

На правах рукописи



Шачнев Олег Ярославович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРОИЗВОДСТВ С РЕЗКОПЕРЕМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Липецк – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, доцент Зацепина Виолетта Иосифовна.

Официальные оппоненты:

Грачева Елена Ивановна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО КГЭУ);

Виноградов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Электро- и энергоснабжения и электробезопасности» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ).

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

Защита диссертации состоится «30» октября 2018 года в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.108.01 при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская 30, первый корпус, ауд. 601.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.stu.lipetsk.ru при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Автореферат разослан « 24 » августа 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В.И. Бойчевский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: В основе рыночной экономики любого развитого или динамически развивающегося государства лежит необходимость в постоянной модернизации всех линий производств. Высокие показатели экономической и технологической эффективности предприятия, а также его конкурентоспособность заключаются в высокой надежности всех элементов системы, бесперебойности питания и качестве электроэнергии. При обеспечении высоких показателей качества электроэнергии можно максимально снизить затраты на производственные (энергетические) нужды, что безусловно повлияет на конкурентоспособность предприятия. Таким образом, можно решить вопросы как технологического характера, так и экономического. Важной отраслью в России является металлургия, и именно металлургические предприятия имеют в своём составе наиболее мощные электроприёмники. Для них характерны резкопеременные нагрузки, приводящие к ощутимым негативным последствиям, как в экономическом плане (увеличение удельных затрат на единицу продукции), так и в производственной сфере (ухудшение качества электроэнергии с последующим снижением уровня надёжности оборудования). Множество исследований показывают, что в металлургических производствах эффективно использовать современные компенсирующие системы типа СТАТКОМ. Однако в настоящее время не решена проблема блокировки его входных ключей при возникновении эксплуатационных коротких замыканий в дуговых печах. В связи с этим наиболее тяжёлый электрический режим проходит без компенсации, что повышает производственные издержки и противоречит пункту 8 (энергосбережение в перечне критических технологий) в приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники в Российской Федерации в соответствии с указом Президента РФ от 07.07.2011 г., следовательно, обеспечение эффективного функционирования электротехнических комплексов с резкопеременными нагрузками является актуальной задачей.

Целью работы является обеспечение эффективного функционирования электротехнических комплексов, содержащих нагрузки резкопеременного характера за счет выявления и компенсации негативных воздействий.

Идея работы заключается в определении и минимизации негативных воздействий в системах с резкопеременными нагрузками, за счет применения нового способа деблокировки входных ключей компенсирующей установки электротехнического комплекса «ДСП – СТАТКОМ».

Задачи работы:

1. Анализ специфических нагрузок систем электроснабжения с целью определения влияния возмущений на функционирование электротехнических комплексов промышленных производств.

2. Определение способа выявления амплитудной и частотной составляющих колебаний нагрузки, приводящих к кратковременным нарушениям функционирования компенсирующей установки.

3. Определение способа деблокировки входных ключей компенсирующего устройства с целью его функционирования при эксплуатационном коротком замыкании в рабочем пространстве дуговой печи.

4. Разработка программного комплекса для ЭВМ, позволяющего в режиме реального времени обеспечить эффективное функционирование электротехнических комплексов без ущерба технологического процесса.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам Паспорта специальности 05.09.03:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

2. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

Объект и предмет исследования: электротермические установки, специфические резкопеременные нагрузки, режим работы электротехнической установки, средства компенсации негативных факторов, влияющих на качество электроэнергии, электротехнический комплекс «ДСП – СТАТКОМ».

Методы исследования и аппаратура. Решение поставленных задач достигалось с применением методов теоретических основ электротехники, статистического анализа, интегральных преобразований сигналов. Имитационное моделирование выполнено в программной среде Matlab Simulink 2014a, а анализ сигналов проводился в подпрограммном пакете Wavelet Toolbox.

Научная новизна.

Работа содержит следующие новые научные результаты:

1. Разработана имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП – СТАТКОМ», отличающаяся реализацией в системе управления нового способа деблокировки входных ключей компенсирующей установки.

2. Разработан новый способ выявления и минимизации негативных возмущений при функционировании электротехнического комплекса «ДСП – СТАТКОМ», отличающийся совместным применением индикаторов Боллинджера и вейвлет-обработки кривой изменения параметров режима, позволяющий идентифицировать эксплуатационные короткие замыкания и сформировать управляющий сигнал деблокировки входных ключей компенсирующей установки.

3. Разработан программный комплекс для ЭВМ, позволяющий выбрать наиболее рациональный режим работы электроприемника и отличающийся тем, что анализирующий блок программного комплекса на основании статистических данных посылает сигнал системе управления электроприемника с целью корректировки входных электрических параметров для обеспечения максимального коэффициента полезного действия электрической дуги.

