующих систем электроснабжения. Например, в работах [20, 40] показана разработка реакторно-тиристорного регулятора напряжения, подключаемого к первичной обмотке печного трансформатора.

Третьим способом повышения качества электроэнергии в точке подключения компенсатора является **оптимизация алгоритмов работы** самого компенсатора для повышения его быстродействия и стабилизации электромагнитных процессов [55].

Оптимальная работа любого компенсирующего устройства требует своевременного управления этим устройством в соответствии с изменениями электрических параметров сети. В зависимости от типа компенсатора и поставленных задач способ управления будет отличаться, в первую очередь, видом управляющего сигнала. Согласно [33, 36, 39] управляющий сигнал может формироваться:

- по мощности (полной, активной или реактивной);
- по напряжению в точке подключения компенсирующего устройства;
- часовым устройством, для регулирования по времени суток;
- технологическим алгоритмом (или механизмом) в зависимости от режима работы приемников;
- комбинацией перечисленного.

Для приемников со стационарной нагрузкой, но низким коэффициентом мощности возможно использование нерегулируемых индивидуальных устройств компенсации, которые включаются и отключаются одновременно с электроприемником. Однако, зачастую оказывается более рациональным с экономической точки зрения использование компенсаторов для группы приемников (цеха). В таком случае наиболее простым способом управления устройством является его включение (переключение) по времени в соответствии с суточным нагрузочным графиком или по сигналу переключения режимов работы приемников. Управление устройствами компенсации по уровню мощности или напряжения осуществляется в случае нестационарной работы электроприемников, например, дуговой сталеплавильной печи и прокатного стана.

Дуговые печи и прокатные станы являются наиболее сложными электроприемниками, поэтому в основном внимание исследователей уделяется системам управления устройствами, позволяющими снизить влияние этих приемников на электрические сети и других потребителей ЭЭ. К таким устройствам относятся СТК и СТАТКОМ. В работах [27, 76, 87 – 90] рассмотрены различные варианты систем управления этими компенсаторами. Однако, в основе большинства алгоритмов, реализуемых в этих СУ, используются классические ПИ и ПИД регуляторы [55].

В настоящее время установлено, что применение искусственного интеллекта в системах управления техническими устройствами позволяет повысить быстродействие систем управления и их устойчивость [50, 47, 75]. В тоже время, результаты анализа мероприятий по повышению КЭ, представленные в разделе 1.3, показывают необходимость повышения именно этих характеристик СУ компенсирующими устройствами.

В работах [1, 2, 4 – 6, 8 – 10, 12] рассматривается применение нечеткой логики в системах управления СТК и СТАТКОМ. Однако в этих работах в основном рассматривается применение компенсаторов в системах распределения и передачи электроэнергии. Алгоритмы работы таких СУ настроены на повышение передаточной способности линий электропередач и демпфированию колебаний частоты сети, поэтому не соответствуют требованиям, которые предъявляются к устройствам компенсации резкопеременной нагрузки на металлургических предприятиях.

## **1.5 Выводы по главе 1**

По выполненному обзору литературных источников можно сделать следующие выводы:

1. На режимы работы, качество технологического процесса и сроки службы электрооборудования промышленных предприятий влияет качество электроэнергии. Отклонения показателей качества от установленных значений приводит к негативным последствиям даже при соблюдении нормативов, установленных в ГОСТ 32144 – 2013.

2. На предприятиях металлургической отрасли используется большое количество искажающих электроприемников, режимы работы которых приводят к отклонениям и колебаниям напряжения, несимметрии, несинусоидальности и низ-

кому коэффициенту мощности. Наибольшее влияние на электрические сети и других потребителей ЭЭ оказывают дуговые сталеплавильные печи и прокатные станы.

3. Для компенсации влияния искажающих электроприемников на металлургических предприятиях применяются различные виды компенсирующих устройств. Однако результаты измерений ПКЭ на линии, от которой питается металлургический завод, говорят о недостаточной эффективности применяемых устройств для стабилизации уровня напряжения.

4. Среди подходов, которые выполняются для решения проблемы КЭ, можно выделить исследования по оптимизации алгоритмов работы систем управления компенсирующими устройствами. В настоящее время все большее внимание уделяется использованию средств искусственного интеллекта для стабилизации напряжения в СЭС. Однако, анализ публикаций по данной тематике показывает, что данные системы управления в основном ограничиваются частными задачами СЭС, поэтому разработка новых подходов для повышения КЭ в СЭС с резкопеременной актуальна и имеет практической значение.

## ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТК В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

### 2.1. Разработка имитационной модели системы электроснабжения металлургического предприятия

Разработка новых принципов управления системой компенсации реактивной мощности на металлургическом предприятии предполагает проведение большого числа экспериментов. Это означает воздействие на параметры технологического процесса, что не всегда допустимо. Поэтому задачу разработки и исследования принципов управления целесообразно перевести в область математического моделирования. В качестве среды моделирования была выбрана система MatLab. Одним из преимуществ этой системы является возможность визуального моделирования при помощи готовых функциональных блоков. В частности, в дальнейшем для имитации работы электротехнических устройств были использованы блоки библиотеки SimScape/SimPowerSystem.

В общем виде схема включения СТК в систему энергоснабжения предприятия имеет вид, приведенный на рисунке 2.1.

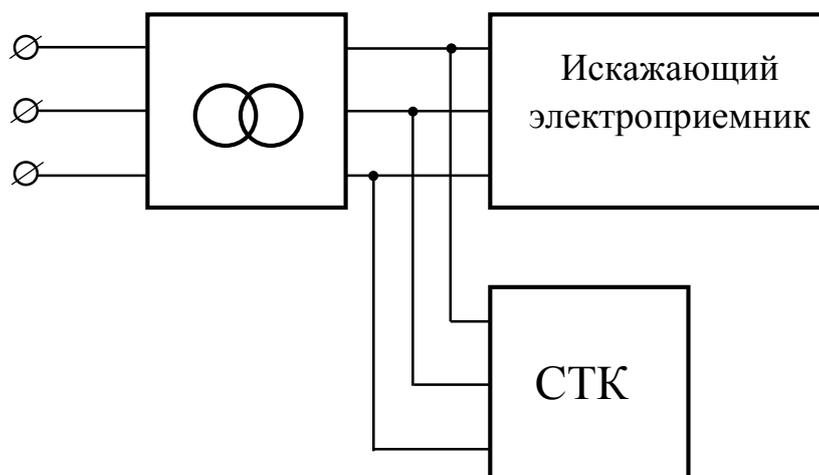


Рисунок 2.1 – Схема включения СТК

Как было показано выше, один из центральных электроприемников металлургического предприятия, технологической особенностью которого является резкопеременный характер нагрузки, – это дуговая сталеплавильная печь. Интегральные характеристики негативного влияния такого вида нагрузки на питающие сети приведены в первой главе. Но для выявления характера изменения нагрузки на конкретный показатель качества электроэнергии, выявления предельных значений, скорости изменения искажений целесообразно иметь имитационную модель системы электроснабжения, наиболее полно учитывающую характерные особенности технологического процесса плавки. Функциональная схема имитационной модели системы электроснабжения предприятия на примере ООО «Амурсталь» приведена на рисунке 2.2 [99, 101].

ДСП питается от линии 220 кВ через сетевой и печной трансформаторы, как показано на функциональной схеме. Сетевой трансформатор мощностью 160 МВА понижает напряжение до 35 кВ и имеет несколько ступеней переключения, основной задачей которых является поддержание необходимого уровня напряжения на низкой стороне трансформатора.

Печной трансформатор мощностью 120 МВА понижает напряжение с 35 кВ, до уровня, определяемого требованиями технологического процесса плавки и имеет 18 ступеней переключения, которые позволяют изменять напряжение на низкой стороне от 600 до 1200 В. Выбор ступени определяется мощностью, которую необходимо подать в ДСП. На ООО «Амурсталь», как правило, в работе ступени с 14 по 18.

Стабильное горение электрической дуги в печи обеспечивается поддержанием необходимого уровня реактанса. Для этого в одном корпусе с печным трансформатором выполнен 6-ти ступенчатый реактор. В имитационной модели реактор представлен как трехфазное последовательное включение активных и индуктивных элементов.

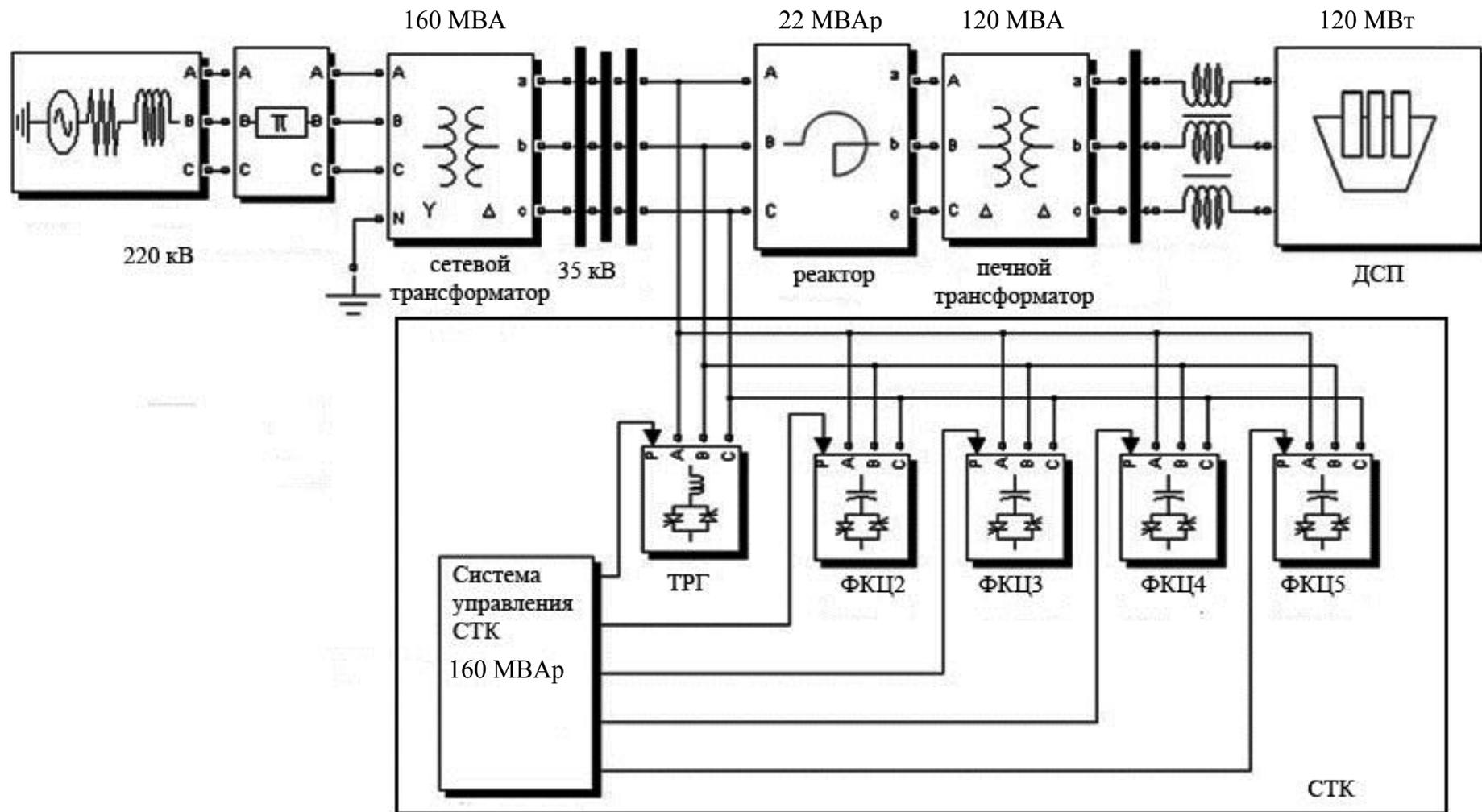


Рисунок 2.2 – Схема имитационной модели системы энергоснабжения цеха металлургического предприятия с дуговой сталеплавильной печью и статическим тиристорным компенсатором

В имитационной модели учтен также активно-индуктивный характер питающей линии 220 кВ и проводной линии между трансформаторами, а также взаимная индуктивность между шинами электродов ДСП.

Модель статического тиристорного компенсатора в MatLab составлена на основе модели, разработанной Power System Laboratory, IREQ Hydro-Quebec (Pierre Giroux, Gilbert Sybille) [7]. При этом для получения модели, соответствующей рассматриваемому случаю, потребовалось увеличить количество блоков фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ) и изменить параметры всех блоков таким образом, чтобы получить необходимые значения мощностей: мощность тиристорно-реакторной группы (ТРГ) компенсатора 160 МВАр; мощности блоков ФКЦ – 25, 55, 40 и 40 МВАр. На Рисунках 2.3. и 2.4. показаны структурно-функциональные схемы трехфазных блоков тиристорно-реакторной группы и фильтрокомпенсирующих цепей.

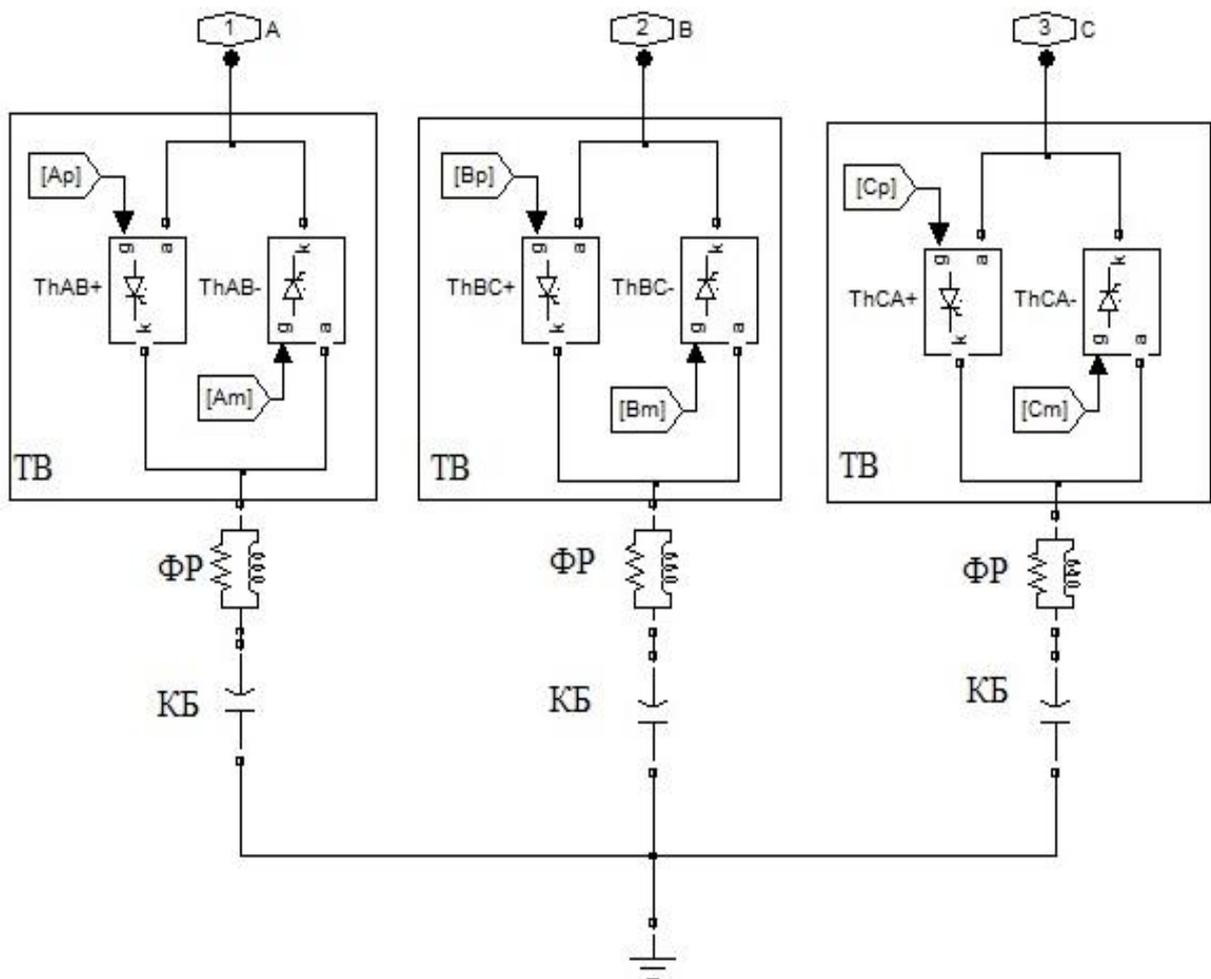


Рисунок 2.3 – Структурно-функциональная схема блока ФКЦ

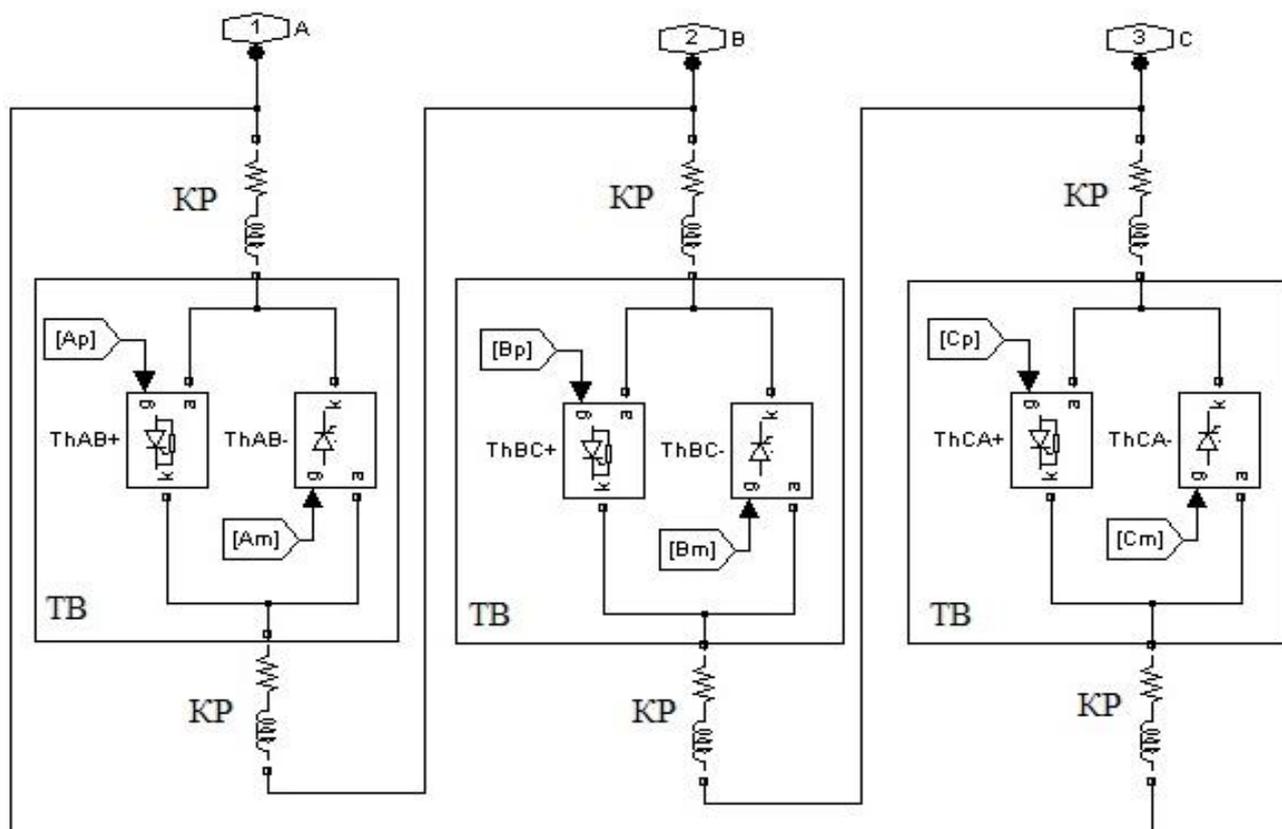


Рисунок 2.4 – Структурно-функциональная схема блока ТРГ

Каждая фаза ФКЦ содержит конденсатор (КБ), тиристорный вентиль (ТВ) и фильтровый реактор (ФР). В каждой фазе ТРГ два компенсирующих реактора (КР) и тиристорный вентиль (ТВ). Импульсные сигналы управления тиристорными вентилями обозначены как  $A_p$ ,  $A_m$ ,  $B_p$ ,  $B_m$ ,  $C_p$ , и  $C_m$ . Эти сигналы вырабатываются в блоке управления СТК (рисунок 2.2).

## 2.2 Разработка математической модели дуговой сталеплавильной печи.

Математическому описанию процессов, протекающих в дуговых сталеплавильных печах уделяется достаточно большое внимание и посвящено немало число научных работ [28, 29, 42, 44, 51, 68, 70, 74, 77, 91, 96, 110 – 112, 116 – 118]. Следует уточнить, что в зависимости от конечных целей исследователей эти описания могут сильно отличаться друг от друга. Объясняется это тем, что при рас-

плаве металла в ДСП протекают различные по своей физической природе процессы: тепловые, химические, аэродинамические, электромагнитные. Описание всех этих процессов в одной математической модели привело бы к ее существенному усложнению, и, как следствие, существенным затратам машинного времени, необходимого для обработки такой модели. Но так как все процессы в печи являются взаимосвязанными, то на практике зачастую прибегают к выделению конкретных составляющих процессов и описанию ДСП с их помощью.

Так, например, в работах И.М. Ячикова металлургический расплав рассматривается как токонесущая жидкость и описывается уравнениями магнитной гидродинамики для изучения электровихревых течений в ванне расплава [116]. В работе Е.М. Костылевой внимание уделяется характеристикам магнитного поля вблизи электродов печи и их влиянию на окружающую среду, поэтому модель составлена на основании уравнений, описывающих электромагнитное поле с учетом геометрического расположения электродов [42]. В работе Р.А. Бикеева [16] рассматривается векторное поле токов проводимости (в электродах и стенках колодцев) и токов, индуцированных в шихте при взаимодействии электромагнитных полей в трехфазной системе. Полученная модель позволяет учесть выделение энергии в рабочем пространстве ДСП.

В рассматриваемой системе электроснабжения ДСП в качестве возмущающих факторов, которые оказывают влияние на качественные показатели системы, выступают технологические особенности в работе печи, которые связаны с электрическими режимами плавки. Очевидно, что в этом случае из всего многообразия имеющегося математического описания процессов в ДСП следует выделить те, которые связаны с электрическими параметрами системы.

В работе Маркова А.Н. [67, с.23] говорится, что «электрические дуги не могут существовать при произвольных значениях тока, напряжения и длины дугового промежутка. Для того, чтобы в дуге поддерживалось равновесное состояние, эти три параметра должны удовлетворять определенным соотношениям, выраженным через вольт-амперную характеристику дуги».

Полученные в результате исследований на реальном объекте вольт-амперные характеристики электрической дуги переменного тока представляют собой замкнутые «петли», форма которых изменяется в зависимости от режима работы дуговой печи на различных стадиях плавки. Один из примеров ВАХ, снятой непосредственно на дуговой сталеплавильной печи, приводится в [74] и показан на рисунке 2.5.

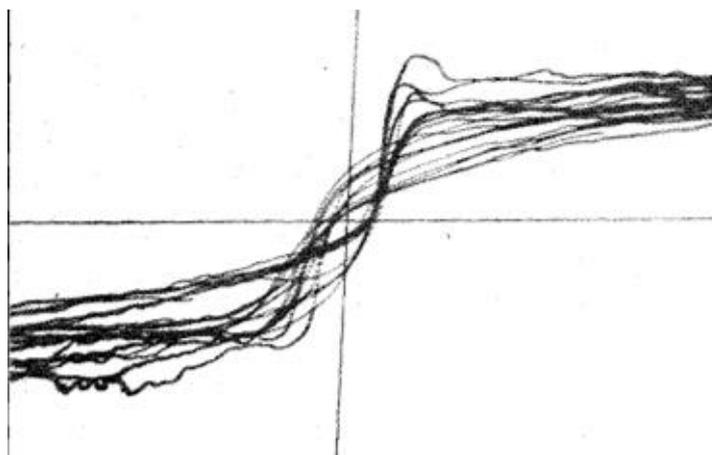


Рисунок 2.5 – Вольт-амперная характеристика дуги переменного тока по данным [74, с. 95].

Согласно [61, с.94] «осциллограммы начального периода расплавления характеризуют беспокойное горение дуги и отражают резкие изменения ее даже в течение полупериода». В этот период плавки наблюдаются частые и значительные колебания тока дуги, которые обусловлены короткими замыканиями и обрывами дуг, т.к. на холодной шихте электрические дуги перебрасываются по выступающим частям металла. После проплавления в шихте колодцев на электрическую дугу начинают действовать потоки паров и газов и электромагнитное поле от протекающих через соседние участки шихты токов. Это также приводит к значительным колебаниям тока.

Процесс немного стабилизируется после появления жидкого металла в ванне печи. Однако на стадии закрытых дуг в результате повышения уровня расплавленного металла происходит обрушение колодцев, в результате которого можно наблюдать длительные короткие замыкания и, соответственно, значительные коле-

бания тока. На заключительном этапе периода расплавления и стадии рафинирования возможные изменения электрического режима являются результатом обгорания электродов и подъема уровня жидкого металла. Но эти изменения, как правило, характеризуются как медленно протекающие. Кратковременные и быстропротекающие изменения можно также наблюдать в течение окислительного периода при «кипении металла». В восстановительный период электрические режимы становятся близкими к нормальным. [61, 66, 67, 97, 115].

Изменение формы ВАХ электрической дуги в дуговой сталеплавильной печи для разных стадий плавки согласно [74, с. 27] показано на рисунке 2.6.

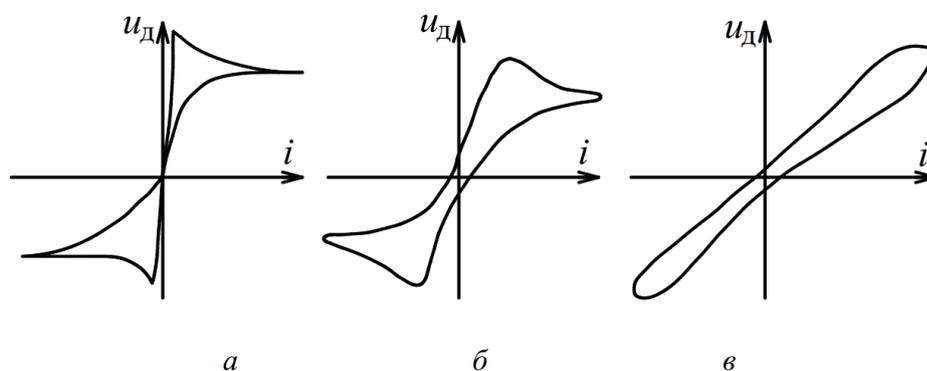


Рисунок 2.6 – Форма ВАХ дуги переменного тока в периоды расплавления шихты (а), проплавления колодцев (б) и жидкого металла (в) по [72]

Реализацию математической модели динамической вольт-амперной характеристики электрической дуги можно осуществить либо по приближенным (аппроксимированным) аналитическим зависимостям, либо по множеству состояний (точкам)  $\{u_d, i_d\}$  экспериментальных кривых.

Моделирование на основе аналитических выражений кроме использования непосредственной зависимости тока и напряжения дуги позволяет учесть и ряд других сопутствующих параметров технологического процесса плавки. Например, уравнение Майера, которое используют для моделирования электрической дуги для малых (близких к нулю) токов, показывает зависимость электрического сопротивления дуги от количества теплоты, мощности, подводимой из электрической сети, и мощности, отводимой от дуги посредством теплопроводности. В уравнении

Касси, которое используют для больших токов, электрическое сопротивление зависит от напряженности на дуге в произвольный момент времени и отношения энергии, запасенной в единичном объеме дуги, к скорости рассеяния энергии этим объемом [85, § 3.2.2.4]. На основе этих уравнений, ставших классическими для описания электрической дуги, разработаны модифицированные уравнения Хабедэнка, Кема, Шейвмейкера и т.п. В работе Николаева А.А. [77] приводится сравнительный анализ моделей, разработанных по перечисленным классическим и модифицированным уравнениям в системе MatLab. Примеры разработки моделей на основе аналитических выражений можно увидеть также в работах других авторов [15, 71, 110, 117, 118].

Моделирование электрической дуги на основе аналитических выражений достаточно распространено. В частности, в [45] показаны преимущества использования модели электрической дуги на основе уравнения Касси для оценки электрического режима на различных стадиях плавки. Тем не менее, некоторые исследователи считают, что такие модели обладают существенными недостатками. Например, в [112, с.9] Черненко А.Н. делает вывод о том, что «использование существующих методов расчета электрической дуги, в основе которых лежат труды Майра и Касси, затруднительно в связи с необходимостью использования постоянной времени дуги, которая остается неизвестной при постоянном изменении теплового состояния газового промежутка... Для расчета уровней высших гармоник тока и напряжения, генерируемых печной дугой переменного тока, целесообразно пользоваться вольт-амперными характеристиками, полученными экспериментальным путем на действующих ДСП».

Один из наиболее простых способов реализации в модели MatLab динамической ВАХ по экспериментальным точкам рассмотрен в [44]. Участки ВАХ задаются по точкам табличным способом. В модели выбор участка ВАХ и соответствующей таблицы осуществляется по знаку производной тока по времени. Однако, учитывая, что для проведения дальнейших исследований в данном направлении авторы выбрали другие способы моделирования электрической дуги [45, 77] можно сделать вывод, что данная модель имеет некоторые недостатки.

При использовании моделей на основе аналитических выражений и моделей, реализующих динамическую ВАХ со множеством постоянно изменяющихся состояний, сложно проанализировать переходные процессы, протекающие в электрической части системы при изменении какого-либо параметра в ДСП. Для этих целей наиболее подходящими являются модели, реализующие определенное состояние  $\{u_{dk}, i_{dk}\}$  из множества возможных состояний  $\{u_d, i_d\}$ , соответствующих ВАХ дуги.

Согласно формуле Айртона напряжение электрической дуги определяется как

$$u_d = \alpha + \beta l_d,$$

где  $l_d$  – длина электрической дуги,  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, зависящие от состава газов внутри печи и от материала электродов.

Тогда связь между параметрами дуги можно выразить соотношением

$$R_d = \frac{u_d}{i_d} = \frac{\alpha + \beta l_d}{i_d}.$$

Поэтому при составлении имитационной модели был рассмотрен еще один подход к моделированию дуговой печи, который предполагает использование электрической схемы замещения контура печи. В общем виде схема замещения приводится на рисунке 2.7, более детальное описание рассмотрено в [67].

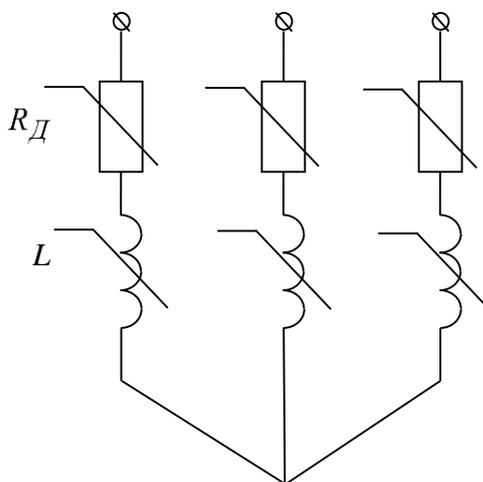


Рисунок 2.7 – Электрическая схема замещения дуговой сталеплавильной печи

Примеры использования электрической схемы замещения для моделирования дуговой печи можно увидеть в [28, 62, 73, 92, 111, 114]. В указанных примерах некоторые исследователи считают возможным не учитывать взаимное влияние токопроводов друг на друга для упрощения расчетов [73, 92]. Однако для полноценного анализа влияния работы ДСП на электрические параметры СЭС желательно более полное описание электрической части системы. Поэтому для проведения исследований была составлена схема замещения, показанная на рисунке 2.8 [11, 28].

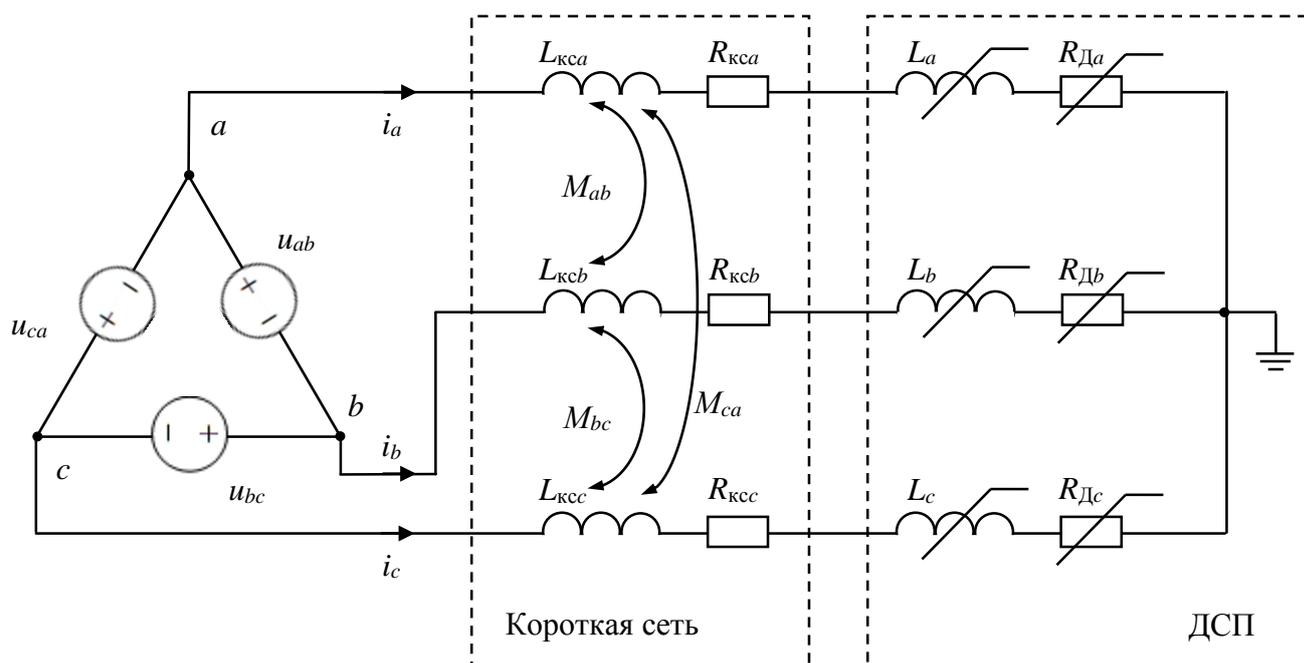


Рисунок 2.8 – Схема замещения дуговой печи, учитывающая вторичную обмотку печного трансформатора и токоподводящие пути

На приведенной схеме с помощью источников напряжения  $u_{ab}(t)$ ,  $u_{bc}(t)$  и  $u_{ca}(t)$  учитываются вторичные обмотки печного трансформатора. Токопроводы и их влияние друг на друга описываются с помощью параметров  $R_{кca}$ ,  $R_{кcb}$ ,  $R_{кcc}$ ,  $L_{кca}$ ,  $L_{кcb}$ ,  $L_{кcc}$ ,  $M_{кcab}$ ,  $M_{кcbс}$ , и  $M_{ксса}$ . Для описания влияния дуговой печи на систему электроснабжения, как приемника с активно-индуктивным характером нагрузки, используются переменные сопротивления  $R_{Да}$ ,  $R_{Дб}$ ,  $R_{Дс}$  и индуктивности  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c$ .

По электрической схеме замещения контура печи можно составить следующую систему уравнений по законам Кирхгофа

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{ab}(t) = L_{kca} \frac{di_a}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ca} \frac{di_c}{dt} + R_{kca} i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + R_{Da} i_a - R_{Db} i_b - \\ \quad - L_b \frac{di_b}{dt} - R_{kcb} i_b - M_{ab} \frac{di_a}{dt} - M_{bc} \frac{di_c}{dt} - L_{kcb} \frac{di_b}{dt}; \\ u_{bc}(t) = L_{kcb} \frac{di_b}{dt} + M_{ab} \frac{di_a}{dt} + M_{bc} \frac{di_c}{dt} + R_{kcb} i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + R_{Db} i_b - R_{Dc} i_c - \\ \quad - L_c \frac{di_c}{dt} - R_{kcc} i_c - M_{ac} \frac{di_a}{dt} - M_{bc} \frac{di_b}{dt} - L_{kcc} \frac{di_c}{dt}; \\ u_{ca}(t) = L_{kcc} \frac{di_c}{dt} + M_{ca} \frac{di_a}{dt} + M_{bc} \frac{di_b}{dt} + R_{kcc} i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + R_{Dc} i_c - R_{Da} i_a - \\ \quad - L_a \frac{di_a}{dt} - R_{kca} i_a - M_{ab} \frac{di_b}{dt} - M_{ca} \frac{di_c}{dt} - L_{kca} \frac{di_b}{dt}; \\ i_a + i_b + i_c = 0, \end{array} \right.$$

В среде MatLab данная система уравнений может быть реализована с помощью стандартных блоков библиотеки SimPowerSystems [53, 54]. При этом короткая сеть моделируется с помощью блока Mutual Inductance (рисунок 2.2), а для имитации переменного сопротивления с возможностью изменения параметров в процессе вычислений представим активное сопротивление  $R_D$ , как сумму двух составляющих

$$R_D = R_c + R_v,$$

где  $R_c$ ,  $R_v$  – постоянная и переменная составляющие сопротивления дуги.

Согласно теореме замещения из теории электрических цепей переменную составляющую сопротивления  $R_v$  с напряжением  $u_v$  можно заменить на эквивалентный источник напряжения (рисунок 2.9).

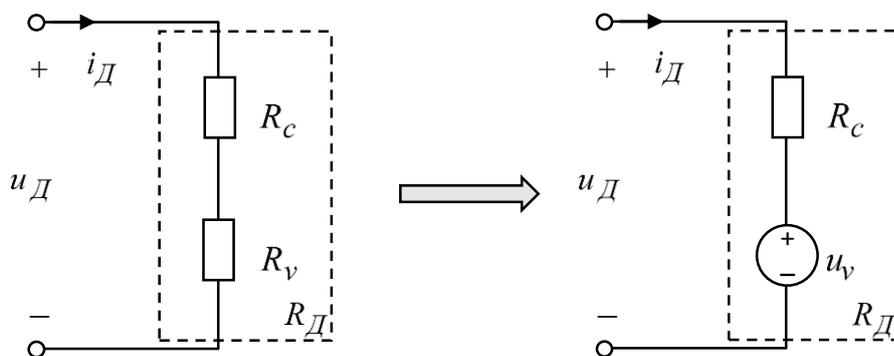


Рисунок 2.9 – Эквивалентная схема переменного сопротивления

Если задать  $R_D = kR_c$ , то

$$u_D = i_D R_D = i_D (R_c + R_v) = i_D R_c + u_v = \frac{u_D}{R_D} R_c + u_v = \frac{u_D}{kR_c} R_c + u_v,$$

тогда

$$u_v = \frac{k-1}{k} u_D.$$

Такое представление позволяет путем задания значения  $k$  с помощью входного сигнала, варьировать в модели значение сопротивления  $R_D$ . Модель переменного сопротивления показана на рисунке 2.10. Аналогично может быть получена модель переменного индуктивного сопротивления (рисунок 2.11).

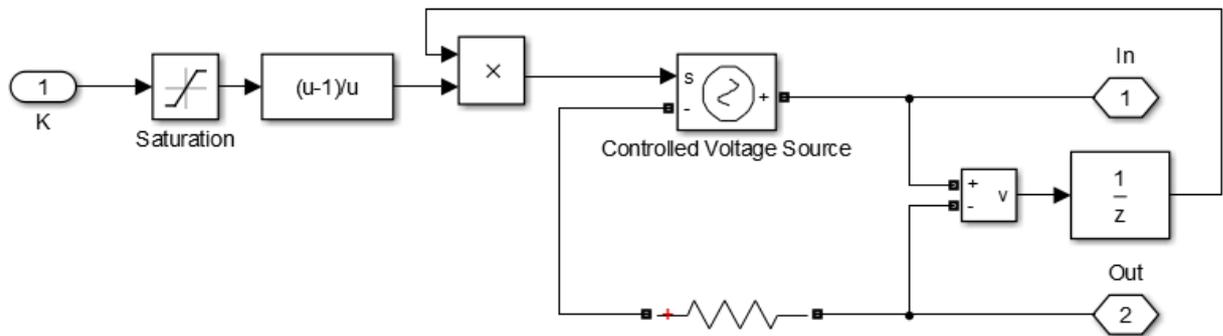


Рисунок 2.10 – Модель переменного активного сопротивления в MatLab

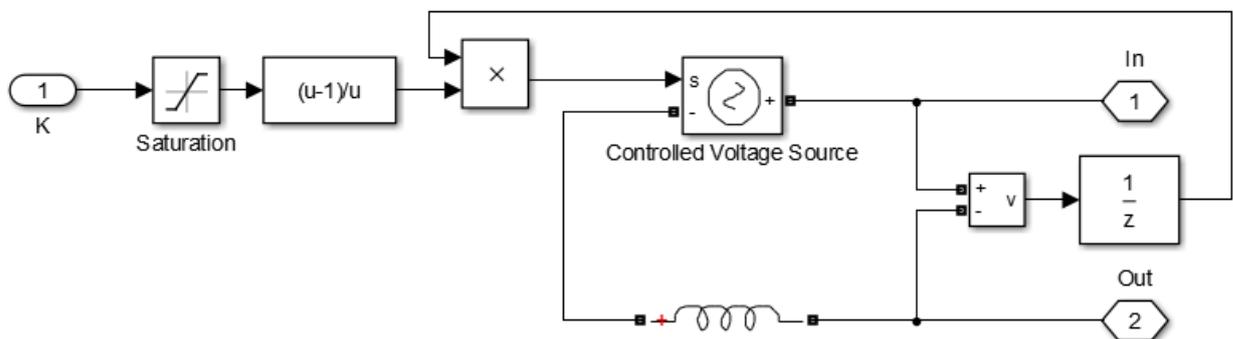


Рисунок 2.11 – Модель переменной индуктивности в MatLab

На рисунке 2.12 показана модель трехфазной дуговой печи, составленная из переменных активных и индуктивных сопротивлений [53, 54].

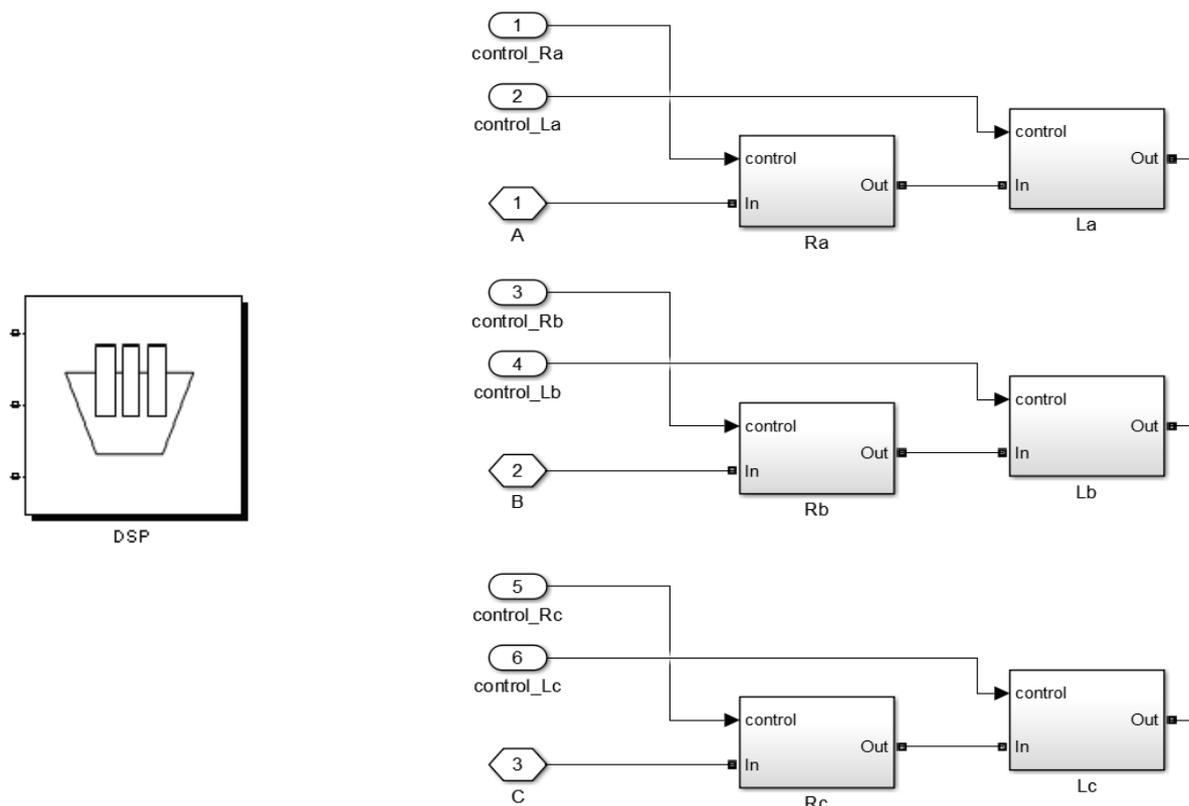


Рисунок 2.12 – Модель дуговой печи в среде MatLab

На рисунках 2.13 – 2.15 показаны результаты моделирования переменных активного и индуктивного сопротивлений в трехфазной симметричной системе, собранной по схеме с рисунка 2.2 с отключенным СТК. В рассмотренных примерах частота изменения параметров соответствует частоте изменения параметров в ДСП, работающей на максимальной мощности. На графиках рисунка 2.13 представлены изменения тока  $i_d$ , напряжения  $u_d$  дуги и коэффициента мощности при переменном активном сопротивлении  $R_d$  и постоянном индуктивном –  $X_L = 5$  мОм. Изменения  $R_d$  оказывают влияние на амплитуду и начальную фазу  $i_d$  и  $u_d$ , поэтому при быстром изменении параметра наблюдаются изменения формы синусоидальных кривых мгновенных значений.

На рисунке 2.14 приводятся графики изменения параметров при постоянном  $R_d = 1$  мОм и переменном индуктивном сопротивлении  $X_L$ . При сравнении графиков видно, что изменение индуктивности оказывает большее влияние на форму кривых мгновенных значений тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$ .

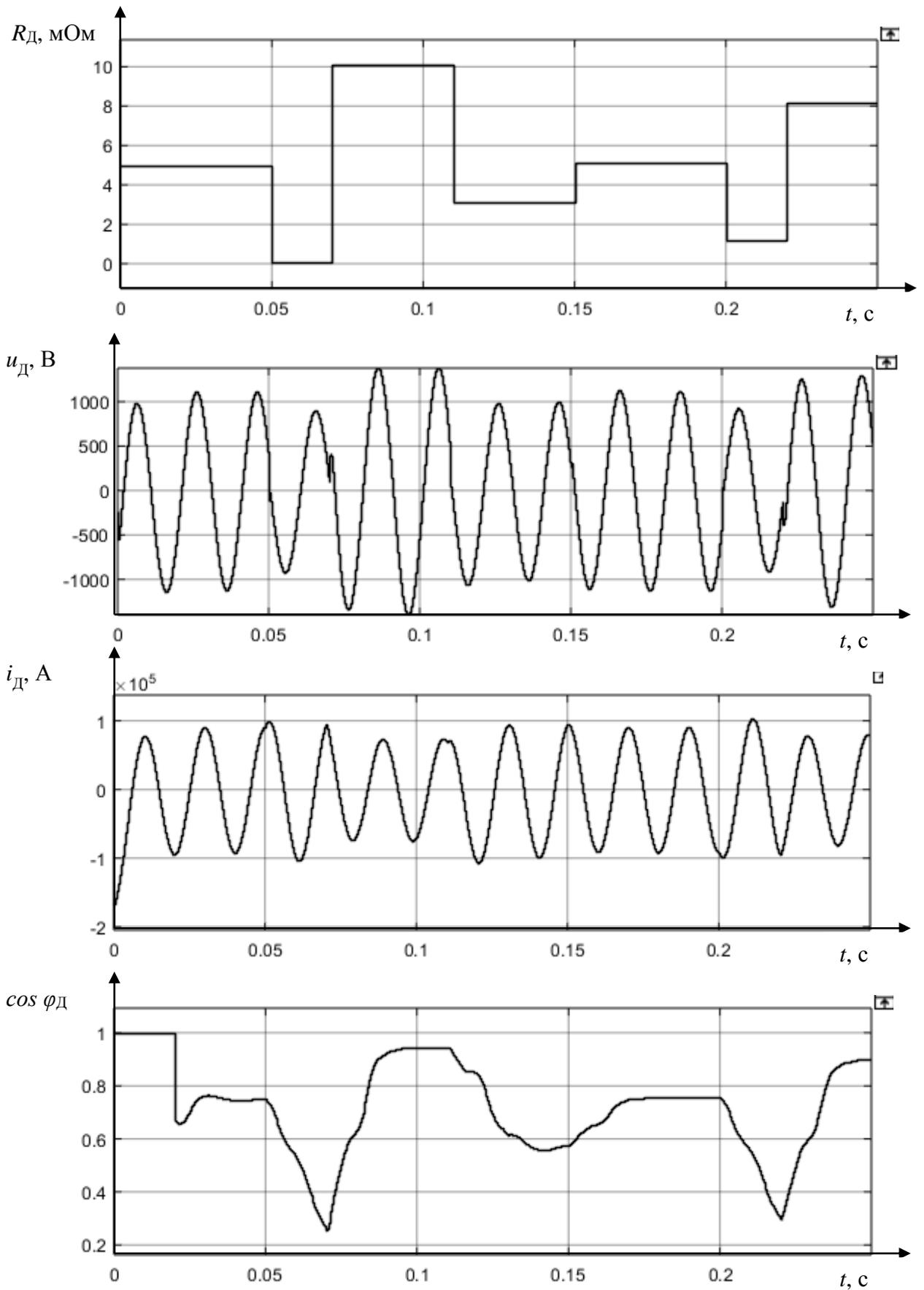


Рисунок 2.13 – Результаты моделирования дуговой печи по электрической схеме замещения с переменным активным сопротивлением

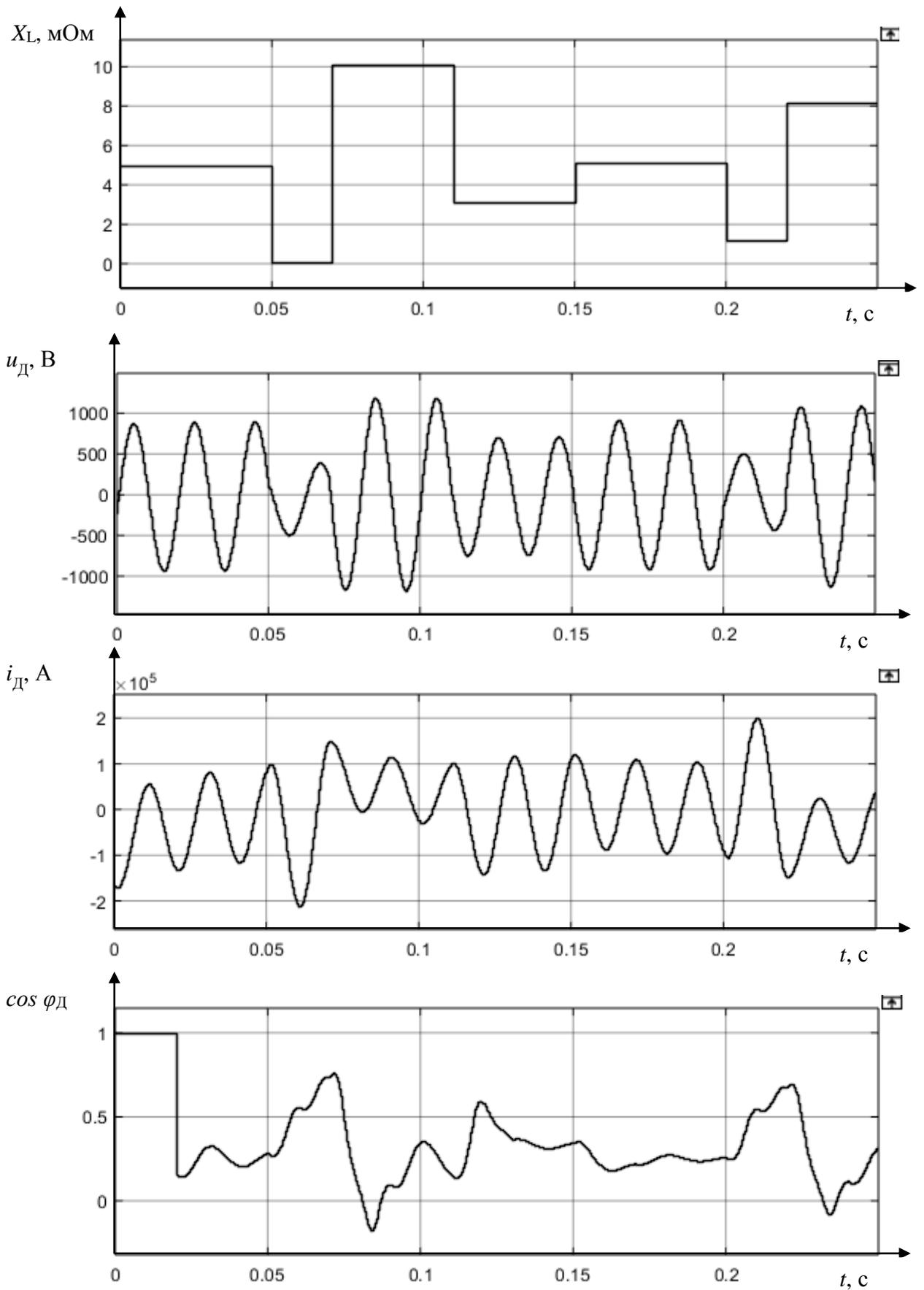


Рисунок 2.14 – Результаты моделирования дуговой печи по электрической схеме замещения с переменным индуктивным сопротивлением

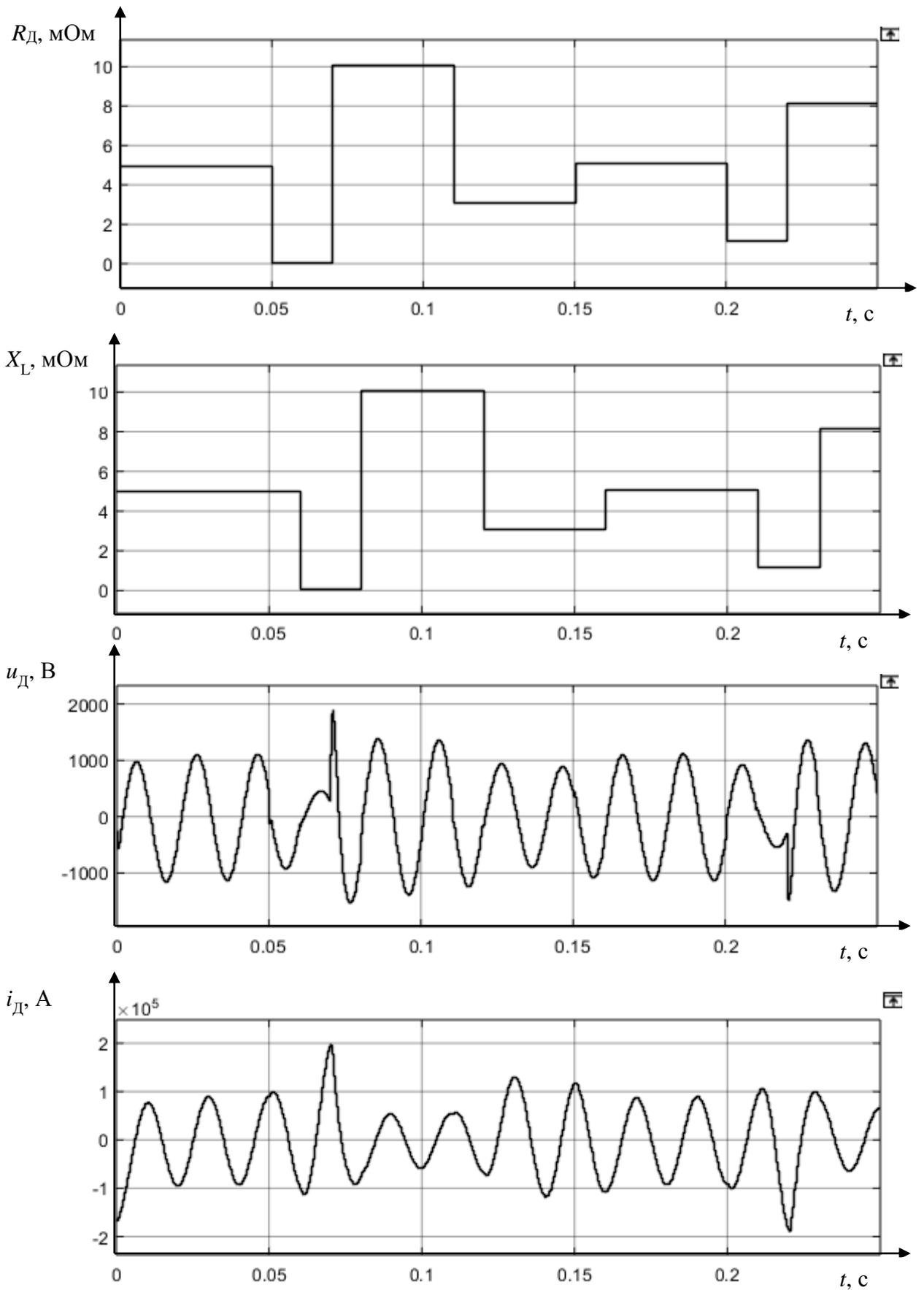


Рисунок. 2.15 – Результаты моделирования дуговой печи по электрической схеме замещения с переменными сопротивлениями

Для примера на рис. 2.15 также приводятся графики тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$  дуги, соответствующие изменениям  $R_d$  и  $X_L$ . Значения сопротивлений взяты такими же, как в предыдущих примерах, но сдвинуты по оси времени относительно друг друга. Очевидно, что это изменение параметров лишь приблизительно соответствует изменениям параметров в реальной дуговой печи. Однако данное представление позволяет смоделировать характерные для печи, работающей на максимальной мощности, импульсные скачки напряжения и тока.

### 2.3 Исследование влияния переменной нагрузки на питающие сети в системе без компенсатора

Для полноценного анализа использования компенсирующего устройства в системе электроснабжения с переменной нагрузкой необходимо предварительно оценить влияние этой нагрузки на систему [100]. Для выполнения измерений электрических параметров в модели системы энергоснабжения цеха с ДСП и СТК (рис. 2.2) были выделены две точки подключения измерительных устройств: на линии 35 кВ в точке подключения СТК и на выводах обмотки печного трансформатора.

Для измерения параметров трехфазной системы в MatLab используются блоки *Three-Phase V-I Measurement*. На модели были измерены действующие значения линейных напряжений ( $U_{35}$  и  $U_{dsp}$ ) и токов ( $I_{35}$  и  $I_{dsp}$ ) в указанных точках в относительных единицах (*o.e.*, *pu*), а также значения их начальных фаз ( $\alpha_{I_{35}}$ ,  $\alpha_{U_{35}}$  и  $\alpha_{I_{dsp}}$ ,  $\alpha_{U_{dsp}}$ ). Так как в данном разделе рассматриваются симметричные изменения в системе, то мощности (активная, реактивная, полная) могут быть рассчитаны по формулам из теории электрических цепей.

Полная мощность

$$S = 3U_{\phi}I_{\phi},$$

где фазный ток  $I_{\phi} = I_L$  и фазное напряжение  $U_{\phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$ , тогда  $S = \sqrt{3}U_L I_L$ .

Активная и реактивная мощности  $P = S \cos \varphi$ ,  $Q = S \sin \varphi$ .

Коэффициент мощности определяется как

$$\cos \varphi = \cos(\alpha_u - \alpha_i),$$

где  $\varphi$  – сдвиг по фазе между током и напряжением.

При моделировании в MatLab блоки электротехнических устройств рассматриваются как элементы нагрузки, потребляющие некоторую мощность  $S_k$ , зависимость которой от полного сопротивления  $z_k$  этого устройства можно описать выражением:

$$S_k = \frac{U^2}{z_k}.$$

То есть уменьшение сопротивления  $z_k$  приводит к увеличению мощности  $S_k$ , потребляемой элементом. Это значит, что большее влияние на все параметры системы оказывают минимальные значения активного и реактивного сопротивлений.

В реальной системе изменение электрического импеданса печи в нормальных режимах работы осуществляется в следующих пределах: для активного сопротивления  $R_d$  от 3 до 87 мОм; для индуктивного сопротивления  $X_L$  от 5 до 12 мОм. Но т.к. в имитационной модели системы энергоснабжения блок трехфазного источника обеспечивает стабильную мощность, чего нет в реальной системе, то в модели требуется расширить диапазон возможных значений импеданса печи и рассматривать его для  $R_d$  от 1 мОм, а для  $X_L$  от 1,7 мОм. Кроме того, следует рассмотреть возможность работы дуговой печи на повышенной мощности и ввести в указанный диапазон  $R_d$  значения от 0,1 мОм.

Поэтому для проведения исследований влияния нагрузки на систему энергоснабжения из возможных диапазонов значений  $R_d$  и  $X_L$  были выбраны следующие точки:

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

$$X_L = [1,7; 5; 9; 12] \text{ мОм}.$$

В системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи изменение импеданса наблюдается также за счет переключения ступеней печного трансформатора

и реактора. Ступени, которые были выбраны для проведения исследований на модели, показаны в таблицах 2.1. и 2.2.

Таблица 2.1. – Параметры ступеней реактора в модели MatLab

Ступень, № п.п. (№ ступени)	$R_P$ , мОм	$X_{LP}$ , мОм
1 (2)	3,2	768,7
2 (4)	4,3	1246,6
3 (6)	5,3	1847,6

Таблица 2.2. – Параметры ступеней трансформатора в модели MatLab

Ступень, № п.п. (№ ступени)	$U_2$ , В (о.е.)	$R_{об}$ , мОм	$X_{Lоб}$ , мОм.	$R_{магн}$ , кОм.	$X_{Lмагн}$ , кОм.
1 (14)	1021 (0,85)	0,108	2,19	76,500	58,076
2 (16)	1104 (0,92)	0,072	1,87	62,240	28,043
3 (18)	1200 (1)	0,072	1,51	49,643	15,743

По результатам измерения параметров (Приложение А) в модели системы электроснабжения печи были построены зависимости, которые представлены на рисунках 2.16 и 2.17. Для упрощения сравнения параметров в разных режимах значения токов, напряжений и мощностей указаны в относительных единицах.

Базовые значения параметров:

- a)  $S_{баз}$  для обеих точек измерения равна 160 МВА (соответствует мощности СТК);
- b)  $U_{35баз} = 35$  кВ;
- c)  $I_{35баз} = 2639,31$  А;
- d)  $U_{DSPбаз} = 1200$  В;
- e)  $I_{DSPбаз} = 76980$  А.

По графикам (рисунки 2.16 и 2.17) видно, что значения измеряемых параметров в большей степени зависят от значений  $R_d$  и  $X_L$ . При переключении режимов реактора и печного трансформатора изменения есть, но кривые зависимостей параметров расположены близко друг к другу. Поэтому для наглядного представления зависимостей были построены поверхности, показывающие изменения параметров системы при изменении нагрузки (рисунки 2.18 – 2.23)

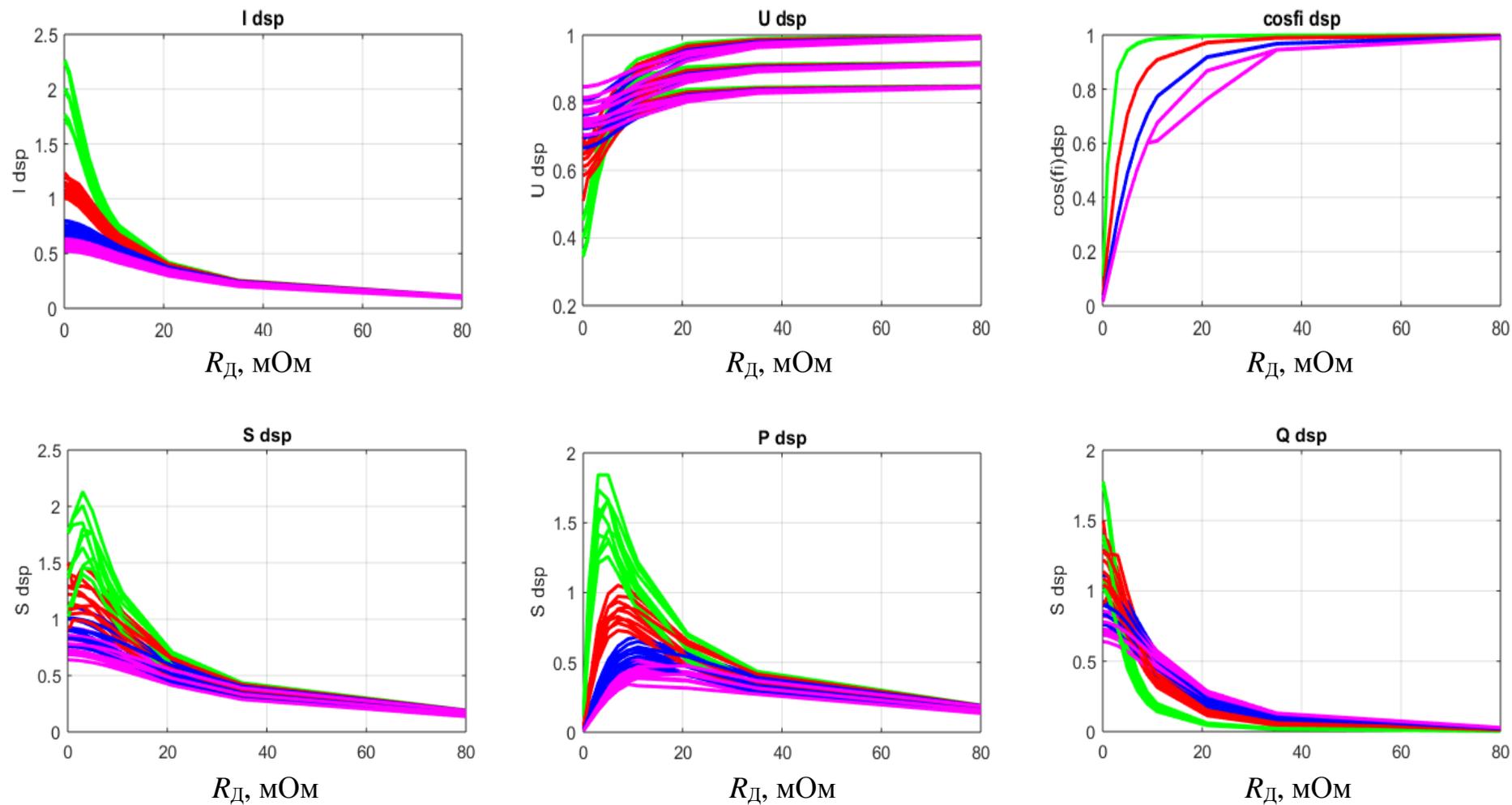


Рисунок 2.16 – Графики изменения параметров системы на шинах дуговой сталеплавильной печи

- -  $X_L = 1.7$  мОм;
- -  $X_L = 9$  мОм;
- -  $X_L = 5$  мОм;
- -  $X_L = 12$  мОм;

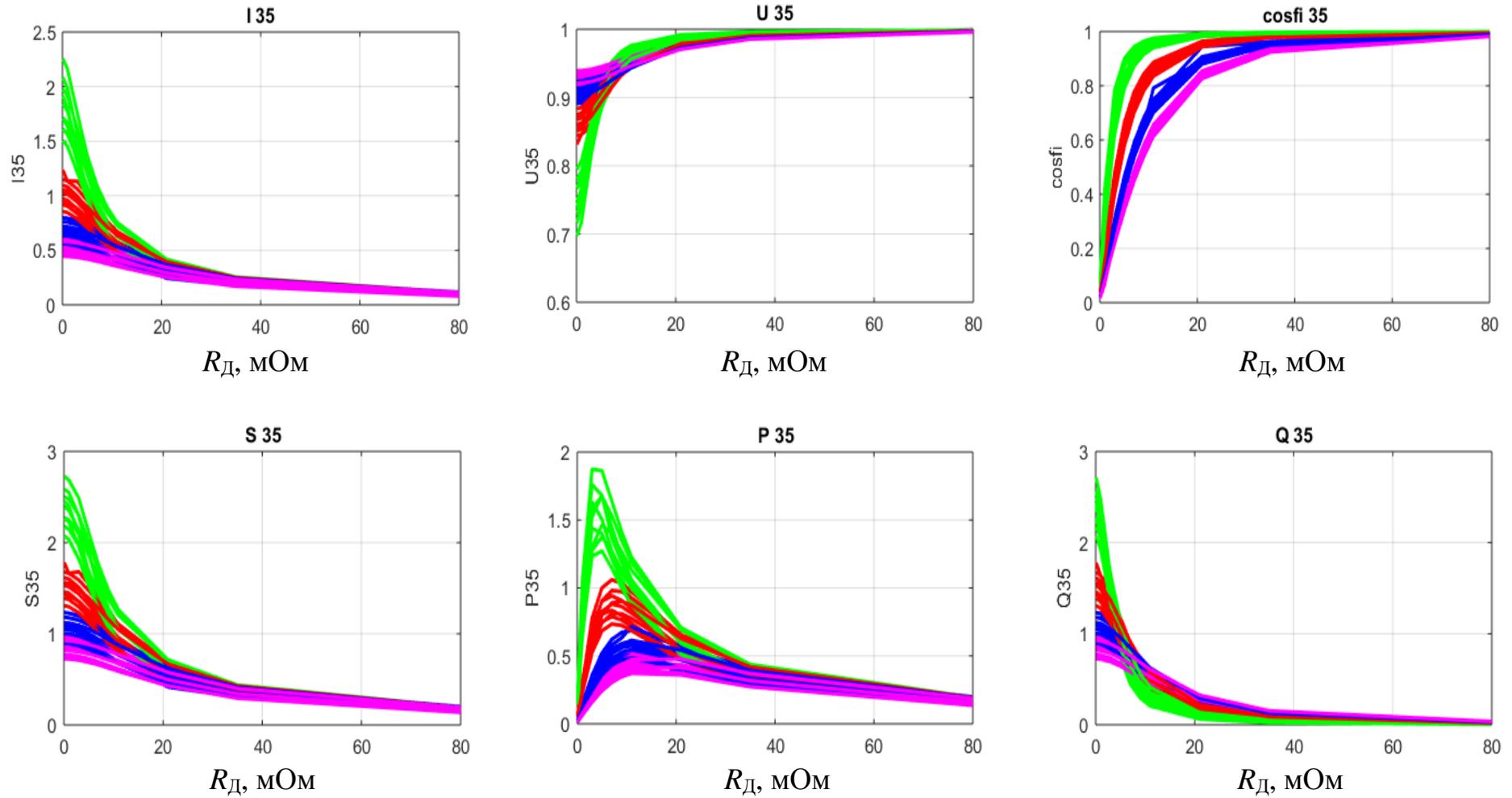


Рисунок 2.17 – Графики изменения параметров системы на линии 35 кВ

- -  $X_L = 1.7$  MΩ;
  - -  $X_L = 5$  MΩ;
- -  $X_L = 9$  MΩ;
  - -  $X_L = 12$  MΩ;

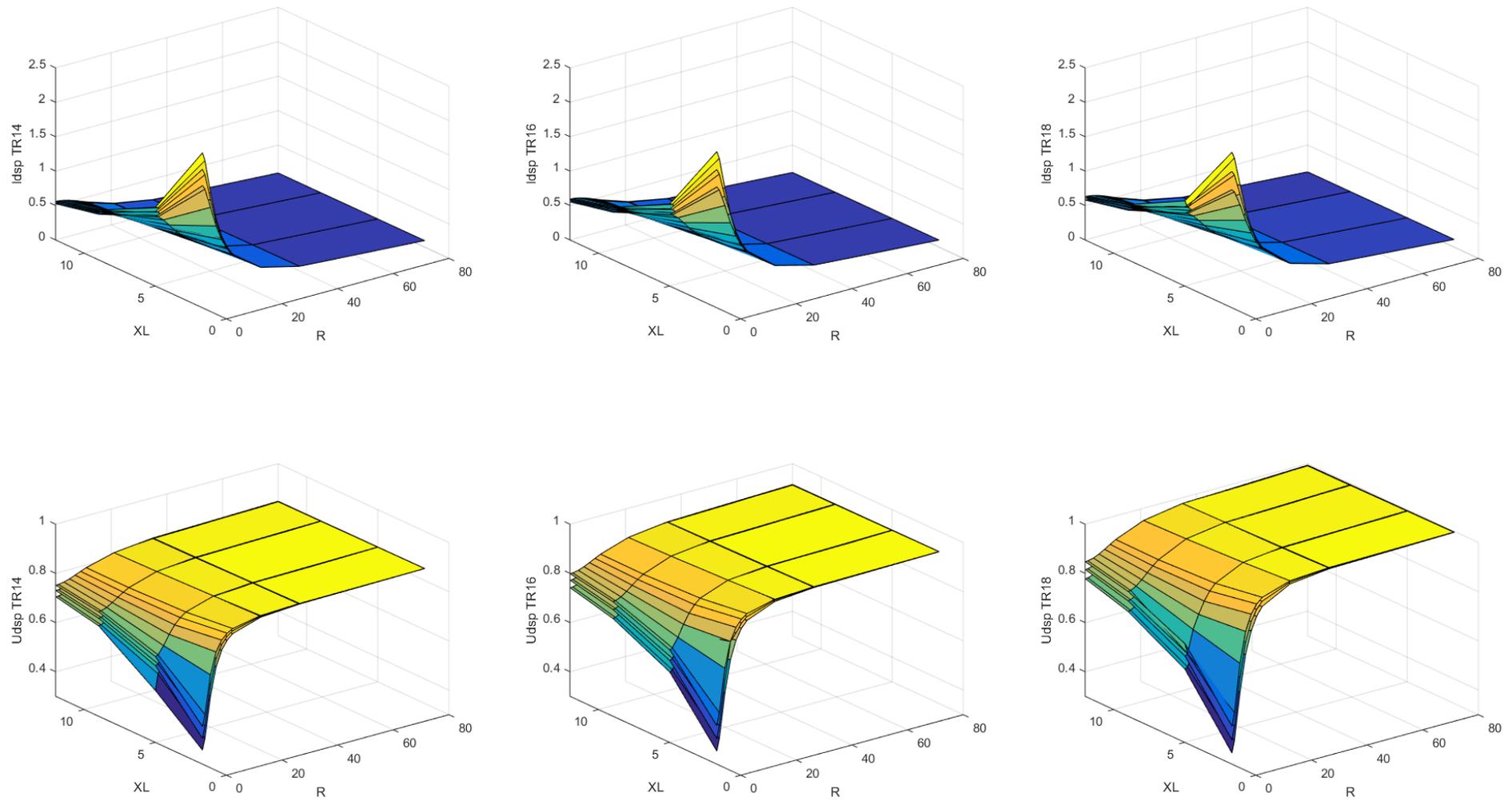


Рисунок 2.18 – Зависимости тока и напряжения на шинах ДСП при изменении  $R_D$  (мОм) и  $X_L$  (мОм)

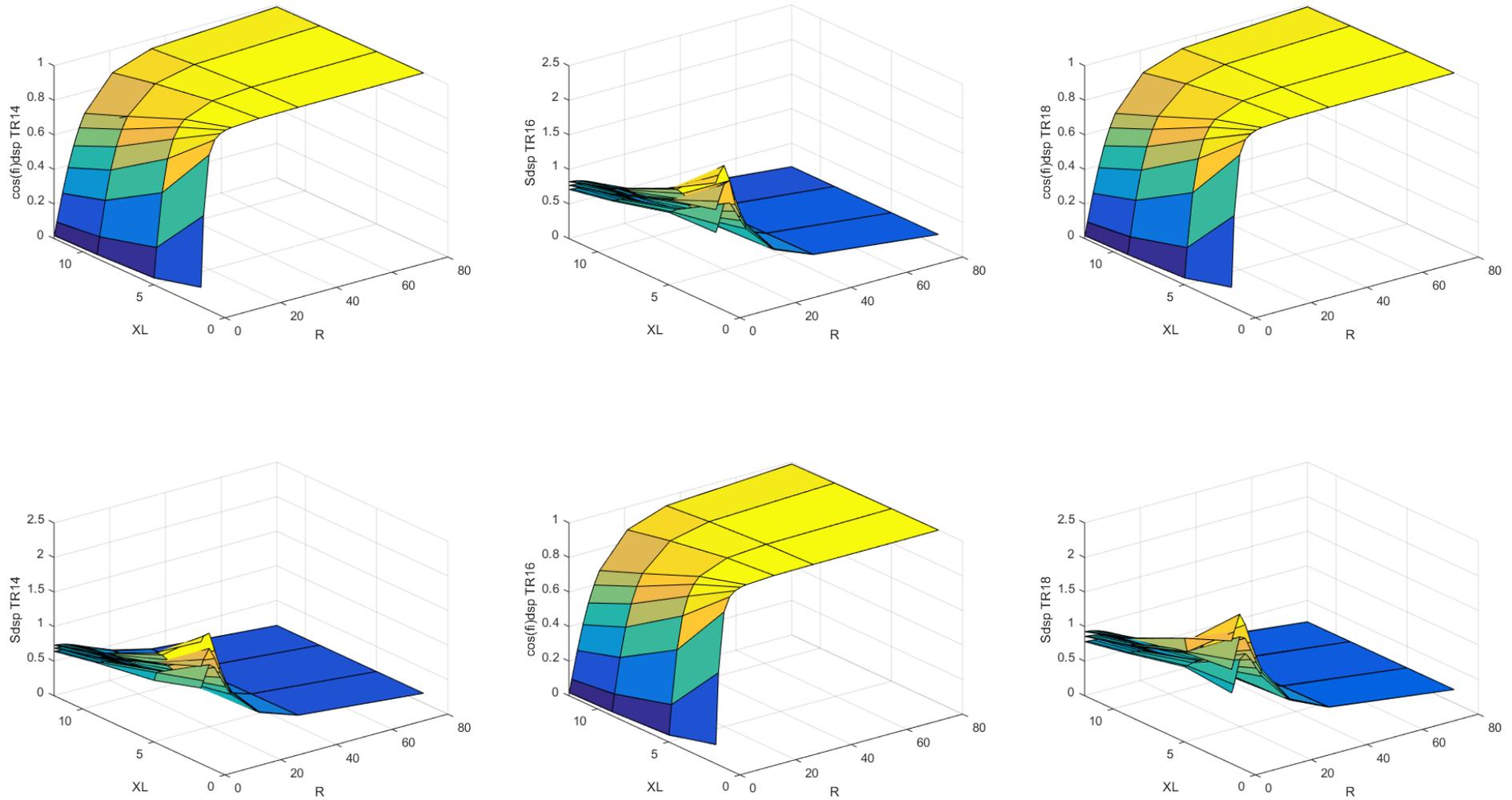


Рисунок 2.19 – Зависимости коэффициента мощности и полной мощности на шинах ДСП при изменении  $R_{\text{Д}}$  (мОм) и  $X_L$  (мОм)

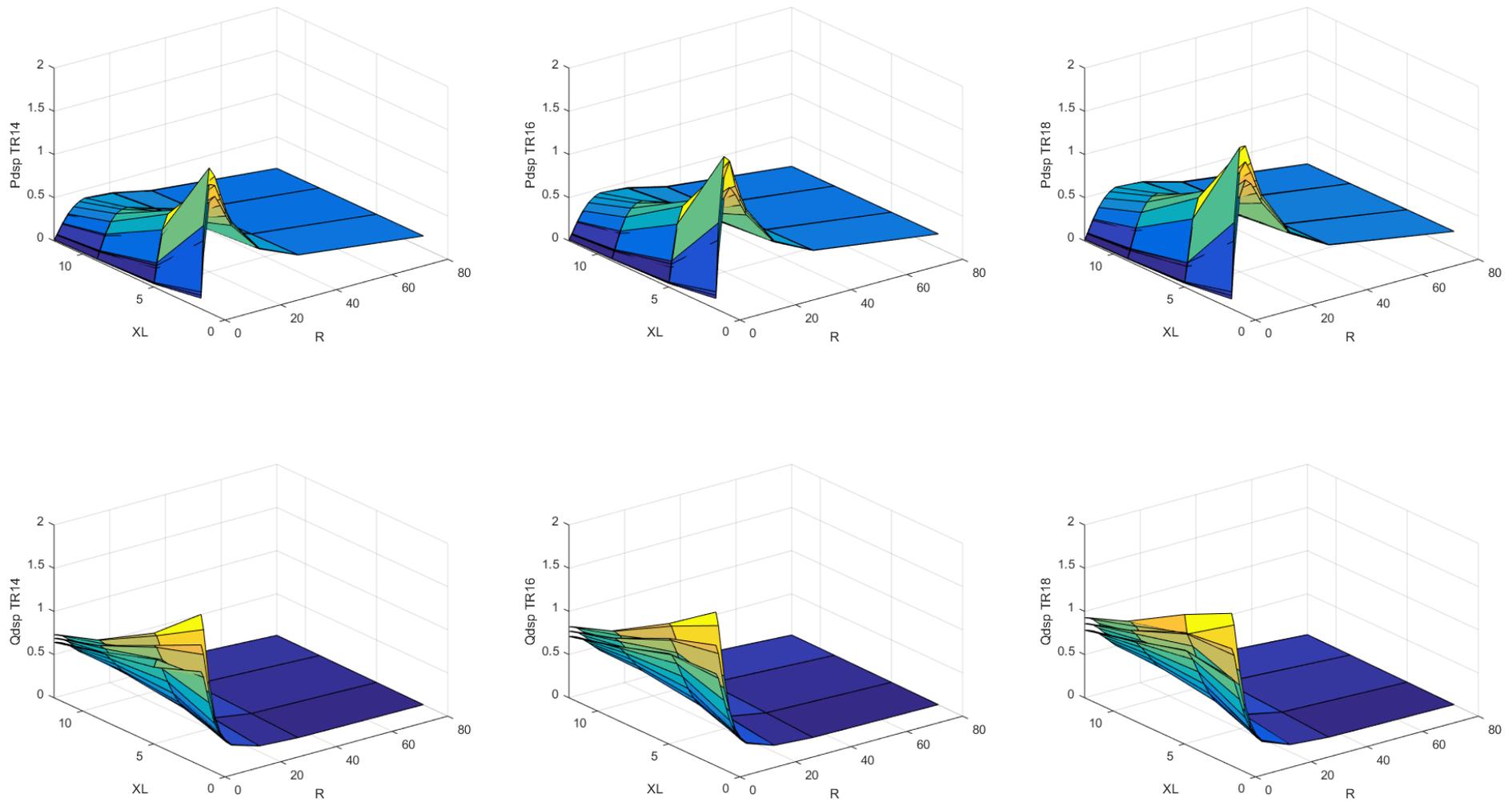


Рисунок 2.20 – Зависимости активной и реактивной мощностей на шинах ДСП при изменении  $R_D$  (МОм) и  $X_L$  (МОм)

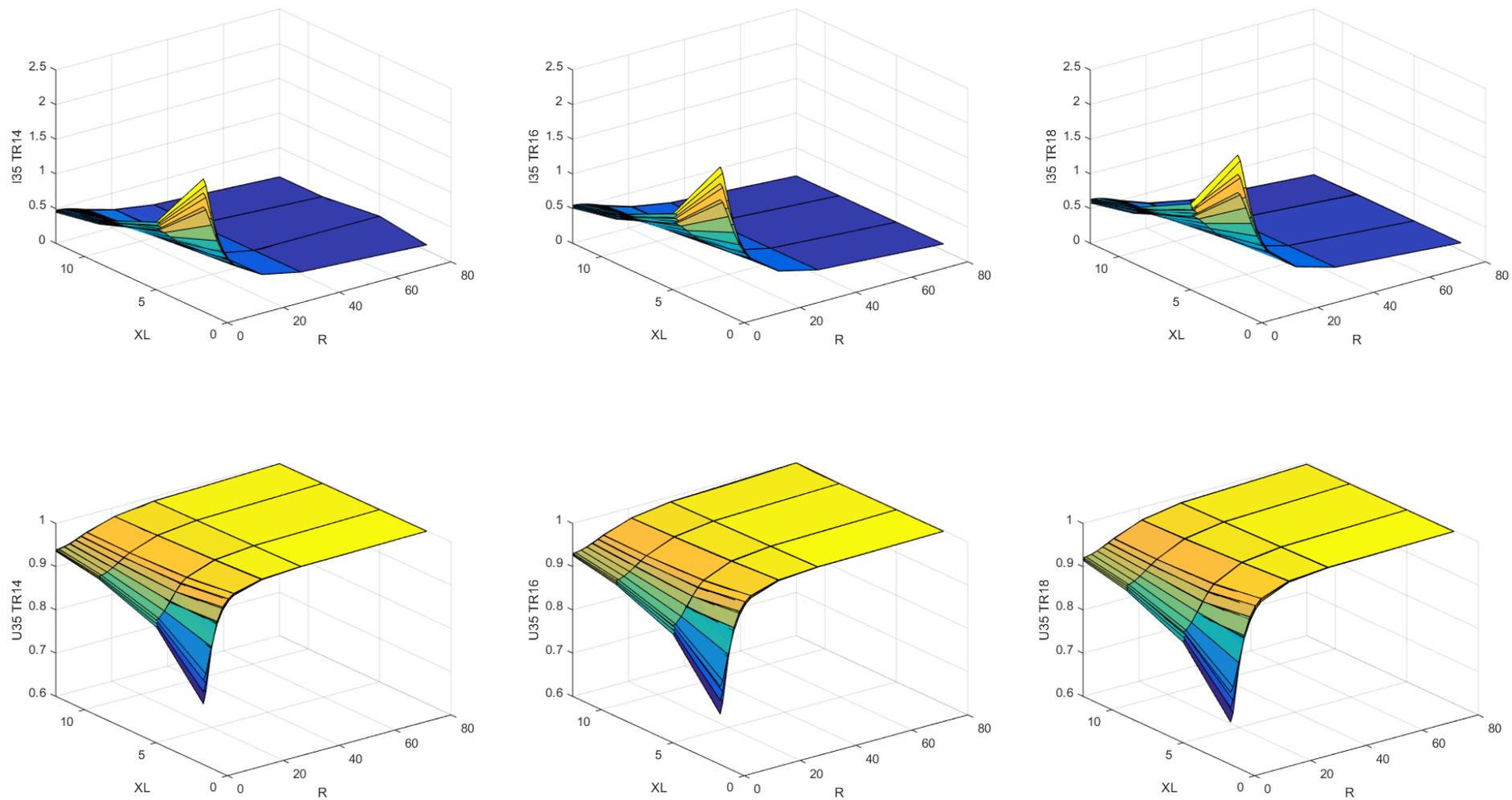


Рисунок 2.21 – Зависимости тока и напряжения на линии 35 кВ при изменении  $R_D$  (мОм) и  $X_L$  (мОм)

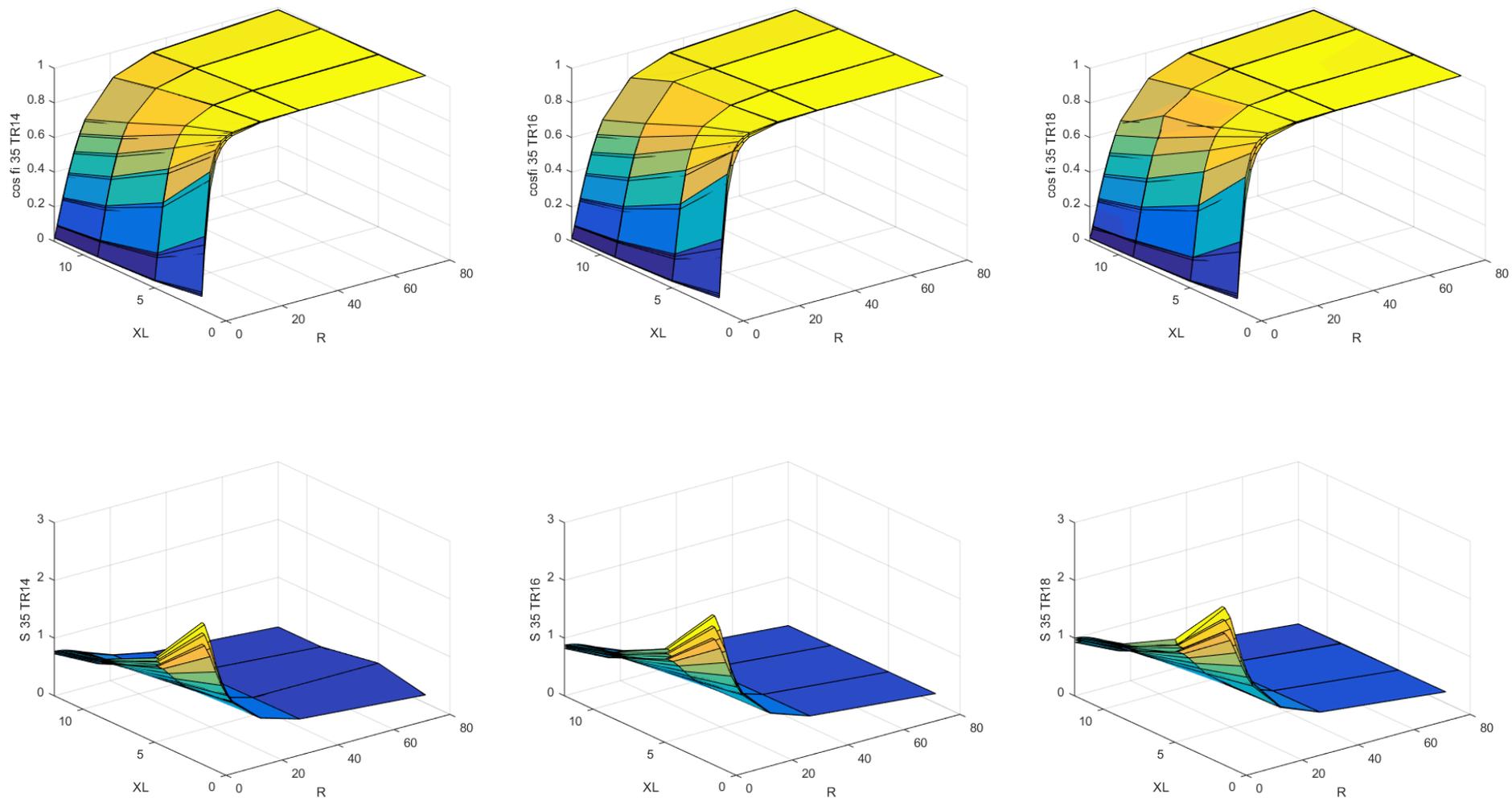


Рисунок 2.22 – Зависимости коэффициента мощности и полной мощности на линии 35 кВ при изменении  $R_D$  (МОм) и  $X_L$  (МОм)

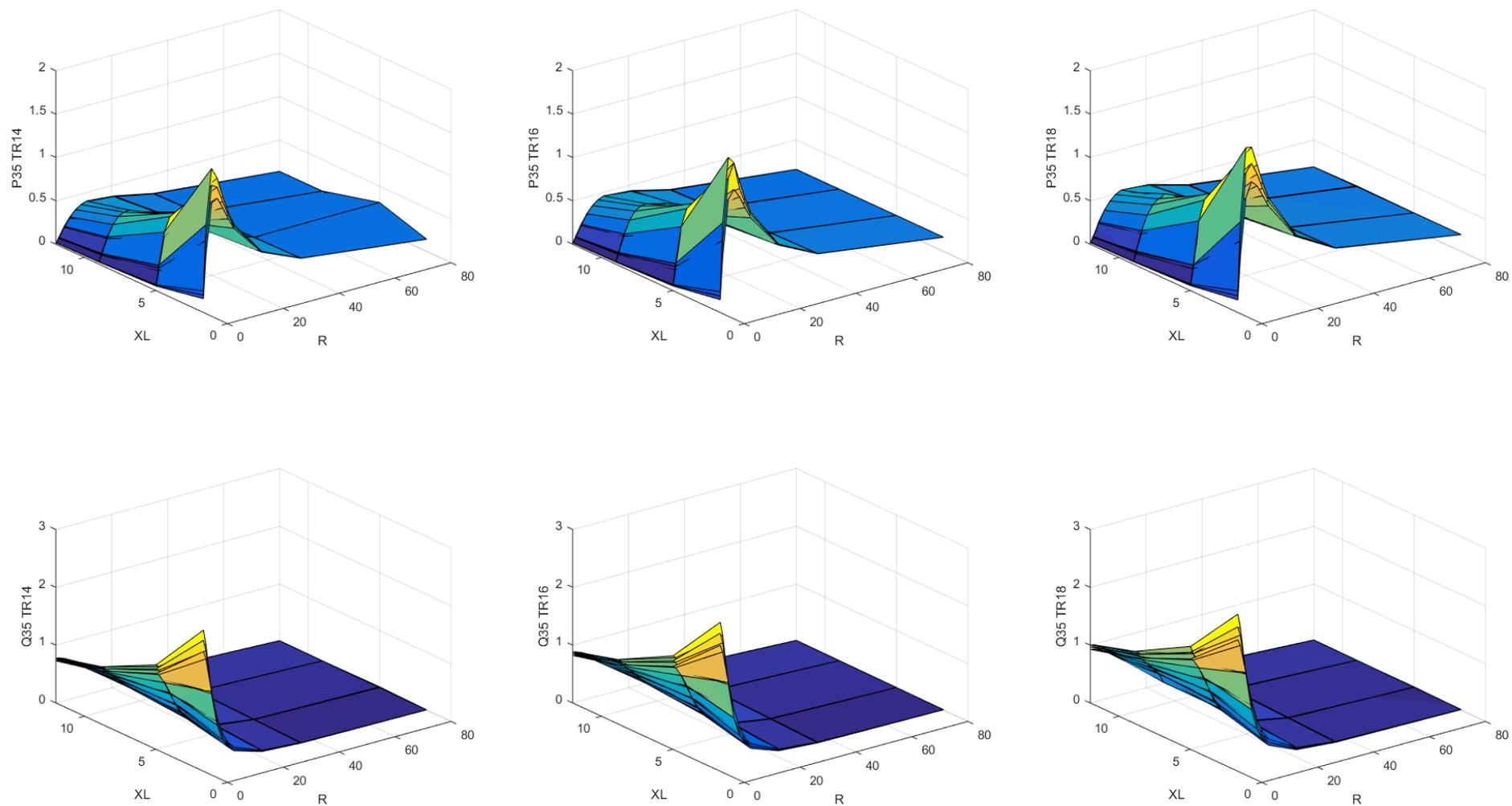


Рисунок 2.23 – Зависимости активной и реактивной мощностей на линии 35 кВ при изменении  $R_D$  (МОм) и  $X_L$  (МОм)

Представленные на рисунках 2.16 – 2.23 зависимости показывают, что при увеличении сопротивления  $R_d$  изменения параметров системы электроснабжения ДСП перестают быть видны. При  $R_d > 25$  мОм напряжение на шинах питания печи фактически зависит только от выходного напряжения печного трансформатора, которое устанавливается включением соответствующей ступени. На линии 35 кВ переключение ступеней трансформатора не влияет на напряжение, поэтому при  $R_d > 25$  мОм напряжение  $U_{35}$  практически не меняется и равно 1 о.е. При этом токи печи и на линии 35 кВ принимают минимальные значения. Аналогичные результаты можно видеть на графиках активных, реактивных и полных мощностей. Наибольшие изменения этих параметров соответствуют значениям сопротивления  $R_d < 25$  мОм.

#### **2.4 Синтез параметров классического регулятора в системе управления статическим тиристорным компенсатором**

В качестве сигнала, по которому возможно реализовать управление СТК, используют сигналы, показывающие уровень реактивной мощности или уровень напряжения в точке подключения компенсатора. Низкие значения коэффициента мощности, наблюдаемые в диапазоне основных рабочих точек печи, предполагают, что управление должно выполняться по первому типу сигналов. Однако в работах [65, 82] показано, что в этом случае невозможно будет обеспечить требуемый уровень напряжения на выводах печного трансформатора и соответственно снизится производительность печи. Поэтому далее в качестве входного сигнала в систему управления используется сигнал ошибки  $e$ , показывающий отклонение измеренного на линии 35 кВ напряжения  $V_{meas}$  от заданного значения  $V_{ref}$ :

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

В общем виде систему управления статическим тиристорным компенсатором можно представить функциональной схемой, показанной на рисунке 2.24

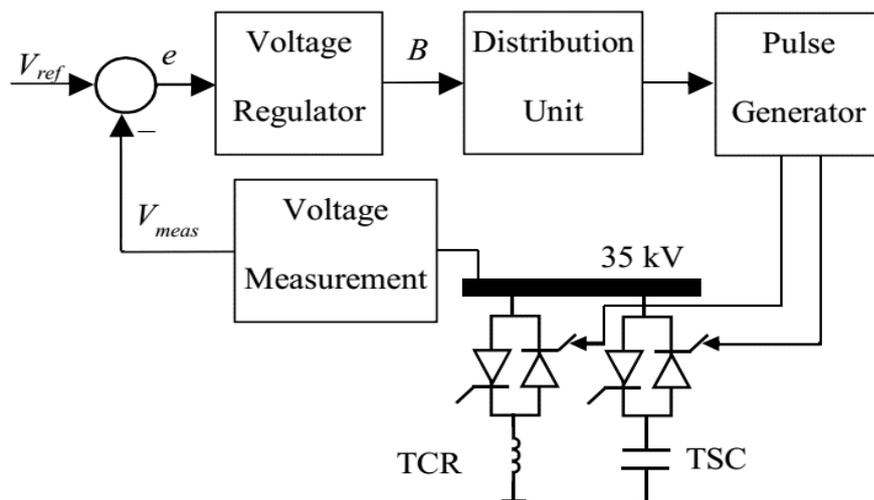


Рисунок 2.24 – Функциональная схема системы управления статическим тиристорным компенсатором

В процессе работы регулятора вычисляется переменная величина реактивной проводимости  $B$ , которая должна быть получена в СТК переключением блоков фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ,  $TSC$ ) 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.

Как правило, для управления СТК в блоке *Voltage Regulator* применяют пропорционально-интегральный закон управления. Структурная схема регулятора показана на рисунке 2.25.

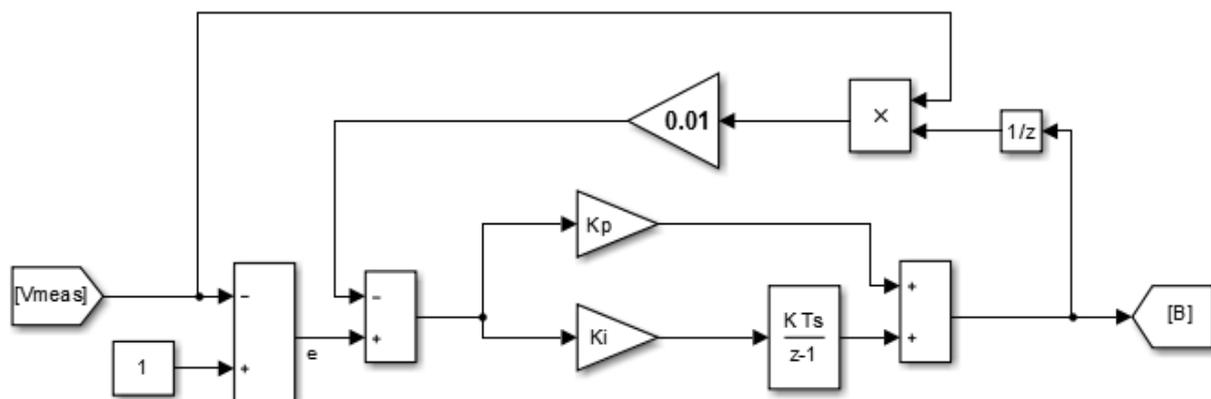


Рисунок 2.25 –ПИ-регулятор в модели статического тиристорного компенсатора

В системе электроснабжения дуговой сталеплавильной печи достаточно много нелинейных элементов, поэтому при определении параметров ПИ-регулятора вместо аналитических методов был использован блок *Signal Constraint*, в котором оптимальные параметры  $K_p$  и  $K_i$  подбираются численными методами [56, 57].

Для определения параметров блок *Signal Constraint* подключается к сигналу  $V_{meas}$ . Затем в блоке с помощью ограничительных линий задается зона, определяющая желаемую форму напряжения  $V_{meas}$ . На рис. 2.26 показан процесс подбора параметров  $K_p$  и  $K_i$  для нагрузки  $R_D = 1$  мОм и  $X_L = 5$  мОм, трансформатор включен на 18 ступень, реактор – на 2 ступень.

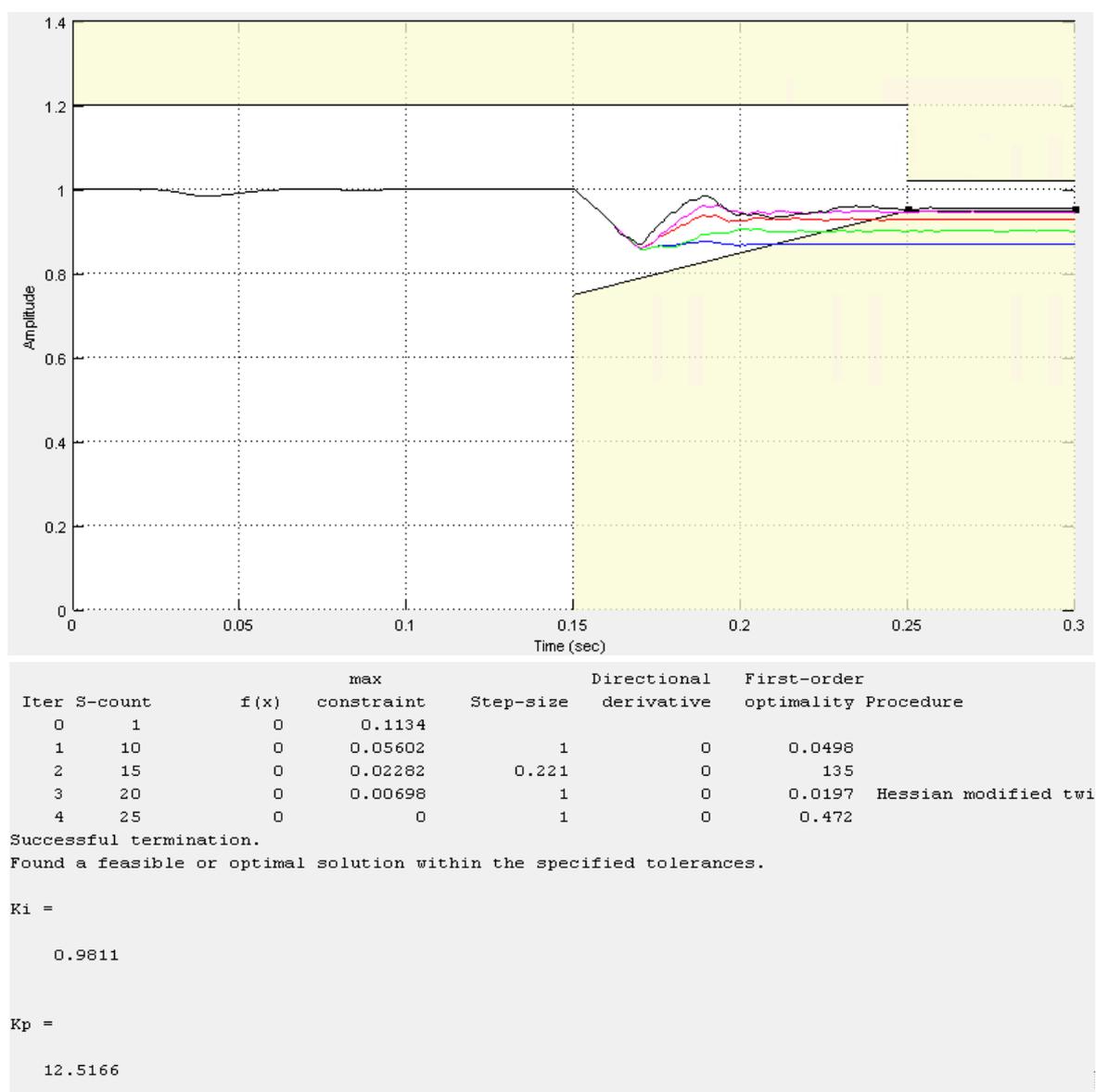


Рисунок 2.26 – Процесс подбора оптимальных параметров в блоке *Signal Constraint*

Для исключения влияния переходных процессов в библиотечных блоках модели, наблюдаемых при включении симуляции, на процесс определения параметров в зоне желаемого сигнала (рисунке 2.26) отпущено время до 0.15 с на их завершение. Сигнал на подключение нагрузки подается в момент времени 0.15 с.

Выбор «коридора» для прохождения сигнала влияет на значения определяемых параметров. В рассматриваемом примере задается время регулирования  $t_p = 0.1$  с и максимальное отклонение  $e_{max} = 5\%$ . Для заданной нагрузки удалось подобрать оптимальные параметры и получить желаемую форму сигнала  $V_{meas}$ . Однако в большинстве случаев, соответствующих большой мощности нагрузки, невозможно подобрать параметры  $K_p$  и  $K_i$  таким образом, чтобы измеряемый сигнал соответствовал этой зоне. Для примера на рисунке 2.27 показан результат работы блока *Signal Constraint* с нагрузкой  $R_D = 1$  мОм и  $X_L = 5$  мОм, трансформатор включен на 18 ступень, реактор – на 6 ступень. Увеличение мощности нагрузки привело к невозможности получения сигнала, соответствующего заданной зоне. Поэтому для получения оптимальных параметров время регулирования  $t_p$  было увеличено до 0.25 с, а максимальное отклонение  $e_{max}$  до 15%.

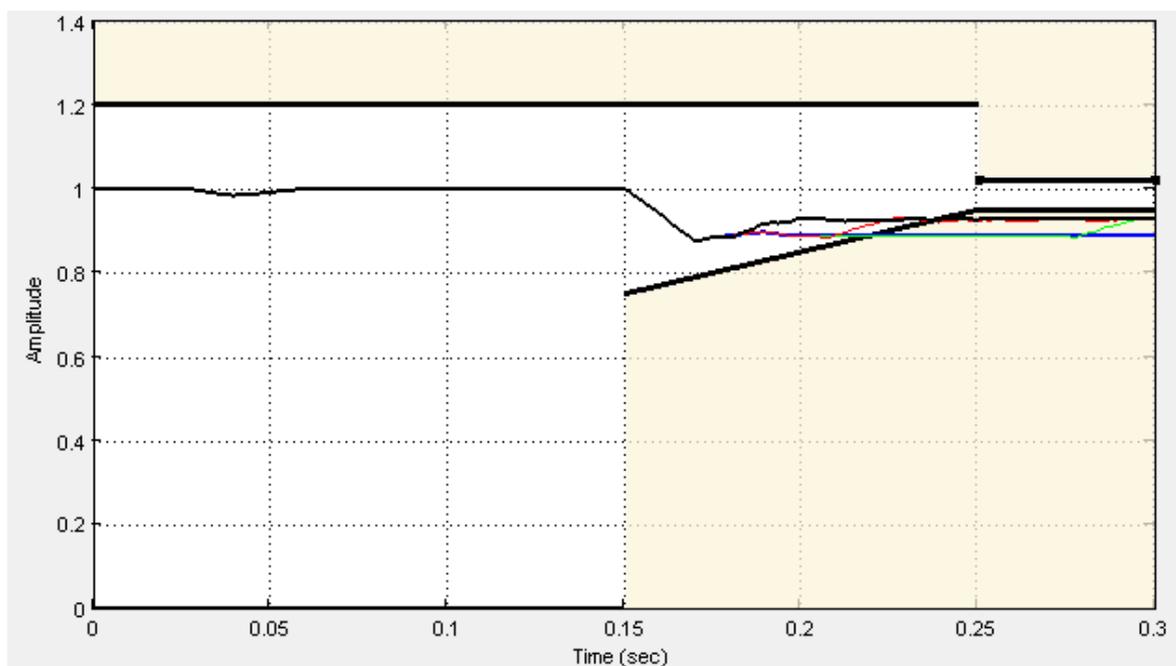


Рисунок 2.27 – Процесс подбора оптимальных параметров в блоке *Signal Constraint* для больших мощностей нагрузки

При других сочетаниях  $R_D$ ,  $X_L$ , ступеней трансформатора и реактора также требовалось задавать другие значения  $t_p$  и  $e_{max}$  для успешного завершения операций подбора приемлемых значений параметров  $K_p$  и  $K_i$ , что говорит о снижении качества регулирования.

В таблице 2.3 показаны результаты определения коэффициентов регулятора  $K_p$  и  $K_i$  для разных значений нагрузки при включении 18 ступени трансформатора и 6 ступени реактора.

Таблица 2.3 - Параметры ПИ-регулятора

<b><math>X_L = 1.7</math> мОм</b>								
$R$ , мОм	0.1	1	3	5	7	9	11	21
$K_p$	11.78	1.2	2.83	1.12	3.99	4	1	1
$K_i$	23.88	9.8	16.91	65.5	9.78	15.84	10	1
<b><math>X_L = 5</math> мОм</b>								
$R$ , мОм	0.1	1	3	5	7	9	11	21
$K_p$	61.75	1.02	10.02	4	2.79	1	4	1
$K_i$	0.003	47.57	29.99	1	4	38.44	15.84	1
<b><math>X_L = 9</math> мОм</b>								
$R$ , мОм	0.1	1	3	5	7	9	11	21
$K_p$	1.12	1.14	6.12	4	1	1	4	1
$K_i$	10.02	10.02	9.27	9.8	39.84	39.69	15.84	1
<b><math>X_L = 12</math> мОм</b>								
$R$ , мОм	0.1	1	3	5	7	9	11	21
$K_p$	0.99	0.99	1	3.99	4	4	4	1
$K_i$	29.99	29.99	40	14.61	10.03	10.03	10.56	1

По приведенным данным видно, что 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.

Переключение на другие ступени трансформатора и реактора также ведет к снижению потребляемой мощности и, соответственно, получению больших участков нечувствительности коэффициентов регулятора. Например, на 14 ступени трансформатора практически все коэффициенты определяются как  $K_p \approx 4$  и  $K_i \approx 1$ .

В результате определения коэффициентов ПИ-регулятора численными методами можно сделать следующий вывод. Во время работы ДСП с минимальным потреблением мощности, коэффициенты ПИ-регулятора в системе управления СТК мало изменяются и достаточно некоторых приближенных значений, для приемлемой работы компенсирующего устройства. Если дуговая печь работает на полную мощность, например, во время проплавления колодцев в шихте, то требуется подбор параметров регулятора в реальном времени, который сложно и трудоемко обеспечить, так как в реальной системе энергоснабжения нагрузка изменяется непрерывно.

На рисунках 2.28 – 2.30 приводятся результаты исследований, которые выполнялись в модели СЭС дуговой печи, и показывают реакцию ПИ-регулятора в СУ СТК на включение постоянной во времени нагрузки. На графиках показаны изменения значений напряжения  $V_{meas}$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi_{35}$  на линии 35 кВ для 18 ступени трансформатора и 6 ступени реактора. Мощность нагрузки определяется только сочетанием параметров  $R_d$  и  $X_L$ .

На рисунке 2.28 показаны результаты моделирования системы электроснабжения с  $R_d = 21$  мОм и  $X_L = 12$  мОм. В точке подключения печи указанным значениям соответствует коэффициент мощности  $\cos\varphi_d = 0.87$ . По представленным диаграммам видно, что СТК с ПИ регулятором хорошо справляется с компенсацией данной нагрузки. В результате работы СТК отклонение напряжения не превышает 0.5 %, а коэффициент мощности в точке подключения СТК стремится к 1. При этом время регулирования менее 0.05 с.