Достоверность научных результатов. Достоверность результатов подтверждается адекватной сходимостью результатов имитационного моделирования с данными, полученные в реальных производственных условиях.

Реализация работы. Основные результаты диссертационной работы были отражены в итоговых отчетах следующих научно-исследовательских проектов:

- 14-48-03629 р_центр_а «Оптимизация динамики и энергосбережение в электротехнических комплексах металлургических производств» (РФФИ);
- 7430ГУ/2015 «Разработка программно-аппаратного комплекса по анализу электрических характеристик» (Фонд содействия инновациям);
- 17-48-480083 р_а «Оптимизация динамики и энергосбережение в электротехнических комплексах территориально-промышленных кластеров Липецкой области» (РФФИ).

Программы для ЭВМ с № 2014616662, № 2014616663, № 2014616664 внедрены в учебный процесс ЛГТУ. Основные результаты, представленные в диссертации, используются в АО «Лимак».

Научные положения, выносимые на защиту:

- имитационная модель, отражающая электрическое состояние электротехнического комплекса «ДСП – СТАТКОМ» учитывающая процессы блокировки и деблокировки входных ключей компенсирующей установки в случае резкого наброса мощности;
- метод определения негативных возмущений, снижающих эффективность функционирования электротехнических комплексов «ДСП – СТАТКОМ» посредством совместного использования индикаторов Боллинджера и методов вейвлет-декомпозиции снятых электрических сигналов;
- метод определения эксплуатационного короткого замыкания в рабочем пространстве дуговой печи системой управления СТАТКОМ, позволяющий при резком набросе мощности сохранять работоспособность компенсирующего устройства;
- программный комплекс для ЭВМ, позволяющий отражать процесс расплава металла в печи с последующим анализом получаемых электрических характеристик.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Выявлены негативные возмущения при работе дуговой печи, влияющие на функционирование систем управления электротехнического комплекса «ДСП – СТАТКОМ».
2. Обеспечена минимизация негативных последствий в системе электропитания со специфическими нагрузками при резких набросах мощности.
3. Разработаны имитационные модели и программы для ЭВМ позволяющие выбрать рациональный режим работы электропечной установки.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции МЦИИ Омега Сайнс (г. Уфа, 2014 г.), Международной научной конференции к 80-летию ОАО «НЛМК» (г. Липецк, 2014 г.), XII Международная научная конференция 15-17.10.14 (г. Калининград, 2014 г.), 2-ой Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах» (г. Тамбов, 2015 г.), XIV Международной научной конференции «Энерго- и Ресурсосбережение XXI век» (г. Орел, 2016 г.), IV рос-

сийской молодежной научной конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи» (г. Томск, 2016 г.), IV Международной научной конференции молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах» (г. Тамбов, 2017 г.).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано печатных работ - 17, в том числе 5 опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 4 – зарегистрированных программ для ЭВМ, 2 – публикации в периодических научных изданиях, 6 – тезисы международных конференций.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка и 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 124 страницы, в том числе 104 страниц основного текста, 54 рисунка, список литературы из 109 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность задачи по обеспечению эффективного функционирования электротехнических комплексов промышленных производств с резкопеременными нагрузками. Показана степень разработанности темы исследования по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». Сформулирована цель диссертационной работы. Сформулированы научная новизна и научные результаты с отражением практической значимости работы. Изложены основные положения, выносимые на защиту по указанной выше специальности.

В первой главе диссертационной работы описана технологическая и электрическая часть дуговых сталеплавильных печей (ДСП), изложен характер потребляемой нагрузки и её воздействие на систему электроснабжения. Далее произведен анализ научных трудов, относящихся к направлению диссертационного исследования. Рассмотренные исследования значимы при обзоре конкретных электрических систем и для конкретных электрических режимов дуговой печи или иных схожих по характеру нагрузки электрических потребителей.

Во второй главе диссертационной работы проанализированы негативные воздействия, вызываемые потребителями с резкопеременным характером нагрузки. Проведен анализ структуры металлургических производств и принципа работы дуговых печей и влияния их работы на систему электроснабжения предприятия. Колебания напряжения на «неспокойной» шине напрямую связаны с колебанием токов, то есть, если в дуговой печи происходит резкий скачок тока в дуге, то, соответственно, и происходит провал напряжения в сети, что негативно отражается на соседних электроприемниках, подключенных к данной шине. Данный эффект весьма заметен в периоде расплава, когда работа дуговой печи сопровождается эксплуатационными короткими замыканиями с режимом корот-

кого замыкания в рабочем пространстве печи при касании электродами шихты. Возникает необходимость в исследовании влияния резкопеременных нагрузок посредством имитационного моделирования. Источник резкопеременной нагрузки формируется из двух сигналов импульсного, который задает уровень нагрузки и нестационарным сигналом, характеризующий режим работы печи.