Увеличение мощности нагрузки приводит к снижению качества регулирования. По графикам, приведенным на рисунке 2.29 видно, что при сочетании сопротивлений  $R_d = 5$  мОм,  $X_L = 9$  мОм, которым соответствует  $\cos\varphi_d = 0.49$ , напряжение  $V_{meas}$  выходит на уровень близкий к 1 (отклонение напряжения не превышает 2%) за время менее 0.05 с, но при этом наблюдаются колебания коэффициента мощности  $\cos\varphi_{35}$  между значениями 0.9 и 1.

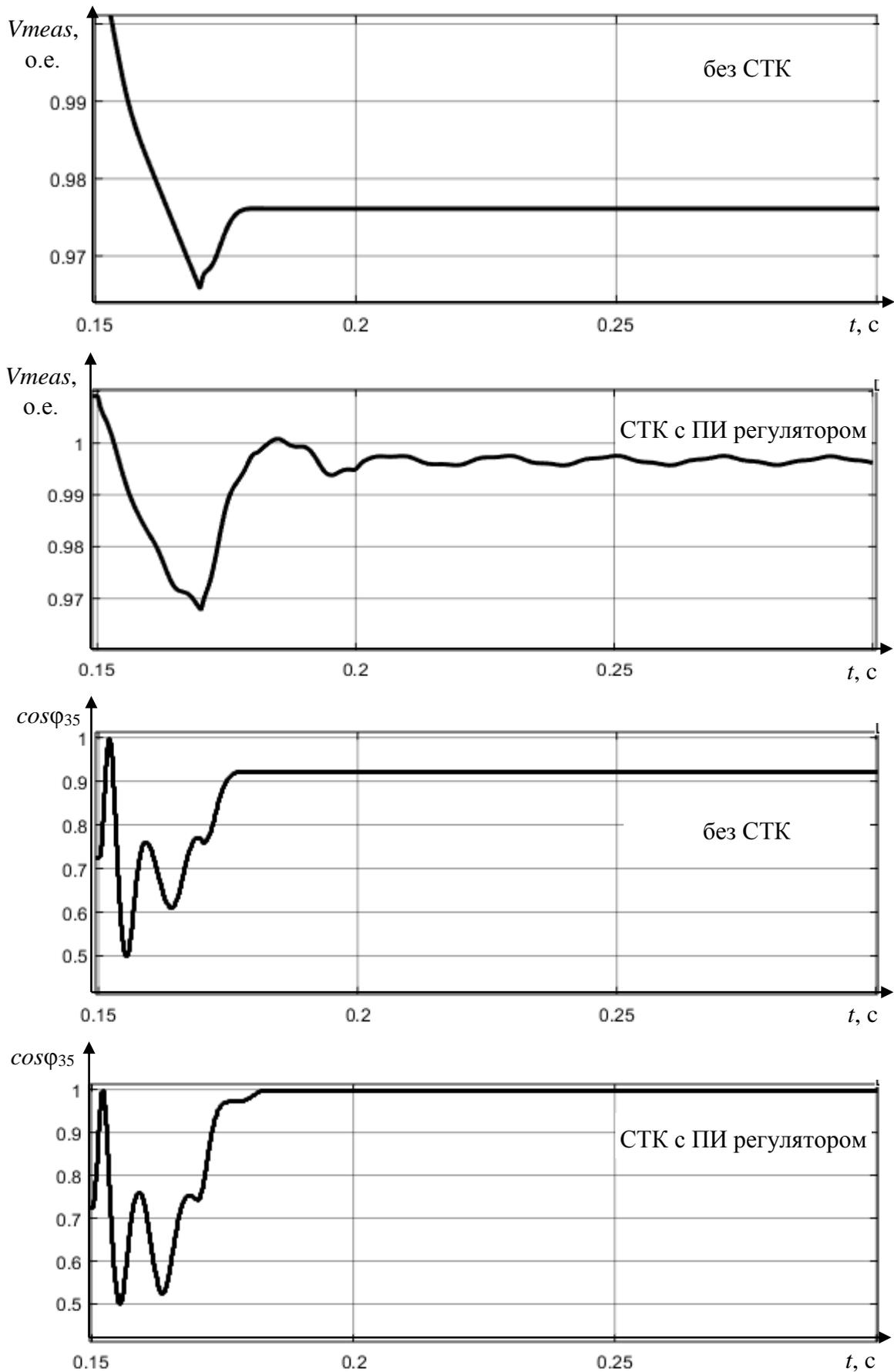


Рисунок 2.28 – Реакция системы при малой мощности нагрузки

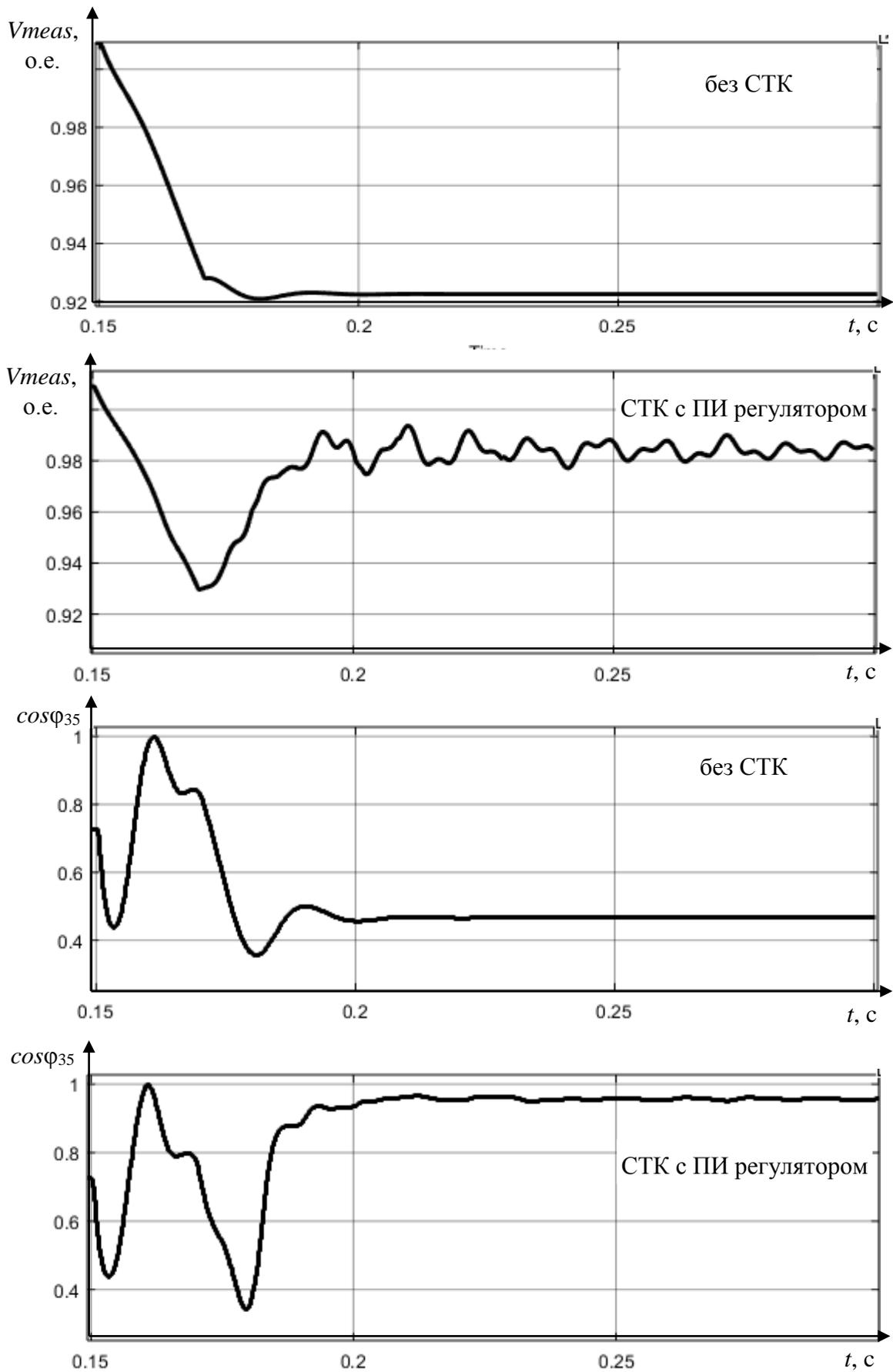


Рисунок 2.29 – Реакция системы при средней мощности нагрузки

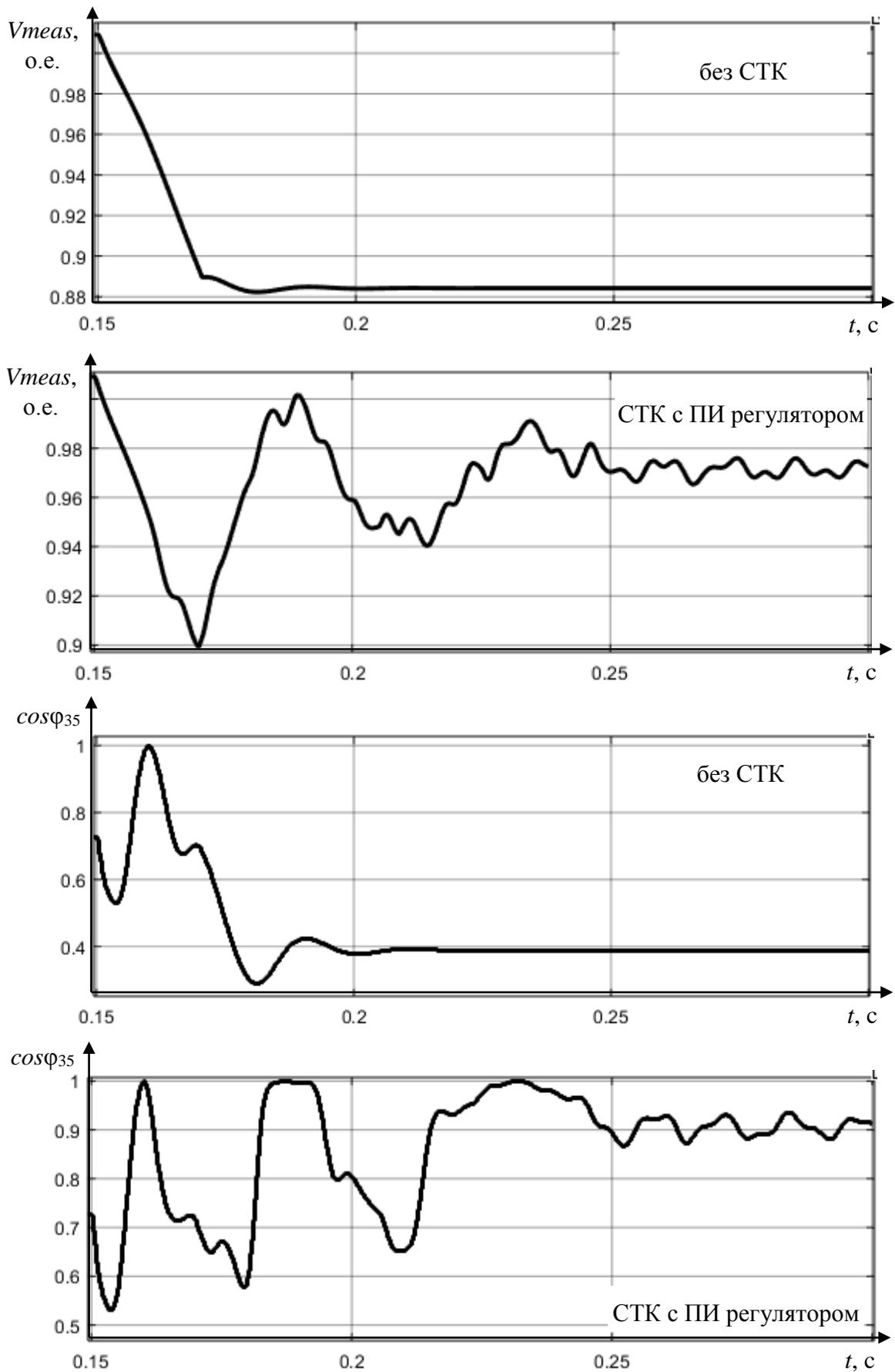


Рисунок 2.30 – Реакция системы при большой мощности нагрузки

Результаты работы СТК при дальнейшем увеличении мощности нагрузки с сочетанием параметров  $R_D = 3$  мОм,  $X_L = 5$  мОм ( $\cos\varphi_D = 0.51$ ) показаны на рисунке 2.30. В результате регулирования сигнал напряжения  $V_{meas}$  выходит на уровень близкий к заданному с отклонением 3%, время регулирования равно 0.1 с. При этом коэффициент мощности не удается поднять выше значения 0.91.

Указанные значения параметров  $V_{meas}$  и  $\cos\varphi_{35}$  находятся в допустимых пределах. Однако увеличение времени регулирования и невозможность стабилизировать уровень сигнала может привести к существенным колебаниям напряжения и коэффициента мощности при резкопеременной нагрузке.

Полноценный анализ эффективности применения СТК с ПИ-регулятором возможен при построении адаптивной системы выбора параметров регулятора. Однако разброс значений при изменении нагрузки делает эту задачу сложно выполнимой. Поэтому была разработана упрощенная система подбора коэффициентов, в которой учтены данные только для 18 ступени трансформатора и 6 ступени реактора, при этом  $X_L = 5$  мОм и  $R_D = [1, 3, 5, 7, 9]$  мОм. Структурная схема ПИ-регулятора с адаптивным выбором коэффициентов  $K_p$  и  $K_i$  показана на рисунке 2.31.

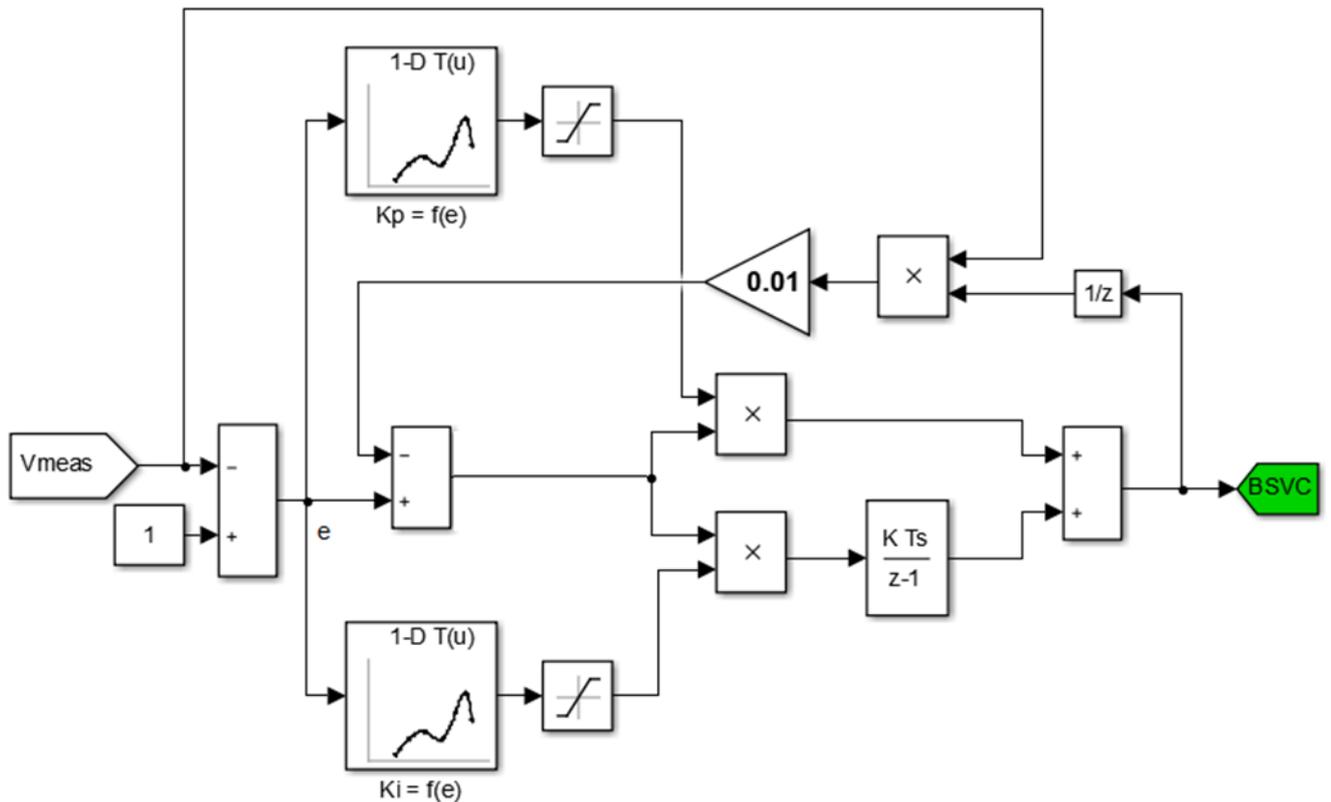


Рисунок 2.31 – ПИ-регулятор с переменными параметрами

Определение коэффициентов регулятора осуществляется по уровню отклонения напряжения  $e$ , соответствующему параметрам  $R_D$  и  $X_L$  (Приложение А) На рисунке 2.32 представлены графики функций  $K_p$  и  $K_i$ , по которым определяются параметры регуляторов в модели. Графики получены в результате интерполяции методом кубических сплайнов значений из таблицы 2.3.

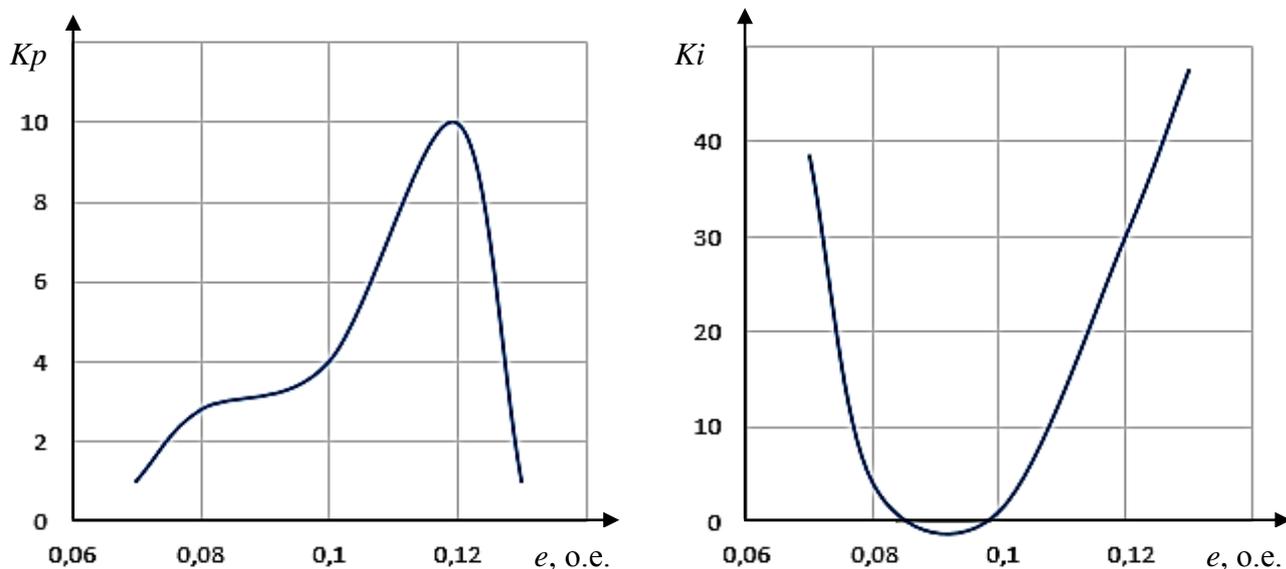


Рисунок 2.32 – Параметры ПИ-регулятора

Для анализа реакции СТК на переменную нагрузку был сформирован сигнал, который имитирует переменное сопротивления  $R_D$  (рисунок 2.33). Реакция системы на этот сигнал показана на рисунке 2.34.

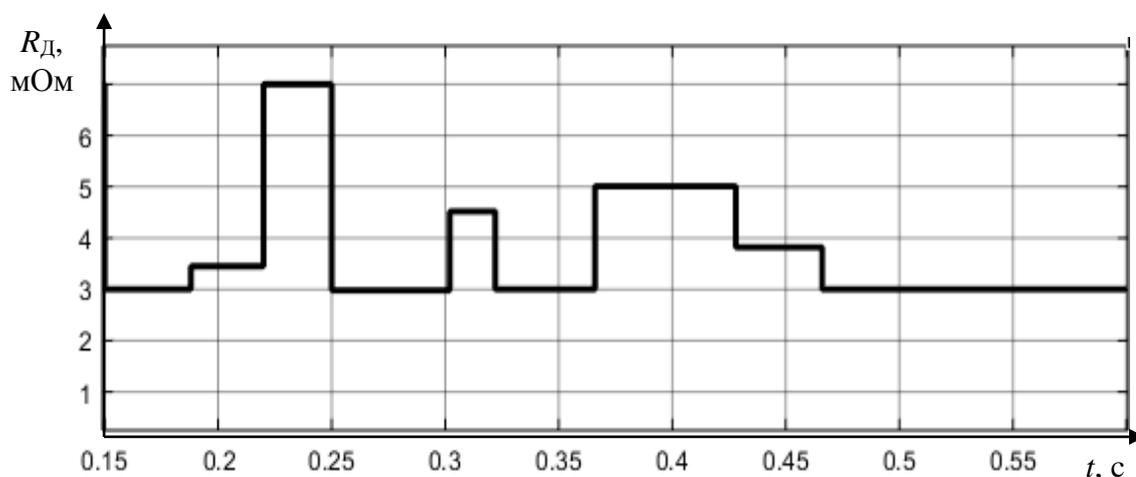


Рисунок 2.33 – Моделирование резкопеременной нагрузки

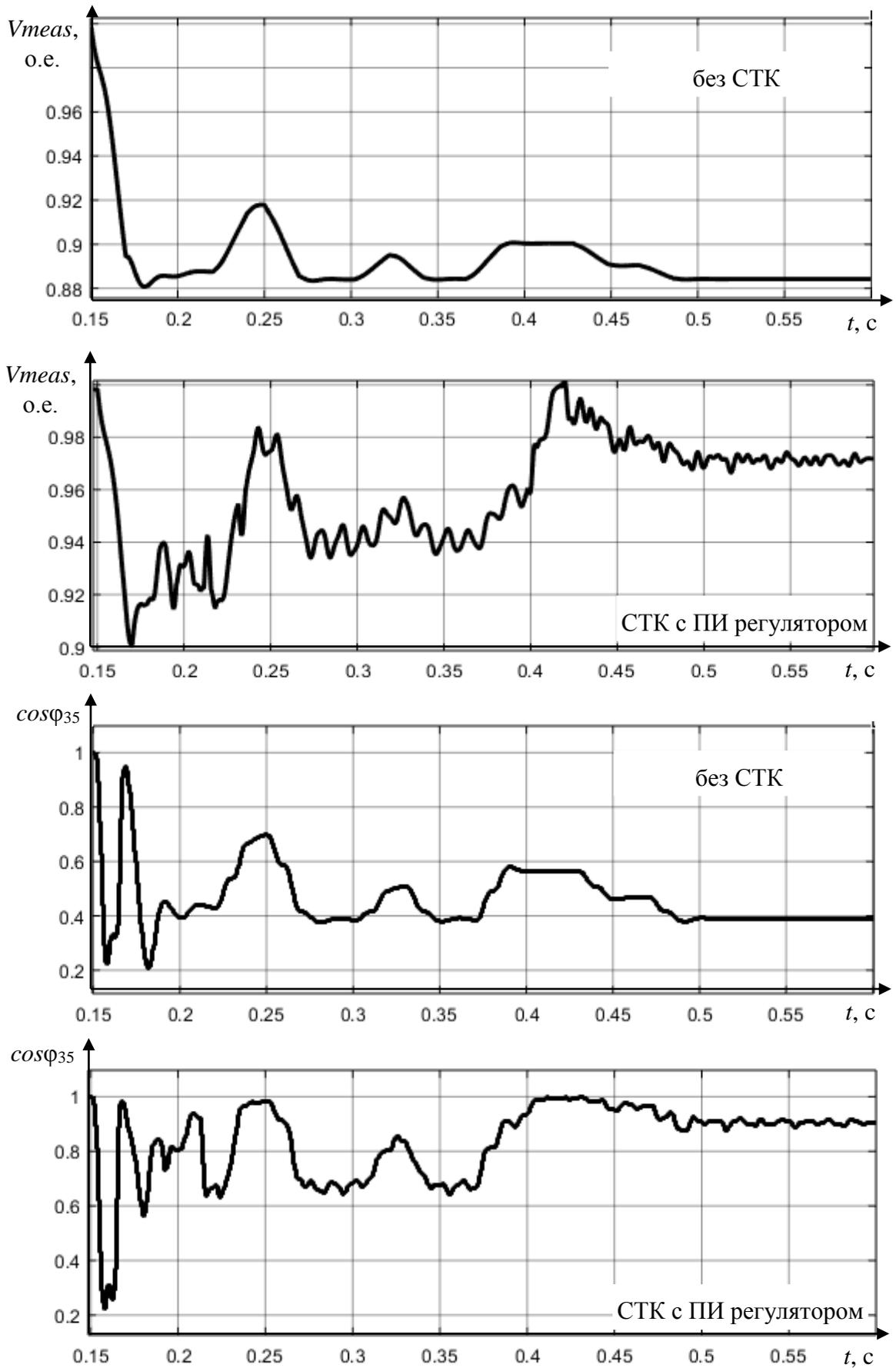


Рисунок 2.34 – Реакция системы на резкопеременную нагрузку

Как видно по результатам моделирования системе управления СТК с ПИ-регулятором не хватает быстродействия для стабилизации напряжения и коэффициента мощности. Уровень напряжения находится в пределах допустимой нормы – отклонение напряжение не превышает 10 %, но значения напряжения сильно изменяются во времени. Компенсацию реактивной мощности можно считать неудовлетворительной, т.к. при резкопеременной нагрузке не удается поддерживать уровень коэффициента мощности  $\cos\varphi_{35}$  постоянным и близким к 1.

## 2.5 Выводы по главе 2

1. Разработана имитационная модель системы энергоснабжения цеха металлургического предприятия с ДСП и СТК. Модель содержит следующие блоки:

- сетевой трансформатор, понижающий напряжение с 220 кВ до 35 кВ;
- печной ректора с 6 ступенями переключения обмоток;
- печной трансформатор с 18 ступенями переключения обмоток, позволяющий изменять напряжение на выходе с 600 до 1200 В;
- блок взаимной индуктивности, учитывающий близкое расположение токопроводов ДСП;
- СТК, модель которого составлена по примеру из [7] с добавлением функциональных блоков и заданием параметров, соответствующих исследуемой СЭС
- ДСП.

2. Выполнен анализ подходов к математическому описанию дуговой печи. ДСП представляет собой сложный для моделирования объект, т.к. при расплаве металла наблюдаются различные по своей физической природе процессы. В зависимости от поставленных задач различаются и подходы исследователей к описанию этих процессов. В данной работе рассматривается влияние дуговой печи, как источника резкопеременной нагрузки, на питающие сети, поэтому целесообразно при описании печи учитывать технологические особенности ее работы, связанные с электрическими параметрами системы.

По результатам анализа возможных способов описания печи был выбран метод, согласно которому дуговая печь описывается по электрической схеме замещения как трехфазная активно-индуктивная нагрузка с переменными сопротивлениями  $R_d$  и  $X_L$ .

3. По электрической схеме замещения была составлена модель ДСП, в которой переменные сопротивления реализованы с помощью управляемых источников. Источник формирует синусоидальный сигнал, значение которого соответствует падению напряжения на  $R_d$  или  $X_L$ .

4. Получены графики мгновенных значений тока  $i_d$ , напряжения  $u_d$  дуги и коэффициента мощности при переменных сопротивлениях  $R_d$  и  $X_L$ . Частота изменения значений сопротивлений соответствует частоте изменения параметров работающей на максимальной мощности ДСП. По приведенным графикам можно сделать вывод, что изменение индуктивного сопротивления  $X_L$  оказывает большее влияние на форму кривых тока и напряжения, чем изменение сопротивления  $R_d$ .

5. По имитационной модели выполнено исследование влияния трехфазной симметричной нагрузки на СЭС без компенсирующего устройства. Измерения параметров СЭС (токов и напряжений) осуществлялось на линии 35 кВ и на выводах обмотки печного трансформатора. По измеренным параметрам СЭС были рассчитаны коэффициент мощности, полная, активная и реактивная мощности. В результате были получены графики зависимостей измеренных и рассчитанных параметров СЭС от режимов работы СЭС (переключение ступеней печного трансформатора и реактора) и переменных сопротивлений  $R_d$  и  $X_L$ .

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- Переключение режимов работы СЭС оказывает меньшее влияние на параметры, чем изменение сопротивлений  $R_d$  и  $X_L$ , характеризующих режимы работы дуговой печи. При переключении ступеней печного трансформатора и реактора графики параметров СЭС располагаются вблизи друг от друга, образуя семейство кривых, соответствующих определенным режимам печи.

- При увеличении сопротивления  $R_d$ , которому соответствует снижение потребляемой ДСП мощности, параметры СЭС печи практически перестают изменяться. Наблюдаемые изменения параметров СЭС соответствуют  $R_d < 25$  мОм.

6. Определены коэффициенты  $K_p$  и  $K_i$  ПИ-регулятора в СУ СТК для различных режимов работы ДСП. Так как в СЭС ДСП есть нелинейные элементы, для определения оптимальных коэффициентов использовались численные методы, реализованные в блоке *Signal Constraint*. Управление СТК осуществляется по уровню измеренного напряжения  $V_{meas}$  в точке подключения компенсатора, поэтому в блок *Signal Constraint* вводился соответствующий этому напряжению сигнал. В блоке устанавливалась зона, ограничивающая желаемую форму сигнала. Оптимальные коэффициенты ПИ-регулятора определялись для сигнала  $V_{meas}$ , попадающего в эту зону.

Полученные значения коэффициентов  $K_p$  и  $K_i$  ПИ-регулятора неоднозначны. Во-первых, возможность получения некоторых коэффициентов появлялась только при увеличении времени регулирования  $t_p$  и максимального отклонения сигнала  $e_{max}$ . Во-вторых, наблюдается, как большой разброс числовых значений коэффициентов, так и некоторая нечувствительность регулятора к изменению нагрузки. Это позволяет говорить о сложности качественного регулирования напряжения в режиме реального времени в системе с переменной нагрузкой. Данный вывод подтверждается результатами исследований, выполненными в имитационной модели СЭС дуговой печи. СТК с ПИ-регулятором хорошо справляется с компенсацией нагрузки малой мощности, но при увеличении мощности наблюдается увеличение статической ошибки и времени регулирования. В результате при резкопеременной нагрузке не удастся стабилизировать уровни напряжения и коэффициента мощности. Следовательно, можно говорить о недостаточно эффективной работе ПИ-регулятора и необходимости оптимизации алгоритмов управления компенсирующим устройством.

## ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИМ ТИРИСТОРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ

### 3.1. Синтез нечеткого регулятора в системе управления статическим тиристорным компенсатором по алгоритму Мамдани

Повышение качества регулирования за счет увеличения быстродействия системы управления и снижения статической ошибки возможно с применением аппарата нечеткой логики [24, 48, 102, 113]. При этом разрабатываемый нечеткий регулятор (НР) должен быть встроен в существующую систему управления СТК, построенную на базе классического регулятора [26, 52, 60]. Соответственно, на входе и выходе НР должны быть учтены лингвистические переменные, соответствующие входному  $e$  и выходному  $B$  сигналам классического регулятора. Также следует учесть, что традиционно для соответствия регулятору, построенному на ПИ законе управления, в нечетком регуляторе кроме входной переменной  $e$  используется переменная  $de/dt$  – производная ошибки  $e$ . Функциональная схема системы управления с НР и соответствующий ей нечеткий алгоритм представлены на рисунках 3.1 и 3.2.

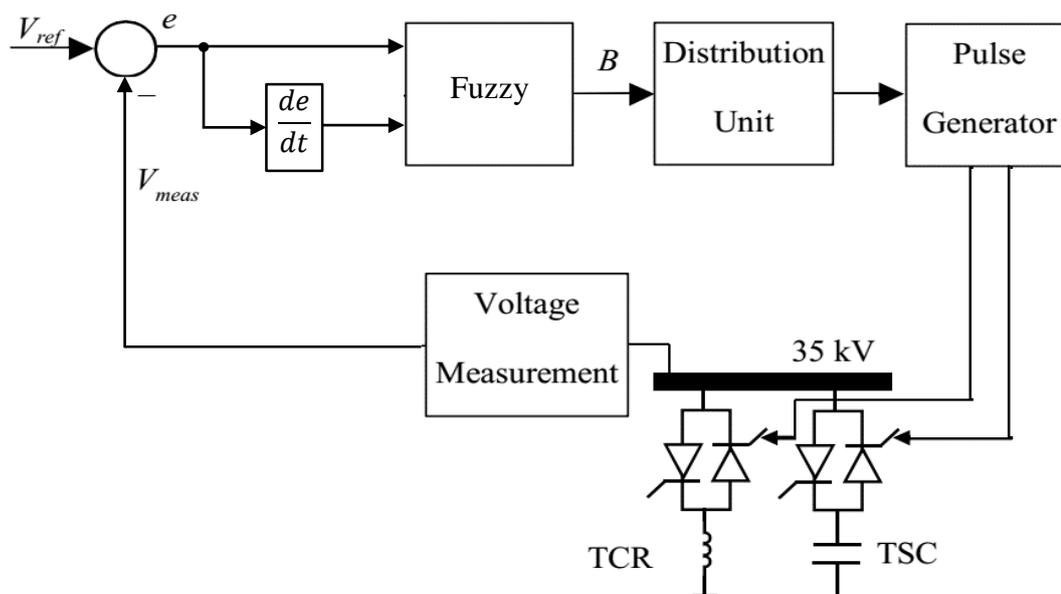


Рисунок 3.1 – Функциональная схема системы управления статическим тиристорным компенсатором с НР

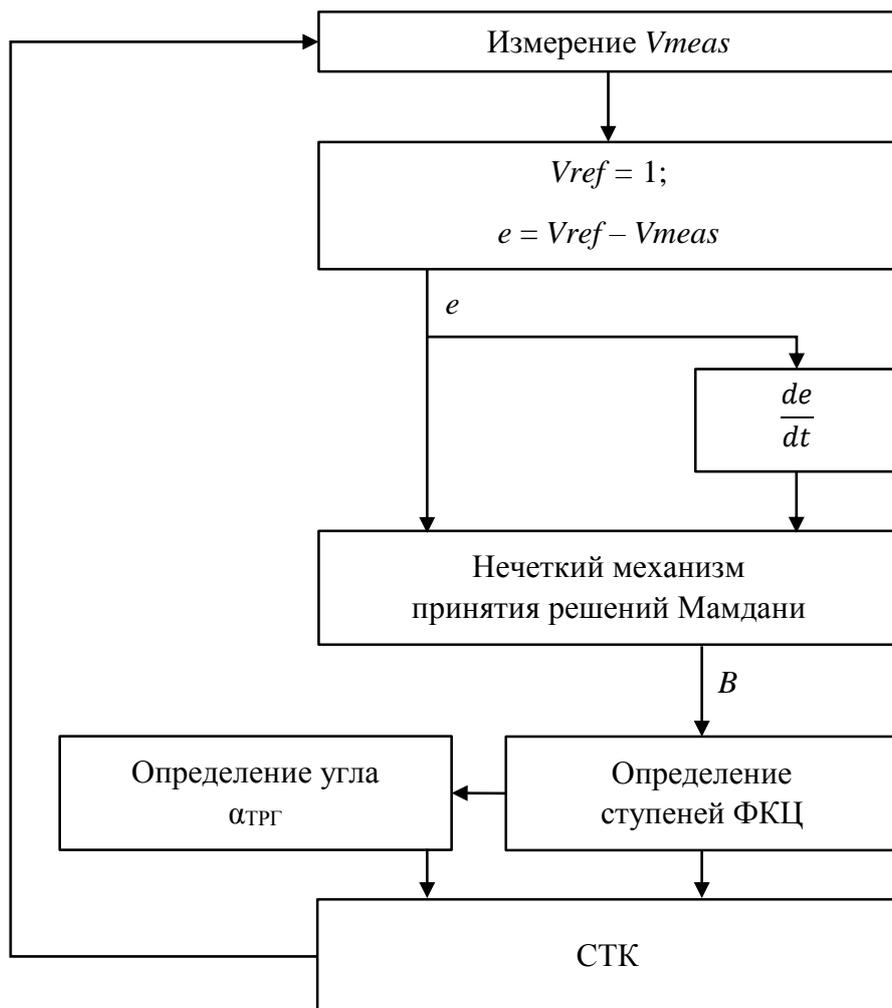


Рисунок 3.2 – Нечеткий алгоритм стабилизации напряжения в точке подключения СТК

Для формирования областей определения переменных  $e$  и  $de/dt$  были использованы результаты исследований, рассмотренные во второй главе. При нагрузке, идентичной номинальной и немного превышающей номинальную, максимальное отклонение от заданного уровня напряжения в точке 35 кВ в установившемся режиме составило  $e_{max} \approx 0.15$  о.е. Очевидно, что это значение должно соответствовать правой границе диапазона определения переменной  $e$ . Так как в результате работы системы управления СТК возможно перерегулирование и соответствующий ему выход переменной  $e$  в отрицательную область, то левая граница должна быть задана с учетом этого перерегулирования. В данной ситуации перерегулирование допустимо, но нежелательно, поэтому значение  $e$ , соответствующее левой границе диапазона, не должно быть большим.

Для описания переменной отклонения  $e$  первоначально были выбраны пять термов, функции принадлежности (ФП) которых показаны на рисунке 3.3:

$N$  – соразмерно перерегулированию;

$Z$  – соответствует достижению окрестности заданного значения;

$PS$  – малое отклонение от заданного значения;

$PM$  – среднее отклонение;

$PB$  – большое отклонение.

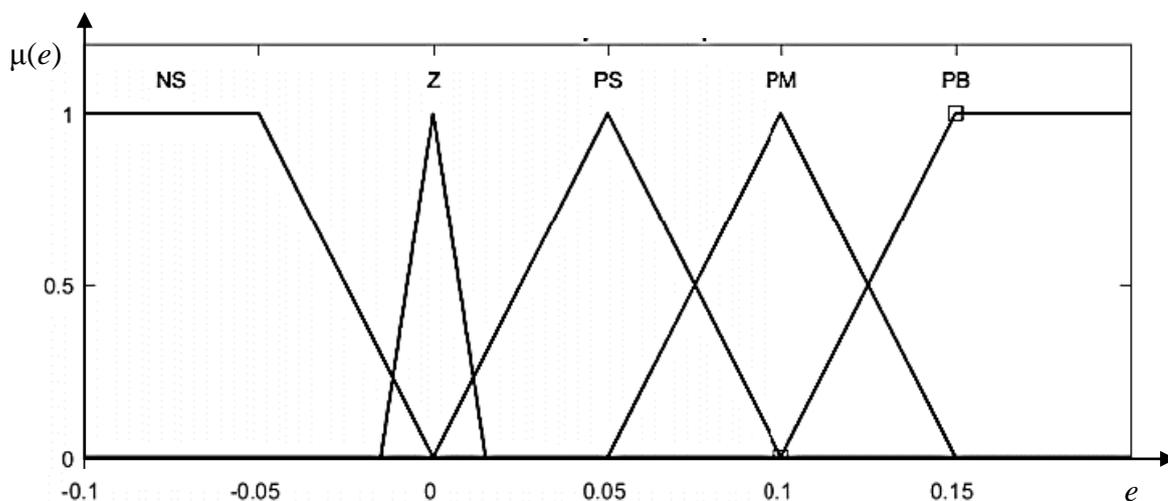


Рисунок 3.3 – Исходное распределение функций принадлежности входной лингвистической переменной  $e$

Для предварительной настройки нечеткого регулятора функции принадлежности (кроме  $Z$ ) переменной  $e$  были равномерно распределены в диапазоне возможных значений переменной. Для определения границ ФП  $Z$  справа и слева от  $e = 0$  были выбраны значения равные  $\pm 0.015$  о.е.

При определении переменной  $de/dt$  было сделано следующее заключение. Относительно небольшая скорость изменения нагрузки и, соответственно, ошибки  $e$  не должна оказывать существенного влияние на выходное значение переменной  $B$ . В то же время, если наблюдается быстрое нарастание (или убывание)  $e$ , то нечеткий регулятор должен предупредить скорое изменение параметров системы и своевременно увеличить (или уменьшить) значение  $B$ . Поэтому для переменной  $de/dt$  можно выделить следующие термы:

$N$  – быстро уменьшается;

$Z$  – не изменяется или изменяется незначительно;

$P$  – быстро увеличивается.

Функции принадлежности термов переменной  $de/dt$  показаны на рисунке 3.4.

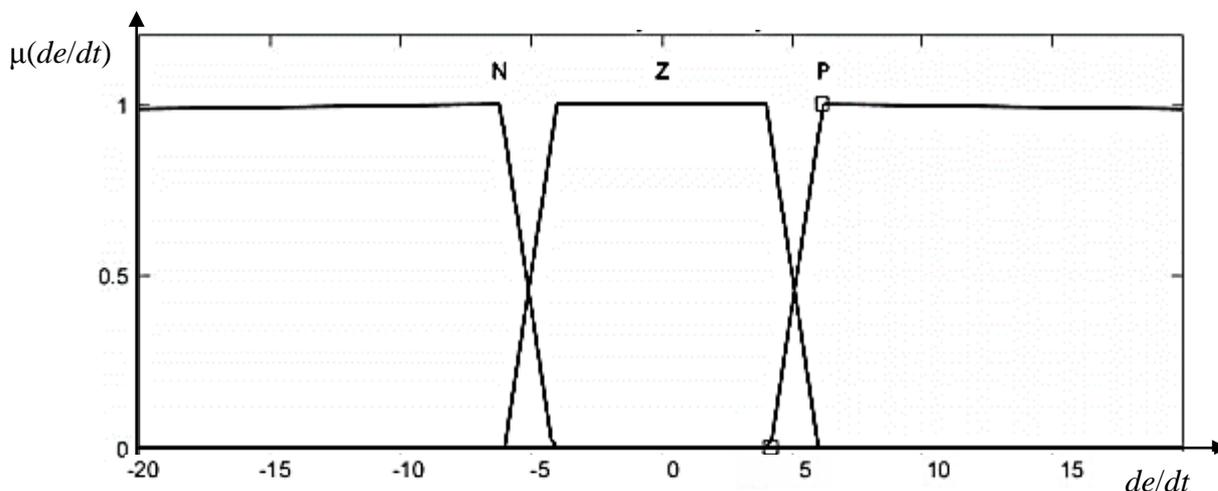


Рисунок 3.4 – Функций принадлежности входной лингвистической переменной  $de/dt$

Область определения выходной лингвистической переменной  $B$  задается в относительных единицах от 0 до 1. Здесь «0» соответствует отключенному СТК, «1» – работающему на максимальной мощности, включены все ФКЦ. Термы переменной  $B$ , должны определяться емкостной проводимостью, которая соответствует включением очередной ФКЦ. Для ФКЦ2 проводимость  $B = 0.156$  о.е, для ФКЦ3 –  $B = 0.344$  о.е, для ФКЦ4 и ФКЦ5 –  $B = 0.25$  о.е. Термы переменной  $B$ :

$S_0$  – ФКЦ отключены, проводимость  $B = 0$ ;

$S_1$  – включен ФКЦ2,  $B = 0.156$  о.е;

$S_2$  – включены ФКЦ2 и ФКЦ3,  $B = 0.156 + 0.344 = 0.5$  о.е;

$S_3$  – включены ФКЦ2, ФКЦ3 и ФКЦ4,  $B = 0.5 + 0.25 = 0.75$  о.е;

$S_4$  – включены все ФКЦ,  $B = 0.75 + 0.25 = 1$  о.е.

На рисунке 3.5 показано первоначальное распределение функций принадлежности переменной  $B$ . В таблице 3.1 приводится база правил НР. Соответствующая поверхность отклика представлена на рисунке 3.6. На рисунках 3.7, 3.8 представлены результаты моделирования СЭС с НР в системе управления СТК.

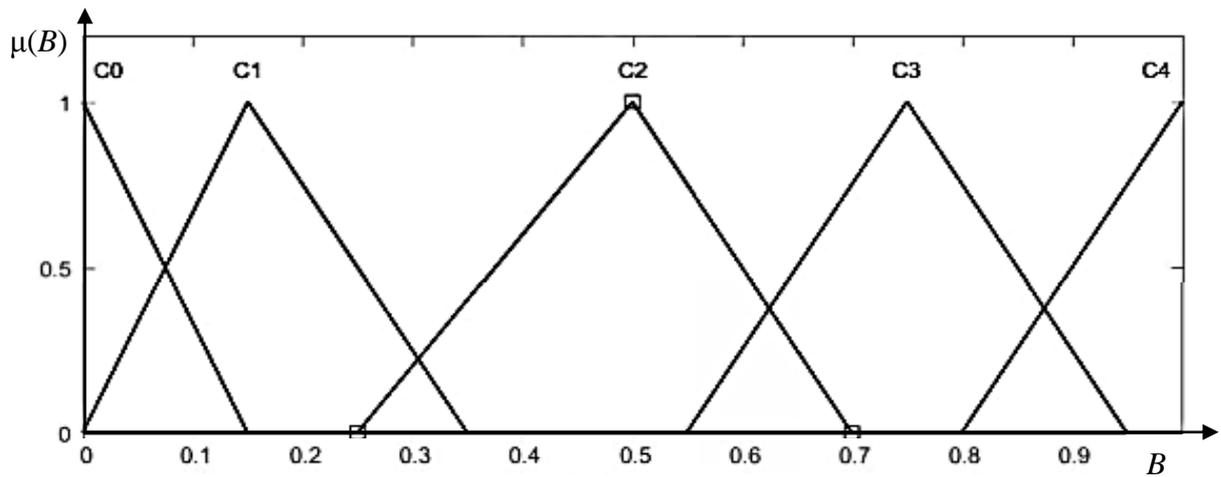


Рисунок 3.5 – исходное распределение функций принадлежности выходной лингвистической переменной  $B$

Таблица 3.1 – База правил нечеткого регулятора с двумя входными переменными

$de/dt$ \ $e$	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>
<b>N</b>	C0	C0	C1	C2	C3
<b>Z</b>	C0	C1	C2	C3	C4
<b>P</b>	C1	C2	C3	C4	C4

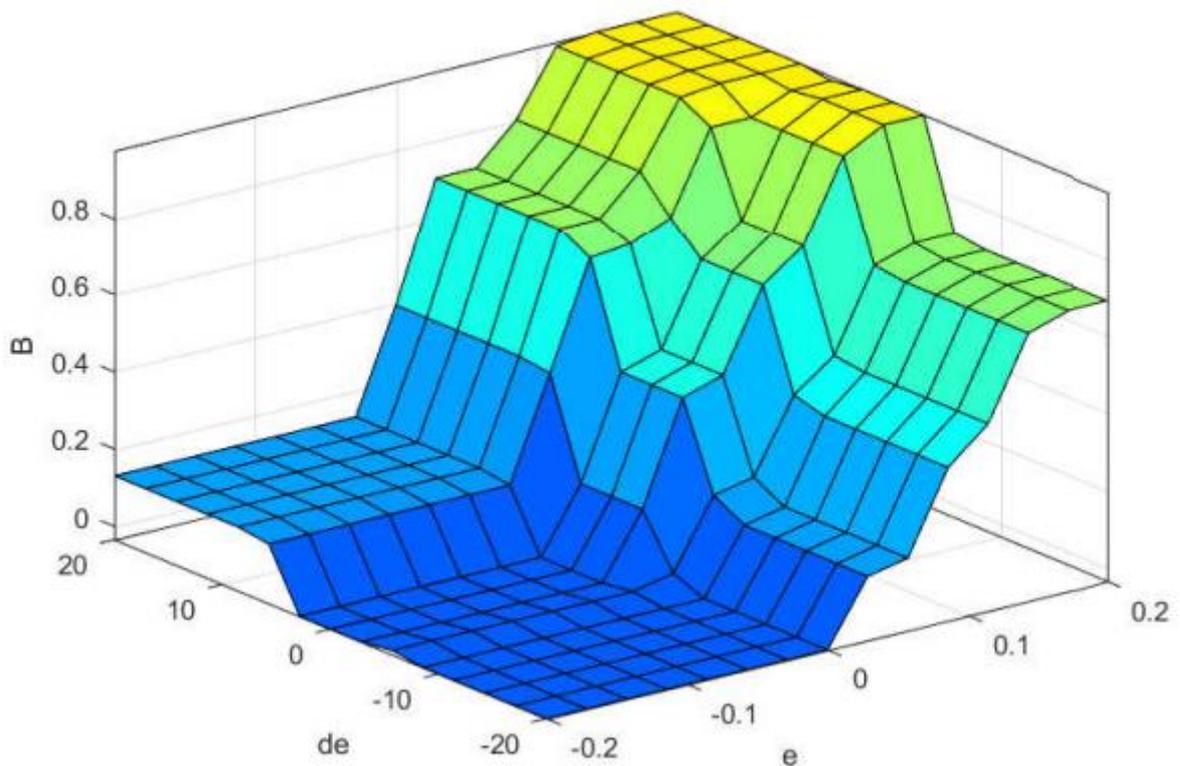


Рисунок 3.6 – Поверхность отклика

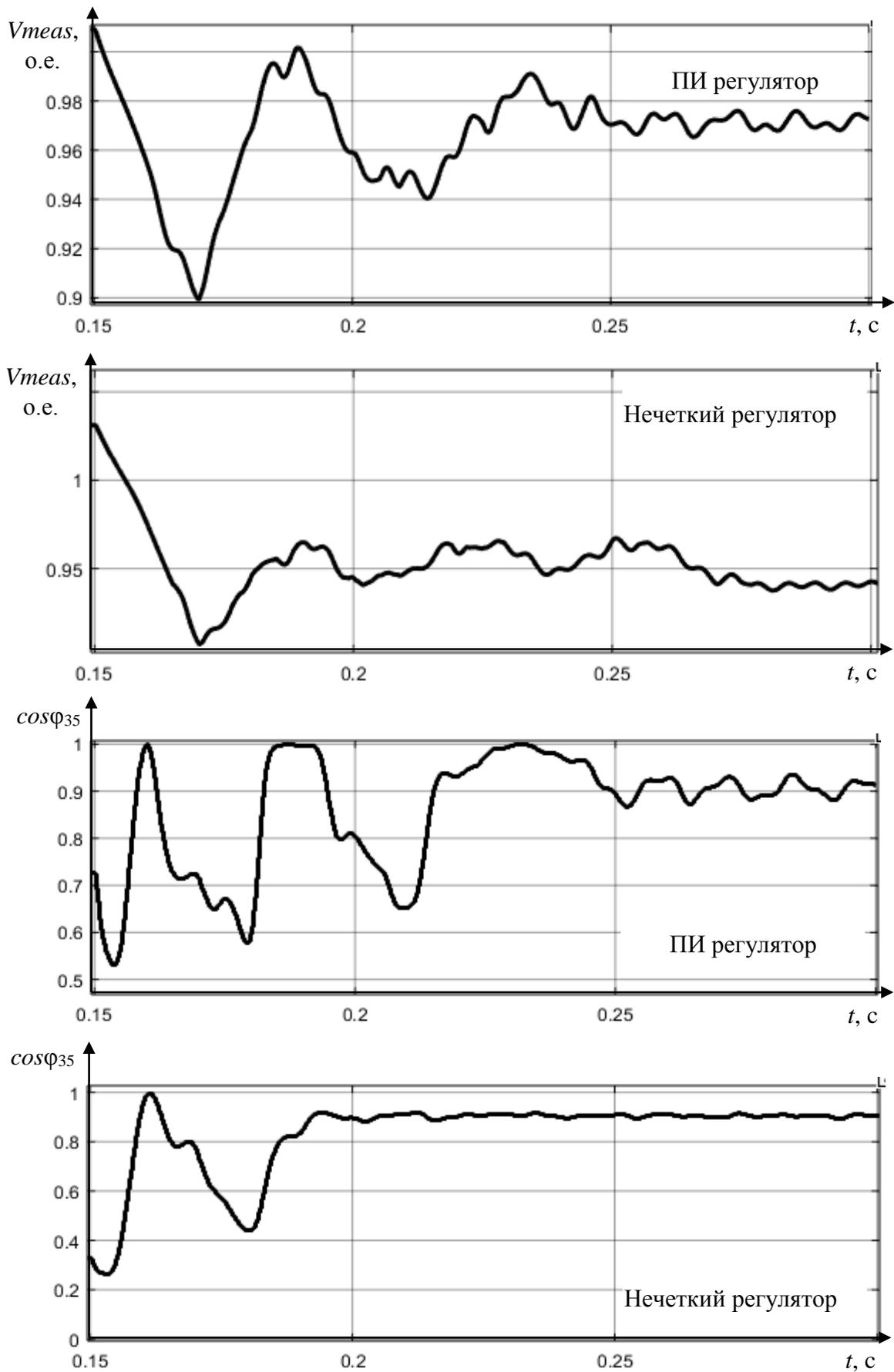


Рисунок 3.7 – Реакция системы при большой мощности нагрузки

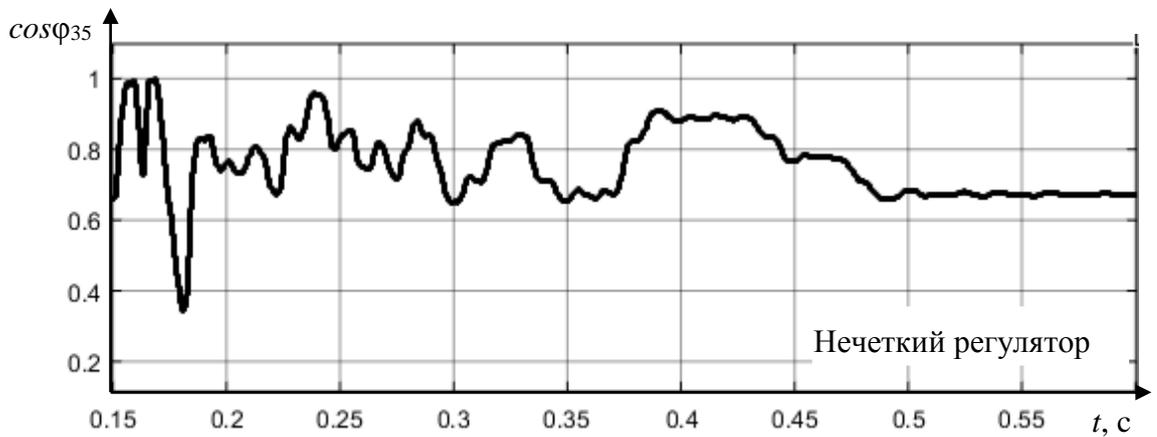
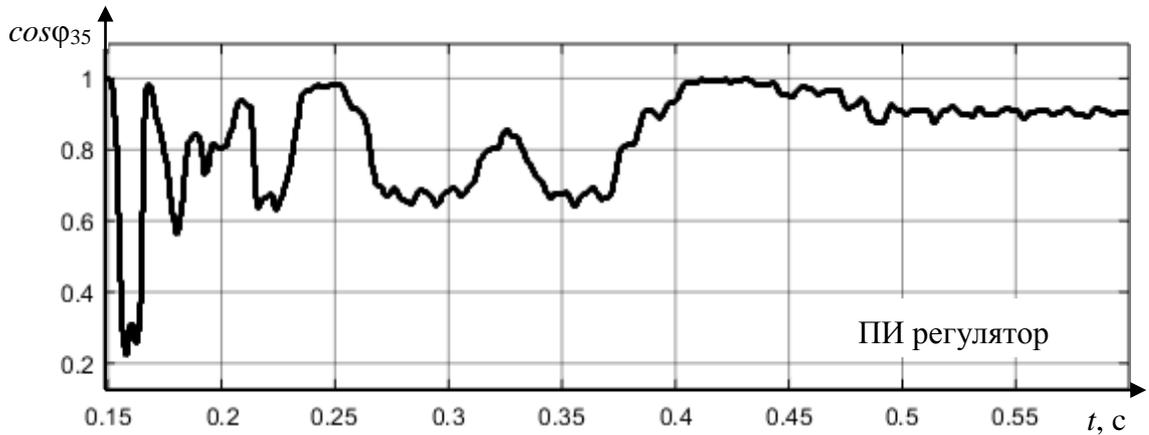
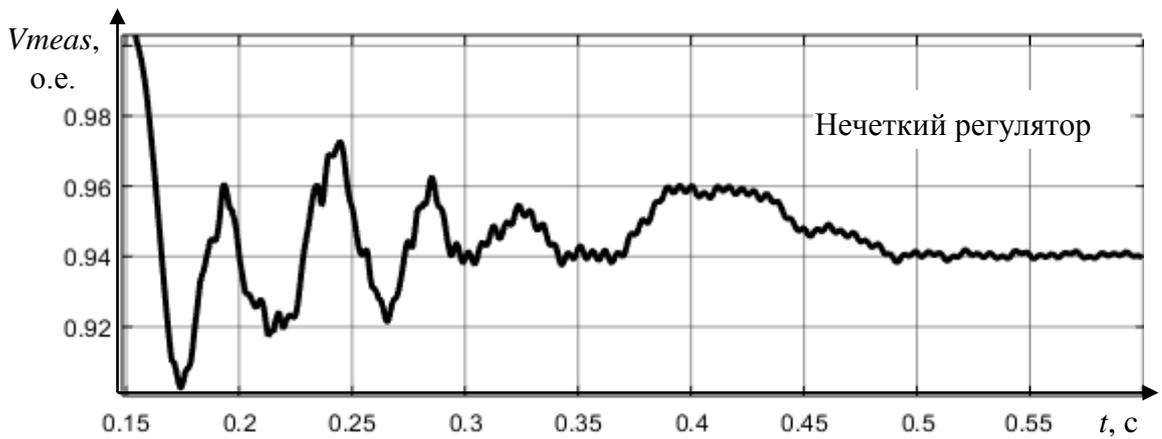
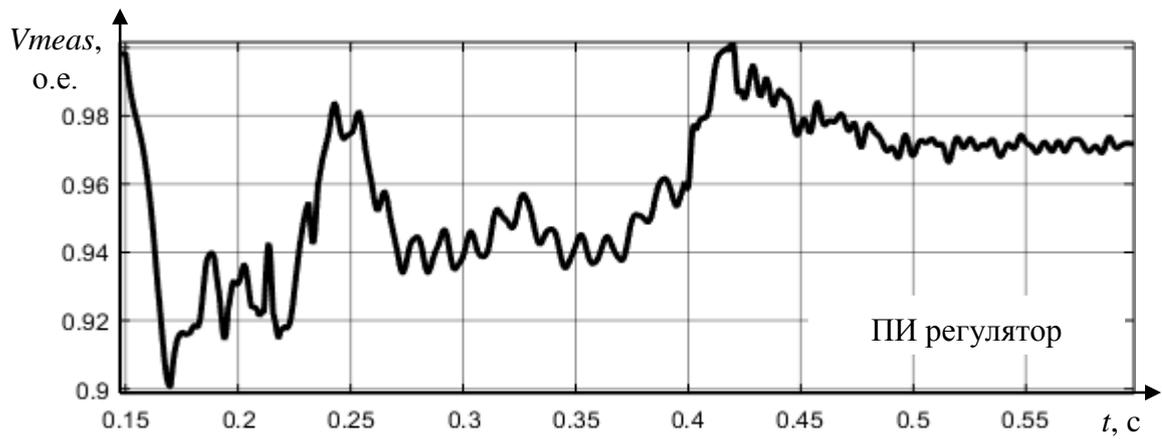


Рисунок 3.8 – Реакция системы на резкопеременную нагрузку

На рисунке 3.7 показана реакция системы на нагрузку, соответствующую 18 ступени трансформатора, 6 ступени реактора,  $R_d = 3$  мОм и  $X_L = 5$  мОм. По графикам  $V_{meas}$  и  $\cos\phi$  видно, что нечеткий регулятор позволяет быстрее вывести сигналы на установившийся уровень и снизить их колебательность во время переходного процесса, но с значительно большим отклонением от заданного значения (более 5%). Аналогичный результат можно наблюдать на графиках, которые приводятся на рисунке 3.8 и показывают реакцию системы на резкопеременную нагрузку (рисунок 2.33). Попытки повысить уровень напряжения  $V_{meas}$  путем настройки функций принадлежности и корректировки базы правил нечеткого регулятора приводят к снижению качества регулирования и увеличению колебательности сигналов  $V_{meas}$  и  $\cos\phi$ . Полученные результаты можно объяснить тем, что нечеткий регулятор с двумя входными переменными  $e$  и  $de/dt$  при формировании выходного сигнала  $B$  не учитывает какие ступени ФКЦ включены в данный момент времени, что приводит к их спонтанному переключению.

### 3.2 Синтез нечеткого регулятора по алгоритму Мамдани с дополнительной входной переменной

Введение в нечеткий регулятор дополнительной входной лингвистической переменной позволит учесть включенные ФКЦ и расширить базу правил НР [3, 25, 59]. Чтобы избежать преждевременных переключений ФКЦ в процессе формирования управляющего воздействия, требуется обеспечить небольшую задержку  $\Delta t$  сигнала  $Step\ TSC$ . Для рассматриваемой модели СЭС время этой задержки определяется временем отклика измерителя  $V_{meas}$  и равно 20 мс при минимальном шаге расчёта модели системы  $T_s = 10\ e^{-6}$  с.

Структурная схема нечеткого аппарата принятия решений с тремя входными ( $e$ ,  $de/dt$ ,  $Step\ TSC$ ) и выходным ( $B$ ) сигналами принимает вид, показанный на рисунке 3.9. Модель системы управления СТК с нечетким регулятором, учитывающая входные ( $e$ ,  $de/dt$ ,  $Step\ TSC$ ) и выходной ( $B$ ) сигналы показана на рисунке 3.10. и соответствующий ей нечеткий алгоритм показан на рисунке 3.11.

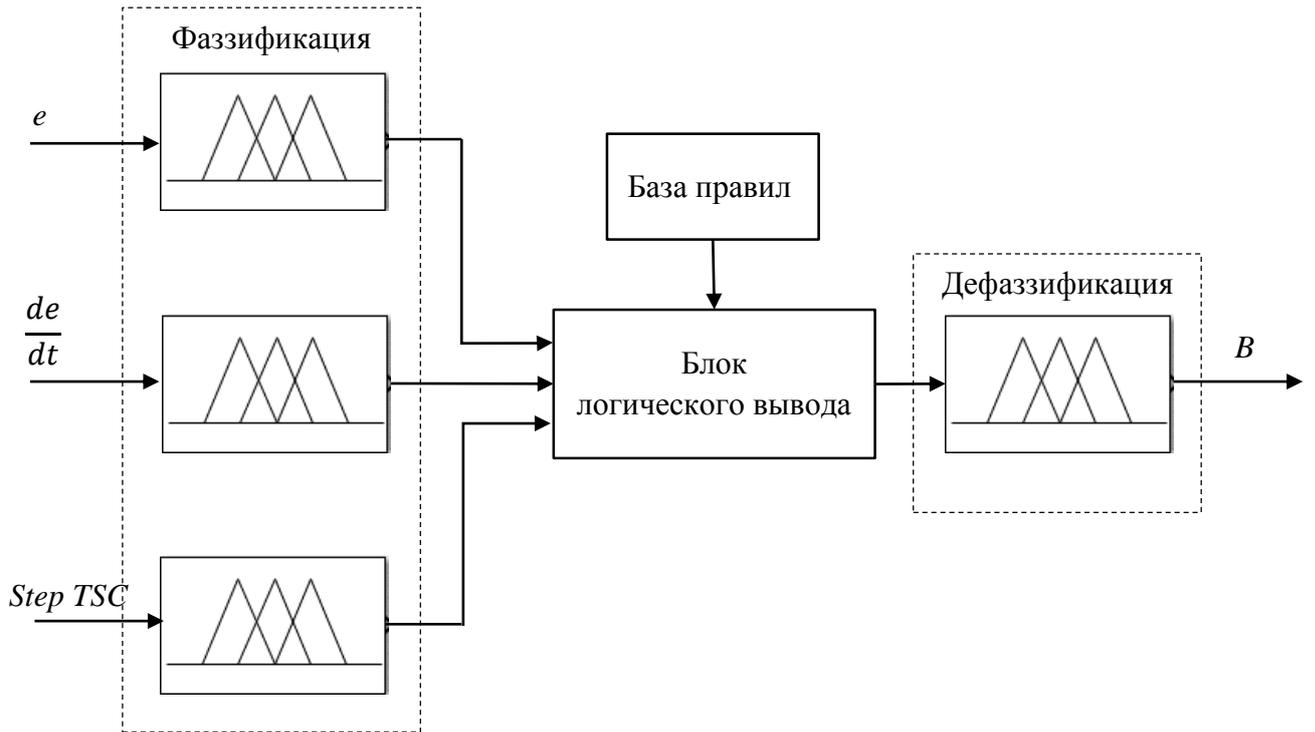


Рисунок 3.9 – Структурная схема нечеткого регулятора

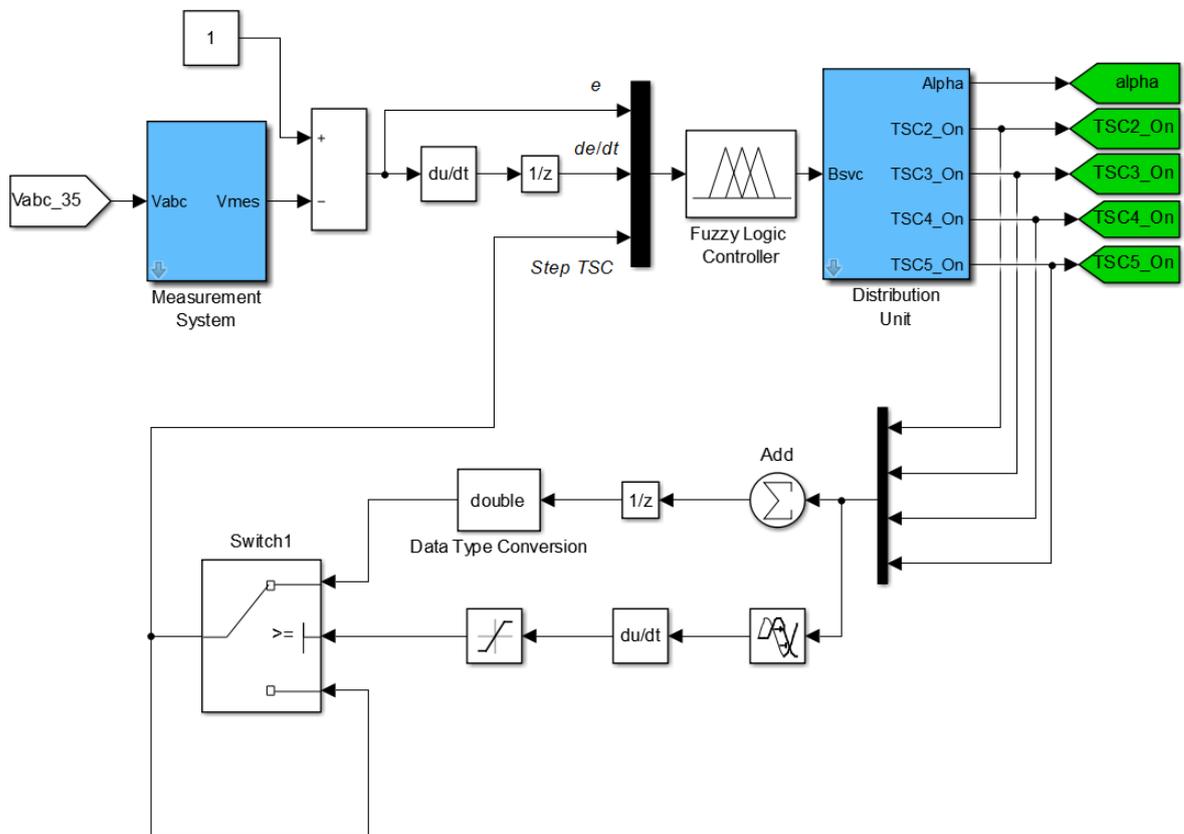


Рисунок 3.10 – Модель системы управления с нечетким регулятором

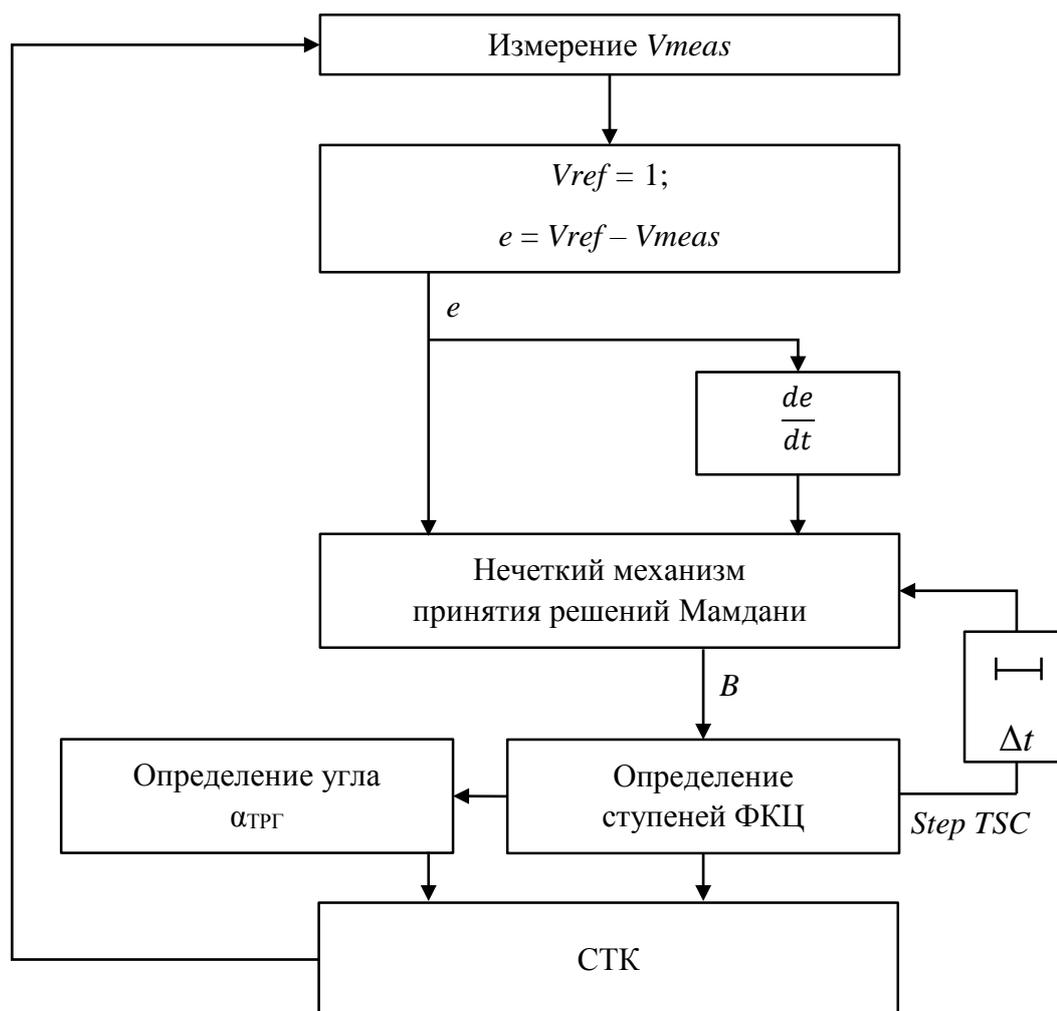


Рисунок 3.11 – Нечеткий алгоритм стабилизации напряжения, учитывающий включенные ФКЦ

Переменная *Step TSC* в результате включения-отключения ФКЦ принимает четкие значения, соответствующие количеству включенных ФКЦ (рисунок 3.10), поэтому для введения этой переменной в нечеткий регулятор функции принадлежности имеют вид, показанный на рисунке 3.12.

Термы входной переменной *Step TSC* идентифицируются как:

*Step0* – все ФКЦ выключены;

*Step1* – включена ФКЦ2;

*Step2* – включены ФКЦ2 и ФКЦ3;

*Step3* – включены ФКЦ2, ФКЦ3 и ФКЦ4;

*Step4* – включены ФКЦ2, ФКЦ3, ФКЦ4 и ФКЦ5.

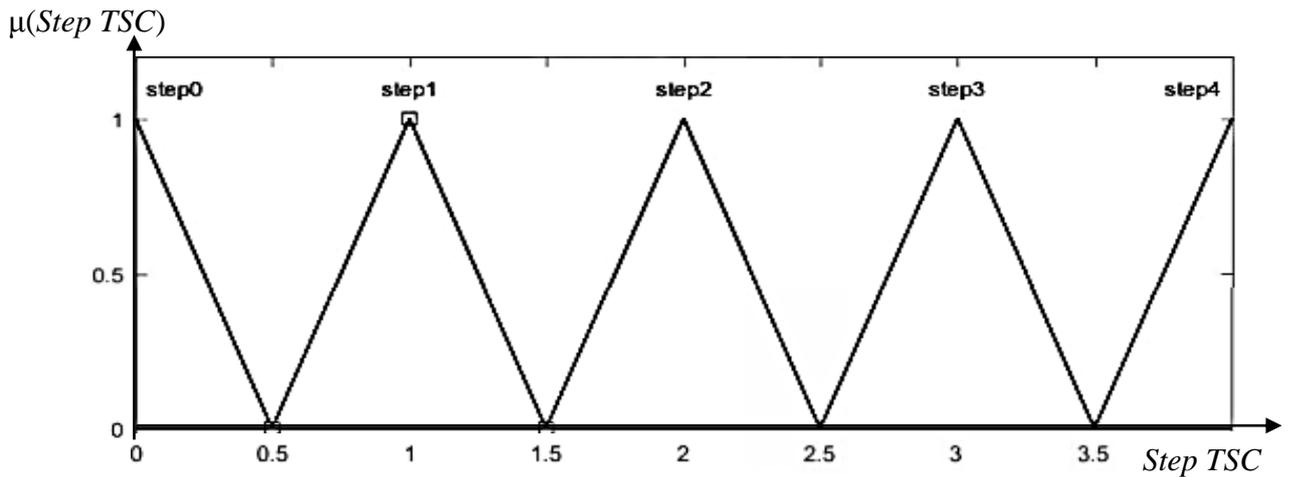


Рисунок 3.12 – Функции принадлежности входной лингвистической переменной *Step TSC*

По результатам настройки НР на модели СЭС с переменной нагрузкой база правил регулятора приняла вид, представленный в таблице 3.2. Визуальное отображение правил НР (рисунок 3.13) позволило скорректировать функции принадлежности входной переменной  $e$  и выходной переменной  $B$ . Для ФП переменной  $e$  была уменьшена ширина термов  $Z$ ,  $PS$  и  $PM$ , изменены углы наклонов  $z$ - и  $s$ -образных термов  $N$  и  $PB$ . Данные преобразования позволили конкретизировать значения отклонения  $e$  для дальнейших операций логического вывода. Результат коррекции ФП переменной  $e$  показан на рисунке 3.14.

Таблица 3.2 – База правил нечеткого регулятора

$de/dt$	$TSC$	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

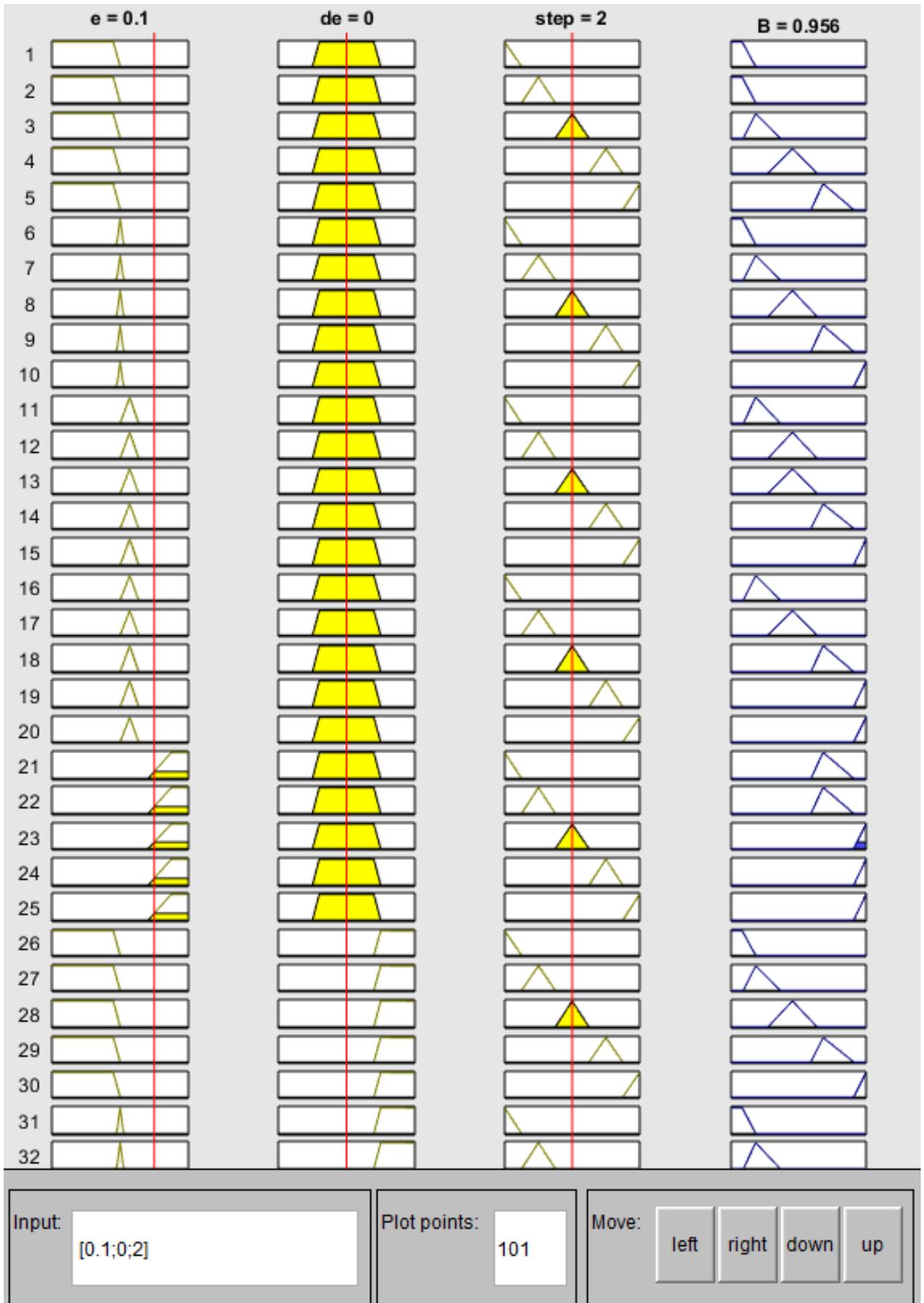


Рисунок 3.13 – Окно визуализации базы правил НР

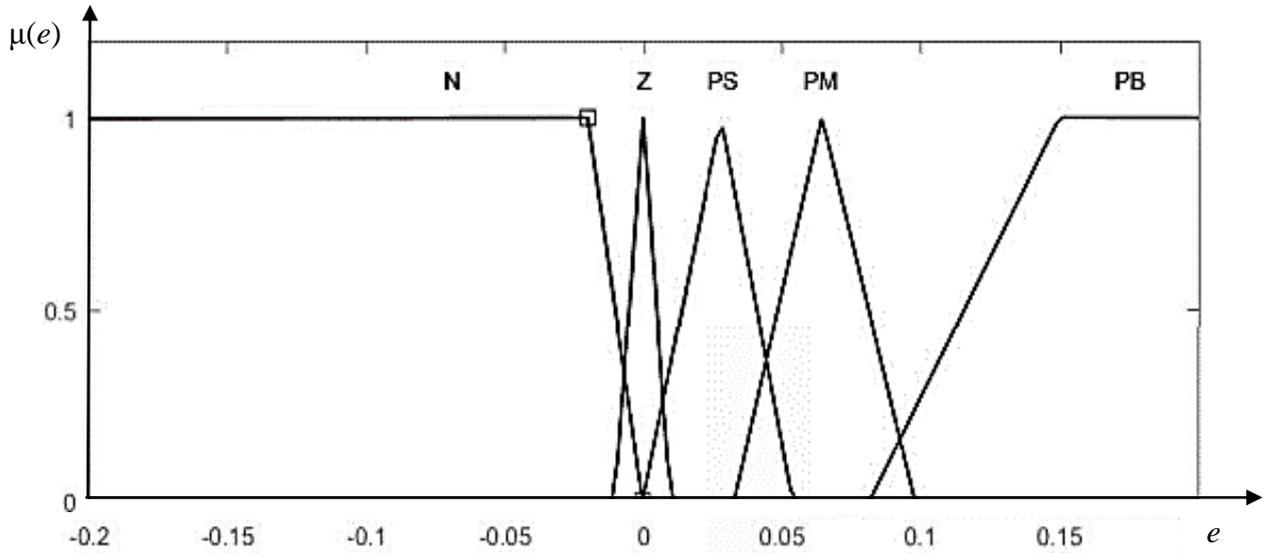


Рисунок 3.14 – Скорректированное распределение функций принадлежности входной лингвистической переменной  $e$

На рисунке 3.15 показано исправленное распределение функций принадлежности входной переменной  $de/dt$ .

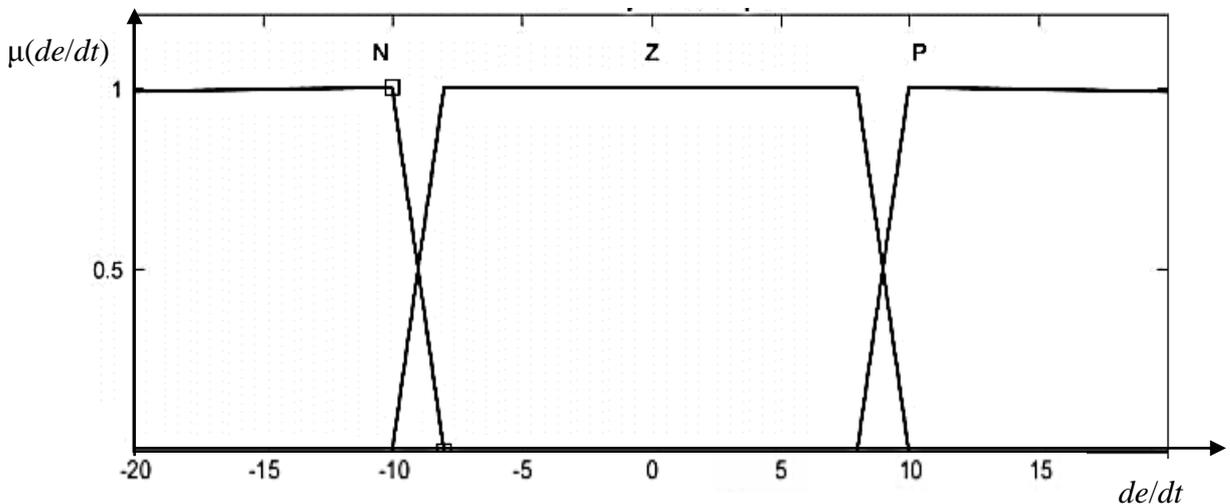


Рисунок 3.15 – Скорректированные функции принадлежности входной лингвистической переменной  $de/dt$

В результате коррекции ФП переменной  $B$  были смещены центры и уменьшена ширина термов  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$ . Результаты коррекции переменной приведены на рисунке 3.16.

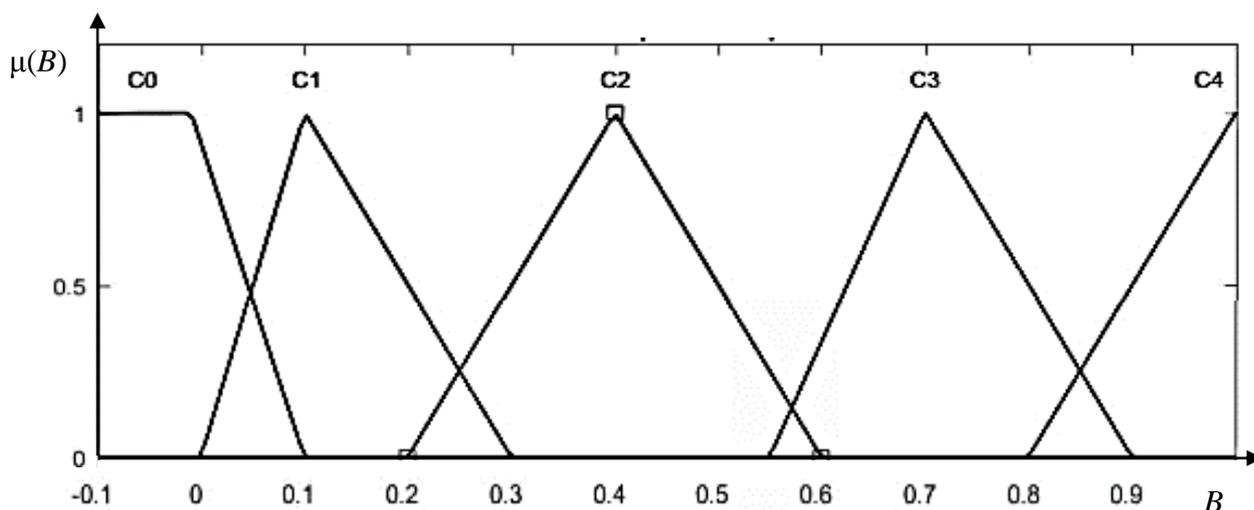


Рисунок 3.16 – Скорректированное распределение функций принадлежности выходной лингвистической переменной  $B$

Оценить влияние значений входных переменных и правил на результат нечеткого вывода можно по представленным на рисунках 3.17 – 3.19 поверхностям отклика для различных значений переменной  $Step\ TSC$ .

На рисунках 3.20 – 3.23 показаны результаты моделирования, по которым можно оценить эффективность применения нечеткого регулятора с тремя входными переменными в системе управления СТК.

$Step\ TSC = 0$

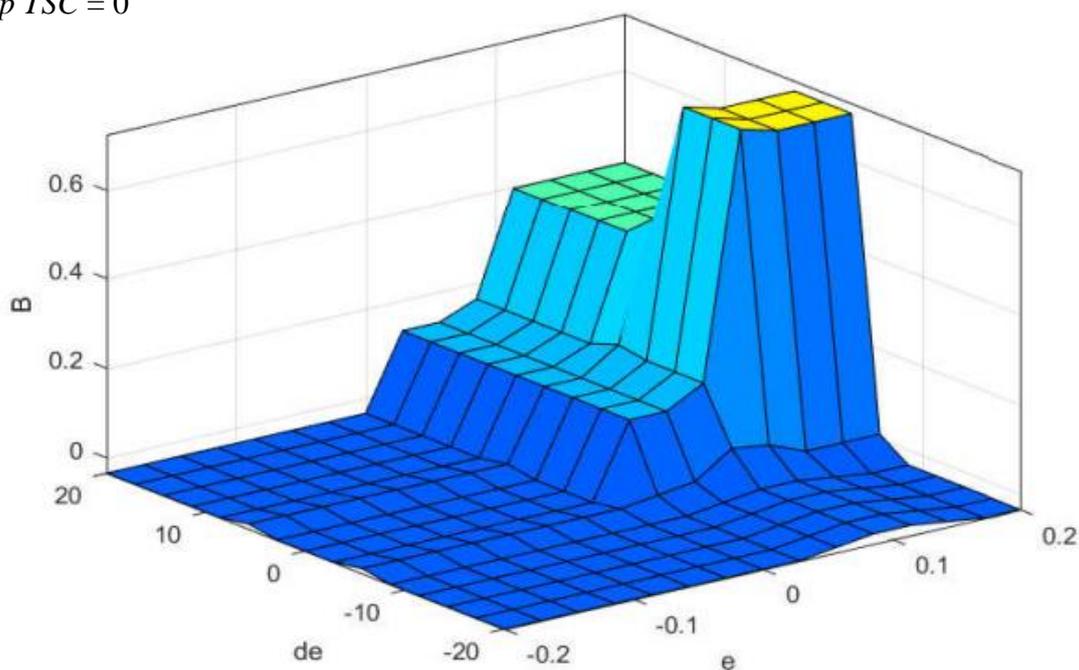
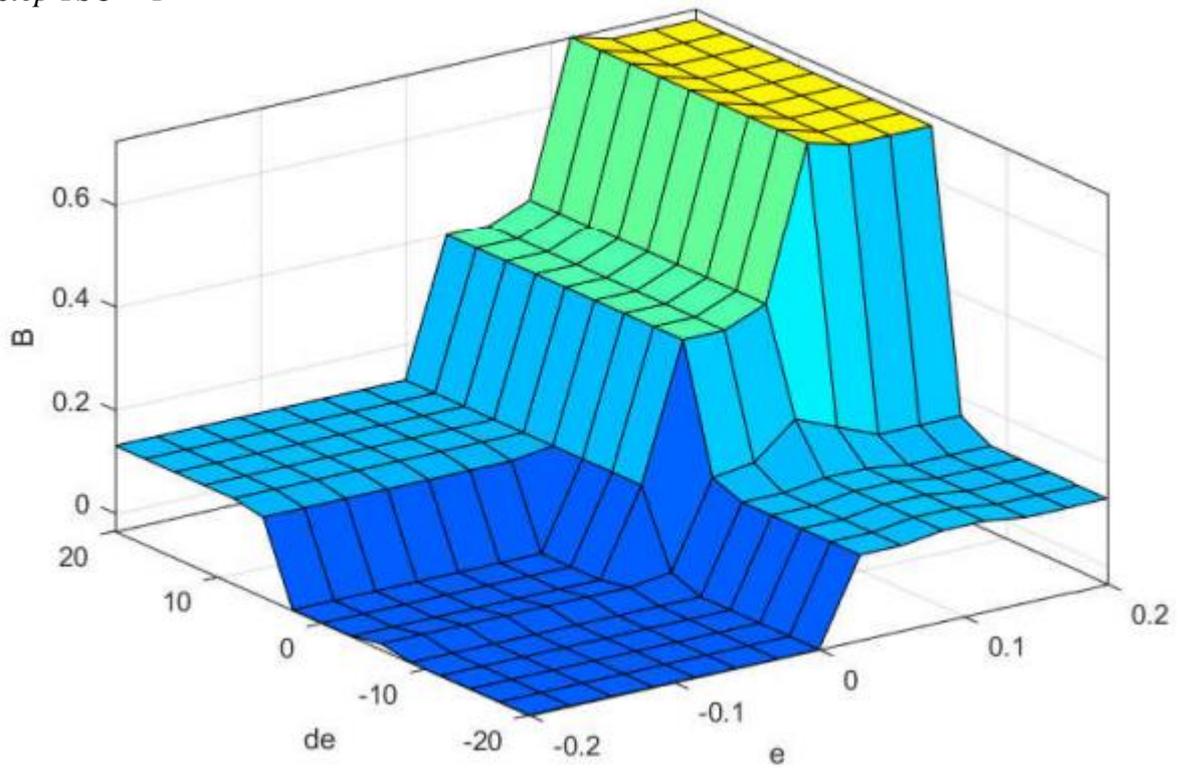


Рисунок 3.17 – Поверхность отклика для  $Step\ TSC = 0$

*Step TSC = 1*



*Step TSC = 2*

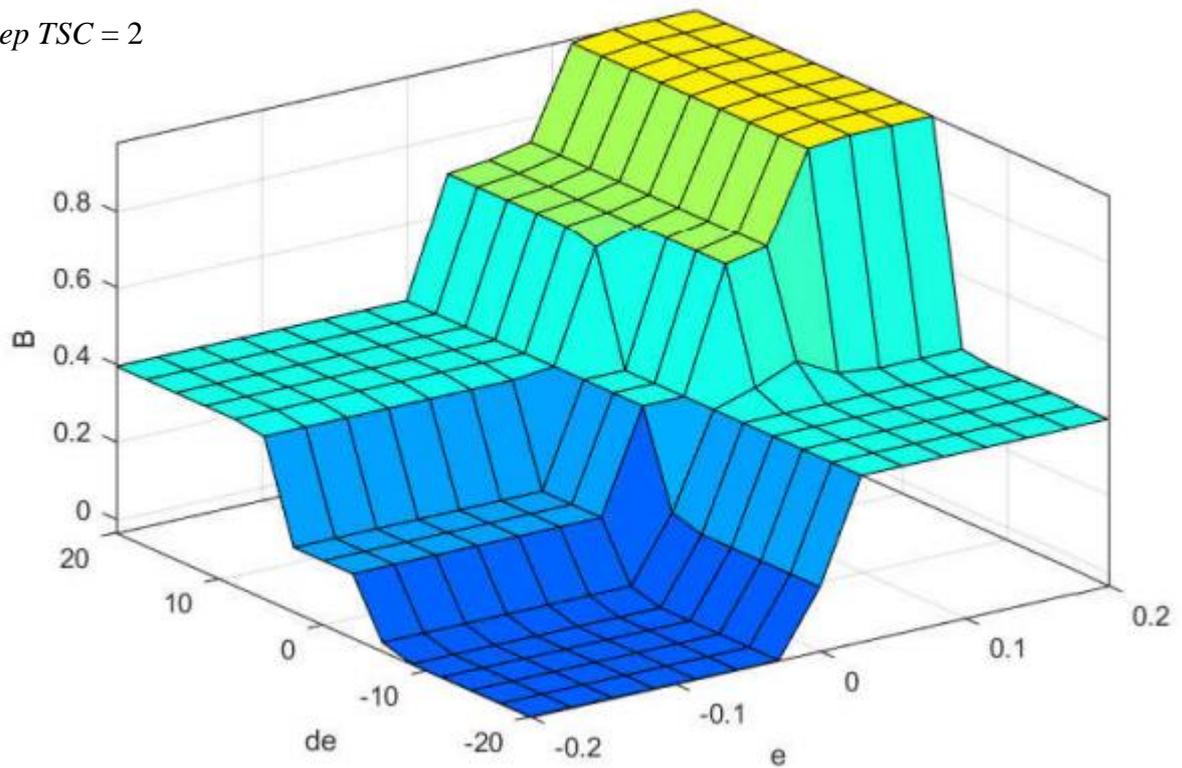
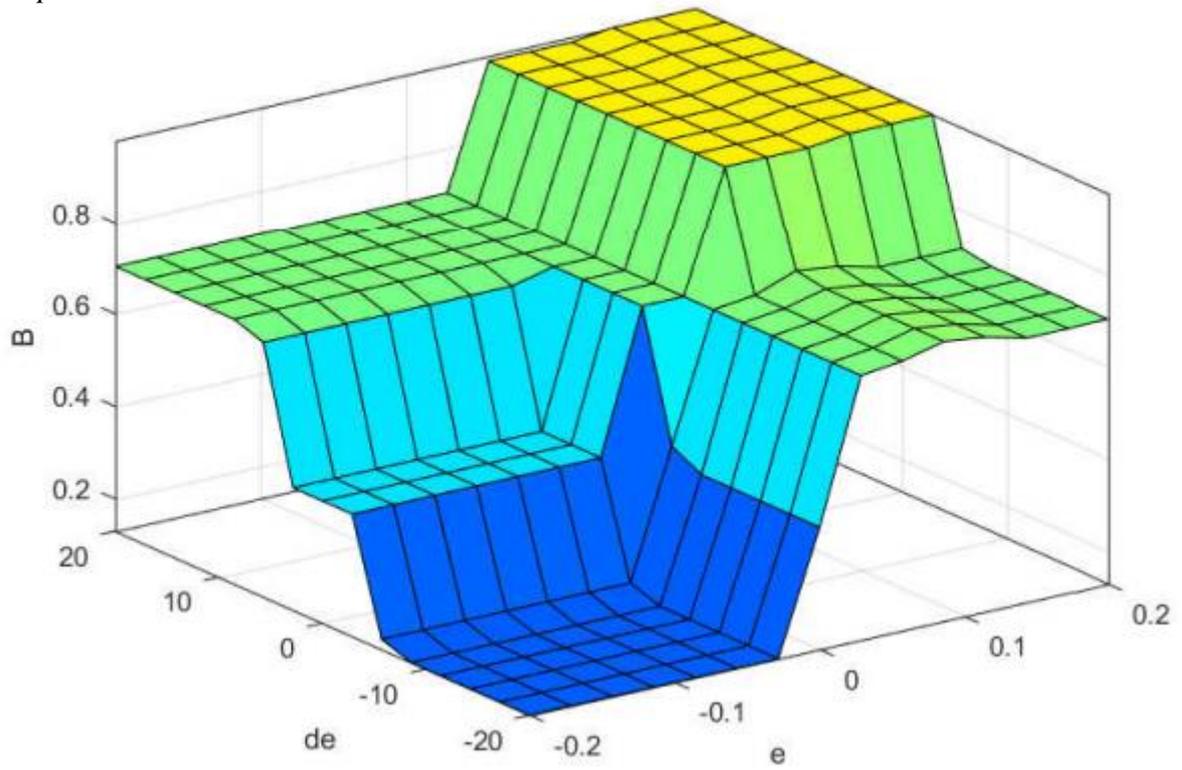


Рисунок 3.18 – Поверхности отклика для  $Step\ TSC = 1$  и  $Step\ TSC = 2$

*Step TSC = 3*



*Step TSC = 4*

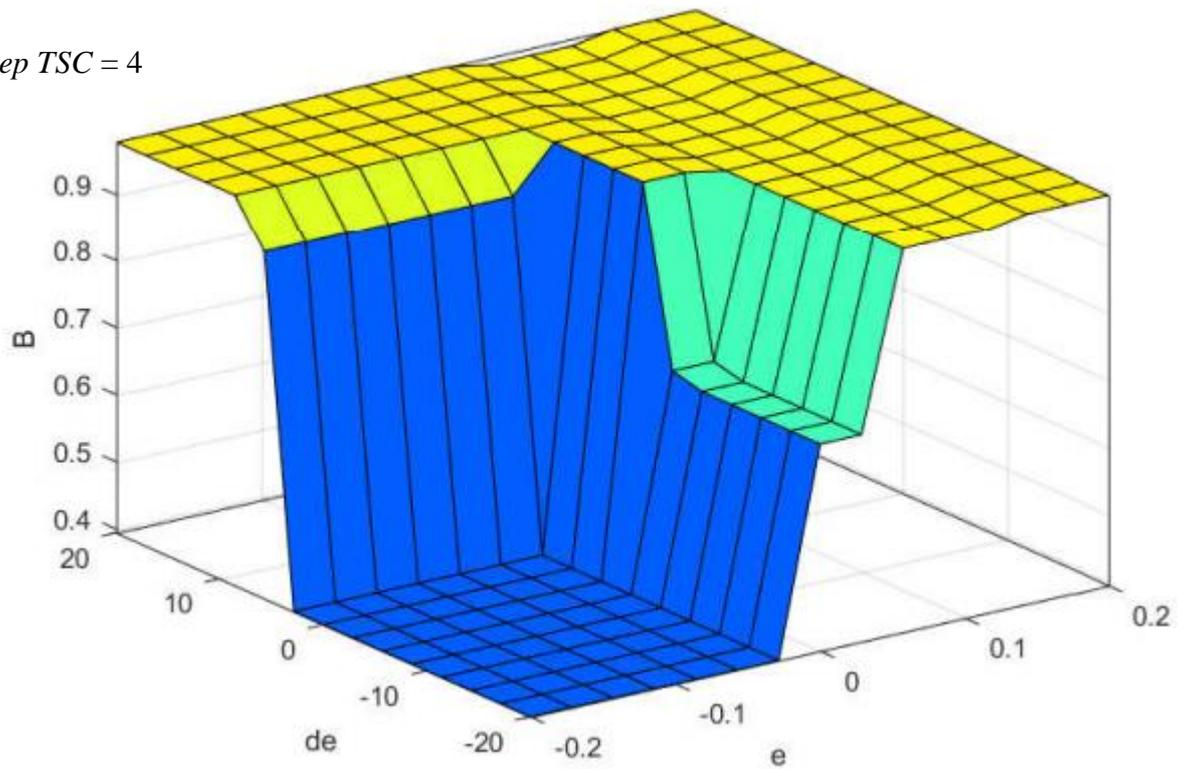


Рисунок 3.19 – Поверхности отклика для *Step TSC = 3* и *Step TSC = 4*

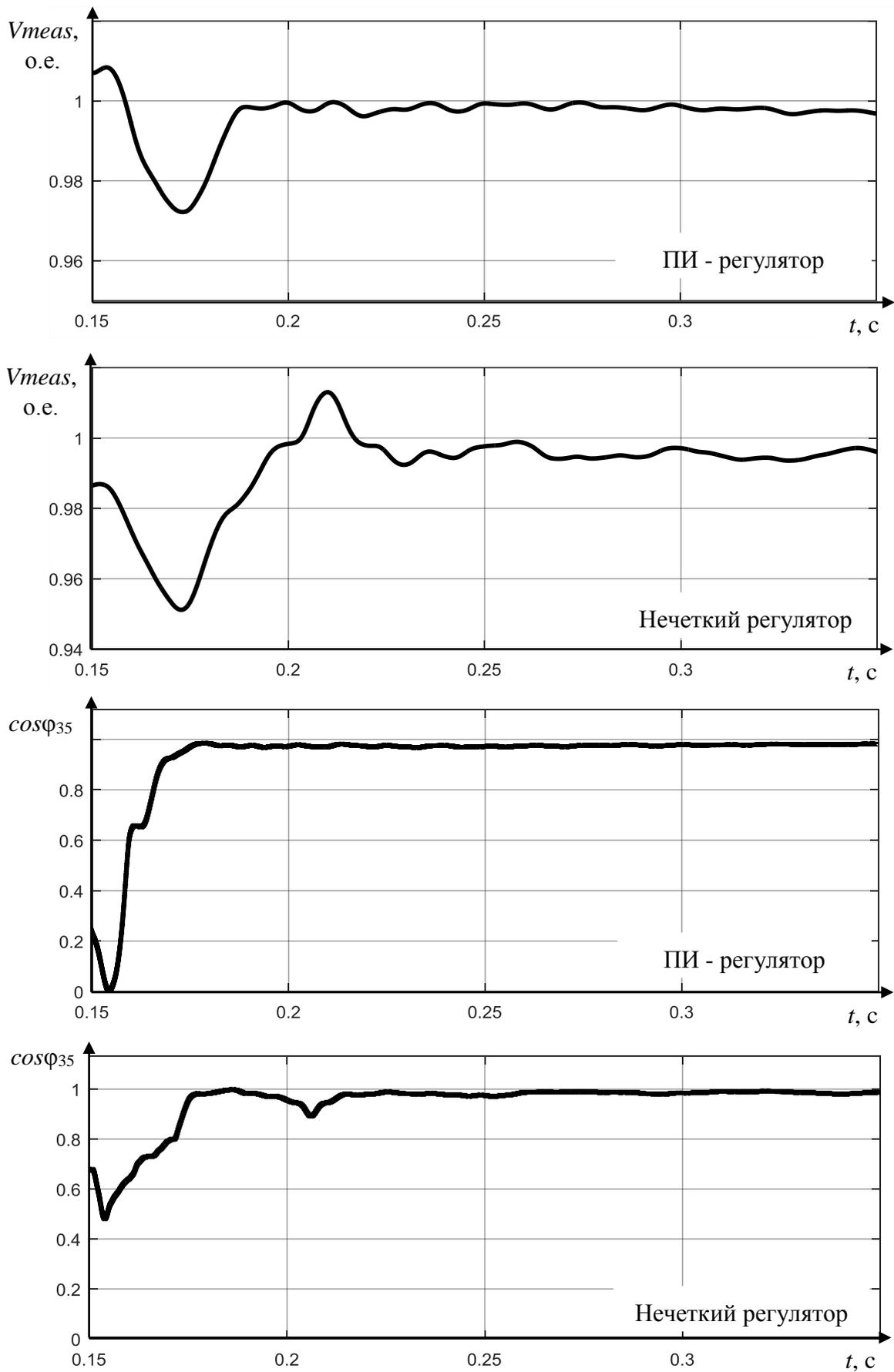


Рисунок 3.20 – Реакция системы при малой мощности нагрузки

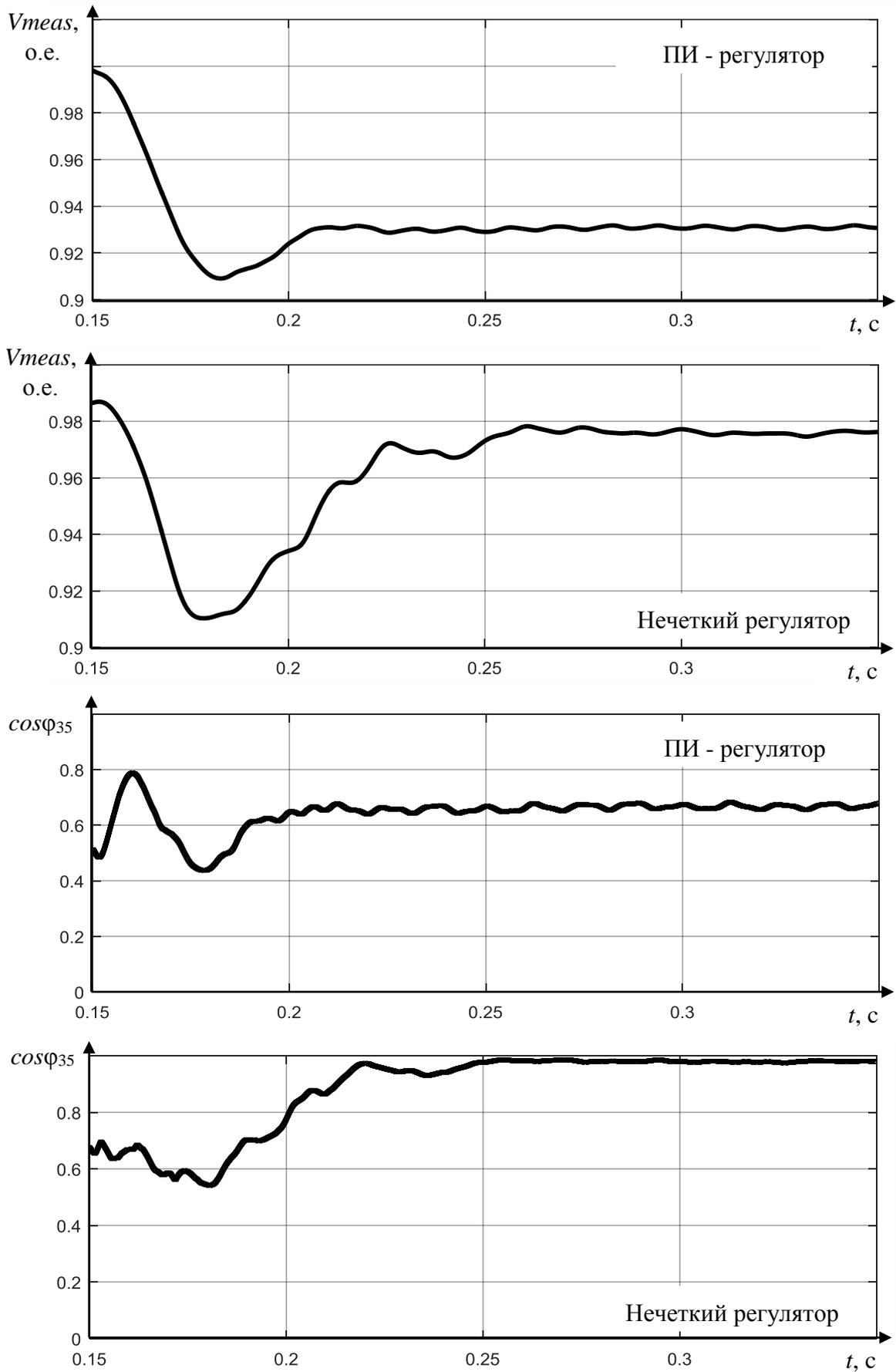


Рисунок 3.21 – Реакция системы при средней мощности нагрузки

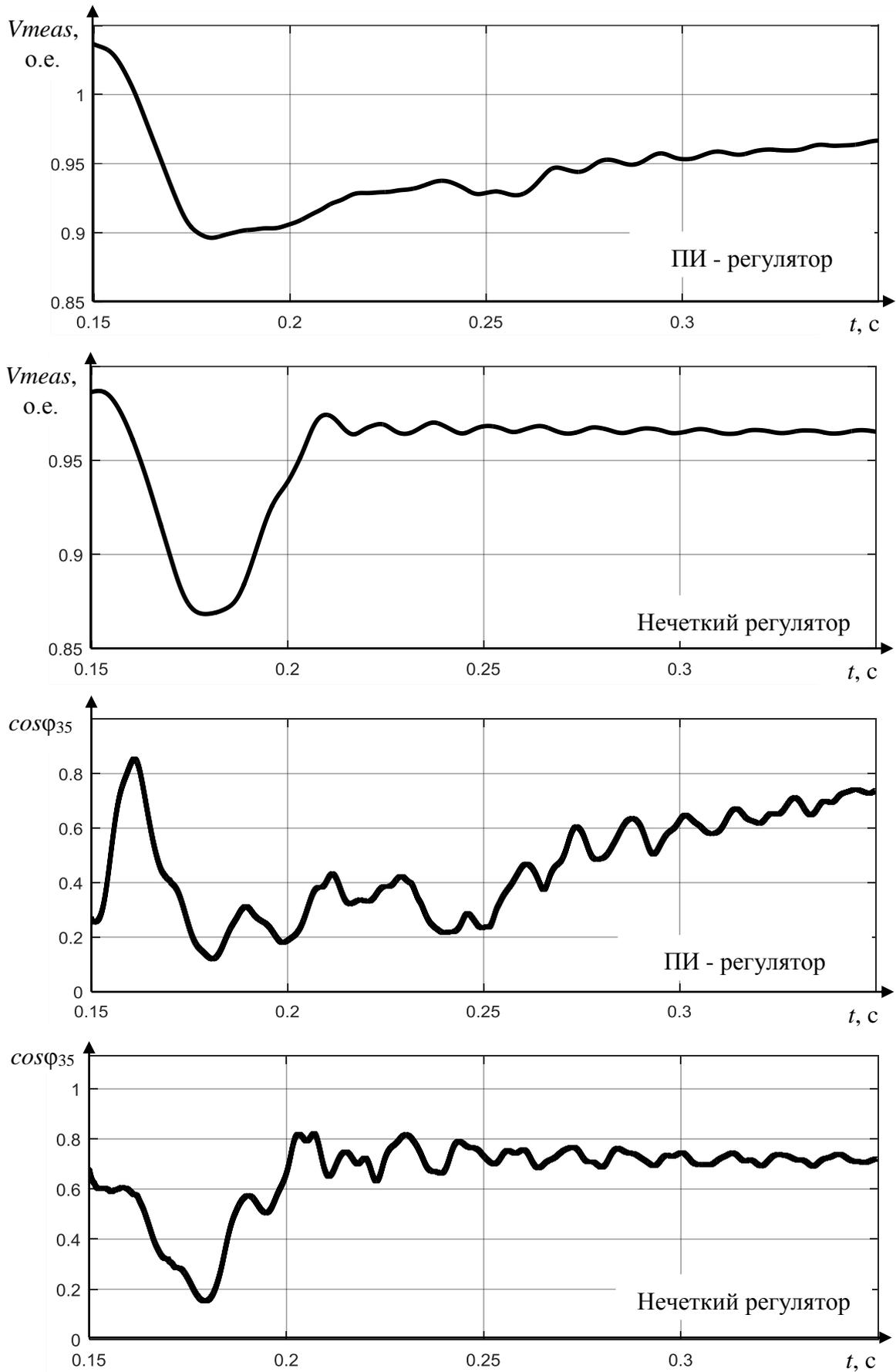


Рисунок 3.22 – Реакция системы при повышенной мощности нагрузки

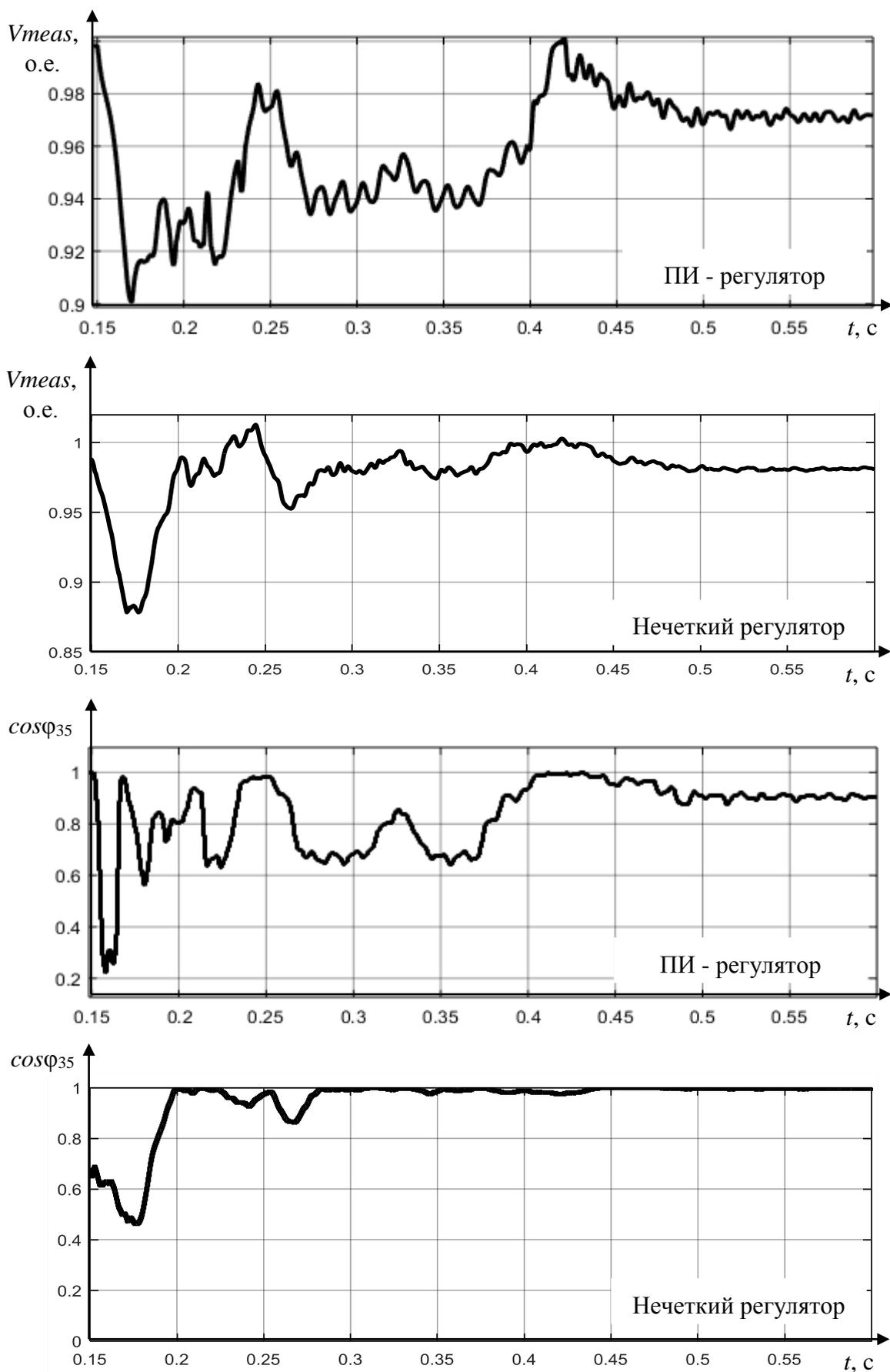


Рисунок 3.23 – Реакция системы на резкопеременную нагрузку

На рисунке 3.20 приводится реакция системы на нагрузку малой мощности: 18 ступень трансформатора, 6 ступень реактора  $R_D = 21$  мОм и  $X_L = 9$  мОм. Сигнал напряжения  $V_{meas}$  выходит на установившееся значение (с отклонением менее 1%) за время 0.075 с.