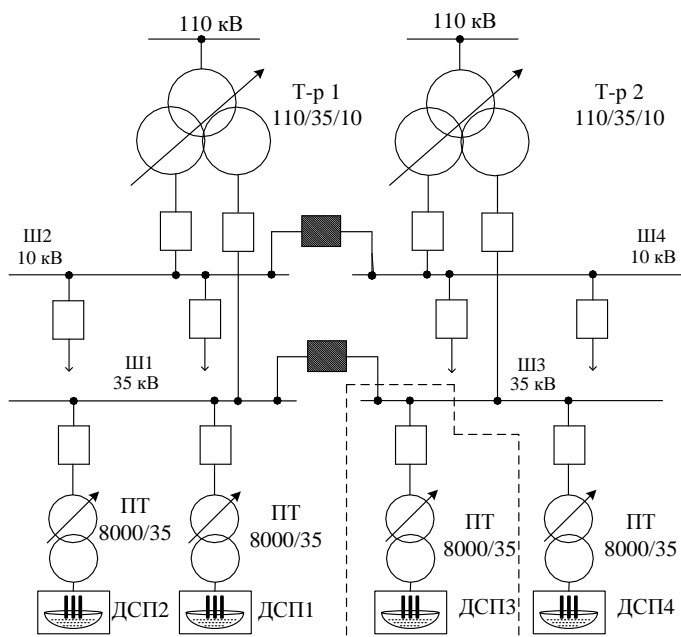


Рисунок 1 – Рассматриваемая электрическая схема с ДСП

Имитационная модель системы электроснабжения, выполненная в программном пакете Matlab Simulink и включающая в себя основные электроприемники (рисунок 1, выделено пунктирной линией), изображена на рисунке 2.

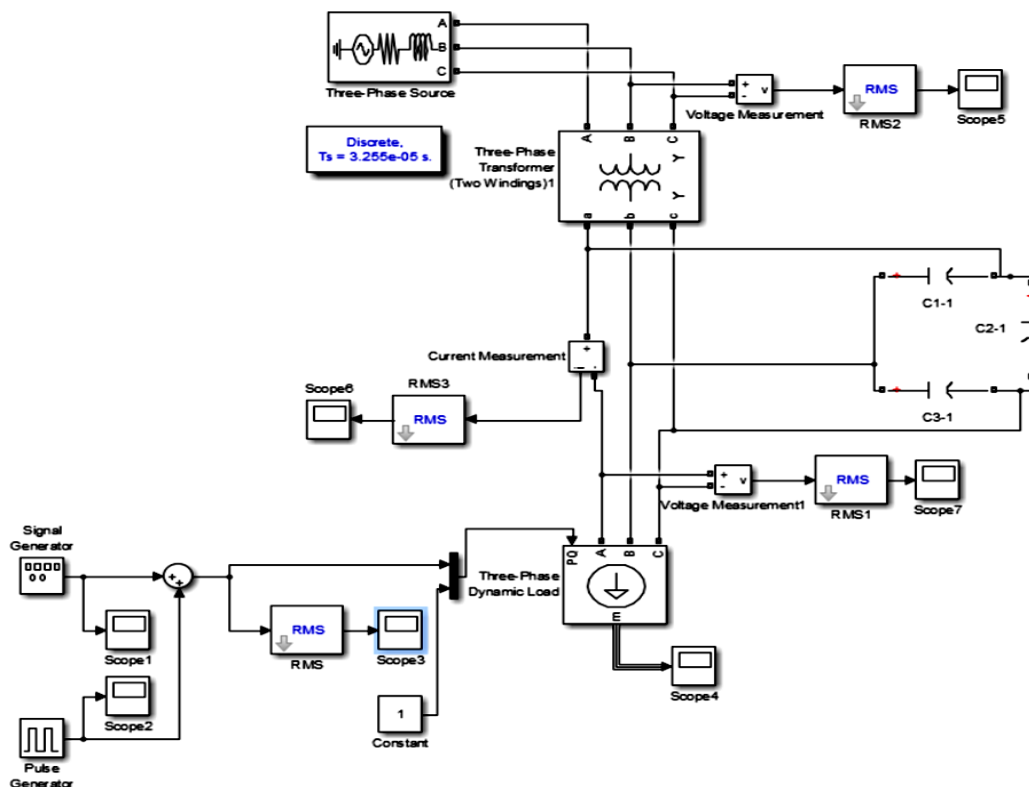


Рисунок 2 – Имитационная модель системы электроснабжения

Модель электротехнического комплекса включает в себя неспокойную систему шин и дуговую печь, представленной трехфазной динамической нагрузкой, работающей по заданному алгоритму, отражающий процесс функционирования дуговой печи в реальных производственных условиях. Далее представлен результат моделирования графиком токовой нагрузки на зажимах электродов ДСП (рисунок 3) и графиком провалов напряжения на вторичной обмотке печного трансформатора (рисунок 4). Во временные интервалы $t = [0,5...1,5; 2,5...3,5; 4,5...5,5]$ происходят резкие броски токов (соответствует режиму расплавки шихты) с последующими провалами и несимметрией напряжения.