На рисунке 3.21 приводится реакция системы на нагрузку  $R_D = 5$  мОм и  $X_L = 7$  мОм. Как видно по приведенным графикам, нечеткий регулятор позволяет получить меньшее отклонение напряжения  $V_{meas}$  (немного превышающее 2%) по сравнению с ПИ-регулятором (около 7%). Время регулирования 0.075 с.

При увеличении мощности в системе с нечетким регулятором время регулирования не увеличивается, в отличие от ПИ – регулятора. Это можно увидеть по графикам  $V_{meas}$  и  $\cos\phi$  при нагрузке  $R_D = 1$  мОм и  $X_L = 5$  мОм, которая соответствует мощности, превышающей номинальную (рисунок 3.22).

По графикам, представленным на рисунке 3.23, можно оценить преимущество использования нечеткого регулятора в СЭС с резкопеременной нагрузкой (рисунок 2.33). В результате работы нечеткого регулятора отклонение сигнала напряжения  $V_{meas}$  от заданного значения в среднем не превышает 3 – 4 %, коэффициент мощности  $\cos\phi$  практически стремится к 1.

### **3.3 Нечеткий регулятор, учитывающий изменение рабочих режимов электроприемника**

На стадии проплавления колодцев в шихте электрические параметры системы электроснабжения дуговой печи изменяются достаточно быстро. Однако, несмотря на, казалось бы, случайный характер этих изменений, они происходят в некоторых диапазонах, которые соответствуют определенному режиму работы системы электроснабжения печи и происходят в определенные моменты времени в соответствии с технологическим процессом плавки. На рисунке 3.24 показан примерный график изменения мощности, подаваемой в печь, в течение одной плавки.

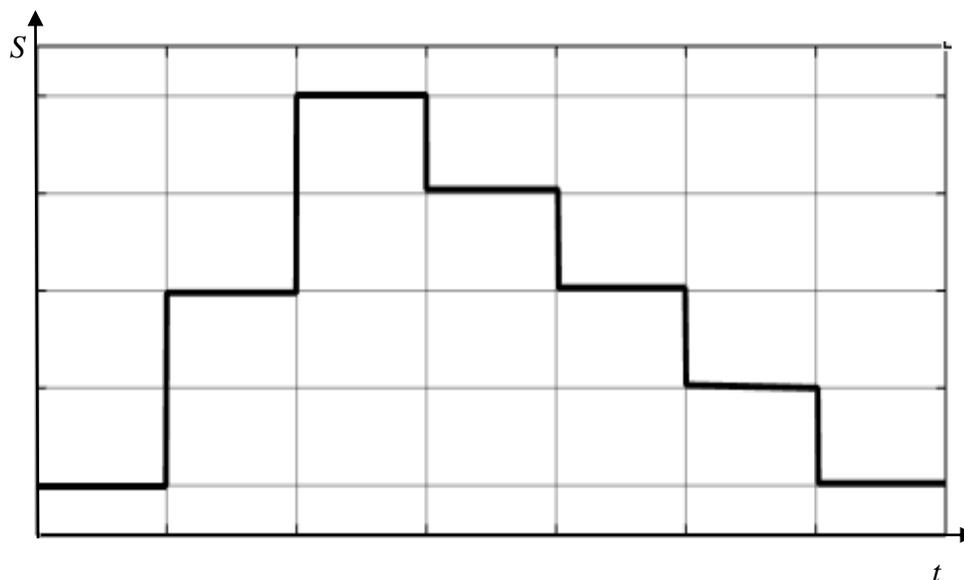


Рисунок 3.24. График изменения мощности, вводимой в ДСП

Так как включение того или иного режима происходит не случайно и известно заранее, то система управления СТК может быть дополнена входным сигналом, сообщающим, что в ближайшее время произойдет изменение потребляемой мощности. При этом введение такого сигнала непосредственно в нечеткий регулятор нежелательно, так как это существенно увеличит базу правил регулятора и время вычислений. Таким образом, требуется коррекция одной из уже имеющихся входных переменных. Лучше всего для этого подходит переменная  $de/dt$ , которая показывает скорость изменения отклонения напряжения, т.к. при переключении режимов печи происходит быстрое изменение нагрузки и, соответственно, быстро изменяется уровень напряжения. Так как время переключения режимов печи известно предварительно, то в систему управления СТК должен поступать упреждающий сигнал (рисунок 3.25), который позволит вывести переменную  $de/dt$  в области быстрых изменений (термы  $N$  и  $P$ ) до того, как эти изменения наступят. Алгоритм коррекции сигнала  $de/dt$  показан на 3.26. На рисунках 3.25 и 3.26 *Step S1* – текущий энергетический режим СЭС, *Step S2* – ожидаемый режим. Значение параметра  $Ch e$  определяется шириной ФП  $Z$  переменной  $de/dt$ .

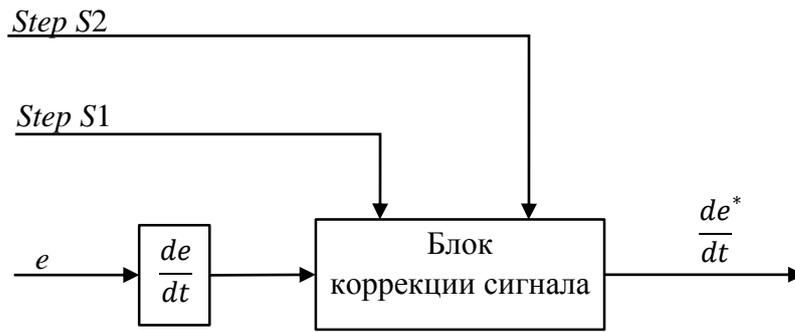


Рисунок 3.25 – Коррекция сигнала производной отклонения, учитывающая изменение режима нагрузки

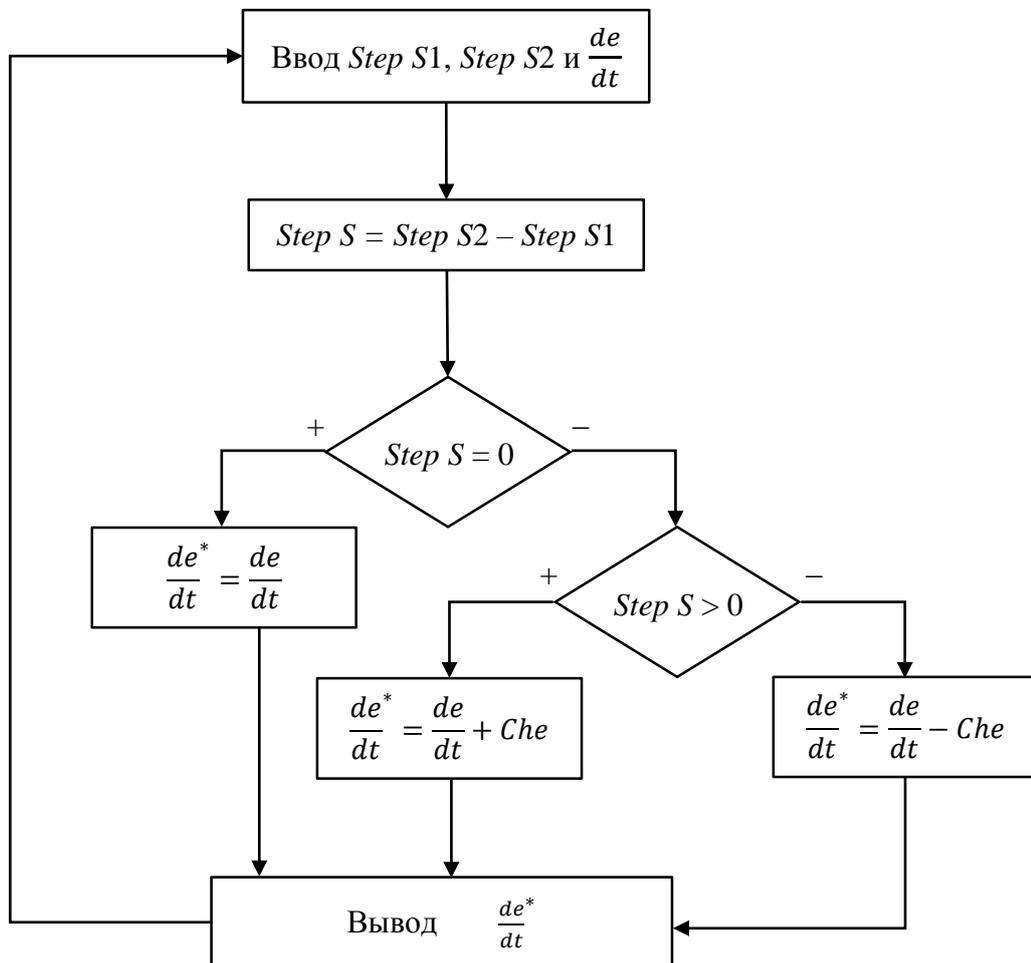


Рисунок 3.26 – Алгоритм коррекции переменной  $de/dt$

Результаты моделирования нечеткой системы управления с упреждающим сигналом показаны на рисунке 3.27.

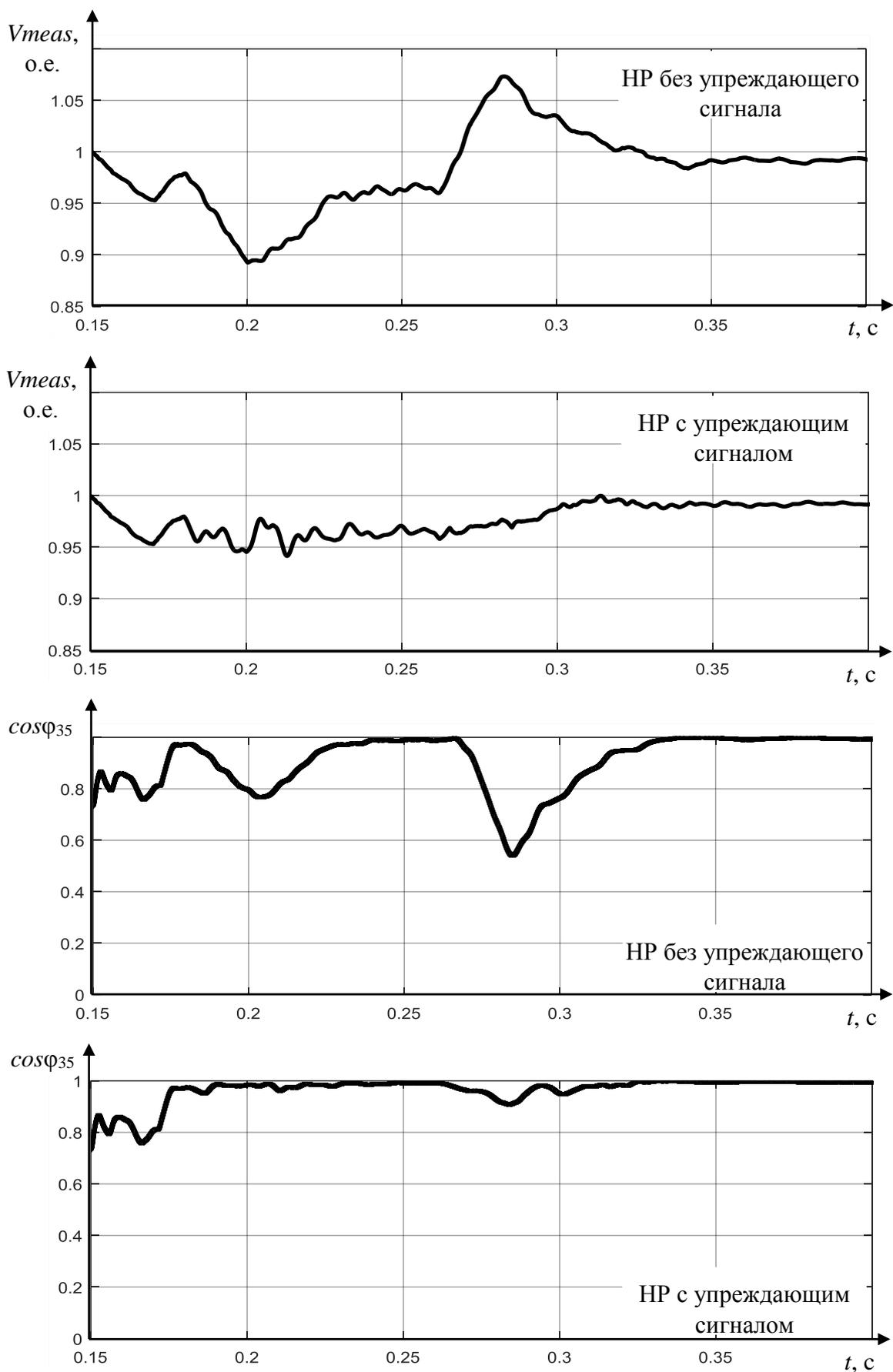


Рисунок 3.27. Влияние упреждающего сигнала на работу нечеткого регулятора

В моменты времени  $t_1 = 0.18$  с. и  $t_2 = 0.26$  с. происходят переключения нагрузки с малой мощности ( $R_D = 21$  мОм,  $X_L = 12$  мОм) на большую ( $R_D = 4.2$  мОм,  $X_L = 2.4$  мОм) и обратно. Так как эти переключения считаются запланированными, то сопровождаются сигналом, который начинает корректировать переменную  $de/dt$  в моменты времени  $t_{1-} = 0.16$  с. и  $t_{2-} = 0.24$  с. Длительность этого сигнала  $\Delta t = 0.02$  с. По графикам напряжения  $V_{meas}$  и коэффициента мощности  $\cos\phi$  (рисунок 3.27) видно, что упреждающий сигнал позволяет свести к минимуму отклонения напряжения и коэффициента мощности во время переходных процессов.

### 3.4 Синтез нечеткого регулятора в системе управления статическим тиристорным компенсатором по алгоритму Сугено

Нечеткий регулятор в модели системы управления СТК, изображенной на рисунке 3.10 может быть настроен с нечетким выводом по алгоритму Сугено. При этом структурная схема нечеткого регулятора примет вид, показанный на рисунке 3.28

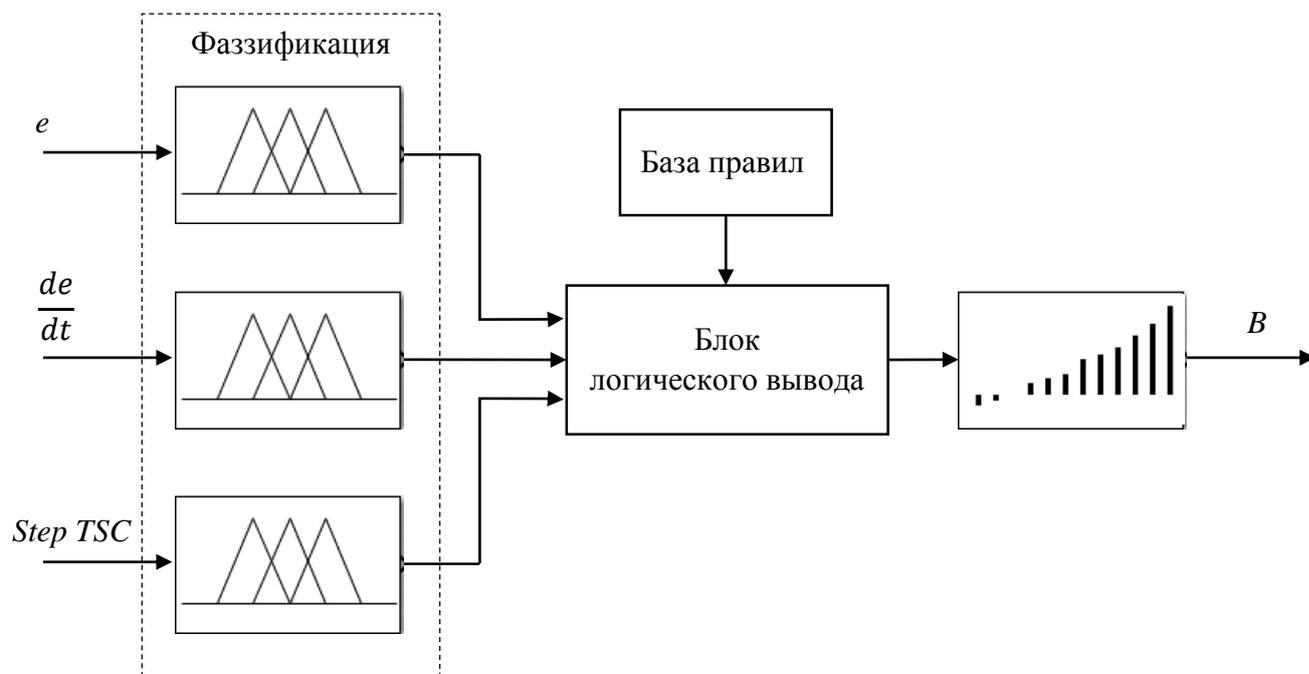


Рисунок 3.28 – Структурная схема нечеткого регулятора

Исходное распределение функций принадлежности входных лингвистических переменных  $e$ ,  $de/dt$ ,  $Step\ TSC$  представлено на рисунках 3.14, 3.15 и 3.12. Для составления базы правил по алгоритму Сугено первоначально весь диапазон значений переменной  $B = [-0.1; 1]$  был поделен на одинаковые уровни по 0.1 о.е. и соответственно обозначен от  $C-01$  до  $C1$ . Далее в процессе настройки НР были добавлены промежуточные уровни. Полученная в результате регулировочная характеристика СТК показана на рисунке 3.29. По оси абсцисс – уставка для СТК в единицах проводимости  $B$ , а по оси ординат – отклонение  $e$  измеренного напряжения  $V_{meas}$  от заданного значения).

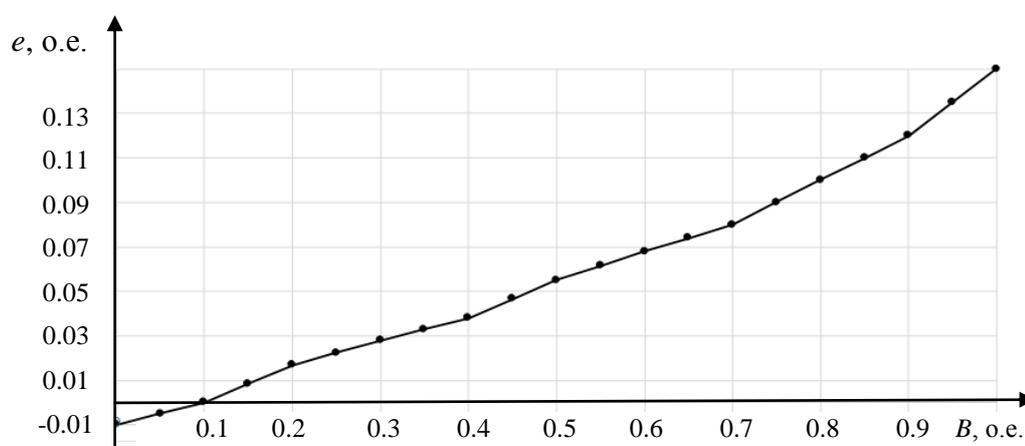


Рисунок 3.29 – Регулировочная характеристика СТК

Составленная по результатам настройки нечеткого регулятора база правил приводится в таблице 3.3. Скорректированные функции принадлежности переменной  $e$  показаны на рисунке 3.30.

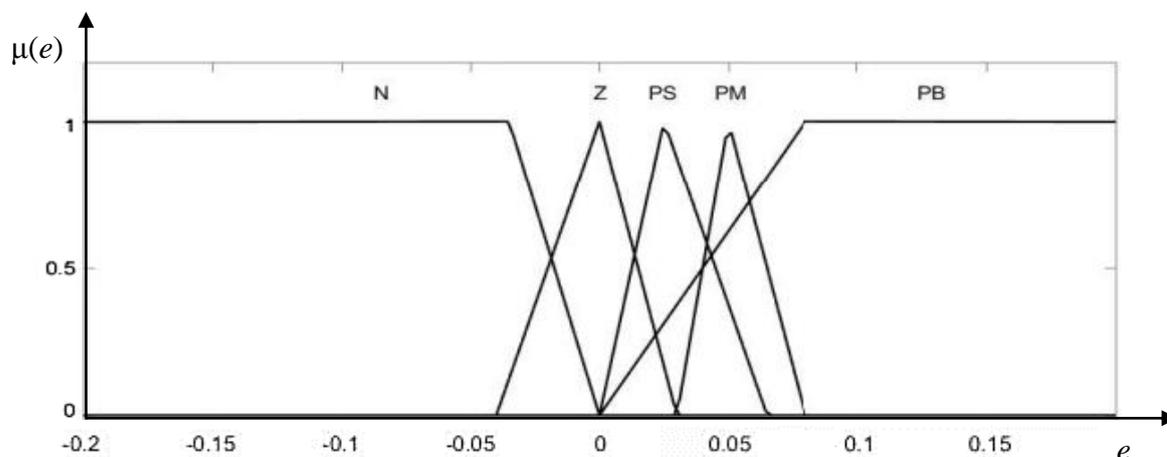


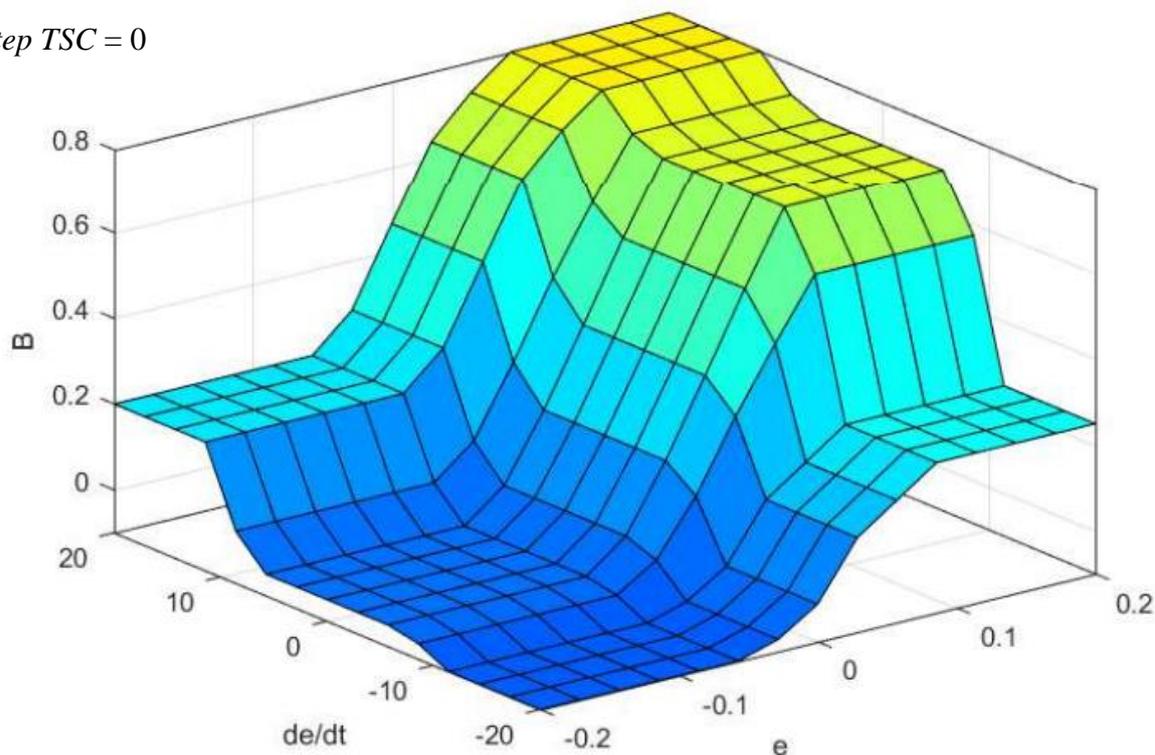
Рисунок 3.30 – Функции принадлежности входной лингвистической переменной  $e$

Таблица 3.3 – База правил по алгоритму нечеткого вывода Сугено

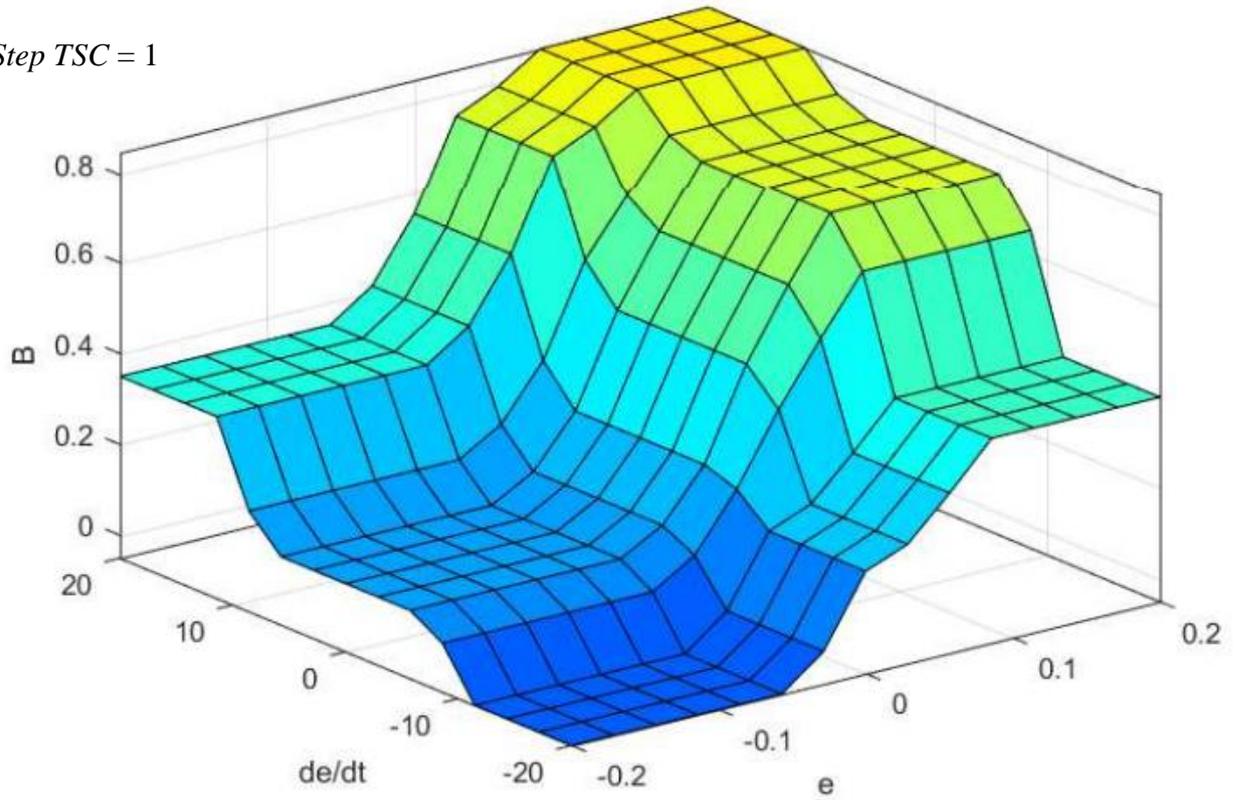
$de/dt$	$TSC$		Step0	Step1	Step2	Step3	Step4
	$e$						
<b>Z</b>	<b>N</b>		C-0.05	C0.1	C0.2	C0.25	C0.3
	<b>Z</b>		C0	C0.1	C0.3	C0.55	C0.75
	<b>PS</b>		C0.15	C0.3	C0.55	C0.8	C0.95
	<b>PM</b>		C0.45	C0.55	C0.65	C0.8	C0.95
	<b>PB</b>		C0.7	C0.75	C0.85	C0.95	C1
<b>P</b>	<b>N</b>		C0.2	C0.35	C0.45	C0.6	C0.75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

Оценить влияние значений входных переменных и правил на результат нечеткого вывода можно по представленным на рисунках 3.31 – 3.33 поверхностям отклика для различных значений переменной  $Step\ TSC$ . Результаты моделирования систем управления с нечетким выводом показаны на рисунках 3.34 – 3.37.

$Step\ TSC = 0$

Рисунок 3.31 – Поверхность отклика для  $Step\ TSC = 0$

*Step TSC = 1*



*Step TSC = 2*

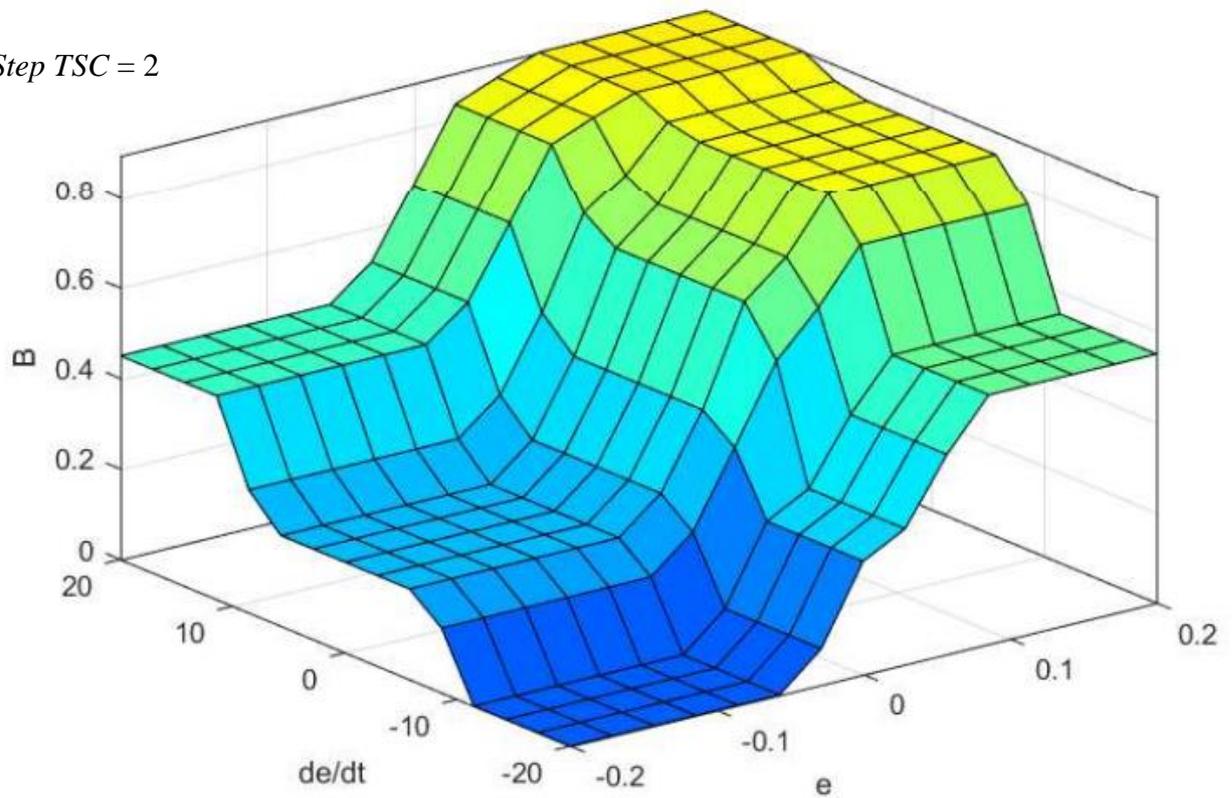
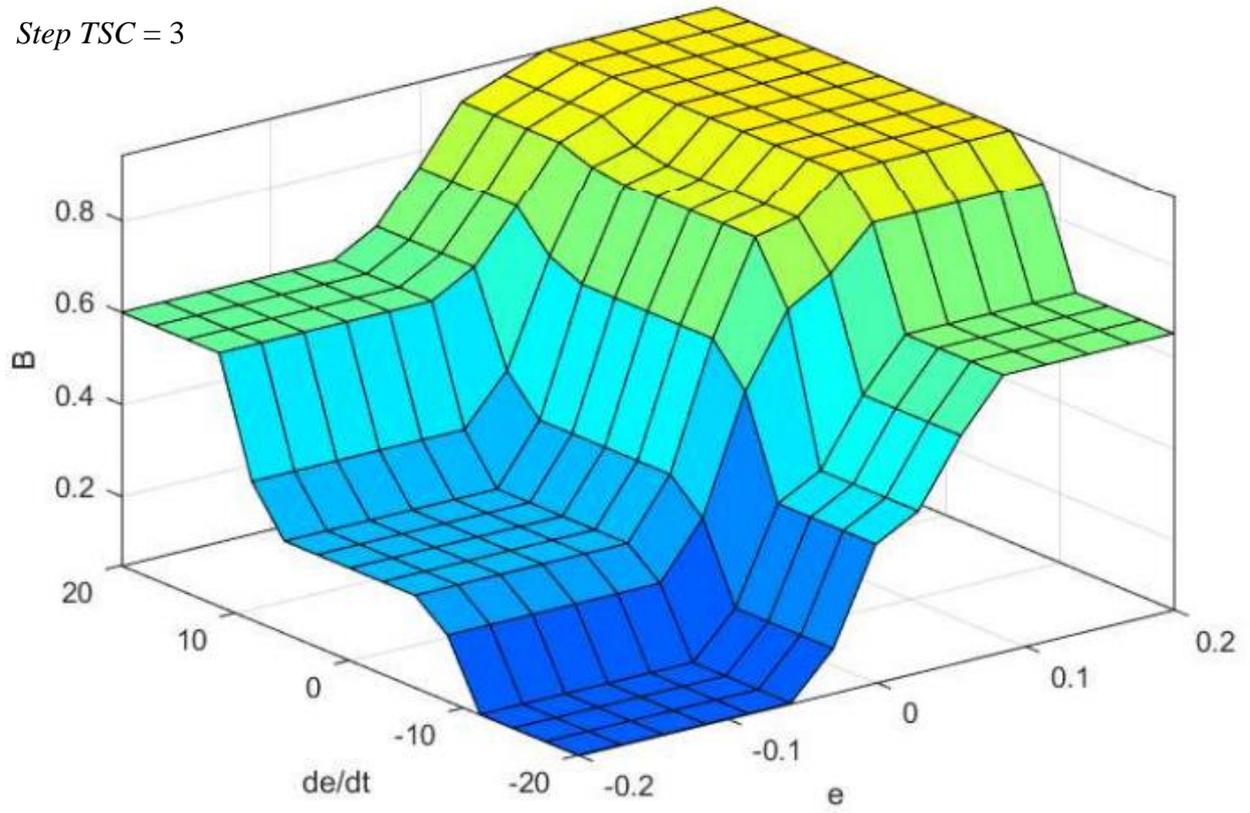


Рисунок 3.32 – Поверхности отклика для  $Step\ TSC = 1$  и  $Step\ TSC = 2$

Step TSC = 3



Step TSC = 4

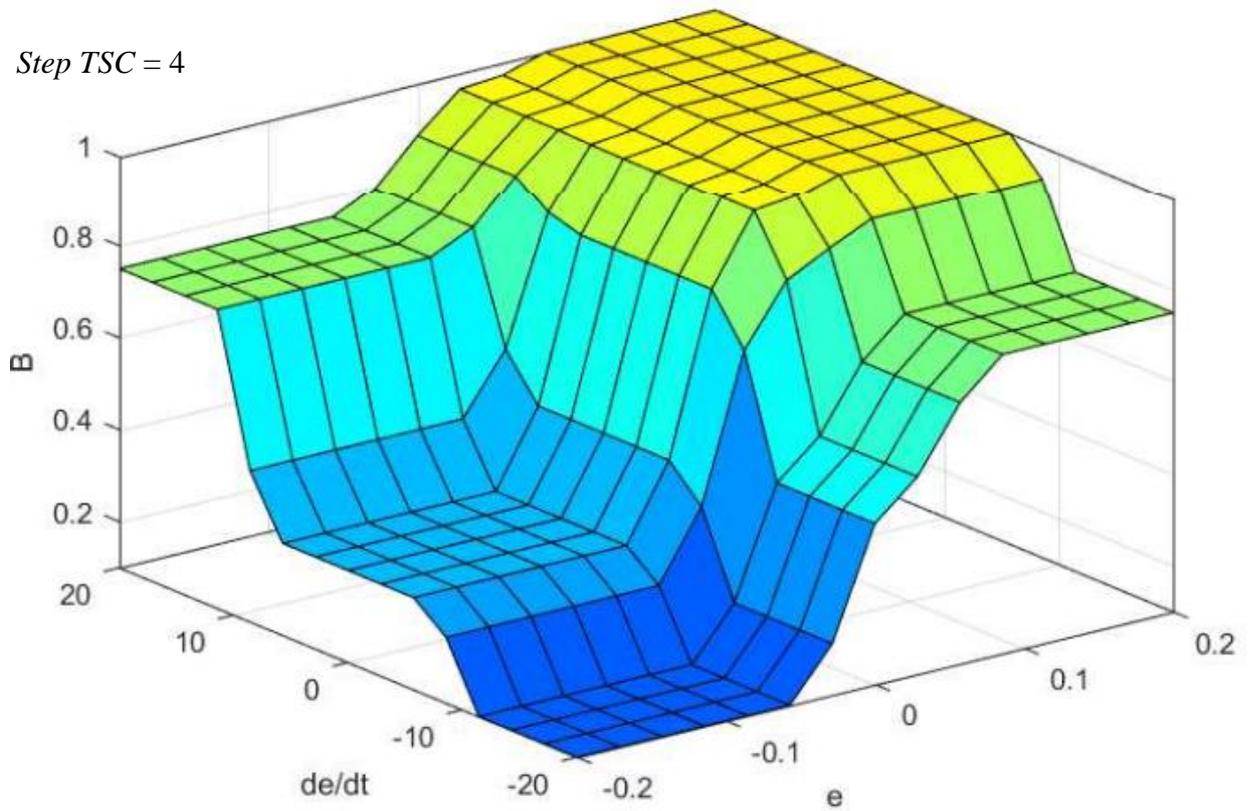


Рисунок 3.33 – Поверхности отклика для Step TSC = 3 и Step TSC = 4

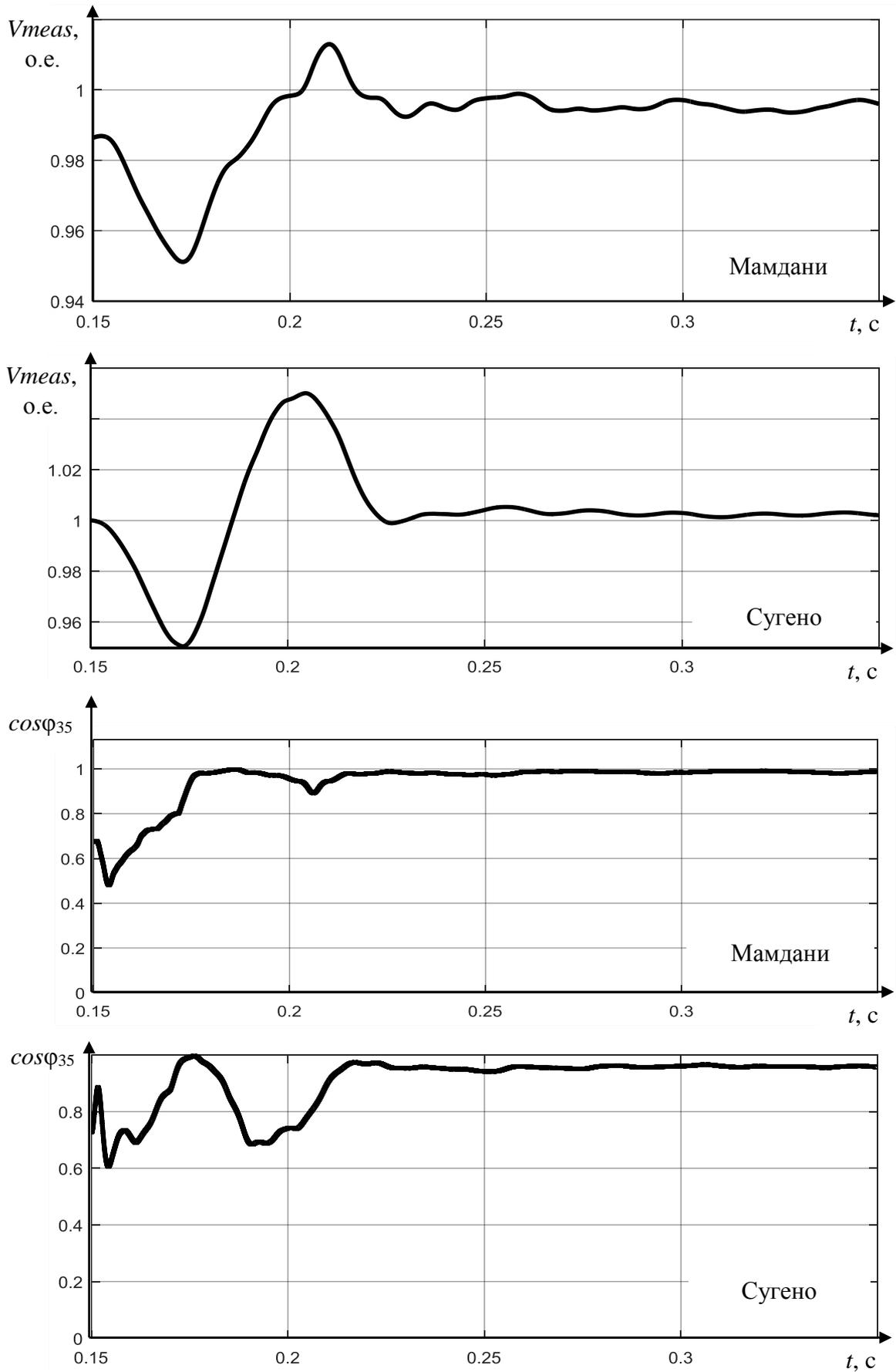


Рисунок 3.34 – Реакция системы при малой мощности нагрузки

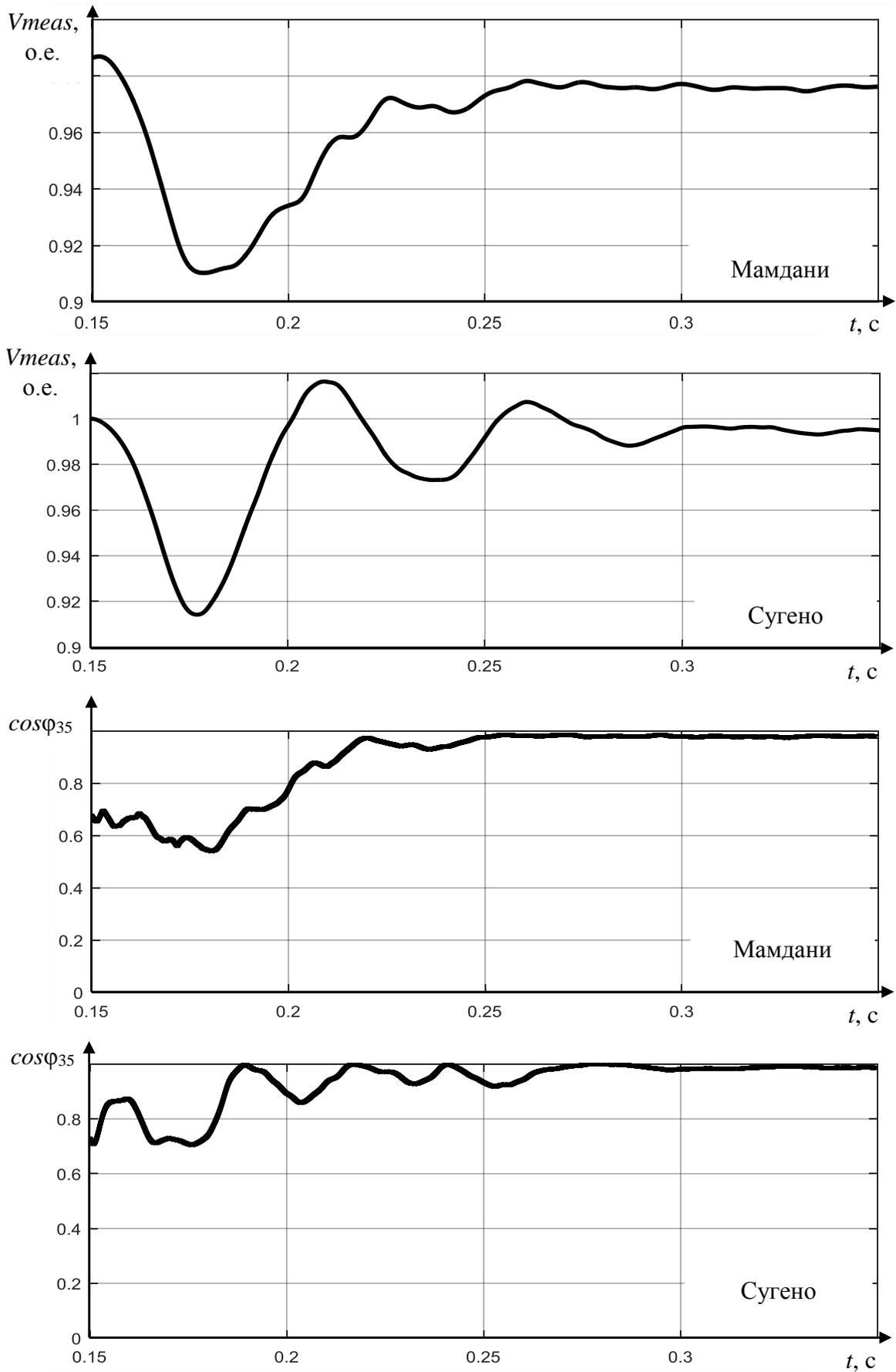


Рисунок 3.35 – Реакция системы при средней мощности нагрузки

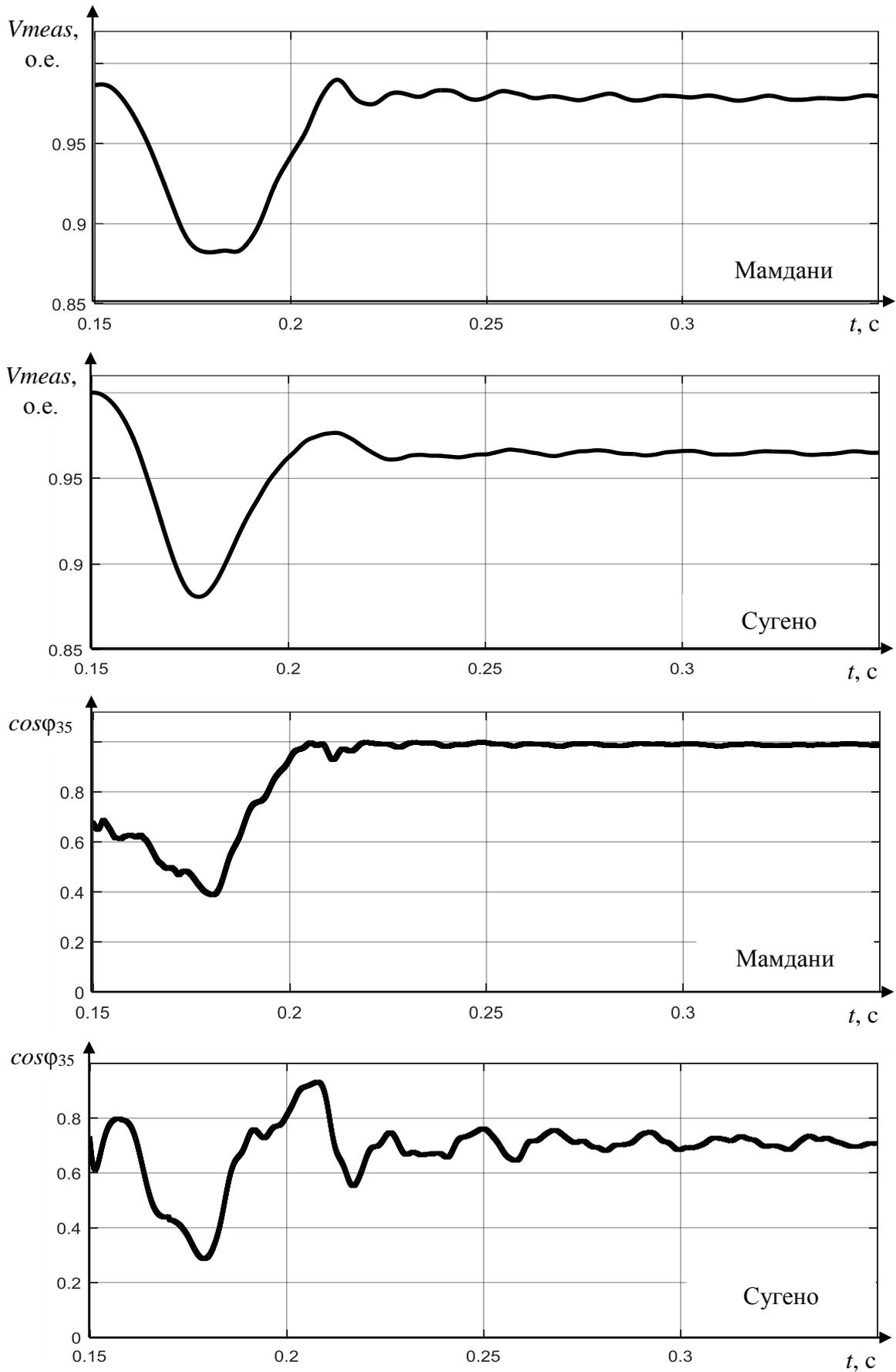


Рисунок 3.36 – Реакция системы при большой мощности нагрузки

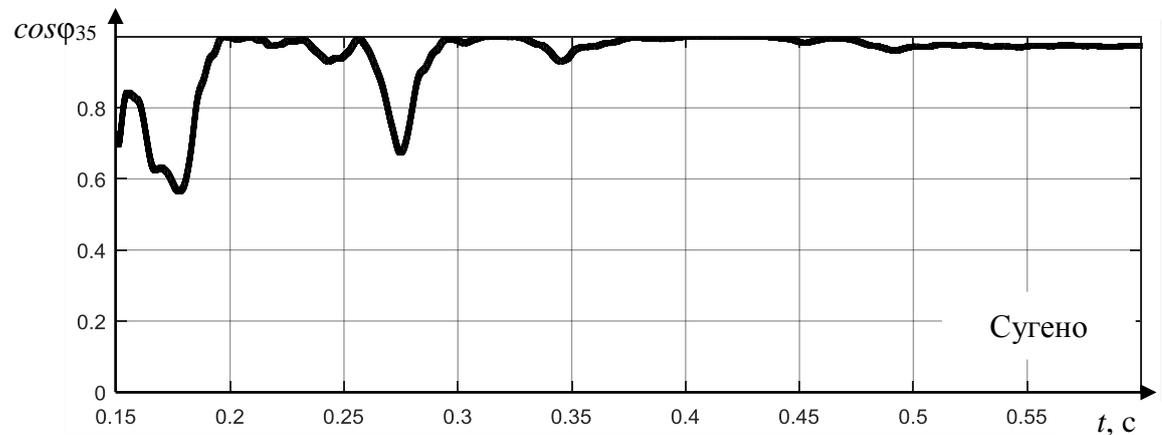
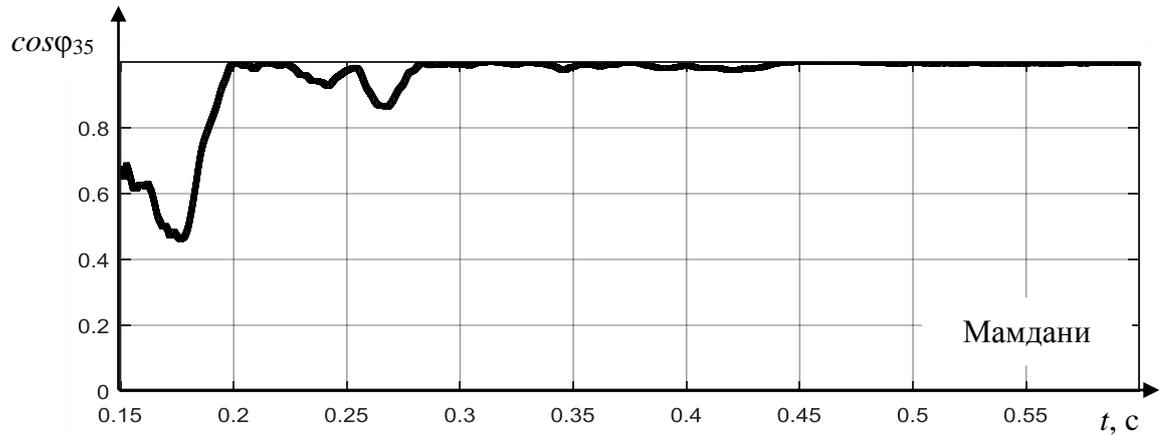
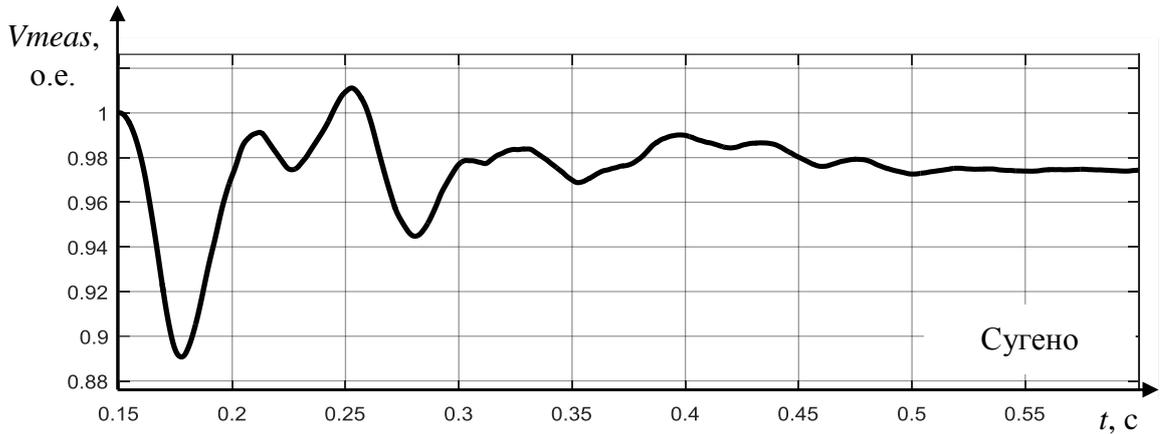
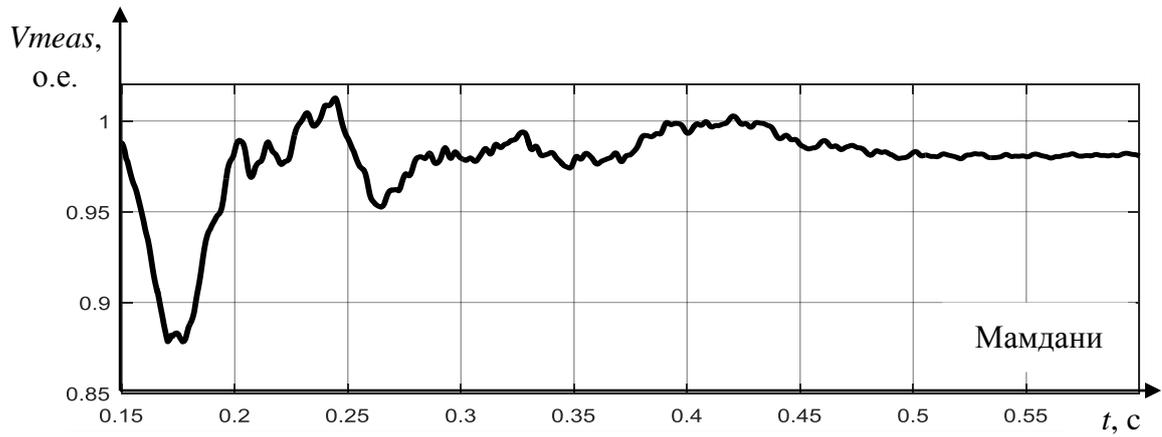


Рисунок 3.37 – Реакция системы при переменной нагрузке

На рисунках 3.34, 3.35 показаны результаты моделирования, полученные при тех же условиях, что и графики на рисунках 3.20, 3.21. Малой мощности нагрузки соответствуют  $R_d = 21$  мОм и  $X_L = 9$  мОм, средней –  $R_d = 5$  мОм и  $X_L = 7$  мОм. В условиях малой мощности нагрузки при регулировании по Сугено наблюдается сильное перерегулирование во время переходного процесса (более 5%). В установившемся режиме ошибка  $V_{meas}$  превышает заданное значение менее, чем на 1 %. Коэффициент мощности при этом близок к 0,92. Время регулирования примерно одинаковое с регулятором Мамдани.

Увеличение мощности нагрузки приводит к увеличению колебательности сигналов (рисунок 3.35), однако перерегулирование не превышает 2%. Не смотря на то, что установившееся значение  $V_{meas}$  приближается к 1 о.е., длительность переходного процесса сильно увеличивается из-за колебаний в начале переходного процесса и достигает 0,15 с. Установившееся значение коэффициента мощности близко к 1.

На рисунке 3.36 показаны результаты регулирования при большой мощности нагрузки ( $R_d = 3$  мОм и  $X_L = 5$  мОм). Время регулирования 0,08 с, перерегулирование отсутствует. Однако установившееся значение сигнала  $V_{meas}$  не превышает уровень 0,96 о.е. Коэффициент мощности  $\cos\phi$  по окончании переходного процесса выходит на значение близкое к 0,75.

На переменной нагрузке (рисунок 3.37) колебания  $V_{meas}$  становятся особенно выраженными в диапазоне от 0,97 до 1,02 о.е. Коэффициент мощности хоть и близок к 1, но наблюдаются значительные отклонения от заданного значения. Таким образом, можно сделать вывод, что СТК, управляемый НР с выводом по Сугено, хуже справляется с компенсацией резкопеременной нагрузки.

### 3.6 Выводы по главе 3

Рассмотрено применение аппарата нечеткой логики для системы управления статическим тиристорным компенсатором, установленным в СЭС с резкопеременной нагрузкой.

1. Выполнен синтез нечеткого регулятора Мамдани с двумя входными переменными (отклонение напряжения от заданного значения  $e$ , производная отклонения  $de/dt$ ) и выходной переменной (проводимость  $B$ ). По сравнению с ПИ – регулятором нечеткий регулятор позволяет повысить быстродействие системы, а также снизить колебания сигналов напряжения  $V_{meas}$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$ . Но при этом не удастся вывести сигнал  $V_{meas}$  к заданному значению. Для установившегося сигнала  $e$  превышает 5%.

2. Использование дополнительной входной переменной *Step TSC* дает возможность учесть количество включенных ФКЦ и расширить базу правил нечеткого регулятора. Это повышает качество регулирования и приводит к уменьшению статической ошибки по напряжению  $V_{meas}$ . Не смотря на увеличение времени регулирования до 0.075 с., нечеткий регулятор с выводом по Мамдани успешно справляется с компенсацией резкопеременной нагрузки.

3. Для сравнения в модели системы управления СТК рассмотрено применение нечеткого регулятора с выводом по Сугено с входными переменными  $e$ ,  $de/dt$ , *Step TSC* и выходной -  $B$ . Результаты моделирования показали, что с компенсацией резкопеременной нагрузки НР Сугено справляется хуже, чем НР Мамдани, т.к. наблюдается большая колебательность сигналов  $V_{meas}$  и  $\cos\varphi$ .

4. По результатам исследований работы нечетких регуляторов в системе управления СТК видно, что переключение режимов работы нагрузки приводит к значительным провалам напряжения. Однако в реальной системе некоторые изменения режимов могут быть запланированы в технологическом процессе и осуществляться в определенные моменты времени. Поэтому нечеткий алгоритм дополняется блоком коррекции сигнала  $de/dt$  для упреждения скорых изменений параметров при ожидаемых переключениях нагрузки. В результате при компенсации наблюдается минимальное отклонение напряжения  $V_{meas}$  от заданного значения.

## ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Оценка работоспособности нечеткого регулятора осуществлялась на макете с использованием отечественного программируемого реле ОВЕН ПР200 [107] ввиду его физической доступности. Построение программы для ПР200 базируется на стандартном языке функциональных блоков FBD, адаптированном компанией ОВЕН для своей продукции и оформленным в программной среде OwenLogic [103]. Программа визуализирует прохождение сигналов между функциональными компонентами и упрощает построение вычислительного алгоритма в виде схемы и её дальнейшую отладку.

### 4.1. Разработка программы нечеткого регулятора для ПР200

Особенностью реализации алгоритма нечёткого регулирования средствами ПР200 является отсутствие специализированных инструментов в библиотеке функциональных блоков программной среды OwenLogic. Поэтому все обязательные компоненты стандартного нечёткого регулятора были собраны из блоков элементарных математических и логических операций. На выполнение полученной таким образом схемы программы НР от аппаратной платформы ПР200 потребовалось не более 9 мс, что меньше длительности полупериода сетевого напряжения 50 Гц.

Регулятор в среде Simulink не содержит очевидным образом интегратор в канале регулирования. Однако в ГОСТ Р МЭК 61131-7-2017 [23] содержится уточнение: «...на рисунке **A.13b** приведен пример, показывающий, как из разности между уставкой и переменной технологического процесса формируется ошибка. Эта разность, как и ее производная по времени, передается нечеткому управлению в виде двух переменных, являющихся независимыми от ее объективного восприятия. Корректирующая переменная получается из выходной переменной интегрированием по времени.» Поскольку фактически регулирующая величина проводимости  $B_{svc}$

находится в пропорциональной зависимости от величины ошибки  $e$  и её производной  $de/dt$ , то выполняется условие, содержащееся в приведённой цитате. Поэтому в программе для ПР200 в канал регулирования введён интегратор, специально разработанный из блоков элементарных функций OwenLogic. Коэффициент интегрирования был подобран на этапе отладки на натурном макете.

На рисунке 4.1 приведена структура программы, реализующей нечёткий регулятор в ПР200.

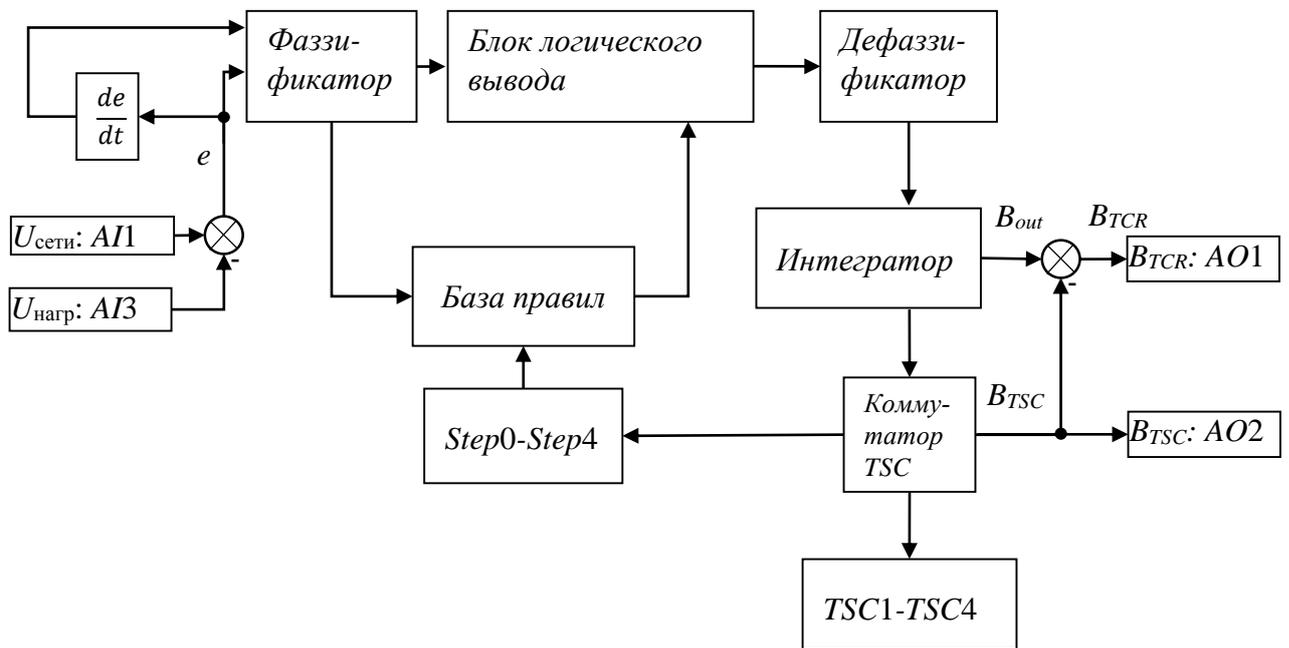


Рисунок 4.1 – Структурная схема нечеткого регулятора для ПР200

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

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

Фаззификатор оформлен в виде двух соответствующих макросов, показанных на рисунке 4.2. В макросах сигнал ошибки для  $e$  задается как сигнал  $x\_in$ , сигнал производной  $de/dt - x'\_in$ .

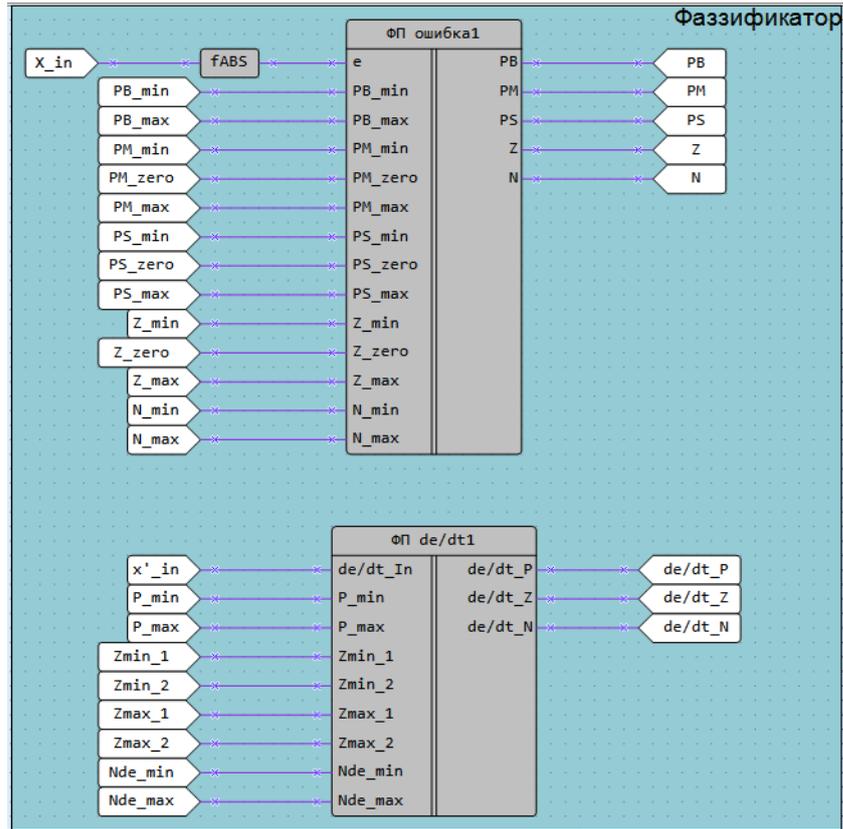


Рисунок 4.2 – Макросы фаззификатора.

Блоки фаззификатора реализованы способом, рассмотренным в [24, 48 и 58]. Треугольные ФП были разделены на участки, состоящие из отрезков прямых  $y(x) = kx$ , и приведены к виду  $Y = (X - X1)/(X2 - X1)$ , затем сгруппированы в соответствующие подмакросы, графическое представление которых показано на рисунке 4.3

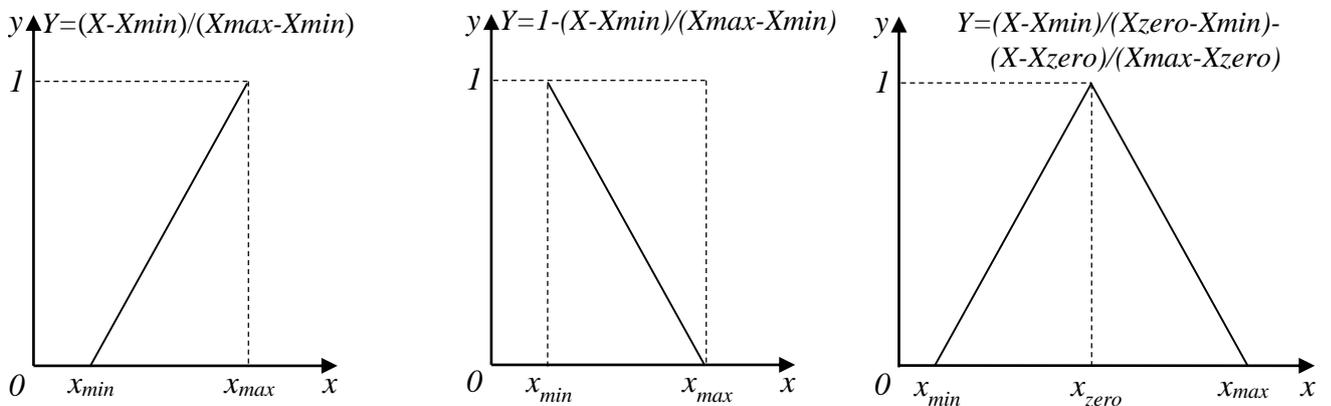


Рисунок 4.3 – Представление уравнений ФП для оцифровки

При  $k > 0$  оцифровываемое уравнение прямой (ФП для РВ) имеет вид

$$Y = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}),$$

где  $X$  – текущее значение входной переменной  $x_{in}$ ;  $X_{min}$  – левая координата пересечения с осью абсцисс данной ФП;  $X_{max}$  – координата максимума данной ФП.

При  $k < 0$  оцифровываемое уравнение прямой превращается в выражение (ФП для N и Nde)

$$Y = 1 - (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}).$$

Тогда для оцифровки треугольных функций принадлежности можно использовать выражение (ФП Треугольн)

$$Y = (X - X_{min}) / (X_{zero} - X_{min}) - (X - X_{zero}) / (X_{max} - X_{zero}),$$

где  $X_{zero}$  – координата вершины треугольника данной ФП.

Подмакросы реализующие перечисленные функции принадлежности показаны на рисунках 4.4 – 4.9.

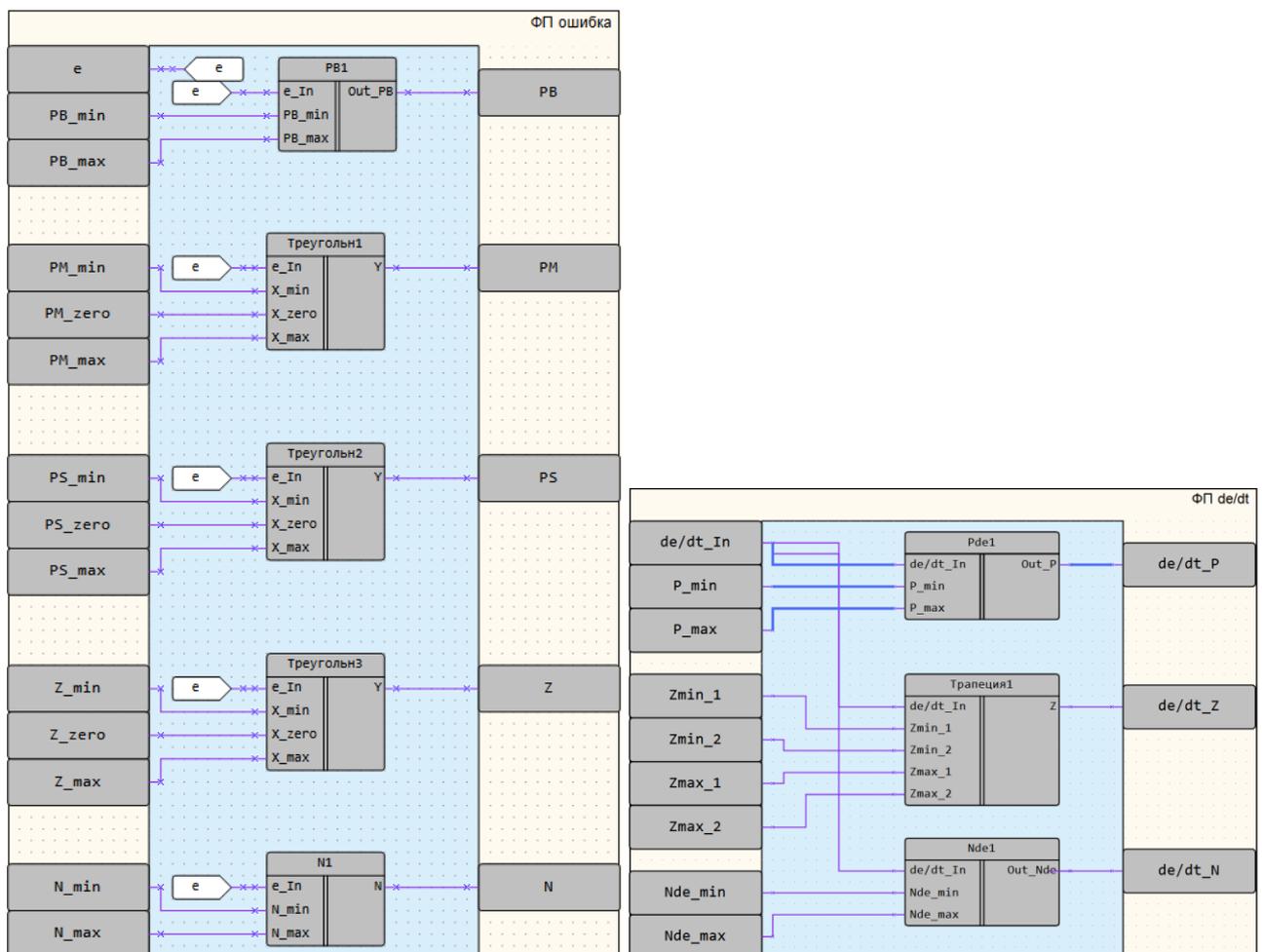


Рисунок 4.4 – Подмакросы фаззификатора

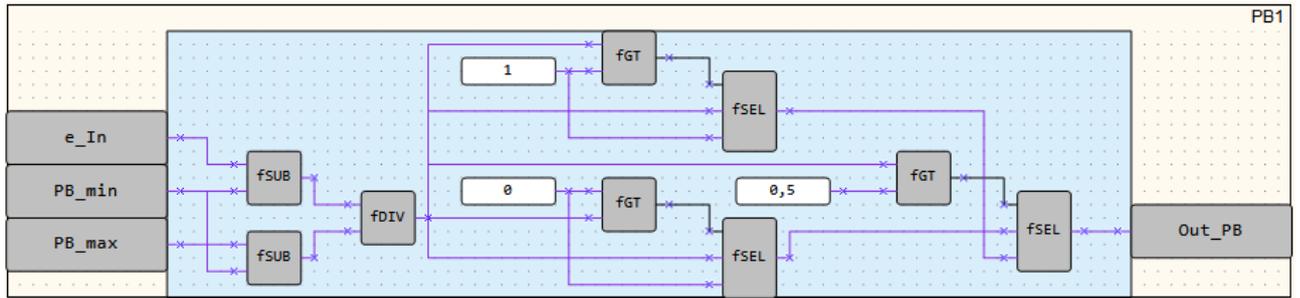


Рисунок 4.5 – Макрос ФП PB

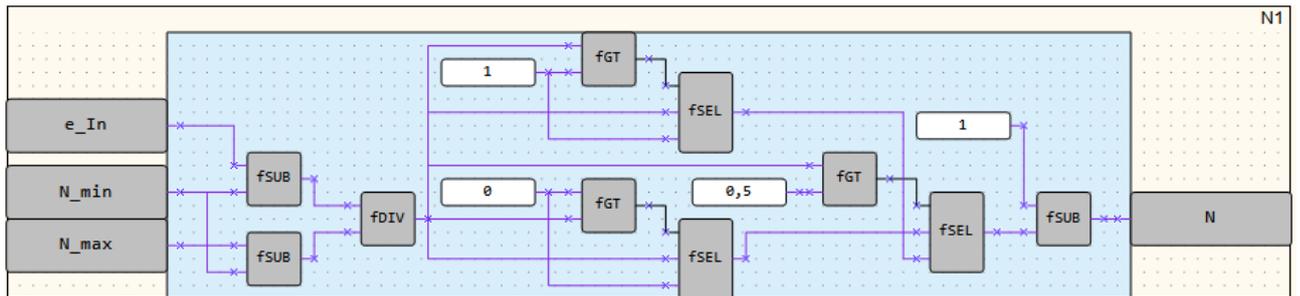


Рисунок 4.6 – Макрос ФП N

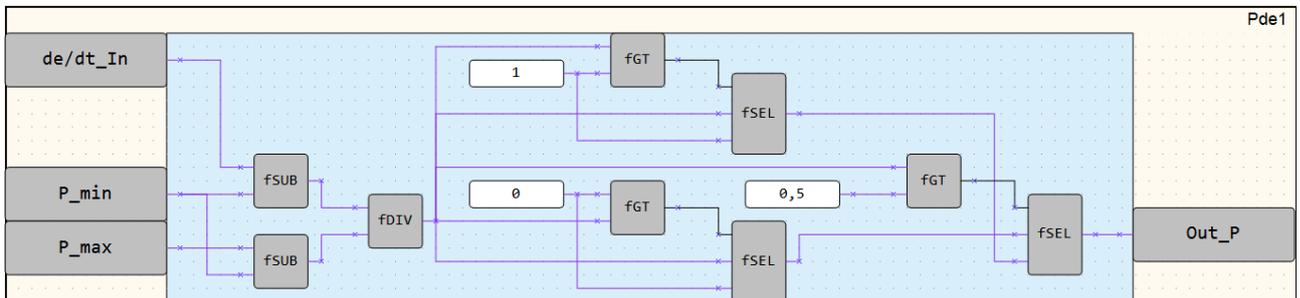


Рисунок 4.7 – Макрос ФП Pde

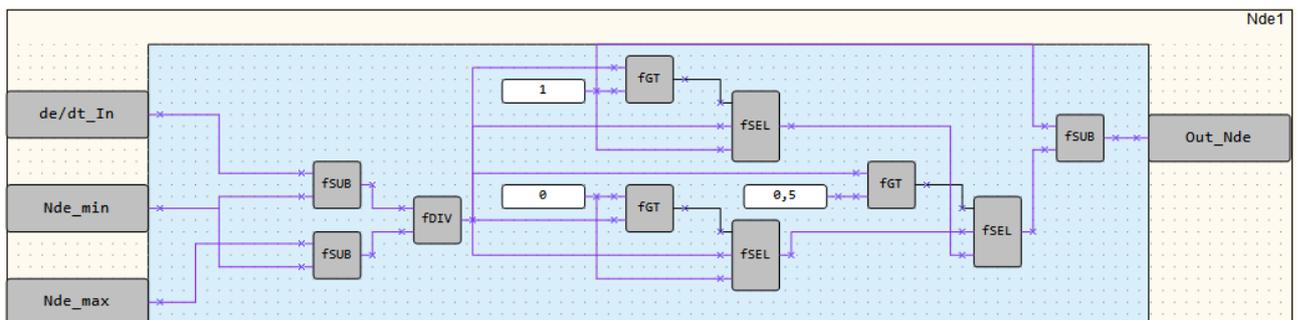


Рисунок 4.8 – Макрос ФП Nde

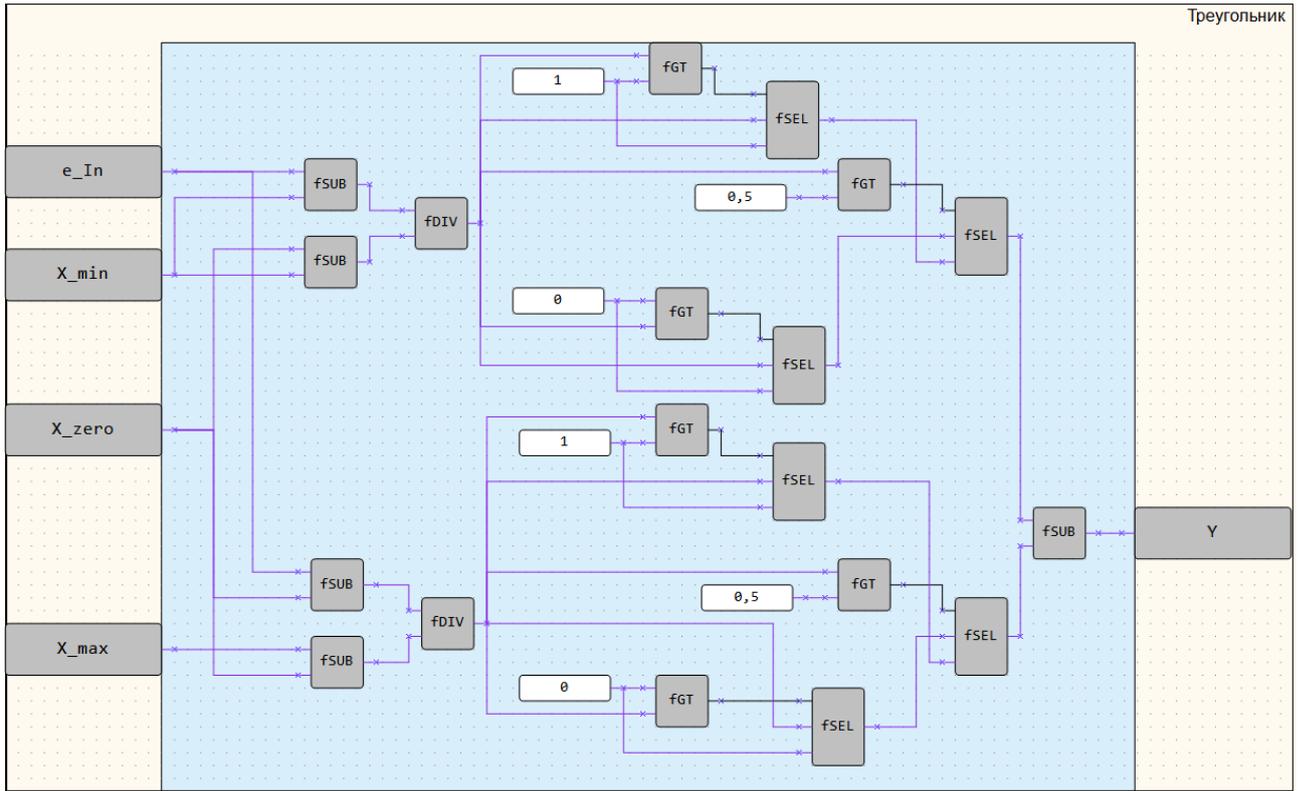


Рисунок 4.9 – Макрос для треугольных ФП

При оцифровывании функции принадлежности  $de/dt Z$  требуется выражение для описания трапеции в виде  $y(x)$ . Оно получено из выражения для треугольника с разделением координаты вершины треугольника на две отдельных координаты (рисунки 4.10, 4.11):

$$Y = (X - X_{min1}) / (X_{min2} - X_{min1}) - (X - X_{max1}) / (X_{max2} - X_{max1}).$$

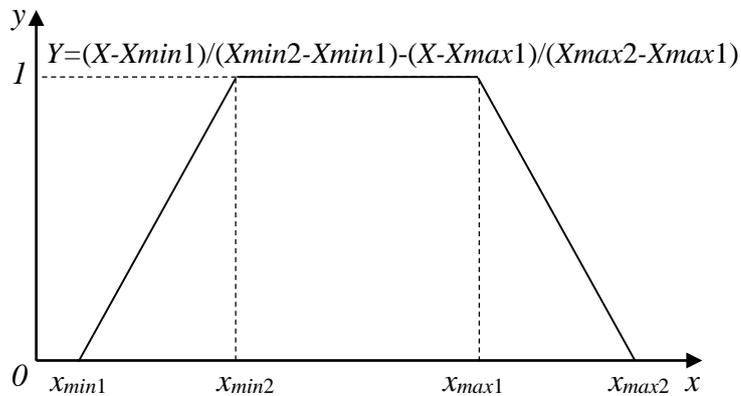


Рисунок 4.10 – Представление уравнения трапеции для оцифровки ФП  $de/dt Z$

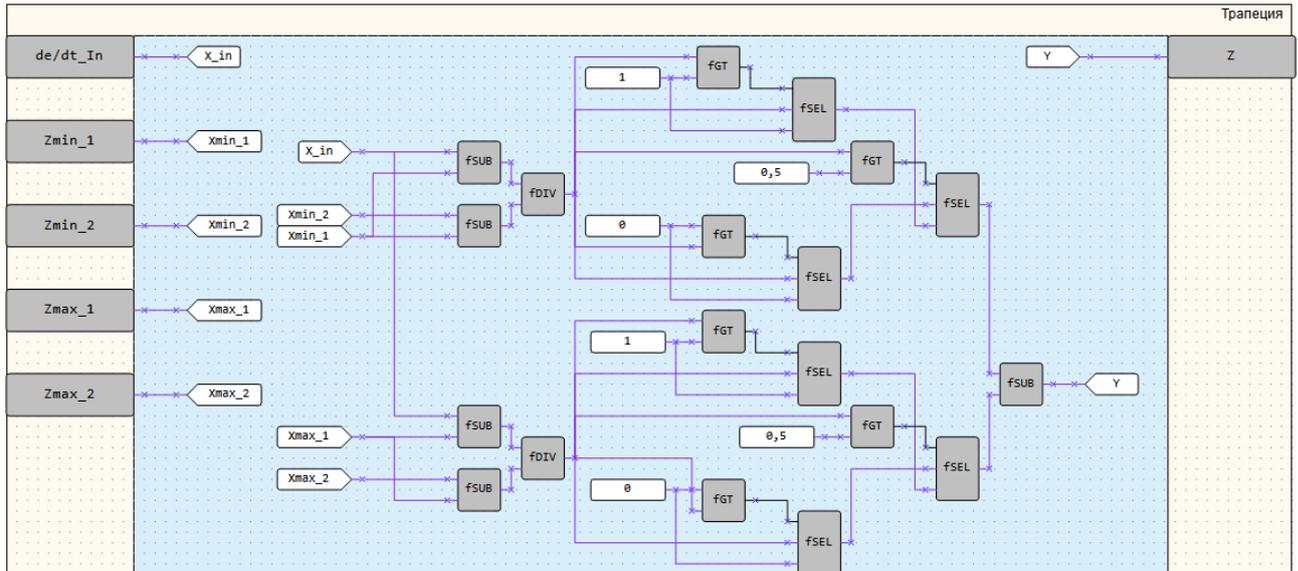


Рисунок 4.11 – Макрос ФП трапеции для производной ошибки  $de/dt$

Нечеткий вывод и процедура дефаззификации показаны на рисунке 4.12. процедура дефаззификация осуществляется по методу центра тяжести, поэтому в составе дефаззификатора присутствуют однотипные макросы, определяющие значение числителя и знаменателя центроида площади, который формирует четкое значение выходной величины  $B$

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

Для вычисления площади полученных трапеций задаются уравнения прямых и координаты:

уравнения прямых  $Z_1(x) = x(z_{mid} - z_{min1}) + z_{min1},$

$$Z_2(x) = x(z_{mid} - z_{max2}) + z_{max2},$$

координаты  $z_{min2}(x) = Z_1(x_{out})$  при  $x = x_{out},$

$$z_{max1}(x) = Z_2(x_{out})$$
 при  $x = x_{out}.$

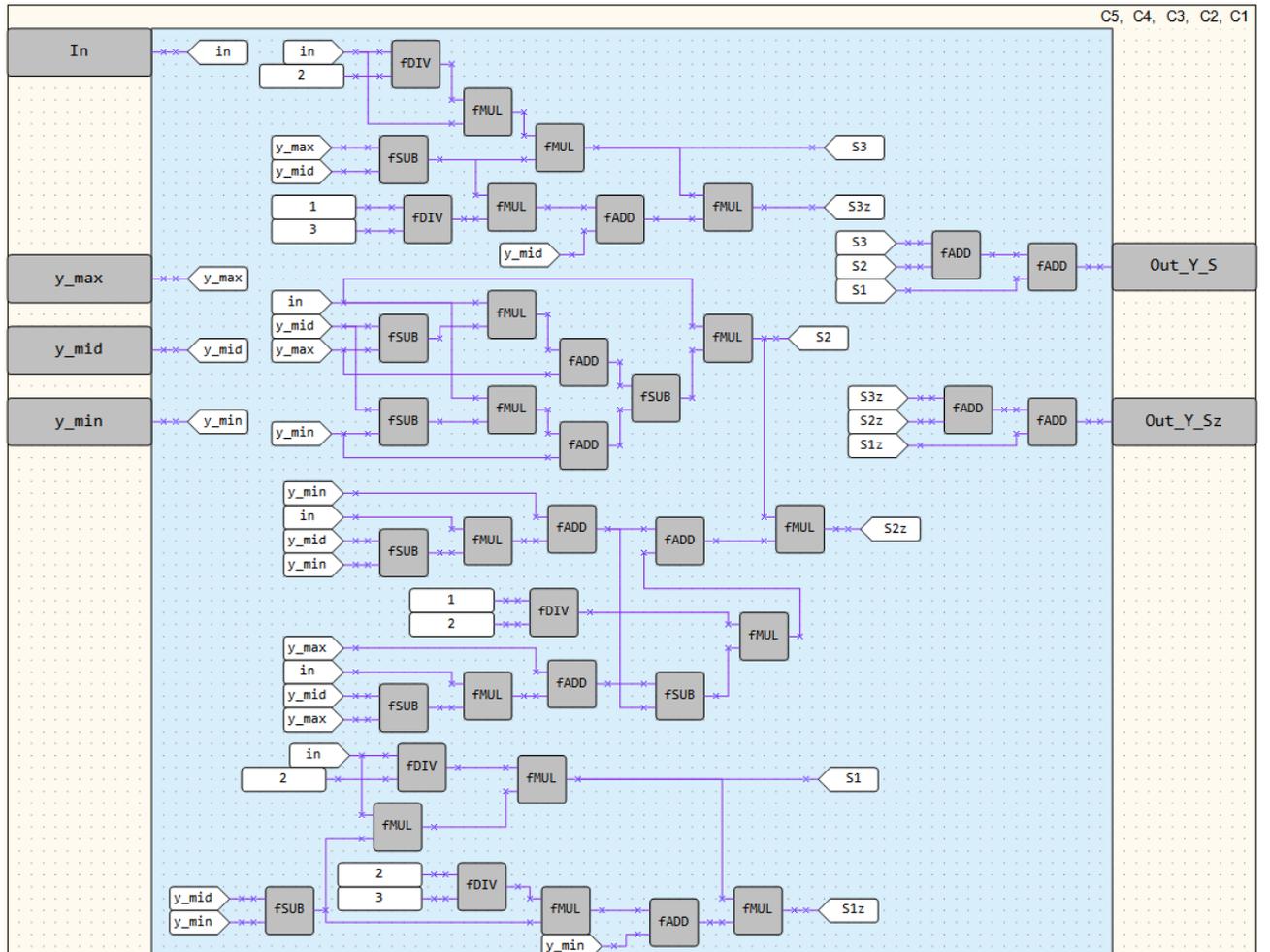
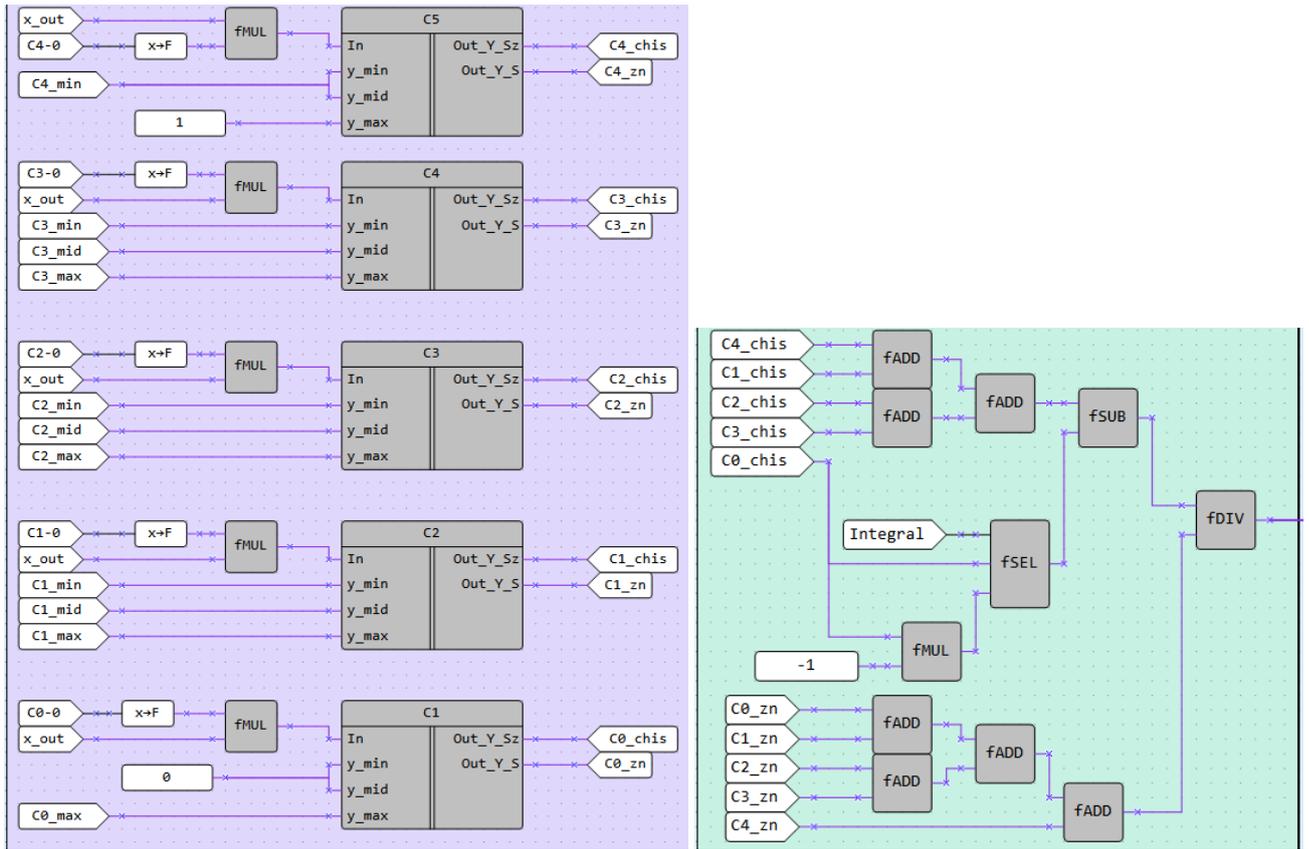


Рисунок 4.12 – Формирование выходного сигнала НР

Определение площади фигур выполняется по следующим уравнениям

$$S1 = \frac{x_{out}}{2} (z_{min2}(x) - z_{min1}) = \frac{x_{out}}{2} [x_{out}(z_{mid} - z_{min1}) + z_{min1} - z_{min1}]$$

$$= \frac{x_{out}^2}{2} (z_{mid} - z_{min1}).$$

$$S2 = x_{out} [z_{max1}(x) - z_{min2}(x)] =$$

$$= x_{out} [(x_{out}(z_{mid} - z_{max2}) + z_{max2}) - (x_{out}(z_{mid} - z_{min1}) + z_{min1})].$$

$$S3 = \frac{x_{out}}{2} (z_{max2} - z_{max1}(x)) = \frac{x_{out}}{2} [z_{max2} - x_{out}(z_{mid} - z_{max2}) - z_{max2}]$$

$$= \frac{x_{out}^2}{2} (z_{max2} - z_{mid}).$$

Графическое представление уравнений площади показано на рисунке 4.13.

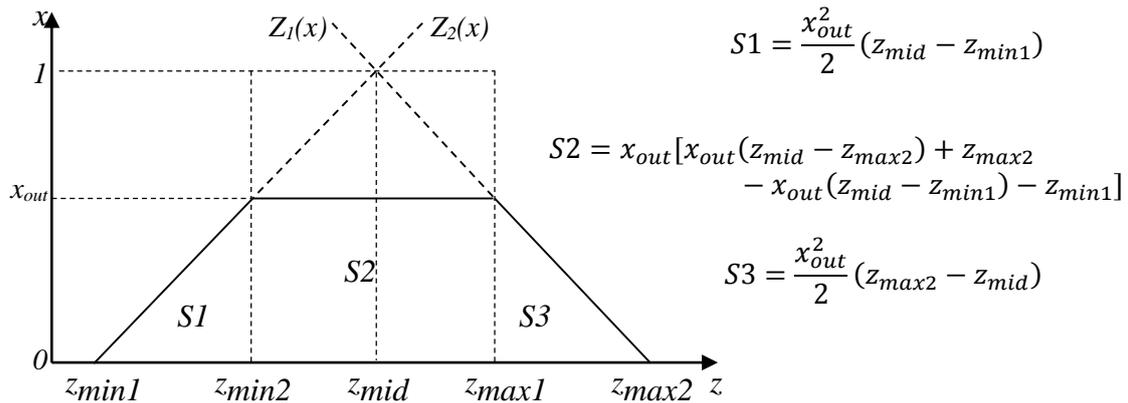


Рисунок 4.13 – Уравнения для оцифровки площадей трапеций центроида.

Полученный в результате дефаззификации сигнал  $B$  интегрируется далее в величину  $B_{out}$ . Схема включения интегратора показана на рисунке 4.14.

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 компенсатора, равного единице, обеспечивается установкой предела интегрирования  $B_{out-I} = 1$ .

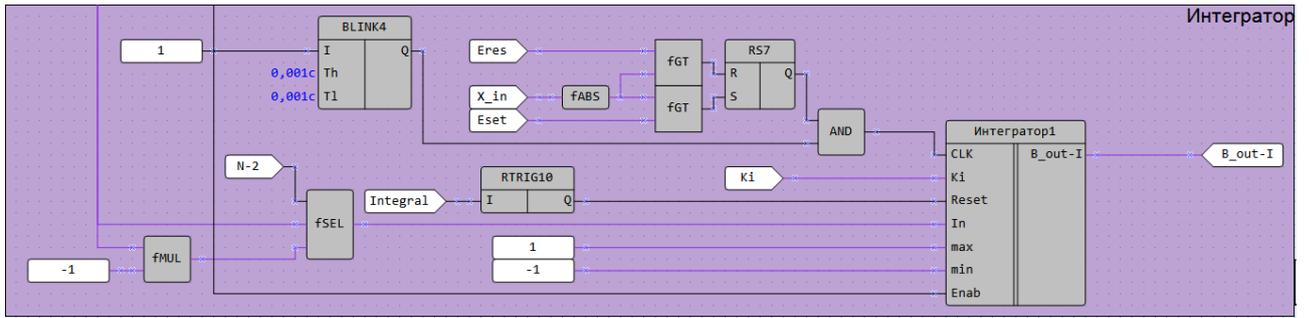


Рисунок 4.14 – Схема включения интегратора

Интегрированное значение  $B\_out-I$  подаётся в схему управления включением ступеней конденсаторных батарей TSC (рисунок 4.15). Непосредственно для включения ступеней предназначены сигналы  $TSC1 - TSC4$ , которые поступают на вход дешифратора DC4\_41.

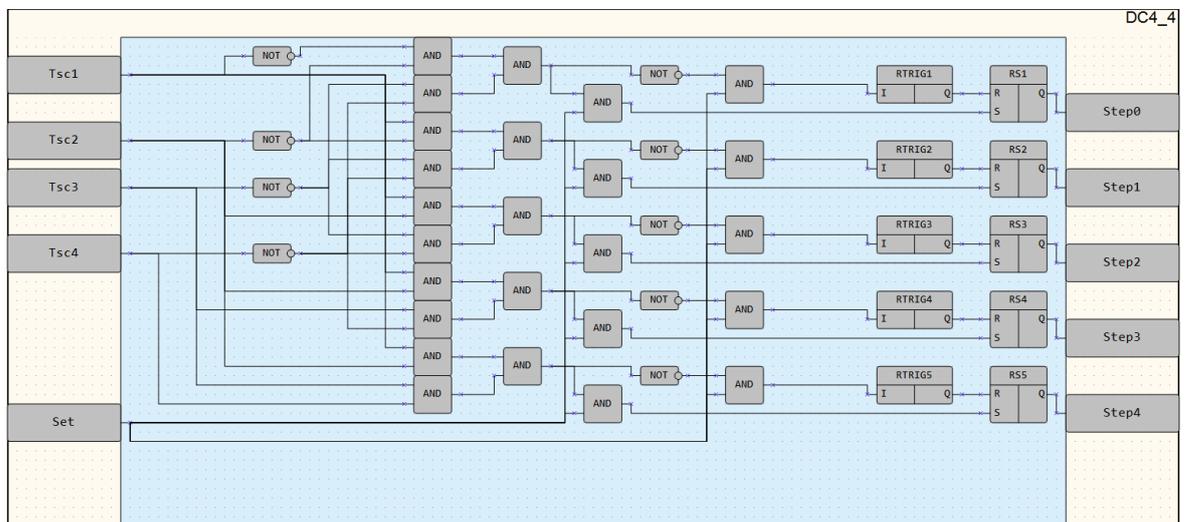
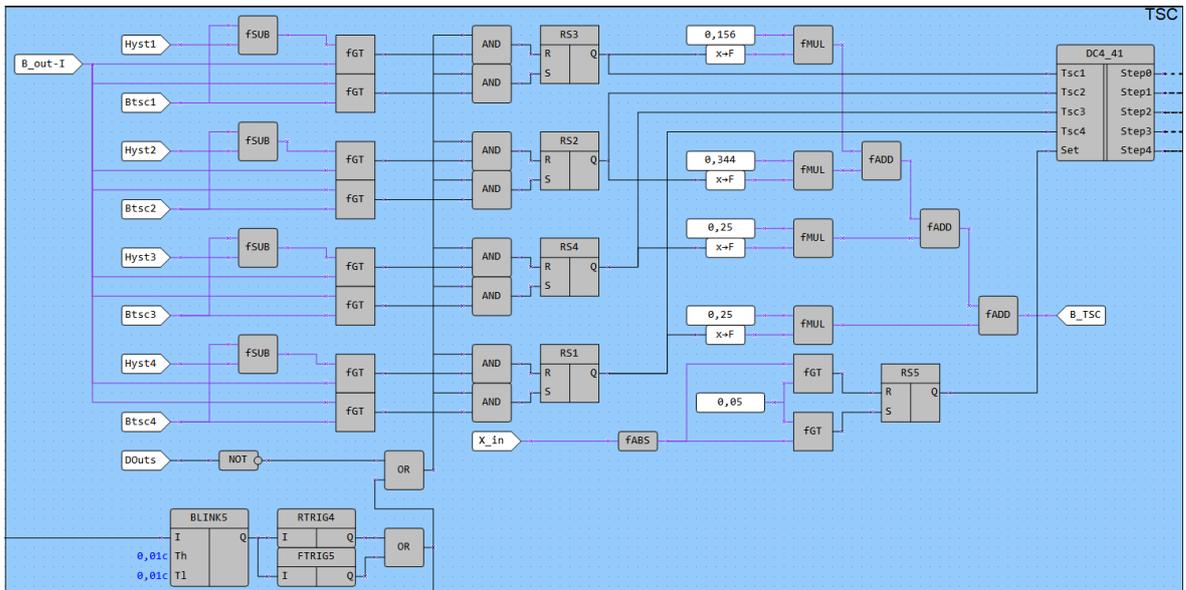


Рисунок 4.15 – Схема управления включением ступеней компенсатора

Дешифратор формирует сигналы *STEP0* – *STEP4* по количеству включенных ступеней, которые используются в Базе правил, сформированной в разделе 3 и скорректированной при отладке программы.

#### 4.2 Отладка программы нечеткого регулятора в среде OwenLogic

В процессе отладки программы регулятора стало очевидно, что применение в явном виде интегратора в контуре регулирования требует коррекции базы правил для *Z* и *N* интервалов значений ошибки *e*. В отличие от Таблицы 3.1, представленной выше и реализованной в модели *Simulink*, скорректированная база правил для регулятора, реализованного в ПР200 имеет вид, показанный в Таблице 4.1, в скобках указываются прежние значения параметров без интегратора. Для корректной работы интегратора в *Z* и *N* интервалах потребовалось принудительное переключение вычислителя *Bsvc* на ФП *C0* и *C1* для отрицательных и около нулевых значений выходной переменной дефаззификатора. Эти изменения необходимы, т.к. иначе не удастся проинтегрировать сигнал ошибки с отрицательным знаком и значение выходной переменной интегратора становится неадекватным изменениям ошибки. Реализация скорректированной базы правил в OwenLogic показана на рисунках 4.16, 4.17.

Таблица 4.1. База правил нечеткого регулятора скорректированная

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

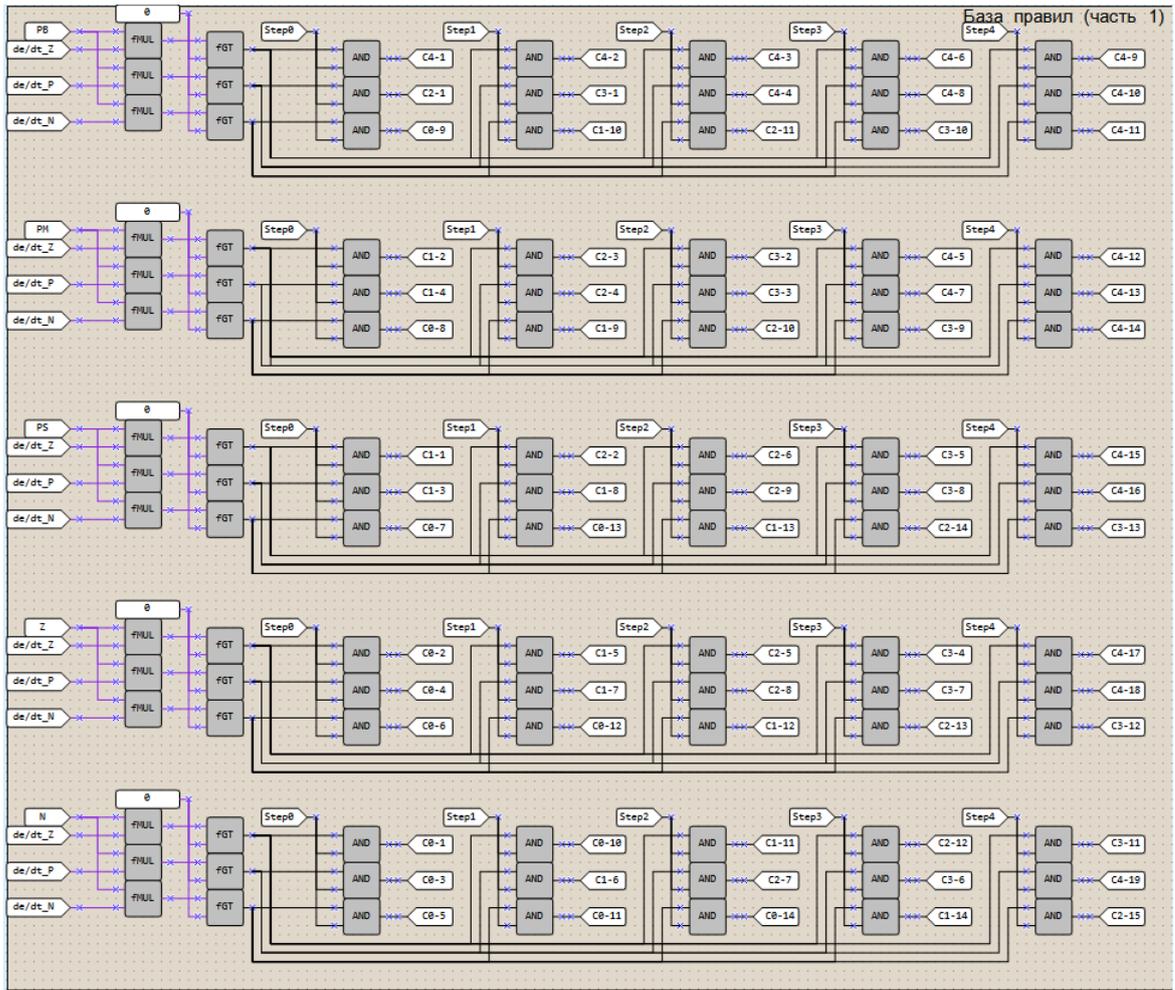


Рисунок 4.16 – Вычислитель номеров правил

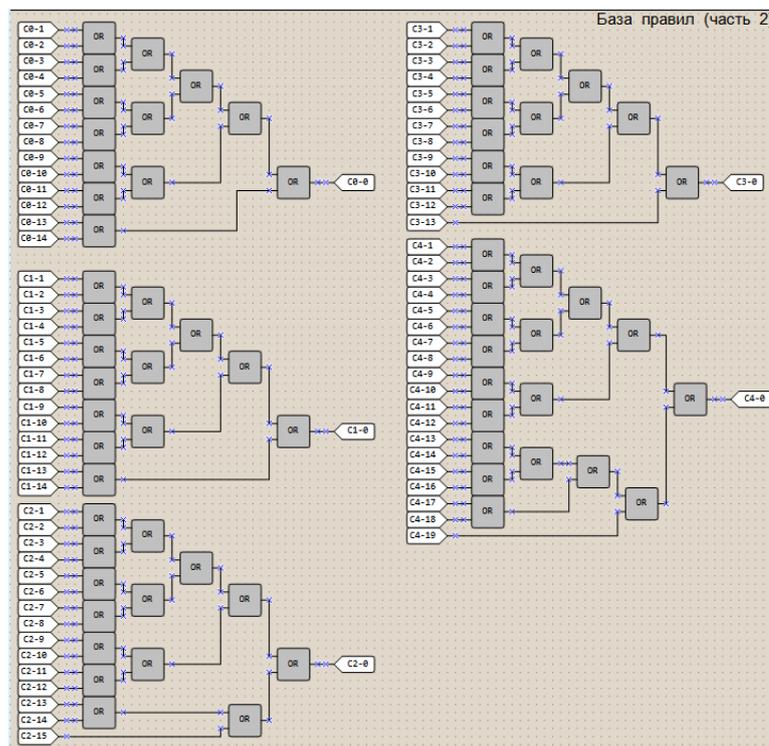


Рисунок 4.17 – Вычислитель номеров трапеций

Такой подход несколько замедляет работу регулятора при возникновении отрицательной ошибки регулирования (т.е. при напряжении сети  $U_{\text{сети}} \geq 1$  pu), однако это не влияет на апробацию принципиальной возможности реализации нечёткого регулирования с помощью ПР200.