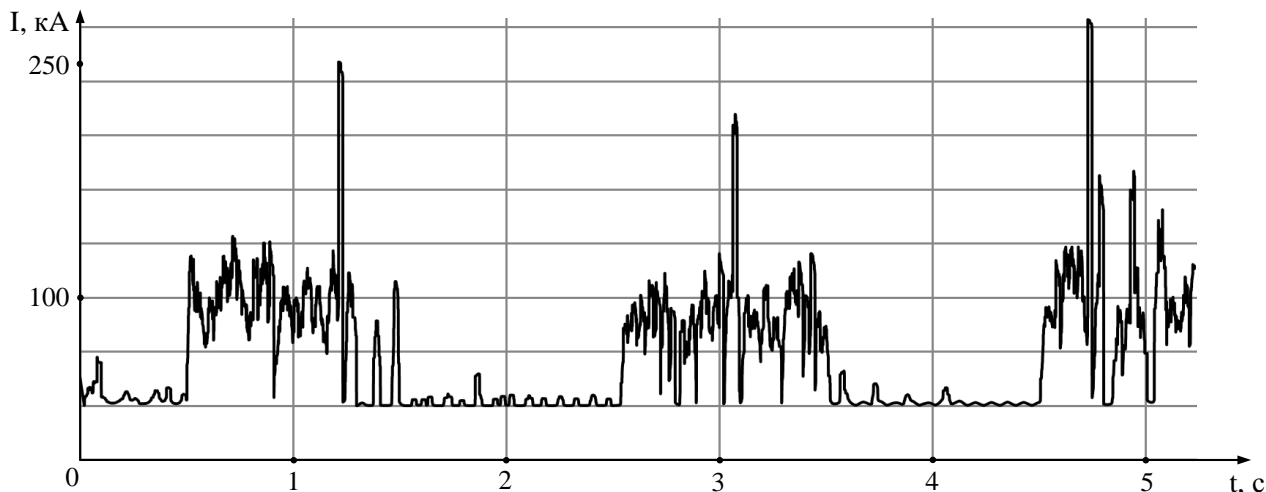


Рисунок 3 – График тока в дуговой печи

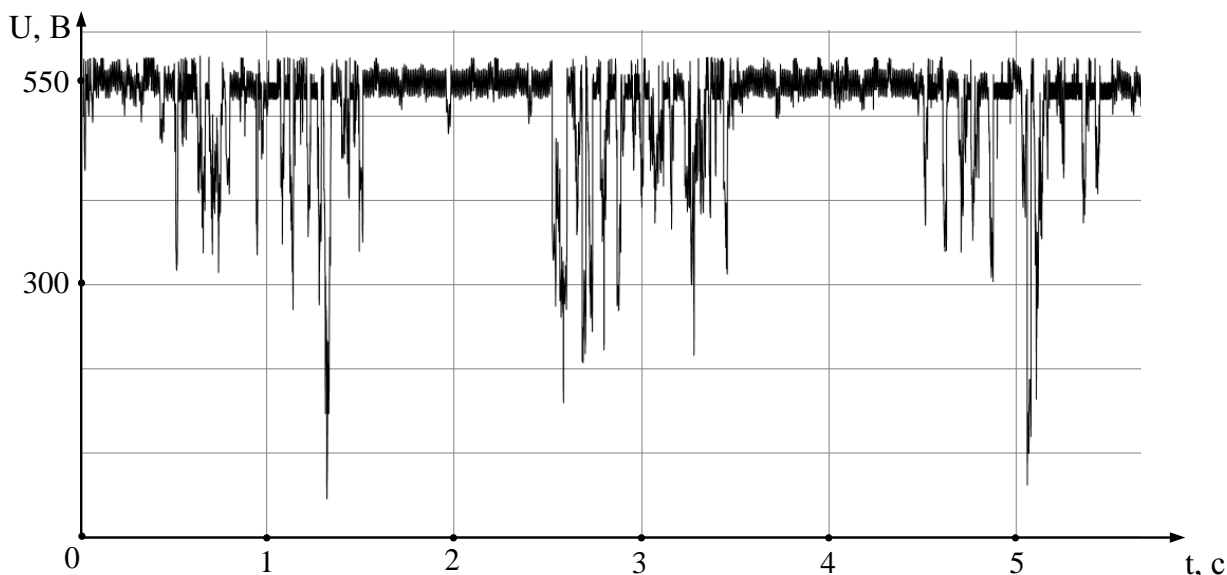


Рисунок 4 – График провалов напряжения на вторичной обмотке печного трансформатора

При $t = [1,5...2,5; 3,5...4,5]$ моделируется процесс горения дуг над ванной жидкого металла, где провалы напряжения менее выражены. Так как процесс расплава является непрерывным, то снижение качества электроэнергии в этом случае будет весьма ощутимым.