Целесообразно было дополнить базу правил, отразив в область отрицательных значений ошибки  $e$  области PS, PM и PB (ошибке  $e$  соответствует сигнал  $x_{in}$  в схеме программы). Однако было обнаружено, что введение в программу дополнительных вычислительных операций замедляет ее выполнение настолько, что время цикла выполнения становится больше 10 мс, что недопустимо в данном случае, т.к. результат вычислений перестает соответствовать измерениям текущего полупериода. Вместо этого был инвертирован знак ошибки на входе интегратора, соответствующий фрагмент программы показан на рисунке 4.18.

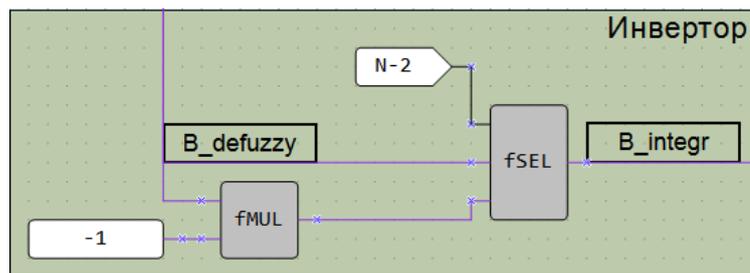
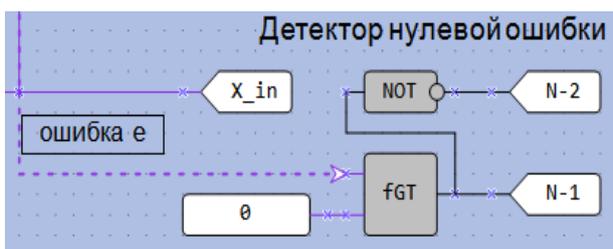


Рисунок 4.18 – Инвертор знака малого сигнала

Переменная  $B\_defuzzy$  является выходным сигналом дефаззификатора, а сигнал  $B\_integr$  подается непосредственно на вход интегратора. При этом функцию сигнализатора отрицательной ошибки выполняет детектор знака ошибки, а на вход фаззификатора подаётся модуль ошибки  $|x_{in}|$  (рисунок 4.19).



N-1 – ошибка перестала быть отрицательной (больше либо равна 0).

N-2 – ошибка стала отрицательной (меньше 0).

Рисунок 4.19 – Детектор отрицательного значения ошибки

Штриховой линией показан путь сигнала предыдущего цикла программы, который необходим для устранения ошибок циклических вычислений в Owen-Logic, возникающих в сложных схемах с множеством обратных связей. Однако их наличие неизбежно и влияние полученных таким образом задержек вычислений должно компенсироваться достаточным быстродействием аппаратной платформы.

Сигнал производной ошибки по времени вычисляется с помощью схемы, представленной на рисунке 4.20.

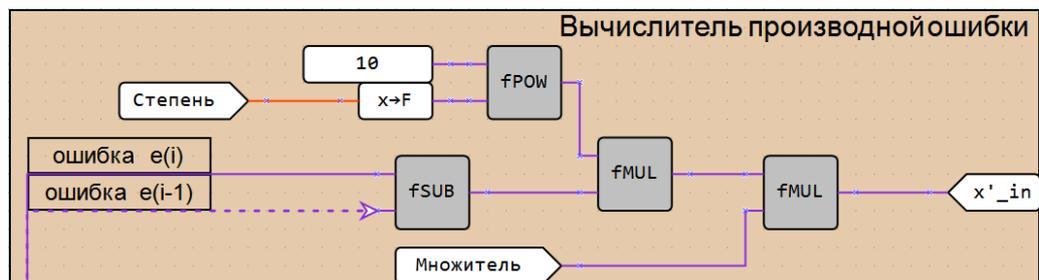


Рисунок 4.20 – Вычисление производной ошибки по времени

В схеме вычислителя производной показаны блоки математических операций и настраиваемые переменные *Степень* и *Множитель*, применявшиеся в процессе отладки для влияния на величину производной ошибки по времени.

### 4.3 Проверка работоспособности программы в контроллере с замкнутыми входом-выходом без нагрузки

Следующим этапом отладки является проверка работоспособности программы при замыкании выхода регулятора на вход с соответствующими преобразованиями. Способ программно-аппаратного замыкания показан на рисунке 4.21

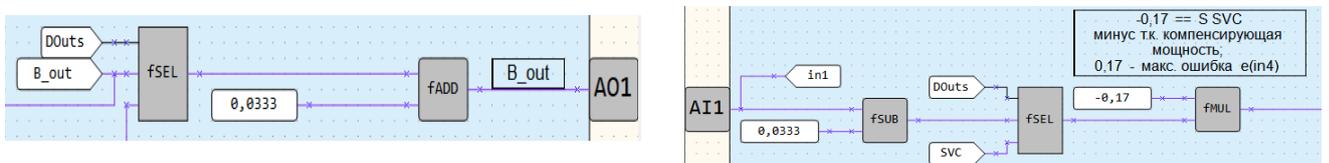


Рисунок 4.21 – Способ программно-аппаратного замыкания регулятора

Сигнал с аналогового выхода АО1 ПР200 подается на его аналоговый вход АП1 с масштабным коэффициентом, согласующим выходной сигнал задания проводимости с величиной ошибки: при предельной величине ошибки  $e = 0.17$  максимальная регулирующая величина проводимости  $B_{svc} = 1$ .

На рисунке 4.22 представлены осциллограммы, которые отображают два характерных сигнала регулятора: выходной сигнал требуемой величины мощности компенсатора (3) и ошибка регулирования (6).

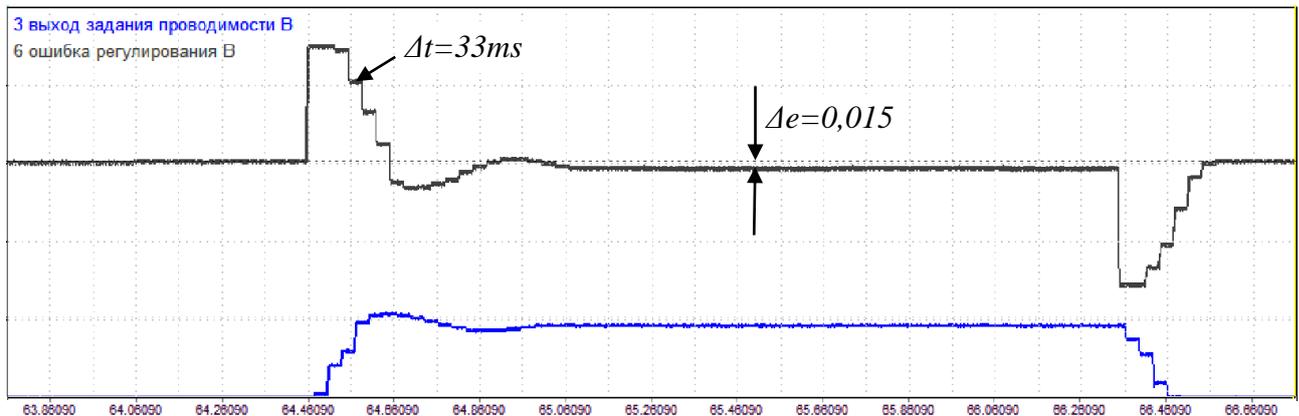


Рисунок 4.22 – Осциллограммы работы замкнутого регулятора.

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. Следует отметить, что это значение позволяет сымитировать в ПР200 задержку измерителя-вычислителя реактивной мощности и отклик срабатывания тиристорного коммутатора SVC.

Т. к. квантование по времени примененного программно-аппаратного устройства ПР200 оказалось довольно большим, то появляется паразитная колебательность выходной величины в окрестности установившегося значения при добавлении в контур регулирования интегратора. Для повышения быстродействия при указанном значении времени квантования следует увеличить коэффициент  $K_i$ . Однако уже при увеличении его до значения  $K_i = 0.025$  возникает недопустимо большая колебательность сигнала ошибки (более 10% от максимальной ошибки

$e = 0.15$ ). Коэффициент интегрирования выбран оптимальным с точки зрения быстрогодействия  $K_i = 0.02$ , а для исключения паразитной колебательности введена зона нечувствительности по ошибке с порогом  $\Delta e = 0.015$ , т. е. меньше 10% от максимальной ошибки, равной 0.15. На рисунке 4.23 показан фрагмент схемы, реализующей зону нечувствительности.

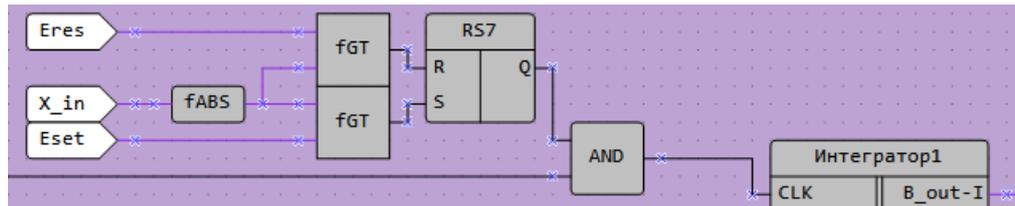


Рисунок 4.23 – Зона нечувствительности интегратора к допустимой величине ошибки

Элементы этой схемы управляют интегрированием в зависимости от соотношения величин пороговых значений  $Eset$ ,  $Eres$  и ошибки  $x_{in}$ .

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

#### 4.4 Исследование работы нечеткого регулятора на макете с переменной активно-индуктивной нагрузкой

Дальнейшая проверка работы программы проводилась с включением ПР200 в схему управления конденсаторами, компенсирующими влияние переменной нагрузки в цепи. Макет построен по одноканальной схеме, показанной на рисунке 4.24.

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.

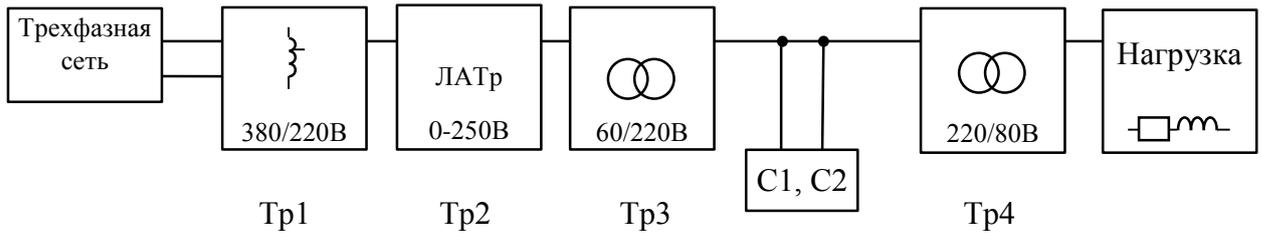


Рисунок 4.24 – Функциональная схема макета

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  $Tr4$ .

На рисунке 4.25 представлена фотография с компонентами макета. Обозначения на фотографии:

- 1 – трансформатор  $Tr1$ ;
- 2 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТр)  $Tr2$ ;
- 3 – трансформатор  $Tr3$ ;
- 4 – трансформатор нагрузки  $Tr4$ ;
- 5 – активно-индуктивная нагрузка в виде коллекторного двигателя мощностью 60 Вт с номинальной частотой оборотов  $8000 \text{ мин}^{-1}$ ;
- 6 – программируемое реле ПР200;
- 7 – блок питания 24 В для ПР200;
- 8 – конденсаторы  $C1$  и  $C2$ ;
- 9 – оптосимисторы
- 10 – датчики напряжения для регулятора ПР200;
- 11 – токовый шунт для осциллографа;
- 12 – USB-осциллограф.
- 13 – вольтметр;

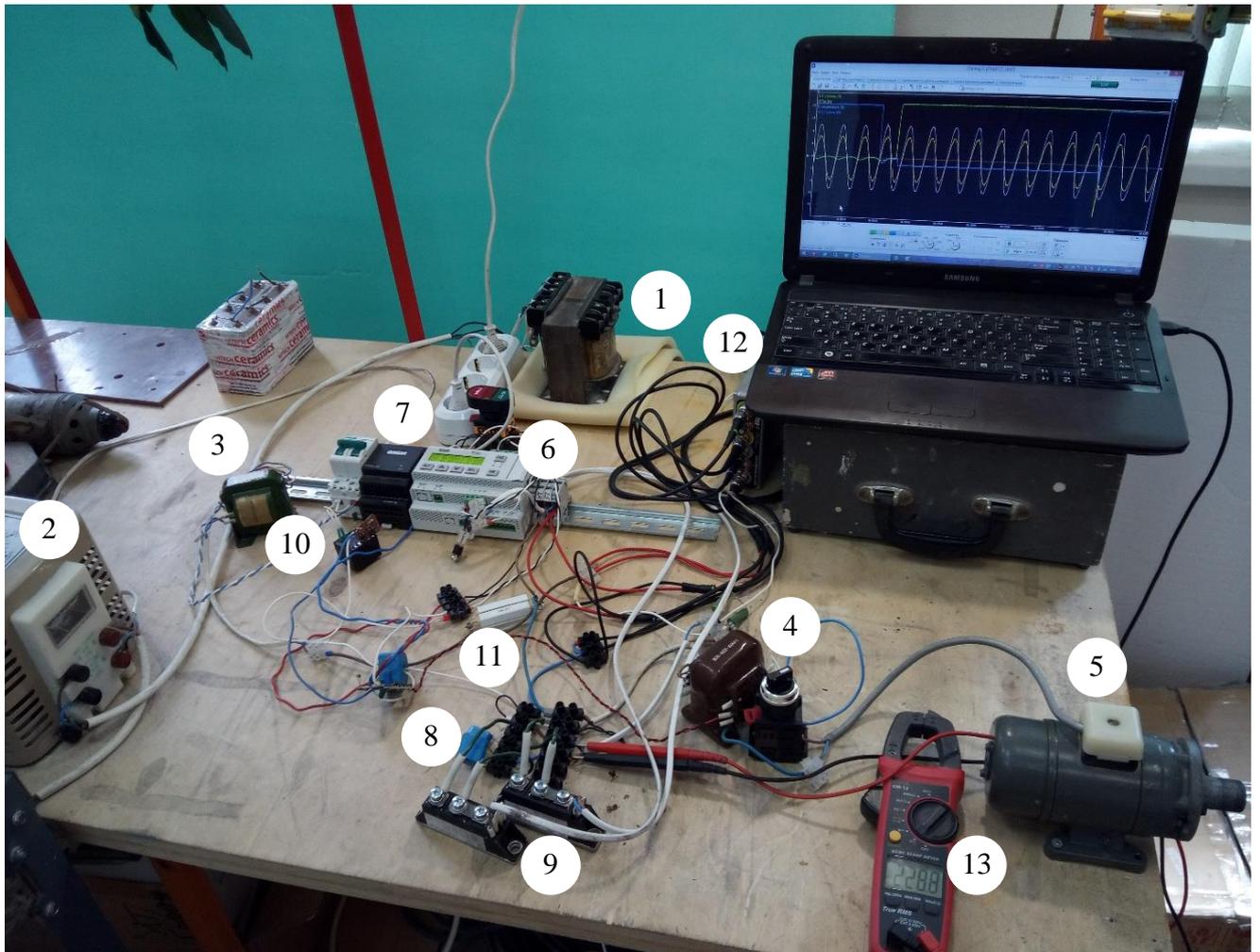


Рисунок 4.25 – Фотография натурального макета с компенсатором на ПР200.

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 осциллограммах, представленных далее (рисунки 4.26, 4.29 – 4.34), показана работа коммутатора и соответствующие изменения угла сдвига фаз напряжения и тока в точке присоединения конденсаторной батареи. Для всех осциллограмм 1 – соответствует состоянию подключения конденсатора 1 ступени  $C_1$  (1), 2 – конденсатора 2 ступени  $C_2$  (4).

На рисунке 4.26 показана осциллограмма, для которой выбран такой масштаб, чтобы было видно угол сдвига между напряжением и током.

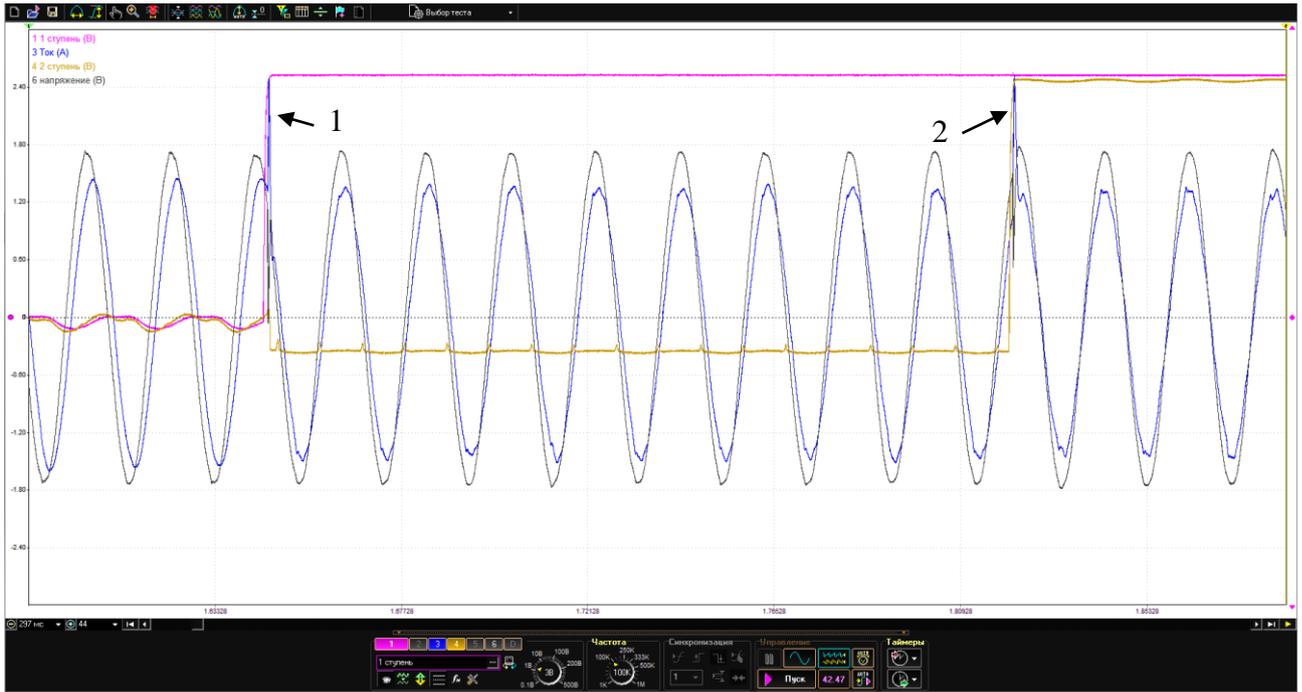


Рисунок 4.26 – Компенсация РМ нагрузки конденсаторами  $C1$  и  $C2$ .

По осциллограммам видно, что конденсаторы ступеней  $C1$  и  $C2$  подобраны так, что каждый из них компенсирует примерно половину индуктивной мощности нагрузки. При включении конденсатора 1 ступени  $C1$  уменьшается угол сдвига фаз между током и напряжением, а при включении конденсатора 2 ступени  $C2$  этот угол становится практически нулевым. Соответственно снижению реактивной составляющей тока снижается и падение напряжения на трансформаторе  $Tr3$ .

На показанных осциллограммах отчётливо 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, показанная на рисунке 4.27.

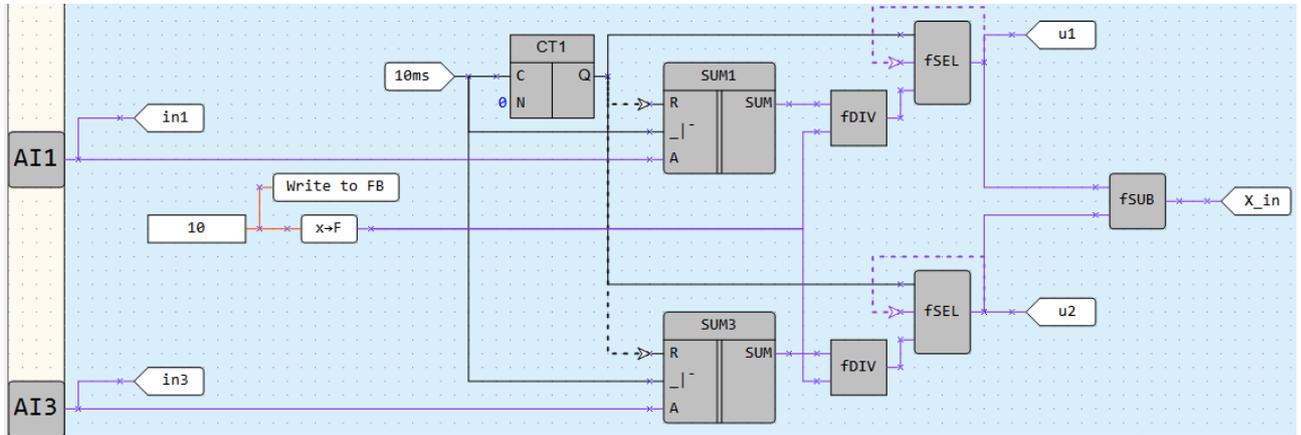


Рисунок 4.27 – Усреднение сигналов о величине синусоидального напряжения

Усреднение производится с помощью счетчика *CT1* по 10 выборкам, сделанным со входов *AI1* ( $U_{\text{сети}}$ ) и *AI3* ( $U_{\text{нагр}}$ ) по раздельности с интервалом 10 мс. Таким образом имитируется реальный измеритель напряжения. Данная схема обуславливает запаздывание на 5 периодов.

Для приближения к реальному режиму коммутации *TCR* в программу был добавлен узел формирования ШИМ сигнала управления оптосимистором 1 ступени.

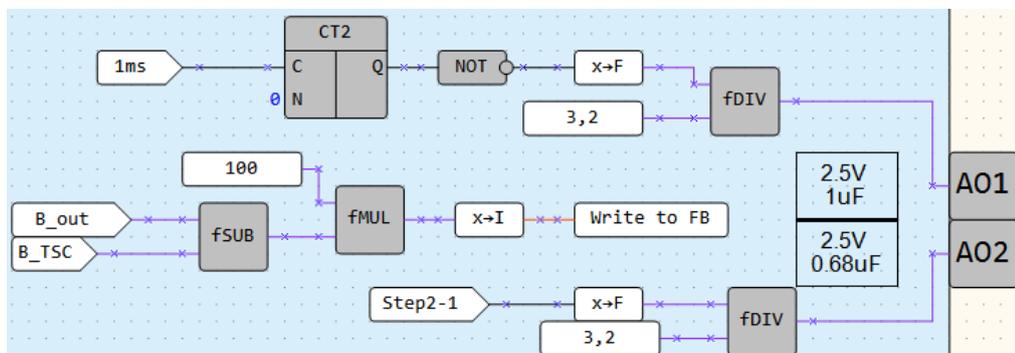


Рисунок 4.28 – ШИМ для 1 ступени *C1*

Скважность ШИМ определяется процентным соотношением по условию  $V_{TCR} = V_{out} - V_{TSC}$ . Счётчик  $CT2$  отсчитывает количество одномиллисекундных тактов по вычисленной скважности. В схеме ШИМ задействованы аналоговые выходы ПР200 в качестве источника напряжения для светодиодов оптосимисторов.

На рисунках 4.29 – 4.34 показаны осциллограммы различных режимов работы макета с регулятором на ПР200.

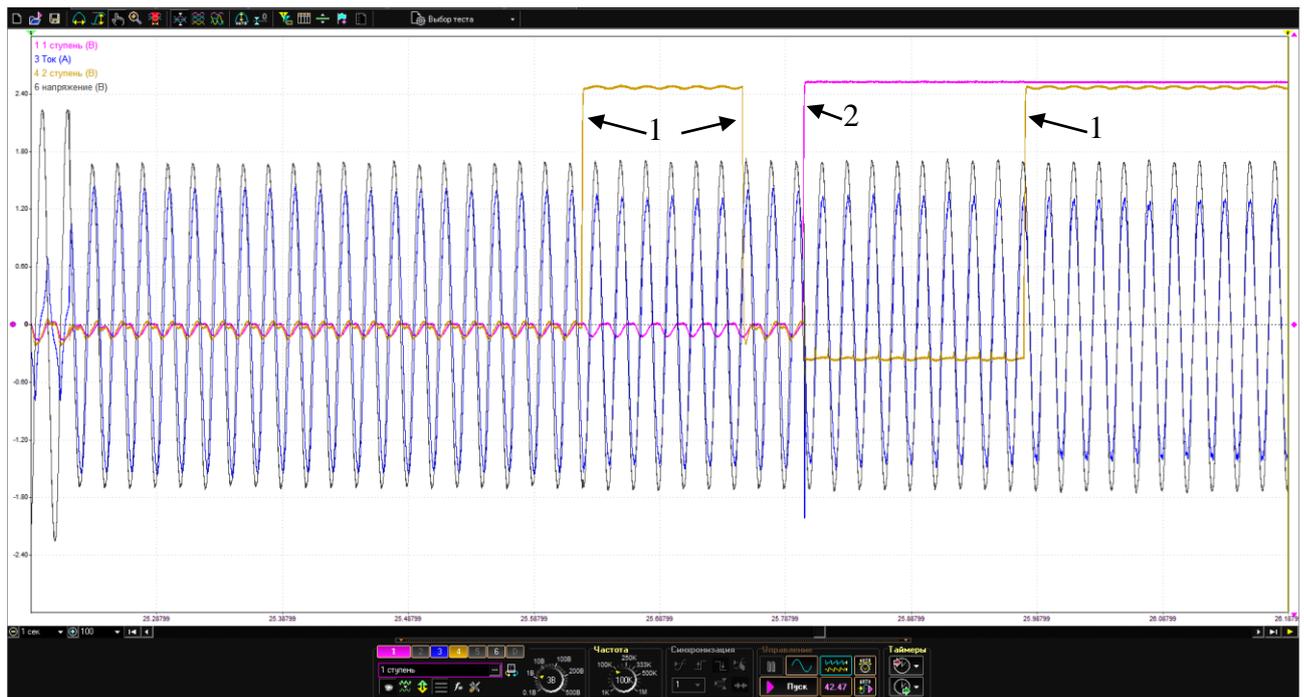


Рисунок 4.29 – Включение нагрузки и срабатывание коммутаторов для  $C1$  и  $C2$ .

По осциллограммам рисунка 4.29 видно, что при подключении нагрузки к сети программно-аппаратная реализация контроллера компенсирующего устройства на базе ПР200 обладает недостаточным быстродействием: от момента подключения нагрузки до срабатывания 1 ступени  $C1$  проходит 20 периодов напряжения, т.е. 400 мс. По фронтам и спадам сигналов (1) и (4) видно, что время переключения между ступенями не превышает 10 периодов (200 мс), что обусловлено работой схемы измерения напряжений с усреднением.

После окончания переходных процессов, регулятор становится более отзывчивым и время реакции на изменения нагрузки значительно уменьшается. Это видно на осциллограммах, представленных далее. По приведенным на рисунках

4.30 – 4.31 осциллограммам также видно указанное ранее быстрое действие ПР200 по аналоговым каналам:  $\Delta t = 33 \text{ мс}$ .

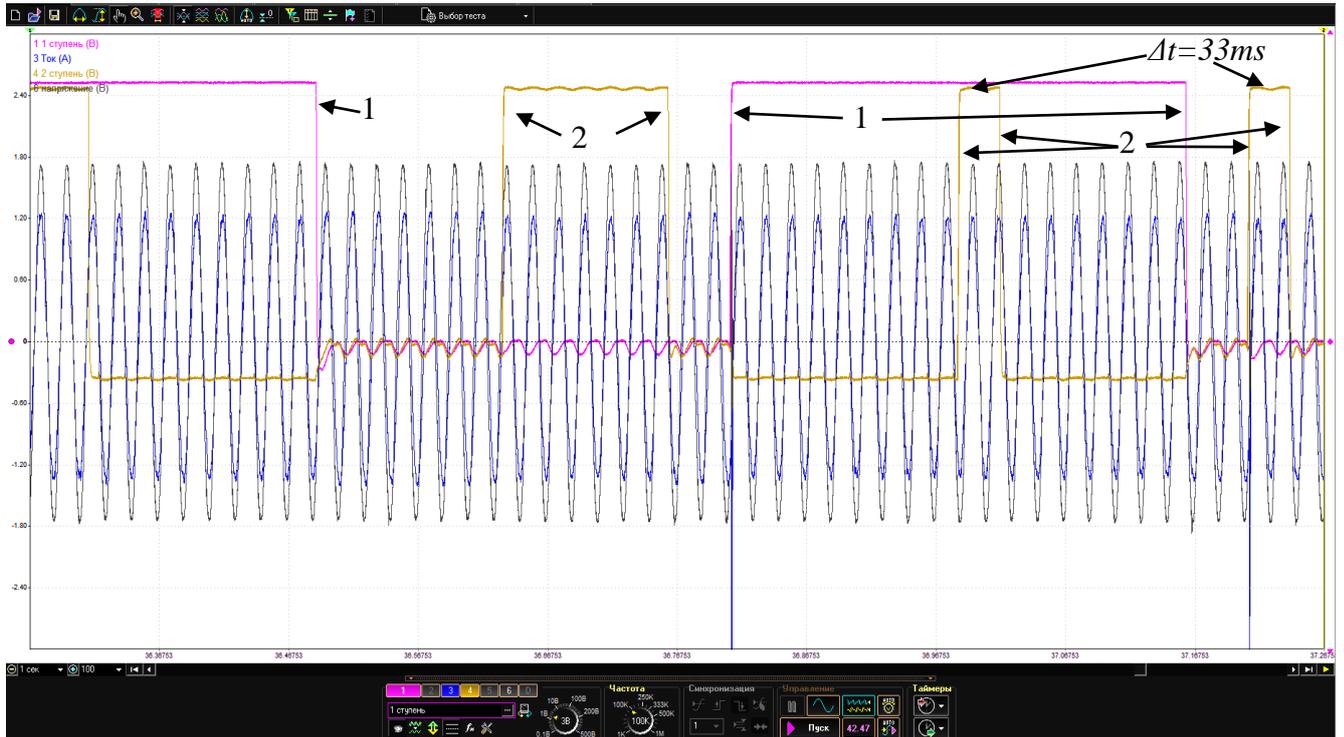


Рисунок 4.30 – Работа регулятора при незначительных колебаниях напряжения фаз сети.

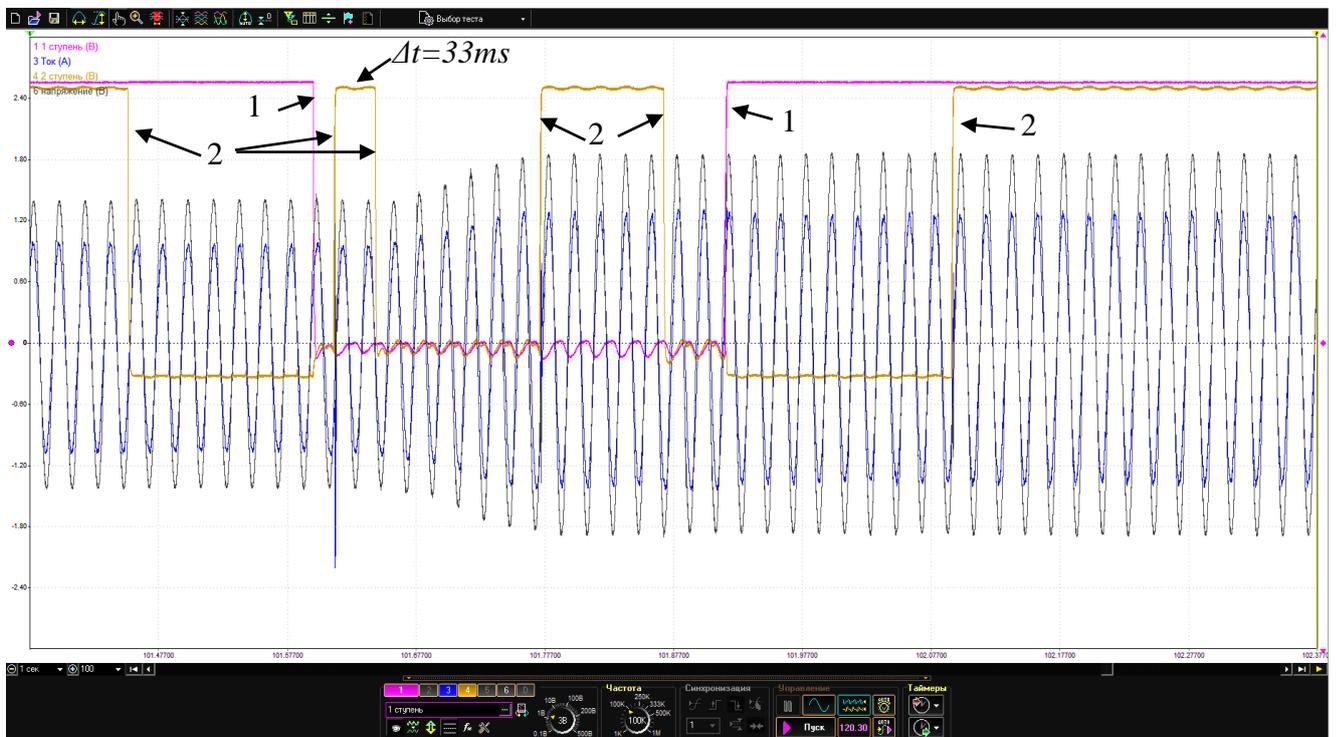


Рисунок 4.31 – Реакция на резкое возрастание напряжения после ЛАТра.

Приведенные осциллограммы показывают отсутствие видимого влияния величины изменения напряжений на быстродействие регулятора. Этот эффект доказывает, что быстродействие регулятора незначительно зависит от быстродействия интегратора (от величины  $Ki$ ) и определяется преимущественно общим быстродействием ПР200.

Приведенные на рисунках 4.32, 4.33 осциллограммы отражают реакцию регулятора на понижение напряжения с помощью ЛАТРа

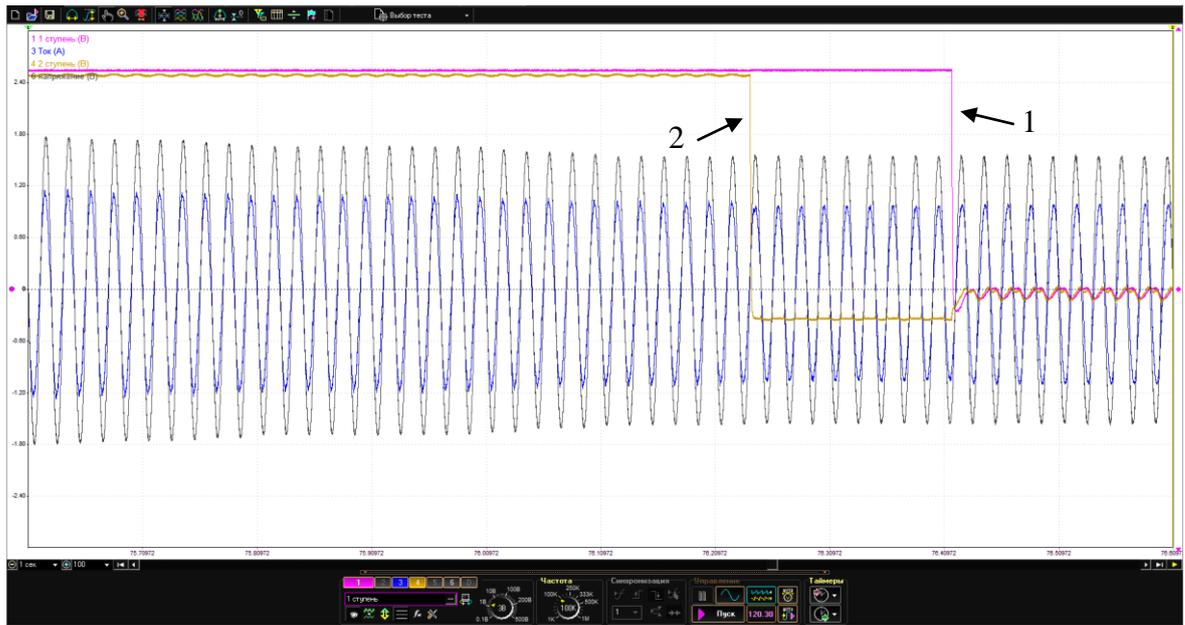


Рисунок 4.32 – Реакция на понижение напряжения в ходе переходного процесса

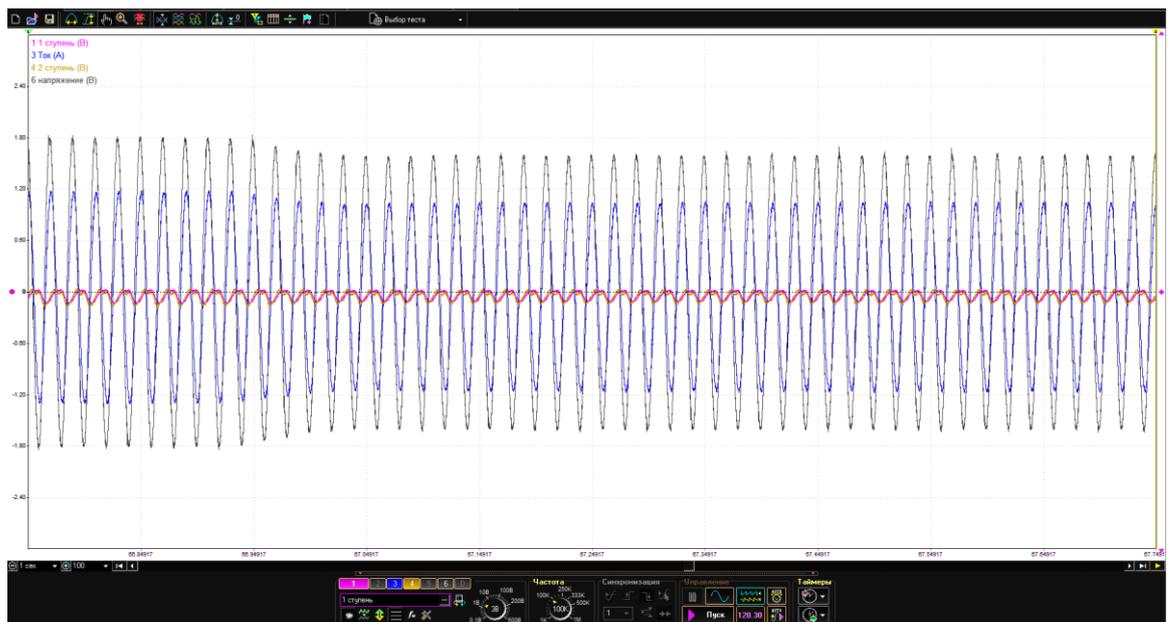


Рисунок 4.33 – Реакция на понижение напряжения после переходного процесса

Если переходный процесс еще не окончен, т.е. ошибка  $e > 0$  и включены ступени  $C1$  и  $C2$ , как на рисунке 4.32, то происходит уменьшение ошибки  $e \rightarrow 0$  и соответствующее ему отключение ступеней  $C1$  и  $C2$ . Если ступени были отключены, то понижение напряжения не вызывает включение ступеней.

Осциллограмма, представленная на рисунке 4.34, отражает работу регулятора по переключению ступеней при двух последовательных включениях нагрузки.

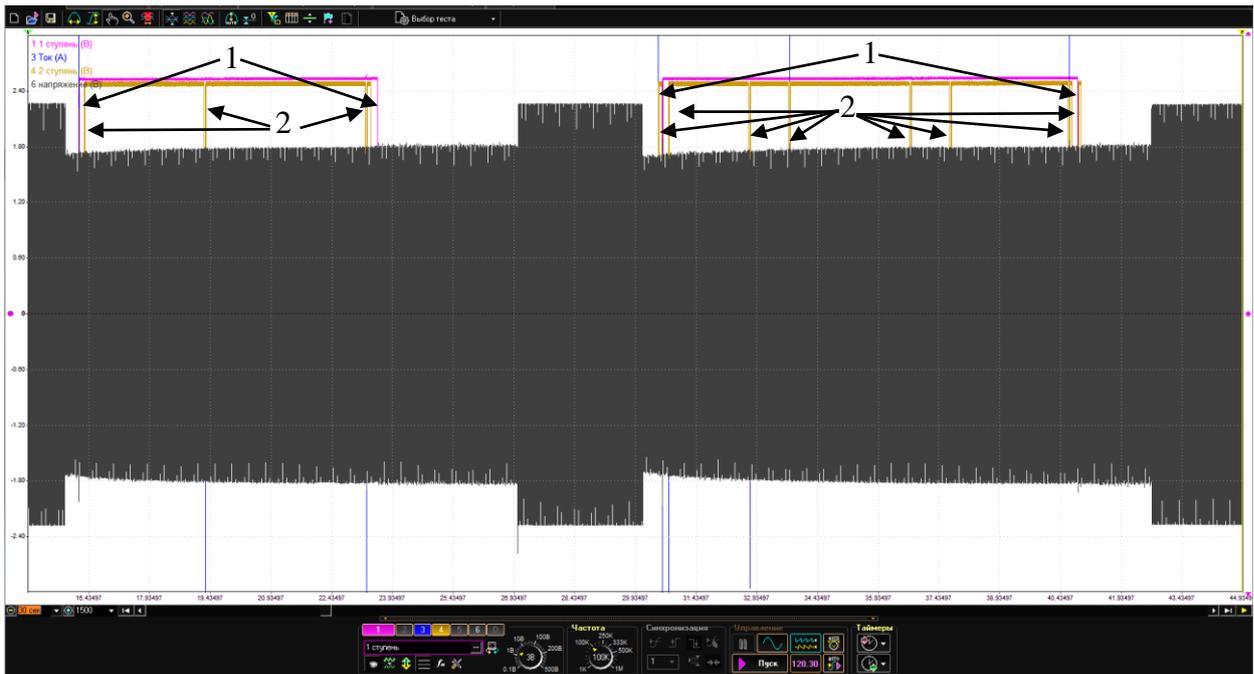


Рисунок 4.34 – Два полных цикла включения нагрузки в макете.

Видимые различия в длительности циклов регулирования объясняются работой макета в реальных производственных условиях от сети предприятия с характерными для этого колебаниями напряжения. Можно увидеть, что первое из показанных включение нагрузки макета имеет меньшую длительность переходного процесса, чем следующее. Это можно объяснить различными начальными условиями пуска, в частности, более высоким напряжением в сети в течении первого пуска.

## 4.5 Выводы по главе 4

1. Выполнена программно-аппаратная реализация нечеткого регулятора на программируемом реле отечественного производства ПР 200 (Овен). Показана принципиальная возможность применения неспециализированных аппаратных платформ для ограниченного круга задач, требующих управления средствами нечеткой логики.

2. Предложенный способ реализации нечеткого управления обеспечивает работу логики Мамдани при регулировании напряжения в сети переменного тока с активно-индуктивной нагрузкой.

3. Визуальное проектирование управляющей программы функциональными блоками и блоками математических операций упрощает построение и отладку программы за счёт наглядного представления внутреннего устройства программы и связей между ее компонентами. Однако функциональные блоки могут быть не оптимальны ввиду своей универсальности, а это отрицательно сказывается на быстродействии. Среда OwenLogic не позволяет осуществить трансляцию программы из представления в виде функциональных блоков в текст на ST-подобном языке программирования, потому оптимизация программы возможна только за счет минимизации количества операций и упрощения функций.

## 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 трансформатора 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  $\cos\varphi$  стремится к 1 с редкими падениями до 0.8 – 0.9.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abdelnasser A. Nafeh, Aya Heikal, Ragab A. El-Sehiemy, Waleed A.A. Salem, Intelligent fuzzy-based controllers for voltage stability enhancement of AC-DC micro-grid with D-STATCOM. Alexandria Engineering Journal, Volume 61, Issue 3, 2022, P. 2260-2293. DOI: 10.1016/j.aej.2021.07.012.

2. Biplab Bhattacharyya, Vikash Kumar Gupta, Fuzzy based evolutionary algorithm for reactive power optimization with FACTS devices. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 61, 2014, P. 39-47. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.03.008.

3. 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

4. Dinesh Shetty, Nagesh Prabhu, Analysis and Performance evaluation of Type 1 Fuzzy Reactive Current Controller with STATCOM. Energy Procedia, Volume 117, 2017. P. 551-558. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.145.

5 Hamid Rezaie, Mohammad Hossein Kazemi-Rahbar Enhancing voltage stability and LVRT capability of a wind-integrated power system using a fuzzy-based SVC. Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 22, Issue 3, 2019, P. 827-839. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.12.018.

6. Lu J., Nehrir M.H., Pierre D.A., A fuzzy logic-based adaptive damping controller for static VAR compensator. Electric Power Systems Research Volume 68, Issue 2, 2004, P. 113-118. DOI: 10.1016/S0378-7796(03)00160-3.

7. MatLab/demos/SimPowerSystems/FACTS Demos/SVC(detailed model), Power System Laboratory, IREQ Hydro-Quebec (Pierre Giroux, Gilbert Sybille)

8. Modi P.K., Singh S.P., Sharma J.D., Fuzzy neural network based voltage stability evaluation of power systems with SVC. Applied Soft Computing, Volume 8, Issue 1, 2008, P. 657-665. DOI: 10.1016/j.asoc.2007.05.004.

9. Qun Gu, Anupama Pandey, Shelli K Starrett, Fuzzy logic control schemes for static VAR compensator to control system damping using global signal. *Electric Power Systems Research*, Volume 67, Issue 2, 2003, P. 115-122. DOI: 10.1016/S0378-7796(03)00077-4.

10. Rastegar H., Abedi M., Menhaj M.B., Fathi S.H., Fuzzy logic based static VAR compensators for enhancing the performance of synchronous and asynchronous motor loads. *Electric Power Systems Research*, Volume 50, Issue 3, 1999, P. 191-204. DOI: 10.1016/S0378-7796(98)00140-0

11. 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.

12. Yamakawa T., Uchino E., Takayama M. An approach to designing the fuzzy if-then rules for fuzzy-controlled static var compensator (FCSVC) *Information Sciences* Volume 101, Issues 3–4, October 1997, P. 249-260. DOI: 10.1016/S0020-0255(97)00012-1

13. Алферов А.А. Влияние светодиодных источников света на содержание гармоник тока и напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий/ А.А. Алферов, Е.А. Якимов, О.Г. Широков, Т.В. Алферова // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого, 2016. №3. – С. 67–73.

14. Баран А.Н. Светодиодные источники света и их влияние на питающую сеть / А.Н. Баран, В.А. Пашинский, Л.А. Липницкий. // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2019; №4. С. 91–99.

15. Белкин Г.С. О постоянных величинах в обобщенном уравнении Касси-Майра для динамической вольт-амперной характеристики дуги // «Электричество». 2012. № 3. С. 19 – 22.

16. Бикеев Р.А. Моделирование электромагнитных процессов в трехфазных дуговых электропечах/ Р.А. Бикеев, В.С. Чередниченко // Электротехника №8 – 2015., с 32 – 39.

17. Вагин Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Учеб. пособие / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов / Нижегород. гос. техн. ун-т. Нижний Новгород, 2004. – 214 с.
18. Вагин Г.Я. «Электромагнитная совместимость дуговых печей и систем электроснабжения» / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеев №2(81). – 2010. С. 202 – 210.
19. Веников В.А. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах./ В.А. Веников, В.И. Идельчик, М.С. Лисеев. – М.: Энергоатомизда, 1985 г. 216 с.
20. Гетопанов А. Ю. Реакторно-тиристорное устройство на высокой стороне печного трансформатора для управления мощностью дуги // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 14 июня 2019 года. / А.Ю. Гетопанов, В.С. Климаш. // Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. – С. 87-92.
21. Глушков В.М. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. / В.М. Глушков, В.П. Грибин. – М., «Энергия», 1975г. – 104 с. (Б-ка электромонтера. Вып.429)
22. ГОСТ 32144-2013. Международный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с
23. ГОСТ Р МЭК 61131-7-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Контроллеры программируемые. Часть 7. Программирование нечеткого управления. – М.: Стандартинформ, 2017. – 48 с
24. Демидова Г.Л. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами / Г.Л. Демидова, Д.В. Лукичев. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.

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

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

27. Джагаров Н.Ф. Адаптивное управление поперечного управляемого компенсатора для улучшения устойчивости электроэнергетических систем / Н.Ф. Джагаров, Ж.Г. Гроздев // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2008. – № 4. – С. 51-62.

28. Елизаров В.А. Исследование гармонического состава тока в трехфазной электрической цепи с дугой / В.А. Елизаров, К.А. Елизаров, В.П. Рубцов // «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» № 3, 2013. С. 40 – 47.

29. Ерофеев В.А. Разработка математической модели физико-химических процессов в электродуговой сталеплавильной печи энергометаллургического комплекса непрерывного действия. / В.А. Ерофеев, Г.А. Дорофеев, А.В. Протопопов, С.К. Захаров, П.И. Маленко, Е.А. Протопопов, А.А. Арсеньева // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 9. – с. 215 – 226.

30. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятия. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с., ил.

31. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. / И.В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с., 74 ил.

32. Жежеленко И. В. Электромагнитная совместимость потребителей [Текст]: моногр. Жежеленко И. В., Шидловский А. К., Пивняк Г. Г. и др. – М.: Машиностроение, 2012. -351с.

33. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышения качества электроэнергии. – М.: Энергоатомиздат. – 224с., ил. – (Экономия топлива и электроэнергии)

34. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с

35. Журавлев Ю.П. «Комплексные решения проблем энергосбережения на металлургических предприятиях» / Ю.П. Журавлев, Г.В. Никифоров, Б.И. Заславец, В.К. Олейников // Главный энергетик №3. – 2011. С. 48 – 53.

36. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336с.

37. Ивекеев В.С. Повышение устойчивости работы электроприводов прокатных станов при провалах напряжения за счет применения статических тиристорных компенсаторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Ивекеев Владимир Сергеевич. – Магнитогорск, 2021. – 137 с.

38. Ильяшов В.П. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок. – М.-Л., издательство «Энергия», 1965. – 62 с.: ил. – (Б-ка электромонтера. Вып.186)

39. Карташев И.И. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.

40. Климаш В.С. Реакторно-тиристорное регулирующее и компенсирующее устройство для трансформаторных подстанций систем электроснабжения / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 342-353.

41. Компенсация реактивной мощности для экономии электроэнергии [электронный ресурс] / МИРКОН. Конденсаторные установки. – Режим доступа: <https://www.mircond.com/blog/kompensatsiya-reaktivnoy-moshchnosti-dlya-ekonomii-elektroenergii/>, свободный. (Дата обращения 18.07.2022 г.).

42. Костылева Е.М. Математическое моделирование напряженности электромагнитного поля, создаваемого дуговыми сталеплавильными печами трехфазного переменного тока / Автоматизированные технологии производства / №3(13) – 2016г., 56-59 с.

43. Корнилов Г.П. «Анализ энергетических режимов мощной электродуговой печи металлургического предприятия», Энергетические и электротехнические системы / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Н.М. Медведев, // Международный сборник научных трудов. Под ред. С.И. Лукьянова, Е.Г. Нешпоренко // Магнитогорск, 2019, с. 33 – 40.

44. Корнилов Г.П. Моделирование электрического контура дуговой печи / Г.П. Корнилов, А.Ю. Мещеряков, А.А. Николаев и др // Электротехнические системы и комплексы. 2006. №12. с. 210 - 217.

45. Корнилов Г. П. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов, И.А. Якимов. //Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013г., №1 76-82 с.

46. Кочкин В.И. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. / В.И. Кочкин, О.П. Нечаев. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002 г. – 248 с.

47. Кравец Е.В. Анализ понятия «нечеткая логика», методы и области применения нечеткой логики / «Цифра» - реальность, меняющая мир: готовность Российской экономики к новым правилам игры: Материалы Национальной научно-практической конференции, Москва, 23 апреля 2019 года. / Е.В. Кравец, О.С. Солодова. – Москва: Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт «Центр», 2019. – С. 110-112.

48. Кудинов Ю.И., Нечеткое моделирование и управление в технических системах: учебное пособие для вузов / Ю.И. Кудинов, Ф.Ф. Пащенко, И.Ю. Кудинов, А.Ф. Пащенко. – Санкт-Петербург: Лань, 2020 – 208 с.

49. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений – 2-е изд. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
50. Кудинов Ю.И. Нечеткие регуляторы и системы управления / Ю.И. Кудинов, И.Н. Дорохов, Ф.Ф. Пащенко // Проблемы управления. 2004. №3. 2 – 14 с.
51. Кулумбаев Э.Б. Метод расчета магнитного поля в магнитогидродинамических моделях электрической дуги / Э.Б. Кулумбаев, Т.Б. Никуличева. // Математическое моделирование, 2012. Т. 24, №10. С. 40-50.
52. **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.
53. **Купова А.В.** Моделирование дуговой печи с управляемыми электродами в Matlab/ **А.В. Купова**, Е.В. Лановенко, В.А. Соловьёв, А.С. Гудим // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2019. Т. 1. № 4 (40). С. 22-27.
54. **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.
55. **Купова А.В.** О возможностях реализации SmartGrid в объединенных сетях / **А.В. Купова**, В.А. Соловьев // 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.
56. **Купова А.В.** Особенности автоматической настройки ПИ-регулятора в моделях Simscape / Электротехнические комплексы и системы : Материалы Международной научно-практической конференции, Уфа, 24 октября 2018 года. / А.В. Купова, А.В. Купов – Уфа: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2018. С. 26-29.