С целью минимизации высших гармонических составляющих напряжения на «неспокойной» шине, снижения реактивной составляющей мощности, несимметрии по обратной последовательности, снижения фликера (особенно в слабой сети) целесообразно применять систему статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности (СТАТКОМ), что учитывается имитационной моделью электротехнического комплекса «ДСП – СТАТКОМ» (рисунок 5) с возможностью блокировки его входных ключей при возникновении эксплуатационного короткого замыкания в рабочем пространстве дуговой печи. Результирующий график уровня напряжения на «неспокойной» шине (рисунок 6) показывает, что в момент времени $t = 0,4$ с. напряжение на шине имеет значение, удовлетворяющее стандартным требованиям. Однако, в момент времени $t = 1,2$ с. происходит блокировка входных ключей СТАТКОМа, что сказывается на уровне напряжения и высших гармонических составляющих. Так как произошло отключение преобразовательных блоков, то появляются негативные возмущающие факторы, влияющие на производительность электротехнических установок. В случае нейтрализации блокировки ключей уровень напряжения будет находиться в пределах необходимого, а электротехнические комплексы будут иметь максимальный коэффициент полезного действия, равно как и производительность системы электроснабжения.

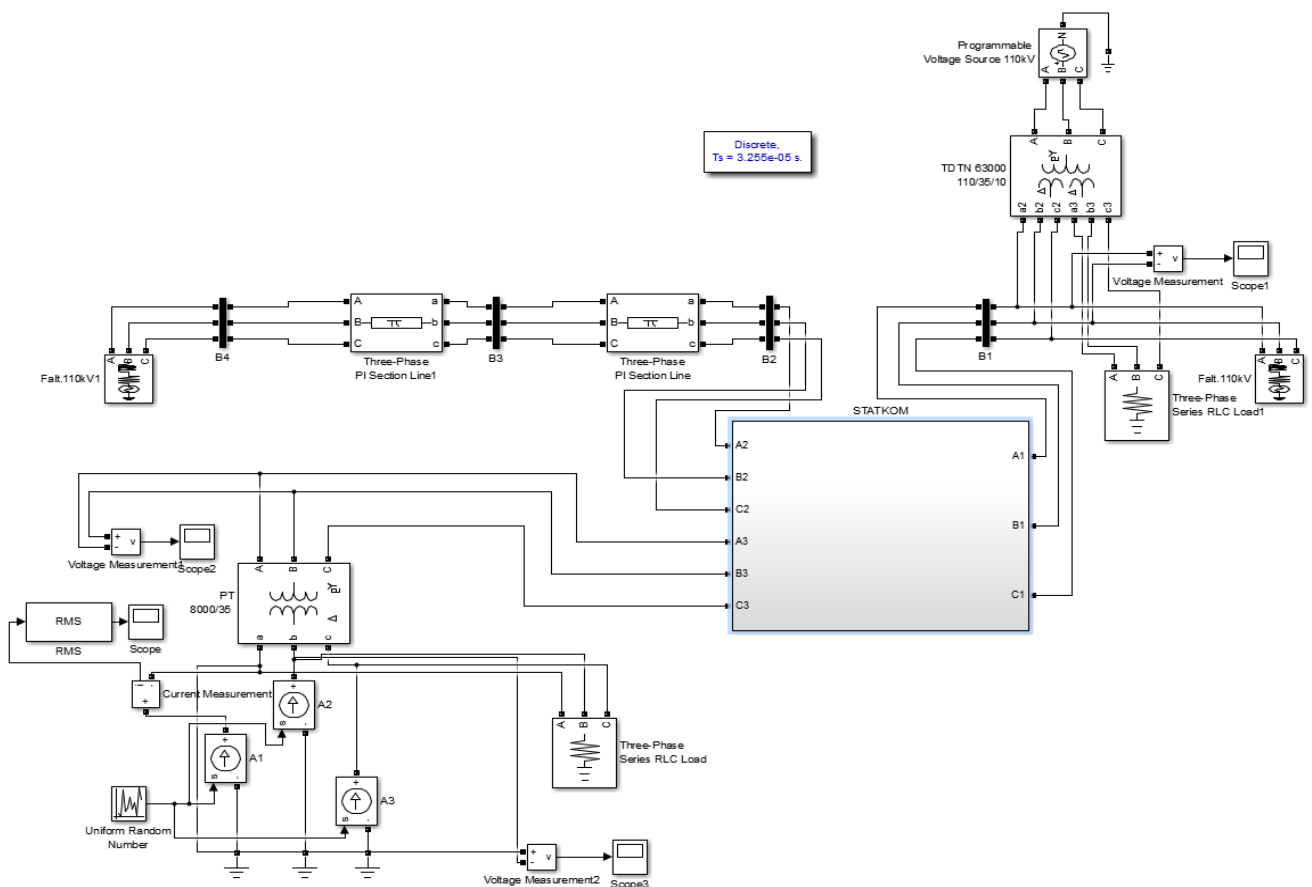


Рисунок 5 – Модель схемы с многоуровневым СТАТКОМом

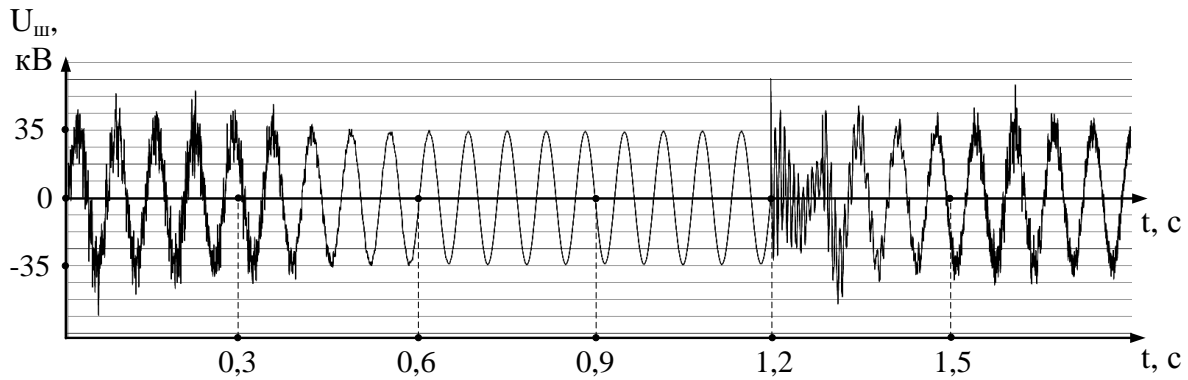


Рисунок 6 – Напряжение на «неспокойной» шине при блокировке ключей СТАТКОМ в момент времени $t = 1,2$ с.

Таким образом, нейтрализация блокировки входных ключей компенсирующей установки СТАТКОМ обеспечивает эффективное функционирование электротехнических комплексов. Согласно рисунку 6 при $t = [0,5...1,19]$ (рабочее состояние СТАТКОМ), негативные возмущения от дуговых печей не влияют на общее состояние системы электроснабжения, что показывает важность нейтрализации блокировки входных ключей СТАТКОМ.

В третьей главе диссертационной работы предлагается использовать индикаторы Боллинджера для выявления негативных воздействий, а также как осциллирующий индикатор, который показывает полный диапазон значений электрических величин и их текущее отклонение от средней величины. Индикаторы Боллинджера имеют три составляющие: средняя составляющая - это среднее значение за определённый интервал времени и определяется с привязкой к мощностным показателям как:

$$S_{cpN}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N i \cdot S_i(t)}{\sum_{i=1}^N i}, \quad (2)$$

где i – численное значение периода; S_i – значение мощности в i -ый период; N – установленный максимальный период (при $N \in \mathbb{Z}$).

Верхние и нижние составляющие являются скользящей средней с прибавлением (верхняя скользящая) или вычетом (нижняя скользящая) стандартного отклонения и рассчитываются по формуле:

$$S_{1,2}(t) = S_{Ncp}(t) \pm K\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N i \cdot S_i(t)}{\sum_{i=1}^N i} \pm K \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i(t) - \bar{S}(t))^2}{\sum_{i=1}^N i}}, \quad (3)$$

где σ – стандартное отклонение; \bar{S} – выборочное среднее значение мощности за период; K – коэффициент чувствительности.

Выявлению негативных воздействий при непрерывных технологических процессах также способствует сбор статистических данных, которые возможно хранить без потери энергии сигнала посредством вейвлет-сжатия. Таким образом, осциллирующие индикаторы Боллинджера показывают полный диапазон нагрузок и их текущее отклонение от средневзвешенного значения, то есть являются инструментом по анализу электрических нагрузок в режиме реального времени.