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

58. **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).

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

60. **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.

61. Лапшин И.В. Автоматизация дуговых печей. М., 2004 – 166 с

62. Лукашенко А.В. Схемное моделирование и оперативный контроль электротермических процессов в дуговых печах / А.В. Лукашенко, А.Н. Грачев, А.А. Фомичев. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 9. Ч.1 С. 90 90 – 97.

63. Львова Э.Л. «Расчет высших гармоник тока и реактивной мощности дуговых сталеплавильных печей» / Э.Л. Львова, А.Н. Миронова. // Вестник Чувашского университета №1. – 2019. С. 59 – 66.

64. Львова Э.Л. «Экспериментальные исследования влияния группы дуговых печей на питающее напряжение» / Э.Л. Львова, А.Н. Миронова. // Вестник Чувашского университета №3. – 2018. С. 67 – 78.

65. Марков Н.А. Распределение электрического тока в ванне дуговой печи. / П.П. Чердовских, Н.А. Марков / М. – Л., изд-во «Энергия», 1966. – 104с

66. Марков Н.А. Эксплуатационный контроль электрических параметров дуговых электропечей. / Н.А. Марков, О.В., Баранник // М., «Энергия», 1973. – 104 с.
67. Марков Н.А. Электрические цепи и режимы дуговых электроустановок. М., «Энергия», 1975. – 20 с.
68. Маслов Д.В. Разработка алгоритмов и систем управления дуговыми сталеплавильными печами, снижающих поломки электродов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.19.10 / Маслов Дмитрий Владимирович. – Москва, 2014. – 20 с.
69. Матура Р.М. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / Под ред. Р.М. Матура: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 160с.
70. Минеев А.Р. Моделирование электротехнологических процессов и установок. / А.Р. Минеев, А.И. Коробов, М.Я. Погребисский. – М.: «Компания Спутник+», 2004. – 124 с.
71. Миронов Ю.М. Анализ влияния инерционности электрической дуги на характеристики дуговых печей. // Электричество, 2017. №5. С. 62-66. DOI:10.24160/0013-5380-2017-5-62-66
72. Миронов Ю.М. Повышение экономической эффективности дуговых сталеплавильных печей с помощью оптимизации их энергопотребления / Ю.М. Миронов, А.Н. Миронова. // Вестник Чувашского университета– 2018. – №3. С. 79 – 92.
73. Миронов Ю.М. Разработка математической модели несимметричной цепи ДСП / Ю.М. Миронов, А.П. Журавлев. // Вестник Чувашского университета. 2009. №2. С. 132-139.
74. Михадаров Д.Г. Исследование особенностей характеристик электротехнологических дуг в дуговых печах: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / Михадаров Денис Георгиевич. – Чебоксары, 2015. – 123 с.
75. Мишта, П.В. Нечеткая логика - современный путь развития теории управления / П.В. Мишта, П.Г. Бызов, Е.В. Васильева. Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – № 1(61). – С. 139-142.

76. Ненахов, А.И. Совмещение функций компенсации реактивной мощности, симметрирования и активной фильтрации токов при построении алгоритма управления устройством СтатКом / А.И. Ненахов, С.И. Гамазин // Электричество. – 2016. – № 8. – С. 46-52.

77. Николаев А.А. Исследование существующих математических моделей электрической дуги для моделирования процессов отключения печного трансформатора дуговой печи с помощью автоматических выключателей / А.А. Николаев, Ф.Ф. Урманова, П.Г. Тулупов. // сб. тр. конф. «Электротехнические комплексы и системы» / Уфа: ГОУ ВПО «УГАТУ», 2015 г. – с. 196-202.

78. Николаев А.А. Исследование усовершенствованной системы управления активных выпрямителей преобразователей частоты в составе электроприводов клетей прокатного стана / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, О.С. Малахов. // Электротехнические системы и комплексы, №4 (53), С. 62 – 68, 2021 – DOI 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-62-68.

79. Николаев А.А. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов четырехклетьевого стана ППП ХП ЧЕРМК ПАО «Северсталь» с питающей сетью 10 кВ / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов, М.Ю. Афанасьев, К.А. Шахбиева, В.А. Лаптова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования, – 2021, Т.12 №1, С. 65 – 74.

80. Николаев А.А. Оценка влияния режимов работы электроприводов прокатного стана с ПЧ-АВ на качество напряжения питающей сети 10 кВ / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, №5, С. 41 – 50, 2021.

81. Николаев А.А. Повышение устойчивости преобразователей частоты с активными выпрямителями при провалах напряжения и параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, В.А. Лаптова, // Электротехнические системы и комплексы, – 2020. – №3(48), С. 33 – 40. DOI 10.18503/2311-8318-2020-3(48)-33-40.

82. Николаев А.А. «Сравнительный анализ режимов регулирования статического тиристорного компенсатора в системе электроснабжения дуговой сталеплавильной печи высокой мощности» / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.В. Анохин, // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия. Энергетика., Т. 16, Т. 2, С. 35–46, 2016

83. О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии. Приказ Минэнерго России от 23 июня 2015 г. № 380 [электронный ресурс] / электронный фонд правовых и нормативно-технических документов КОДЕКС. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420285270>, свободный. (Дата обращения 18.07.2022 г.)

84. Овчаренко Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: Учебник для вузов / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с.

85. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2015. – 592 с.

86. Павлов Г.М. «Автоматическая частотная разгрузка энергосистем» Второе издание. – РАО «ЕЭС России» Центр подготовки кадров энергетики (СЗВ АО «ГВЦ Энергетики»), 2002. – 87 с.

87. Патент на полезную модель № 112532 U1 Российская Федерация, МПК H02J 3/18. Система управления статическим тиристорным компенсатором: № 2011130039/07: заявл. 20.07.2011: опубл. 10.01.2012 / В.М. Степанов, А.В. Фомин, Т.Ю. Чернова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тульский государственный университет" (ТулГУ).

88. Патент на полезную модель № 175561 U1 Российская Федерация, МПК H02J 3/12. Система управления статическим тиристорным компенсатором: № 2017116422: заявл. 11.05.2017: опубл. 11.12.2017 / А.А. Николаев, В.В. Анохин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования "Магнитогорский государственный технический университет им.Г.И. Носова". – 14 с

89. Патент на полезную модель № 180656 U1 Российская Федерация, МПК H02J 3/18. Система управления статическим тиристорным компенсатором: № 2017140682: заявл. 23.11.2017: опубл. 20.06.2018 / А.А. Николаев, В.С. Ивекеев, В.В. Анохин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова". – 12 с.

90. Патент № 2088015 С1 Российская Федерация, МПК H02J 3/18. Способ управления статическим тиристорным компенсатором реактивной мощности: № 94045246/07: заявл. 26.12.1994: опубл. 20.08.1997 / В.А. Кузьменко, В.В. Тропин; заявитель Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина. – 9с.

91. Разживин А.В. Математическое моделирование электрических параметров восстановительного периода плавки в дуговой сталеплавильной печи. / А.В. Разживин, О.В. Субботин. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 10. С. 313 – 321.

92. Садовой А.В. Исследование электрических процессов в дуговых электро-сталеплавильных печах / А.В. Садовой, К.В. Яшина, // Научный вестник ДГМА №1 (4Е), 2009. С. 156 – 163.

93. Салтыков В.М. Выбор рационального режима работы комплекса "линия разлива металла - дуговая сталеплавильная печь" / В.М Салтыков, П.А. Шастин. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2009. – № 1(23). – С. 167 -174.

94. Салтыков В.М., Структурный анализ электропотребления линии разлива чугуна и энергосберегающие режимы ее работы / В.М Салтыков, П.А. Шастин. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2008. – № 2(22). – С. 177-185.

95. Салтыков А.В. Электромагнитная совместимость параллельных дуговых сталеплавильных печей с системой электроснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Салтыков Александр Валентинович. – Самара, 2006. – 22 с.

96. Сериков В.А. Акустические и вибрационные характеристики сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / Сериков Виктор Андреевич. – Новосибирск, 2016. – 147 с.

97. Сисоян Г.А., Электрическая дуга в электрической печи. 3-е изд., М., «Металлургия», 1974, 304 с,

98. Системы электроснабжения промышленных предприятий со специфическими нагрузками [электронный ресурс] / профессиональные справочные системы ТЕХЭСПЕРТ. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200081141>, свободный. (Дата обращения 26.11.2017 г.)

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

100. Соловьев В.А. Исследование влияния параметров дуги ДСП на качество питающего напряжения / В.А. Соловьев, **А.В. Купова**. // 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.

101. Соловьев В.А. Моделирование системы энергоснабжения «ГПП – дуговая печь» со статическим компенсатором / В.А. Соловьев, А.В. Купов, **А.В. Купова**, Л.С. Бардеева. // 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.

102. Соловьев В.А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами: учеб. пособие. / В.А. Соловьев, С.П. Черный. – Владивосток: Дальнаука, 2019. – 267 с.

103. Среда программирования OWEN Logic. Руководство пользователя. Версия 1.41. – 151 с.

104. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах: Пер. тематического сб. рабочей группы Исследовательского Комитета №38 СИГРЭ / Под. ред. И.И. Карташева. – М.: Энергоатомиздат, 1990 г. – 174 с. – (Энергетика за рубежом).

105. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности для дуговых сталеплавильных печей [электронный ресурс] / Nidex, АО «Нидек АСИ ВЭИ». – Режим доступа: <http://nidex-asi-vei.ru/uploads/file/svc4arc-furnaces.pdf>, свободный. (Дата обращения 18.07.2022 г.).

106. Ус А.Г. Электроснабжение промышленных предприятий и гражданских зданий: Учебное пособие. / А.Г. Ус, Л.И. Евминов. – Мн.: НПООО «ПИОН», 2002. – 457 с.

107. Устройство многофункциональное управляющее ПР200. Овен. Руководство по эксплуатации. 04.2022 версия 1.69 – 76 с.

108. Федоров А.А. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для вузов. / А.А. Федоров, В.В. Каменева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.

109. Федоров А.А. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для вузов. / А.А. Федоров, Э.М. Ристхейн. – М.: Энергия, 1981. – 360 с.

110. Фомин А.В. Построение имитационной модели дуговой сталеплавильной печи. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. №3. С. 315 - 321

111. Черненко А.Н. Динамическая модель печной дуги в MatLab (Simulink) / А.Н. Черненко, В.В. Вахнина, С.Г. Мартынова. // Вектор науки ТГУ. 2015. № 2 (32-1). С. 58 – 64.

112. Черненко А.Н. Разработка методики расчета высших гармоник тока и напряжения дуговых электропечей в точке общего присоединения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Черненко Алексей Николаевич. – Москва, 2011. – 20 с.

113. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

114. Шурыгин Ю.А. Повышение эффективности электроснабжения сталеплавильных производств обеспечением совместимости электрооборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Шурыгин Юрий Анатольевич. – Липецк, 2011. – 19 с.

115. Электротехнологические промышленные установки: Учебник для вузов / И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский; Под редакцией А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.

116. Ячиков И.М. Математическое моделирование электровихревых течений и тепломассопереноса в токонесущих расплавах металлургических агрегатов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.18/ Ячиков Игорь Михайлович. – Челябинск, 2009. – 39 с.

117. Паранчук Я.С. Моделювання та дослідження режимів трифазної системи регулювання потужності дуг дугової сталеплавильної печі на основі нейрорегулятора у миттєвих координатах. / Я.С. Паранчук Я.С., А.Б. Мацигін. // Електротехнічні та комп'ютерні системи № 15(91), 2014. с. 190 – 193.

118. Хрестін Р.М. Моделювання електричних параметрів дуги дугової сталеплавильної печі. ISSN 2074-272X. Електротехніка і Електромеханіка. 2015. №4. с. 45 – 48.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Влияние переменной нагрузки на параметры системы электроснабжения без  
статического тиристорного компенсатора**

Реактор – 2, трансформатор – 18,  $X_L = 1.7$  мОм

$R, \text{ мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.6977	0.717	0.8172	0.8894	0.929	0.9511	0.9643	0.9875	0.9944	0.9982
	$\alpha_U$	-1.006	-6.037	-10.28	-9.609	-8.228	-7.031	-6.094	-3.65	-2.417	-1.325
	I	2.256	2.163	1.758	1.371	1.092	0.8963	0.7561	0.4172	0.2543	0.1125
	$\alpha_I$	-115.8	-103.3	-81.43	-67.76	-59.34	-53.85	-50.06	-41.26	-37.22	-34.03
ДСП	U	0.4539	0.5069	0.7	0.8234	0.8879	0.9231	0.9439	0.9803	0.9911	0.9971
	$\alpha_U$	-2.121	-14.76	-21.26	-18.28	-15.05	-12.58	-10.75	-6.19	-3.961	-2.007
	I	2.256	2.163	1.757	1.37	1.091	0.8956	0.7555	0.4166	0.2538	0.112
	$\alpha_I$	-115.8	-103.3	-81.4	-67.72	-59.58	-53.77	-49.96	-41.07	-36.9	-33.29

Реактор – 2, трансформатор – 18,  $X_L = 5$  мОм

$R, \text{ мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.8315	0.8462	0.8572	0.8871	0.9135	0.9336	0.9483	0.9803	0.9914	0.9976
	$\alpha_U$	-0.278	-1.45	-4.057	-5.175	-5.415	-5.239	-4.915	-3.408	-2.356	1.319
	I	1.236	1.135	1.132	1.005	0.8785	0.7667	0.6735	0.4017	0.2508	0.1122
	$\alpha_I$	-117.9	-111.6	-96.56	-84.8	-75.71	-68.79	-63.49	-49.56	-42.44	-36.36
ДСП	U	0.7006	0.6574	0.7497	0.8049	0.8522	0.8875	0.9128	0.9671	0.9857	0.996
	$\alpha_U$	-0.1439	-3.735	-7.842	-9.771	-9.965	-9.45	-8.729	-5.789	-3.86	-1.996
	I	1.235	1.134	1.13	1.004	0.8774	0.7657	0.6725	0.401	0.2501	0.1117
	$\alpha_I$	-117.9	-111.6	-96.55	-84.77	-75.66	-68.72	63.41	-49.38	-42.13	-35.64

Реактор – 2, трансформатор – 18,  $X_L = 9$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.8912	0.8919	0.8981	0.9087	0.921	0.9329	0.9434	0.9742	0.9883	0.9969
	$\alpha_U$	-0.2379	-0.7901	-1.901	-2.727	-3.234	-3.482	-3.552	-3.015	-2.246	-1.307
	I	0.7987	0.7944	0.7684	0.7252	0.673	0.6187	0.5666	0.3753	0.244	0.1117
	$\alpha_I$	-118.8	-114.2	-104.5	-95.61	-87.85	-81.23	-75.66	-58.6	-48.51	-39.17
ДСП	U	0.8066	0.8079	0.8194	0.8391	0.8616	0.883	0.9018	0.9557	0.98	0.9947
	$\alpha_U$	-0.0645	-1.148	-3.307	-4.861	-5.768	-6.168	-6.239	-5.106	-3.672	-1.976
	I	0.7975	0.7932	0.7671	0.7239	0.6718	0.6175	0.5654	0.3743	0.2432	0.111
	$\alpha_I$	-118.8	-114.3	-104.5	-95.59	-87.81	-81.17	-75.59	-58.44	-48.21	-38.46

Реактор – 2, трансформатор – 18,  $X_L = 12$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.914	0.9143	0.9172	0.9228	0.93	0.9377	0.9451	0.9714	0.9863	0.9964
	$\alpha_U$	-0.2552	0.5926	-1.3	-1.891	-2.33	-2.62	-2.787	-2.701	-2.146	-1.296
	I	0.6313	0.6292	0.616	0.5931	0.5636	0.5306	0.4967	0.3528	0.2376	0.111
	$\alpha_I$	-119.1	-115.5	-107.7	-100.4	-93.64	-87.63	-82.35	-64.54	-52.81	-41.25
ДСП	U	0.8472	0.8477	0.8532	0.8635	0.8765	0.8904	0.9038	0.9505	0.9764	0.9938
	$\alpha_U$	-0.0994	-0.7464	-2.096	-3.208	-4.015	-4.531	-4.81	-4.548	-3.497	-1.957
	I	0.63	0.6279	0.6147	0.5918	0.5623	0.5293	0.4954	0.3517	0.2367	0.1104
	$\alpha_I$	-119.2	-115.6	-107.7	-100.4	-93.61	-87.59	-82.28	-64.38	-52.52	-40.55

Реактор – 4, трансформатор – 18,  $X_L = 1.7$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.7305	0.7464	0.8214	0.885	0.9237	0.9466	0.9607	0.9862	0.9939	0.9981
	$\alpha_U$	-0.7059	-4.513	-8.611	-8.67	-7.719	-6.737	-5.912	-3.616	-2.409	-1.324
	I	1.978	1.915	1.616	1.3	1.055	0.8756	0.7435	0.415	0.2538	0.1125
	$\alpha_I$	-116.3	-105.3	-85.07	-71.46	-62.64	-56.72	-52.56	-42.72	-38.12	-34.43
ДСП	U	0.3979	0.4486	0.6435	0.781	0.858	0.9018	0.9282	0.9751	0.9891	0.9966
	$\alpha_U$	-2.682	-16.76	-24.9	-21.98	-18.36	-15.46	-13.25	-7.649	-4.863	-2.409
	I	1.977	1.914	1.616	1.3	1.054	0.8749	0.7429	0.4144	0.2533	0.1119
	$\alpha_I$	-116.3	-105.3	-85.04	-71.42	-62.58	-56.65	-52.47	-42.52	-37.8	-33.7

Реактор – 4, трансформатор – 18,  $X_L = 5$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.8436	0.8462	0.8643	0.8899	0.9137	0.9326	0.9468	0.9793	0.991	0.9975
	$\alpha_U$	-0.2606	-1.45	-3.566	-4.679	-5.018	-4.948	-4.705	-3.357	-2.342	-1.317
	I	1.148	1.135	1.062	0.956	0.8448	0.744	0.6579	0.3983	0.2499	0.1122
	$\alpha_I$	-118.1	-111.6	-98.1	-86.79	-77.83	-70.87	-65.47	-50.91	-43.31	-36.76
ДСП	U	0.6504	0.6574	0.7038	0.7653	0.8196	0.8613	0.8918	0.9589	0.9824	0.9952
	$\alpha_U$	-0.3185	-3.735	-9.375	-11.76	-12.09	-11.54	-10.7	-7.136	-4.735	-2.395
	I	1.147	1.134	1.061	0.9549	0.8438	0.7431	0.657	0.3976	0.2493	0.1116
	$\alpha_I$	-118.1	-111.6	-98.08	-86.76	-77.78	-70.8	-65.38	-50.72	-43	-36.04

Реактор – 4, трансформатор – 18,  $X_L = 9$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.8964	0.8969	0.9023	0.9116	0.9227	0.9336	0.9435	0.9735	0.9879	0.9968
	$\alpha_U$	-0.2408	-0.7394	-1.753	-2.528	-3.028	-3.293	-3.39	-2.955	-2.228	-1.305
	I	0.7608	0.757	0.7344	0.6964	0.6498	0.6005	0.5525	0.3711	0.2429	0.116
	$\alpha_I$	-118.9	-114.5	-105.2	-96.66	-89.09	-82.58	-71.05	-59.78	-49.33	-39.57
ДСП	U	0.7683	0.7699	0.7832	0.8058	0.8318	0.8571	0.8794	0.945	0.9753	0.9936
	$\alpha_U$	-0.1376	-1.435	-4.024	-5.904	-7.017	-7.524	-7.63	-6.276	-4.499	-2.371
	I	0.7596	0.7559	0.7332	0.6952	0.6486	0.5994	0.5514	0.3701	0.2421	0.1109
	$\alpha_I$	-118.9	-114.5	-105.2	-96.64	-89.06	-82.52	-76.98	-59.61	-49.03	-38.85

Реактор – 4, трансформатор – 18,  $X_L = 12$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.9173	0.9175	0.9201	0.9251	0.9316	0.9387	0.9457	0.9711	0.986	0.9963
	$\alpha_U$	-0.2592	-0.5706	-1.226	-1.782	-2.205	-2.493	-2.667	-2.643	-2.125	-1.293
	I	0.6073	0.6054	0.5937	0.5731	0.5463	0.5161	0.4877	0.3484	0.2362	0.1109
	$\alpha_I$	-119.2	-115.7	-108.2	-101.1	-94.52	-88.63	-83.41	-65.57	-53.59	-41.64
ДСП	U	0.815	0.8157	0.8222	0.8343	0.8497	0.8661	0.8821	0.9387	0.9708	0.9924
	$\alpha_U$	-0.145	-0.9275	-2.56	-3.908	-4.894	-5.529	-5.878	-5.58	-4.279	-2.347
	I	0.6061	0.6042	0.5924	0.5718	0.5451	0.5149	0.4835	0.3473	0.2353	0.1103
	$\alpha_I$	-119.2	-115.7	-108.2	-101.1	-94.49	-88.58	-83.35	-65.41	-53.3	-40.94

Реактор – 6, трансформатор – 18,  $X_L = 1.7$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.7666	0.7766	0.8298	0.8827	0.9188	0.9418	0.9566	0.9845	0.9932	0.998
	$\alpha_U$	-0.4972	-3.295	-6.955	-7.585	-7.079	-6.35	-5.666	-3.568	-2.396	-1.323
	I	1.713	1.671	1.462	1.215	1.008	0.8481	0.7265	0.4119	0.2531	0.1124
	$\alpha_I$	-116.9	-107.3	-88.87	-75.59	-66.48	-60.14	-55.59	-44.53	-39.25	-34.94
ДСП	U	0.3445	0.3915	0.5819	0.73	0.8198	0.8735	0.9069	0.9679	0.9862	0.9959
	$\alpha_U$	-3.222	-18.71	-28.7	-26.1	-22.19	-18.88	-16.28	-9.459	-5.991	-2.913
	I	1.712	1.67	1.461	1.215	1.007	0.8475	0.7259	0.4114	0.2525	0.1119
	$\alpha_I$	-116.9	-107.3	-88.84	-75.54	-66.42	-60.07	-55.49	-44.33	-38.93	-34.2

Реактор – 6, трансформатор – 18,  $X_L = 5$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.8565	0.8584	0.8726	0.8937	0.9145	0.9319	0.9454	0.978	0.9904	0.9974
	$\alpha_U$	-0.2472	-1.237	-3.068	-4.141	-4.565	-4.601	-4.446	-3.289	-2.324	-1.315
	I	1.053	1.043	0.9859	0.899	0.8047	0.7162	0.6384	0.3938	0.2488	0.112
	$\alpha_I$	-118.2	-112.3	-99.78	-89.03	-80.28	-73.32	-67.82	-52.56	-44.4	-37.26
ДСП	U	0.5966	0.6041	0.6531	0.7197	0.7807	0.829	0.8653	0.9481	0.9779	0.9942
	$\alpha_U$	-0.5083	-4.453	-11.05	-14	-14.54	-13.99	-13.05	-8.795	-5.825	-2.896
	I	1.052	1.042	0.9849	0.898	0.8038	0.7153	0.6375	0.3931	0.2481	0.1115
	$\alpha_I$	-118.3	-112.3	-99.76	-89	-80.23	-73.25	-67.73	-52.38	-44.09	-36.54

Реактор – 6, трансформатор – 18,  $X_L = 9$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.9022	0.9027	0.9071	0.9151	0.9248	0.9347	0.9438	0.9728	0.9874	0.9967
	$\alpha_U$	-0.2448	-0.6864	-1.594	-2.31	-2.795	-3.075	-3.199	-2.88	-2.204	-1.302
	I	0.7179	0.7148	0.6956	0.6631	0.6225	0.5787	0.5354	0.3657	0.2413	0.1114
	$\alpha_I$	-118.9	-114.9	-106	-97.86	-90.55	-84.18	-78.7	-61.21	-50.36	-40.06
ДСП	U	0.725	0.7269	0.7418	0.7672	0.7968	0.826	0.8527	0.9314	0.9691	0.9922
	$\alpha_U$	-0.2223	-1.762	-4.841	-7.102	-8.47	-9.119	-9.282	-7.709	-5.525	-2.865
	I	0.7168	0.7137	0.6945	0.6619	0.6213	0.5776	0.5343	0.3648	0.2405	0.1108
	$\alpha_I$	-119	-114.9	-106	-97.83	-90.51	-84.12	-78.63	-61.04	-50.06	-39.35

Реактор – 6, трансформатор – 18,  $X_L = 12$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.921	0.9212	0.9235	0.9279	0.9336	0.94	0.9465	0.9707	0.9856	0.9961
	$\alpha_U$	-0.2641	-0.5467	-1.145	-1.66	-2.062	-2.347	-2.527	-2.571	-2.099	-1.29
	I	0.5797	0.5781	0.5678	0.5497	0.5259	0.4988	0.4703	0.3429	0.2345	0.1107
	$\alpha_I$	-119.2	-115.9	-108.7	-101.9	-95.55	-89.81	-84.69	-66.83	-54.56	-42.13
ДСП	U	0.778	0.7788	0.7864	0.8003	0.818	0.8371	0.8558	0.9239	0.9637	0.9907
	$\alpha_U$	-0.1992	-1.138	-3.099	-4.725	-5.925	-6.709	-7.149	-6.84	-5.248	-2.835
	I	0.5786	0.5769	0.5666	0.5485	0.5247	0.4976	0.4691	0.3419	0.2336	0.1101
	$\alpha_I$	-119.3	-115.9	-108.7	-101.9	-95.52	-89.76	-84.62	-66.67	-54.27	-41.23

Реактор – 2, трансформатор – 16,  $X_L = 1.7$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.7161	0.7418	0.8415	0.9075	0.9417	0.9602	0.9711	0.99	0.9955	0.9986
	$\alpha_U$	-0.9979	-5.831	-9.44	-8.561	-7.224	-6.13	-5.295	-3.173	-2.119	-1.192
	I	2.084	1.986	1.57	1.199	0.9438	0.7698	0.6468	0.3544	0.2156	0.09525
	$\alpha_I$	-115.7	-102.1	-79.11	-65.46	-57.3	-52.09	-48.52	-40.33	-36.57	-33.54
ДСП	U	0.4559	0.5058	0.6796	0.783	0.8344	0.8618	0.8778	0.9053	0.9133	0.9179
	$\alpha_U$	-1.994	-13.56	-18.95	-15.99	-13.04	-10.85	-9.247	-5.324	-3.426	-1.769
	I	2.265	2.158	1.706	1.303	1.025	0.8362	0.7026	0.3847	0.2339	0.1031
	$\alpha_I$	-115.7	-102.1	-79.1	-65.43	-57.27	-52.04	-48.46	-40.2	-36.36	-33.06

Реактор – 2, трансформатор – 16,  $X_L = 5$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.8506	0.8537	0.8749	0.9025	0.9262	0.944	0.9566	0.9837	0.993	0.9981
	$\alpha_U$	-0.2951	-1.56	-3.692	-4.641	-4.803	-4.614	-4.309	-2.974	-2.069	-1.186
	I	1.097	1.082	0.9967	0.8784	0.7618	0.6612	0.5784	0.3419	0.2127	0.095
	$\alpha_I$	-117.9	-110.6	-95.67	-83.61	-74.42	-67.52	-62.29	-48.7	-41.81	-35.88
ДСП	U	0.6756	0.6811	0.718	0.7646	0.8036	0.8322	0.8524	0.8948	0.9091	0.917
	$\alpha_U$	-0.1786	-2.772	-6.959	-8.587	-8.695	-8.205	-7.555	-4.993	-3.343	-1.76
	I	1.191	1.175	1.083	0.954	0.8273	0.718	0.628	0.371	0.2307	0.1028
	$\alpha_I$	-117.9	-110.6	-95.67	-83.59	-74.39	-67.47	-62.23	-48.58	-41.67	-35.4

Реактор – 2, трансформатор – 16,  $X_L = 9$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.9051	0.9057	0.9114	0.921	0.9321	0.9426	0.9519	0.9784	0.9903	0.9974
	$\alpha_U$	-0.2629	-0.7517	-1.732	-2.451	-2.884	-3.087	-3.136	-2.644	-1.978	-1.177
	I	0.6965	0.6926	0.6687	0.6293	0.5821	0.5334	0.487	0.3198	0.2071	0.0945
	$\alpha_I$	-118.8	-114.1	-104.1	-95.02	-87.11	-80.41	-74.82	-51.85	-47.91	-38.69
ДСП	U	0.7649	0.7659	0.7755	0.7919	0.8103	0.8278	0.8429	0.8857	0.9047	0.916
	$\alpha_U$	-0.1139	-1.059	-2.937	-4.279	-5.05	-5.38	-5.427	-4.419	-3.186	-1.743
	I	0.7563	0.752	0.726	0.6832	0.6318	0.5789	0.5285	0.3469	0.2245	0.1023
	$\alpha_I$	-118.9	-114.2	-104.1	-95.01	-87.09	-80.38	-74.77	-57.75	-47.72	-38.22

Реактор – 2, трансформатор – 16,  $X_L = 12$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.9255	0.9257	0.9284	0.9334	0.9398	0.9466	0.9531	0.9759	0.9886	0.9997
	$\alpha_U$	-0.2797	-0.5756	-1.195	-1.709	-2.087	-2.334	-2.472	-2.378	-1.893	-1.167
	I	0.5468	0.545	0.5331	0.5125	0.4861	0.4566	0.4266	0.3008	0.2017	0.094
	$\alpha_I$	-119.2	-115.5	-107.5	-99.98	-93.13	-87.04	-81.7	-63.88	-52.24	-40.77
ДСП	U	0.7982	0.7986	0.8031	0.8116	0.8222	0.8335	0.8444	0.8815	0.9018	0.9153
	$\alpha_U$	-0.1463	-0.7071	-1.876	-2.835	-3.527	-3.964	-4.196	-3.946	-3.039	-1.727
	I	0.5936	0.5916	0.5787	0.5562	0.5275	0.4955	0.4628	0.3262	0.2186	0.1017
	$\alpha_I$	-119.2	-115.5	-107.5	-99.98	-93.12	-87.02	-81.67	-63.78	-52.06	-40.32

Реактор – 4, трансформатор – 16,  $X_L = 1.7$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.7486	0.7661	0.8436	0.9075	0.9373	0.9567	0.9683	0.989	0.9951	0.9985
	$\alpha_U$	-0.7336	-4.496	-8.12	-8.561	-6.862	-5.925	-5.17	-3.15	-2.113	-1.191
	I	1.845	1.775	1.46	1.199	0.918	0.7555	0.6383	0.3529	0.2152	0.09521
	$\alpha_I$	-116.2	-104.1	-82.56	-65.46	-60.24	-54.6	-50.69	-41.57	-37.34	-33.88
ДСП	U	0.4034	0.4522	0.6317	0.783	0.8116	0.8459	0.8662	0.9016	0.9119	0.9175
	$\alpha_U$	-2.532	-15.55	-22.4	-15.99	-15.97	-13.36	-11.42	-6.569	-4.192	-2.109
	I	2.005	1.929	1.586	1.303	0.9973	0.8207	0.6933	0.3832	0.2335	0.1031
	$\alpha_I$	-116.2	-104.1	-82.54	-65.43	-60.2	-54.55	-50.63	-41.45	-37.13	-33.4

Реактор – 4, трансформатор – 16,  $X_L = 5$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.8606	0.8626	0.8803	0.9044	0.9262	0.9431	0.9555	0.9829	0.9926	0.998
	$\alpha_U$	-0.2818	-1.382	-3.306	-4.261	-4.507	-4.401	-4.157	-2.938	-2.06	-1.185
	I	1.026	1.014	0.943	0.841	0.737	0.6447	0.5673	0.3395	0.2121	0.095
	$\alpha_I$	-118.1	-111.2	-97.08	-85.41	-76.31	-69.36	-64.01	-49.85	-42.56	-36.22
ДСП	U	0.6323	0.6385	0.6793	0.732	0.7774	0.8115	0.836	0.8887	0.9067	0.9165
	$\alpha_U$	-0.3325	-3.386	-8.368	-10.39	-10.59	-10.04	-9.279	-6.147	-4.088	-2.098
	I	1.115	1.101	1.024	0.9134	0.8004	0.7001	0.6159	0.3684	0.2304	0.1028
	$\alpha_I$	-118.1	-111.2	-97.08	-85.39	-76.28	-69.31	-63.96	-49.74	-42.35	-35.74

Реактор – 4, трансформатор – 16,  $X_L = 9$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.9091	0.9096	0.9146	0.9232	0.9333	0.9431	0.9519	0.9779	0.99	0.9974
	$\alpha_U$	-0.2654	-0.7127	-1.618	-2.3	-2.729	-2.947	-3.017	-2.601	-1.965	-1.175
	I	0.6674	0.664	0.6429	0.6076	0.5648	0.5199	0.4767	0.3168	0.2063	0.0945
	$\alpha_I$	-118.9	-114.4	-104.8	-95.95	-88.21	-81.61	-76.03	-58.86	-48.62	-39.03
ДСП	U	0.733	0.7343	0.7456	0.7646	0.7862	0.807	0.8252	0.8775	0.9011	0.9152
	$\alpha_U$	-0.176	-1.315	-3.58	-5.209	-6.158	-6.574	-6.644	-5.425	-3.891	-2.078
	I	0.7247	0.721	0.698	0.6596	0.6131	0.5644	0.5174	0.3437	0.2236	0.1022
	$\alpha_I$	-118.9	-114.4	-104.8	-95.94	-88.2	-81.57	-75.99	-58.75	-48.43	-38.56

Реактор – 4, трансформатор – 16,  $X_L = 12$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.928	0.9282	0.9306	0.9351	0.941	0.9473	0.9535	0.9757	0.9883	0.9969
	$\alpha_U$	-0.2829	-0.5589	-1.139	-1.627	-1.994	-2.24	-2.384	-2.336	-1.879	-1.165
	I	0.5288	0.5271	0.5164	0.4976	0.4732	0.4459	0.4178	0.2977	0.2008	0.094
	$\alpha_I$	-119.2	-115.6	-107.9	-100.6	-93.91	-87.92	-82.63	-64.76	-52.91	-41.11
ДСП	U	0.7718	0.7724	0.7778	0.7879	0.8005	0.814	0.827	0.8724	0.8976	0.9143
	$\alpha_U$	-0.1844	-0.8662	-2.287	-3.454	-4.301	-4.84	-5.13	-4.834	-3.706	-2.058
	I	0.574	0.5721	0.5604	0.54	0.5135	0.4839	0.4533	0.3228	0.2176	0.1016
	$\alpha_I$	-119.2	-115.7	-107.9	-100.6	-93.9	-87.9	-82.6	-64.67	-52.73	-40.65

Реактор – 6, трансформатор – 16,  $X_L = 1.7$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.7803	0.7917	0.8488	0.9003	0.933	0.9528	0.9652	0.9878	0.9947	0.9984
	$\alpha_U$	-0.5397	-3.381	-6.753	-7.043	-6.399	-5.653	-5	-3.118	-2.105	-1.19
	I	1.612	1.565	1.336	1.084	0.8846	0.7366	0.6267	0.3509	0.2148	0.09517
	$\alpha_I$	-116.7	-106.1	-86.24	-72.64	-63.69	-57.62	-53.34	-43.12	-38.3	-34.31
ДСП	U	0.3525	0.3986	0.5781	0.708	0.7821	0.8247	0.8505	0.8964	0.9099	0.9171
	$\alpha_U$	-3.059	-17.52	-26.08	-23.17	-19.42	-16.38	-14.06	-8.117	-5.151	-2.536
	I	1.752	1.701	1.451	1.178	0.961	0.8001	0.6807	0.381	0.233	0.103
	$\alpha_I$	-116.7	-106.1	-86.23	-72.61	-63.65	-57.57	-53.27	-42.99	-38.09	-33.82

Реактор – 6, трансформатор – 16,  $X_L = 5$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.8706	0.8725	0.8867	0.9071	0.9265	0.9423	0.9543	0.982	0.9922	0.9979
	$\alpha_U$	-0.2711	-1.207	-2.903	-3.84	-4.163	-4.143	-3.969	-2.891	-2.047	-1.184
	I	0.9499	0.94	0.8827	0.7973	0.7071	0.6244	0.5532	0.3364	0.2114	0.095
	$\alpha_I$	-118.2	-111.9	-98.65	-87.46	-78.52	-71.54	-66.08	-51.28	-43.49	-36.64
ДСП	U	0.5852	0.592	0.6358	0.694	0.7458	0.7859	0.8153	0.8805	0.9034	0.9157
	$\alpha_U$	-0.5027	-4.058	-9.937	-12.44	-12.8	-12.23	-11.35	-7.574	-5.017	-2.523
	I	1.032	1.021	0.9587	0.8659	0.7678	0.678	0.6007	0.3651	0.2292	0.1027
	$\alpha_I$	-118.3	-111.9	-98.64	-87.44	-78.49	-71.5	-66.03	-51.16	-43.28	-36.17

Реактор – 6, трансформатор – 16,  $X_L = 9$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.9136	0.914	0.9183	0.9258	0.9348	0.9438	0.952	0.9773	0.9896	0.9973
	$\alpha_U$	-0.2686	-0.671	-1.493	-2.131	-2.551	-2.783	-2.875	-2.548	-1.948	-1.173
	I	0.6342	0.6313	0.613	0.5822	0.5442	0.5038	0.4641	0.313	0.2052	0.0943
	$\alpha_I$	-119	-114.7	-105.5	-97.03	-89.52	-83.02	-77.49	-60.1	-49.49	-39.44
ДСП	U	0.6965	0.6981	0.711	0.7326	0.7576	0.7819	0.8034	0.867	0.8964	0.9141
	$\alpha_U$	-0.2489	-1.609	-4.321	-6.291	-7.46	-7.993	-8.103	-6.662	-4.767	-2.497
	I	0.6887	0.6854	0.6656	0.6321	0.5907	0.5468	0.5037	0.3396	0.2225	0.1021
	$\alpha_I$	-119	-114.7	-105.5	-97.02	-89.5	-82.99	-77.45	-59.99	-49.3	-38.98

Реактор – 6, трансформатор – 16,  $X_L = 12$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.9308	0.931	0.9331	0.9372	0.9425	0.9483	0.9541	0.9754	0.988	0.9968
	$\alpha_U$	-0.2867	-0.5405	-1.076	-1.534	-1.885	-2.129	-2.28	-2.284	-1.86	-1.163
	I	0.5077	0.5062	0.4967	0.4799	0.4579	0.4331	0.4072	0.2937	0.1995	0.0938
	$\alpha_I$	-119.3	-115.8	-108.4	-101.3	-94.83	-88.96	-83.75	-65.85	-53.74	-41.52
ДСП	U	0.7411	0.7418	0.7482	0.7599	0.7747	0.7905	0.806	0.8609	0.8921	0.913
	$\alpha_U$	-0.2303	-1.053	-2.768	-4.184	-5.218	-5.885	-6.251	-5.924	-4.535	-2.472
	I	0.5511	0.5495	0.5391	0.5208	0.497	0.4699	0.4417	0.3185	0.2162	0.1014
	$\alpha_I$	-119.3	-115.9	-108.4	-101.3	-94.82	-88.94	-83.72	-65.76	-53.56	-41.06

Реактор – 2, трансформатор – 14,  $X_L = 1.7$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.7396	0.7663	0.8629	0.9221	0.9516	0.9672	0.9762	0.9918	0.9963	0.9988
	$\alpha_U$	-1.073	-5.592	-8.588	-7.603	-6.352	-5.367	-4.63	-2.785	-1.88	-1.085
	I	1.913	1.809	1.396	1.048	0.8181	0.6642	0.5566	0.3036	0.1845	0.08146
	$\alpha_I$	-115.3	-100.9	-77.06	-63.55	-55.68	-50.71	-47.33	-39.61	-36.08	-33.15
ДСП	U	0.4523	0.4983	0.6531	0.7402	0.7822	0.8042	0.8169	0.8388	0.8453	0.849
	$\alpha_U$	-1.609	-12.29	-16.92	-14.1	-11.43	-9.492	-8.085	-4.668	-3.024	-1.59
	I	2.248	2.126	1.64	1.232	0.9611	0.7802	0.6538	0.3565	0.2165	0.09537
	$\alpha_I$	-115.3	-100.9	-77.06	-63.54	-55.66s	-50.68	-47.3	-39.54	-35.96	-32.88

Реактор – 2, трансформатор – 14,  $X_L = 5$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.8675	0.8705	0.8903	0.9155	0.9367	0.9532	0.9633	0.9863	0.9941	0.9984
	$\alpha_U$	-0.3326	-1.471	-3.36	-4.162	-4.269	-4.079	-3.798	-2.62	-1.838	-1.08
	I	0.9727	0.9582	0.8781	0.7686	0.6627	0.5727	0.4994	0.2933	0.1821	0.1813
	$\alpha_I$	-117.8	-110.2	-94.84	-82.57	-73.34	-66.48	-61.32	-48.03	-41.33	-35.49
ДСП	U	0.6481	0.6527	0.6841	0.7236	0.7561	0.7796	0.7961	0.8304	0.8419	0.8483
	$\alpha_U$	-0.0668	-2.396	-6.139	-7.566	-7.642	-7.198	-6.621	-4.382	-2.951	-1.582
	I	1.143	1.126	1.032	0.9029	0.7784	0.6726	0.5865	0.3443	0.2136	0.0951
	$\alpha_I$	-117.8	-110.2	-94.85	-82.57	-73.33	-66.47	-61.3	-47.97	-41.22	-35.23

Реактор – 2, трансформатор – 14,  $X_L = 9$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.917	0.9176	0.9227	0.9314	0.9413	0.9506	0.9587	0.9817	0.9918	0.9979
	$\alpha_U$	-0.2931	-0.725	-1.587	-2.214	-2.584	-2.752	-2.786	-2.34	-1.761	-1.072
	I	0.6093	0.6058	0.5839	0.5482	0.5056	0.4621	0.421	0.2447	0.1774	0.0809
	$\alpha_I$	-118.8	-114	-103.7	-94.48	-86.47	-79.73	-74.12	-57.26	-47.45	-38.3
ДСП	U	0.7239	0.7247	0.7326	0.7462	0.7615	0.7759	0.7883	0.8231	0.8383	0.8475
	$\alpha_U$	-0.0651	-0.9026	-2.567	-3.755	-4.433	-4.722	-4.762	-3.882	-2.815	-1.568
	I	0.7157	0.7115	0.6858	0.6437	0.5937	0.5426	0.4943	0.3224	0.2081	0.0946
	$\alpha_I$	-118.8	-114	-103.8	-94.49	-86.47	-79.72	-74.11	-57.21	-47.35	-38.05

Реактор – 2, трансформатор – 14,  $X_L = 12$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.9352	0.9354	0.9378	0.9423	0.9479	0.954	0.9597	0.9735	0.9903	0.9975
	$\alpha_U$	-0.3057	-0.5653	-1.107	-1.555	-1.883	-2.093	-2.209	-2.112	-1.689	-1.064
	I	0.476	0.4743	0.4636	0.4451	0.4214	0.3952	0.3686	0.2585	0.1728	0.0804
	$\alpha_I$	-119.1	-115.4	-107.2	-99.62	-92.69	-86.54	-81.16	-63.35	-51.8	-40.39
ДСП	U	0.7517	0.752	0.7556	0.7625	0.7713	0.7806	0.7894	0.8197	0.8361	0.847
	$\alpha_U$	-0.1143	-0.6086	-1.64	-2.486	-3.096	-3.481	-3.686	-3.471	-2.686	-1.553
	I	0.559	0.557	0.5444	0.5226	0.4948	0.464	0.4327	0.3033	0.2027	0.0941
	$\alpha_I$	-119.2	-115.4	-107.3	-99.63	-92.69	-86.54	-81.15	-63.3	-51.71	-40.14

Реактор – 4, трансформатор – 14,  $X_L = 1.7$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.7672	0.7861	0.8636	0.9184	0.948	0.9644	0.9741	0.991	0.996	0.9988
	$\alpha_U$	-0.8231	-4.442	-7.556	-7.09	-6.091	-5.222	-4.542	-2.769	-1.876	-1.084
	I	1.709	1.634	1.31	1.011	0.7997	0.6543	0.5507	0.3027	0.1843	0.08143
	$\alpha_I$	-115.8	-102.8	-80.28	-66.58	-58.27	-52.9	-49.22	-40.68	-36.73	-33.44
ДСП	U	0.4042	0.4501	0.6132	0.7136	0.7646	0.7921	0.8083	0.8361	0.8443	0.8488
	$\alpha_U$	-2.148	-14.24	-20.13	-17.12	-14.02	-11.69	-9.971	-5.738	-3.68	-1.882
	I	2.008	1.92	1.539	1.187	0.9395	0.7685	0.6469	0.3553	0.2162	0.09535
	$\alpha_I$	-115.8	-102.8	-80.27	-66.57	-58.25	-52.88	-49.18	-40.61	-36.62	-33.17

Реактор – 4, трансформатор – 14,  $X_L = 5$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.8751	0.8775	0.8944	0.9169	0.9366	0.9515	0.9623	0.9858	0.9939	0.9983
	$\alpha_U$	-0.3199	-1.327	-3.057	-3.871	-4.047	-3.921	-3.686	-2.594	-1.831	-1.08
	I	0.917	0.9048	0.8365	0.7402	0.6442	0.5606	0.4914	0.2916	0.1817	0.1812
	$\alpha_I$	-118	-110.8	-96.13	-84.19	-75.03	-68.11	-62.83	-49.02	-41.97	-35.78
ДСП	U	0.611	0.6163	0.6517	0.6968	0.735	0.7632	0.7832	0.8257	0.8401	0.8479
	$\alpha_U$	-0.2107	-2.964	-7.427	-9.189	-9.329	-8.819	-8.129	-5.376	-3.59	-1.872
	I	1.077	1.063	0.9827	0.8695	0.7567	0.6584	0.577	0.3423	0.2132	0.0951
	$\alpha_I$	-118	-1110.8	-96.13	-84.19	-75.02	-68.09	-62.81	-48.96	-41.86	-35.52

Реактор – 4, трансформатор – 14,  $X_L = 9$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.92	0.9205	0.9251	0.933	0.9422	0.951	0.9587	0.9813	0.9916	0.9978
	$\alpha_U$	-0.2945	-0.6944	-1.499	-2.098	-2.467	-2.647	-2.698	-2.309	-1.752	-1.071
	I	0.587	0.5838	0.5642	0.5317	0.4926	0.4521	0.4134	0.2725	0.1768	0.0808
	$\alpha_I$	-118.8	-114.2	-104.3	-95.31	-87.46	-80.78	-75.19	-58.13	-48.05	-38.59
ДСП	U	0.6973	0.6984	0.7078	0.7238	0.7419	0.7591	0.774	0.8166	0.8356	0.8469
	$\alpha_U$	-0.1215	-1.133	-3.144	-4.584	-5.416	-5.775	-5.83	-4.752	-3.42	-1.854
	I	0.6895	0.9857	0.6626	0.6244	0.5785	0.5309	0.4853	0.3198	0.2074	0.0945
	$\alpha_I$	-118.9	-114.2	-104.3	-95.32	-87.45	-80.78	-75.18	-58.08	-17.95	-38.34

Реактор – 4, трансформатор – 14,  $X_L = 12$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.937	0.9372	0.9394	0.9436	0.9488	0.9545	0.96	0.9793	0.9902	0.9974
	$\alpha_U$	-0.308	-0.5524	-1.065	-1.493	-1.812	-2.022	-2.143	-2.081	-1.679	-1.063
	I	0.4622	0.4607	0.4509	0.4338	0.4118	0.3873	0.3621	0.2562	0.1722	0.0803
	$\alpha_I$	-119.2	-115.5	-107.6	-100.2	-93.37	-87.31	-81.98	-64.11	-52.37	-40.67
ДСП	U	0.73	0.7304	0.7348	0.7432	0.7537	0.7648	0.7755	0.8125	0.8328	0.8462
	$\alpha_U$	-0.1485	-0.7505	-2.005	-3.035	-3.78	-4.252	-4.504	-4.24	-3.26	-1.837
	I	0.5429	0.541	0.5295	0.5094	0.4835	0.4546	0.4251	0.3006	0.2019	0.094
	$\alpha_I$	-119.2	-115.6	-107.6	-100.2	-93.38	-87.31	-81.97	-64.07	-52.28	-40.43

Реактор – 6, трансформатор – 14,  $X_L = 1.7$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.7946	0.8073	0.8666	0.9154	0.9444	0.9613	0.9716	0.9901	0.9957	0.9987
	$\alpha_U$	-0.629	-3.438	-6.448	-6.468	-5.755	-5.029	-4.423	-2.747	-1.87	-1.084
	I	1.507	1.455	1.212	0.9636	0.7758	0.6409	0.5427	0.3013	0.184	0.0814
	$\alpha_I$	-116.3	-104.8	-83.79	-70.08	-61.35	-55.57	-51.53	-42.02	-37.56	-33.81
ДСП	U	0.3565	0.4008	0.5674	0.6804	0.7417	0.776	0.7965	-0.8323	0.8428	0.8485
	$\alpha_U$	-2.686	-16.21	-23.64	-20.62	-17.11	-14.35	-12.28	-7.071	-4.503	-2.247
	I	1.771	1.71	1.424	1.132	0.9114	0.7529	0.6375	0.3537	0.2158	0.09531
	$\alpha_I$	-116.3	-104.8	-83.79	-70.06	-61.33	-55.54	-51.49	-41.95	-37.44	-33.53

Реактор – 6, трансформатор – 14,  $X_L = 5$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.8834	0.8854	0.8993	0.9187	0.9367	0.9508	0.9613	0.9851	0.9936	0.9983
	$\alpha_U$	-0.3086	-1.181	-2.732	-3.542	-3.785	-3.729	-3.548	-2.56	-1.822	1.079
	I	0.5554	0.8456	0.789	0.7066	0.6217	0.5456	0.4812	0.2894	0.1812	0.0812
	$\alpha_I$	-118.1	-111.4	-97.59	-86.07	-77.02	-70.05	-64.66	-50.26	-42.76	-36.14
ДСП	U	0.51	0.5759	0.6146	0.6652	0.7093	0.7427	0.7669	0.8195	0.8376	0.8474
	$\alpha_U$	-0.3721	-3.597	-8.883	-11.06	-11.32	-10.76	-9.955	-6.61	-4.388	-2.236
	I	1.005	0.9934	0.9269	0.8301	0.7303	0.6408	0.565	0.3398	0.2125	0.095
	$\alpha_I$	-118.1	-111.4	-97.59	-86.07	-77.01	-70.03	-64.63	-50.2	-42.66	-35.88

Реактор – 6, трансформатор – 14,  $X_L = 9$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.9236	0.924	0.928	0.935	0.9433	0.9515	0.9588	0.9809	0.9913	0.9977
	$\alpha_U$	-0.2965	-0.6609	-1.401	-1.967	-2.33	-2.522	-2.591	-2.27	-1.74	-1.07
	I	0.5611	0.5583	0.5411	0.5123	0.477	0.44	0.404	0.2698	0.1761	0.0807
	$\alpha_I$	-118.9	-114.5	-105	-96.29	-88.62	-82.04	-76.48	-59.21	-48.81	-38.95
ДСП	U	0.6666	0.668	0.6789	0.6973	0.7184	0.7387	0.7565	0.8084	0.832	0.8462
	$\alpha_U$	-0.1883	-1.402	-3.816	-5.56	-6.581	-7.036	-7.119	-5.826	-4.174	-2.213
	I	0.6591	0.6558	0.6355	0.6016	0.5602	0.5166	0.4777	0.3166	0.2065	0.0945
	$\alpha_I$	-118.9	-114.5	-105	-96.29	-88.62	-82.04	-76.47	-59.16	-48.71	-38.7

Реактор – 6, трансформатор – 14,  $X_L = 12$  мОм

$R, \text{мОм}$		0.1	1	3	5	7	9	11	21	35	80
35	U	0.9392	0.9394	0.9414	0.9451	0.9499	0.9552	0.9604	0.9791	0.9899	0.9974
	$\alpha_U$	-0.3106	-0.5378	-1.016	-1.421	-1.729	-1.938	-2.064	-2.043	-1.665	-1.061
	I	0.4461	0.4447	0.4358	0.4203	0.4002	0.3776	0.3542	0.2533	0.1713	0.0802
	$\alpha_I$	-119.2	-115.7	-108	-100.8	-94.19	-88.23	-82.97	-65.06	-53.09	-41.03
ДСП	U	0.7044	0.705	0.7103	0.7201	0.7325	0.7457	0.7585	0.8034	0.8285	0.8452
	$\alpha_U$	-0.19	-0.9188	-2.437	-3.688	-4.597	-5.179	-5.493	5.187	-3.974	-2.192
	I	0.5239	0.5222	0.5118	0.4935	0.4699	0.4433	0.4157	0.2973	0.2008	0.0939
	$\alpha_I$	-119.2	-115.7	-108.1	-100.8	-94.19	-88.23	-87.96	-65.02	-53	-40.78

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»  
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

к.т.н., доцент Галунин С.А.

2022 г.



АК1

О внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Куповой Анастасии Викторовны «Нечеткие алгоритмы управления компенсирующим устройством в системе электроснабжения металлургического предприятия» внедрены в учебный процесс СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при обучении студентов направления 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника» по программе обучения – «Энергоэффективные электрические сети и системы с интеллектуальным управлением»

В частности, на лекционных и практических занятиях рассматриваются результаты анализа влияния переменной нагрузки на показатели качества электроэнергии. При изучении современных систем управления силовыми устройствами разбираются разработанные автором алгоритмы нечеткого управления компенсатором в системе электроснабжения с переменной нагрузкой. Также на практических занятиях рассматривается разработанный автором принцип реализации нечеткого регулятора на базе оборудования отечественного производства.

Зав. кафедрой  
«Теоретические основы электротехники»  
д.т.н., профессор

Соловьева Е.Б.

Декан факультета электротехники и автоматики  
к.т.н., доцент

Скакун А.Д.

## Комсомольский-на-Амуре государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновационной  
работе КнАГУ

\_\_\_\_\_ /Космынин А.В./

" 19 /11/ 2022 г.



АКТ

о внедрение в учебный процесс

Комиссия в составе председателя: декана ФЭУ доцента Гудима А.С. и членов комиссии: зав.каф. ЭПАПУ доцента Черного С.П., зав каф. УИПП доцента Горькавого М.А.

Составили настоящий акт в том, что научные результаты диссертационной работы Куповой А.В. " Нечеткие алгоритмы управления компенсирующим устройством в системе электроснабжения металлургического предприятия" используются в учебном процессе кафедры ЭПАПУ по направлениям 27.04.04 «Управление в технических системах» и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Вид внедренных результатов:

1. Программно-аппаратный комплекс нечеткого регулятора на базе программируемого логического контроллера отечественного производителя в виде лабораторного практикума по дисциплинам "Искусственный интеллект в задачах управления" направления 27.04.04 и «Интеллектуальные системы управления электроприводами» направления 13.04.02 кафедры ЭПАПУ КнАГУ.

\_\_\_\_\_/Гудим А.С./

\_\_\_\_\_/Черный С.П./

\_\_\_\_\_/Горькавый М.А./

УТВЕРЖДАЮ

Главный энергетик ООО «Амурсталь»

/Антонов С.А./

2022 г.

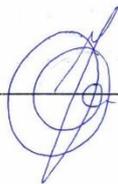


АКТ

о внедрение результатов диссертационной работы  
Куповой Анастасии Викторовны

Подписавшийся ниже, начальник отдела АСУ ТП, Урасов Д.В. подтверждает, что результаты, полученные в диссертационной работе Куповой Анастасии Викторовны на тему «Нечеткие алгоритмы управления компенсирующим устройством в системе электроснабжения металлургического предприятия» могут быть использованы на предприятиях металлургической отрасли, путем применения теоретических и практических данных, для алгоритмического и программного обеспечения интеллектуальной системы управления статическим тиристорным компенсатором.

Начальник отдела АСУ ТП

 /Урасов Д.В./