При исследовании резкопеременных нагрузок целесообразно использовать wavelet (вейвлет) - анализ. Токовая нагрузка дуговых печей является нестационарным сигналом, что затрудняет её исследование традиционным преобразованием Фурье, являясь длительным процессом и, в результате, отражает амплитудно-частотную характеристику. Оконное преобразование Фурье позволяет получать частотно-временную функцию, однако разложение осуществляется периодически, вследствие чего частотные возмущения могут усредняться на исследуемом участке. Вейвлет-преобразование в большей степени позволяет преодолеть такие недостатки, как: замена исходного сигнала периодическим с периодом, равным длительности исследуемого образца; неточности при изменении параметров процесса со временем. Базисные функции вейвлетов обладают свойством временной локализации. Таким образом, свертка сигнала с одним из вейвлетов позволяет выделить характерные особенности сигнала в области локализации этого вейвлета, и чем больший он имеет масштаб, тем более широкая область сигнала будет оказывать влияние на результат свертки.

Реализовать данные преобразования возможно посредством использования пакета MATLAB Wavelet Toolbox. Снятый сигнал резкопеременной нагрузки разложен с использованием вейвлета db3 (вейвлет Добеши) до четвертого уровня. В общем виде разложение имеет вид:

$$S(t) = A_j(t) + \sum_{m=1}^n D_m(t) = \sum_{k=1}^n a_{jk} \varphi_{jk}(t) + \sum_{k=1}^n d_{mk} \psi_{mk}(t); \text{ при } n \in Z, \quad (4)$$

где $a_{jk} = (S(t), \varphi_{jk}(t))$ и $d_{mk} = (S(t), \psi_{mk}(t))$ – аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты, а базисные функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ соответственно равны

$$\begin{cases} \varphi(t) = 2 \sum_1^{N_\ell} L(\ell) \varphi(2t - \ell), \text{ где } L(\ell) = (\varphi(t), \varphi(2t - \ell)); \\ \psi(t) = 2 \sum_1^{N_\ell} H(\ell) \varphi(2t - \ell), \text{ где } H(\ell) = (\psi(t), \varphi(2t - \ell)); \end{cases} \quad \text{при } \ell = 2n - 1,$$

где $L(\ell)$ и $H(\ell)$ – низко- и высокочастотные составляющие, ℓ – номер операции, совпадающий с длиной интервала, n – номер порядка вейвлета.

Для наглядности, на рисунке 7 приведен совмещенный график функции

$S(t)$, отражающий зависимость токовой нагрузки от времени, а так же $D_4(t)$, показывающий частотные возмущения в течение времени t .

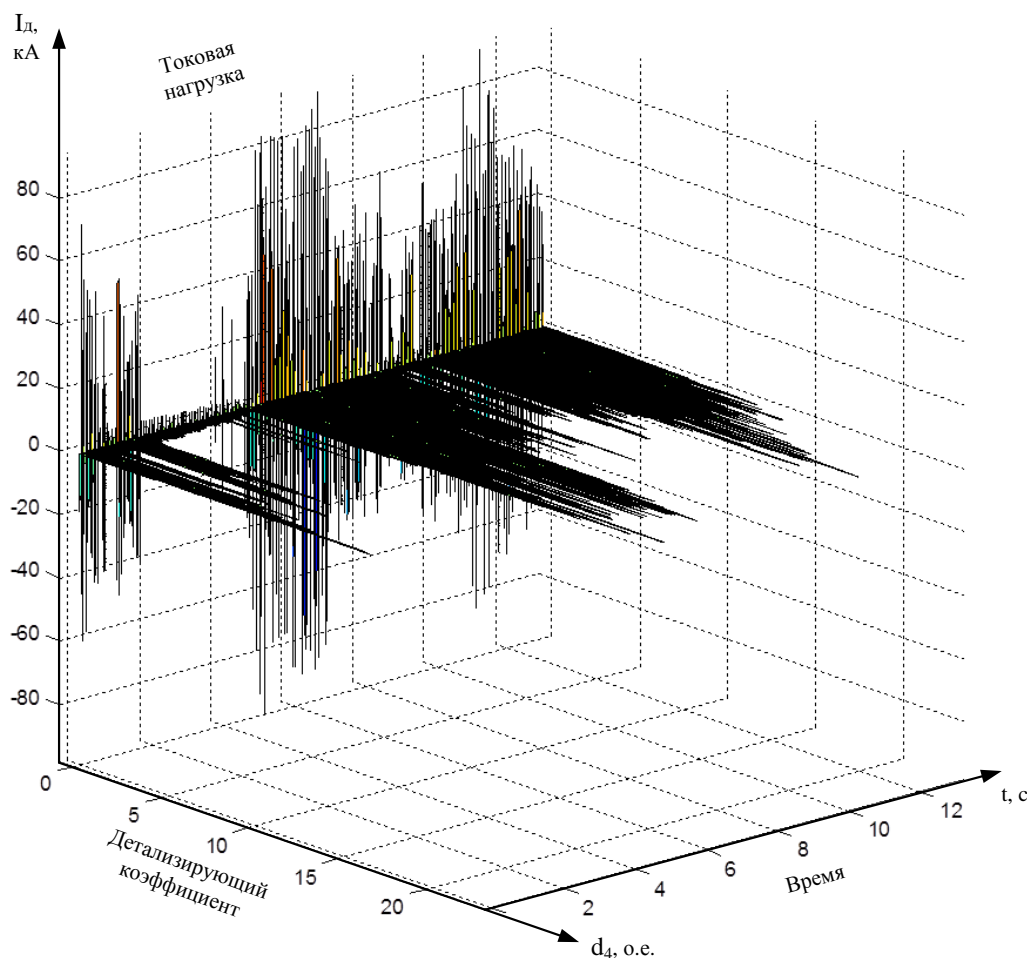


Рисунок 7 – Сопоставление графика резкопеременной нагрузки с графиком детализирующих коэффициентов четвертого порядка

Исследуемый график имеет 32000 точек, следовательно, их разложение не занимает большого количества времени. Отметим, что при разложении графика свыше 100000 точек, необходимо использовать инструменты по их сокращению (или усреднению), так как такие графики могут содержать избыточную информацию и на результат разложения не повлияют, однако их анализ может занять достаточно продолжительное время, что негативно скажется при непрерывном анализе графика в режиме реального времени.

Методы вейвлет-преобразования высокочастотных сигналов предлагается использовать для выявления и локализации негативных факторов, влияющих на качество электроэнергии. По амплитуде негативные возмущения могут отличаться в несколько раз, и для того, чтобы автоматически отслеживать такие явления, целесообразно использовать методы статистического анализа. Например, при использовании индикаторов Боллинджера при должной настройке можно отследить в автоматическом режиме негативные возмущения.

Так, индикаторы условно ограничивают вейвлет-функцию сверху и снизу, следовательно, при пересечении амплитудных всплесков вейвлетом любого из индикаторов на систему управления компенсационного устройства (СТАТКОМ) подаётся сигнал на отдачу нужной формы напряжения. Такой подход достаточно перспективен в области анализа резкопеременных нагрузок. Представляя график нагрузок в виде сверток, будут не только обнаружены высокочастотные колебания, которые могут усредняться при преобразовании Фурье, но и появляется возможность работать с большим объёмом выходных данных, так как сигналы могут сжиматься без потерь в среднем до 7 раз. Использование вейвлет-преобразования позволяет выявить более точную картину отклонения по качеству электроэнергии, внедрив данный способ в системы передачи данных и, соответственно, в программы анализа экспериментальных данных и цифровой обработки.

При возникновении эксплуатационных коротких замыканий, обусловленных в этот момент времени сверхпереходным режимом, ключи компенсирующей установки СТАТКОМ замыкаются с целью её защиты. Для нейтрализации блокировки ключей необходимо отразить способ определения эксплуатационных коротких замыканий. Инициализация эксплуатационного короткого замыкания в дуговой печи достигается посредством вейвлет-анализа и индикаторов Боллинджера при выполнении следующих условий:

- мгновенная частота превышает среднестатистическую частоту колебаний $f_{кз} > f_2$, где $f \in [f_1 \dots f_2]$;
- значение S_i превышает область верхней скользящей, полученной в результате построения линий Боллинджера, т.е.:

$$S_i > \frac{\sum_{i=1}^N S_{i-1}}{\sum_{i=1}^N i_{i-1}} + K \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N i_{i-1} \cdot (S_{i-1} - \bar{S})^2}{\sum_{i=1}^N i_{i-1}}}$$

В первом случае видно возрастающую величину частотного возмущения мощности, во втором – наблюдается резкий наброс мощности, отличающийся от среднестатистических данных, следовательно, при выполнении этих двух условий можно утверждать, что в системе возникло эксплуатационное короткое замыкание и компенсирующая установка должна отработать без блокировки ключей.

Возможные режимы работы электроприемника, а также возможные функции реакции по частотной и нагрузочной области отражены на рисунке 8.



Рисунок 8 – Схема действия системы управления СТАТКОМ при возможных режимах работы электроприемника электротехнического комплекса «ДСП – СТАКОМ»

Для обеспечения нормального функционирования дуговых сталеплавильных печей и наглядности происходящих процессов зарегистрирована программа для ЭВМ «Электрический режим электротехнической установки». Она позволяет в режиме реального времени отразить распределение напряженности электрического поля в ванне печных агрегатов, что способствует оптимизации регулирования электрического режима печи посредством автоматического перехода на другую ступень напряжения вторичной обмотки трансформатора или применения аппаратов автоматики приводных систем механизма перемещения электродов. Также допустимо регулирование компенсационной системой СТАТКОМ в рамках снижения несимметрии в фазах с целью выравнивания токов на электродах.

В четвертой главе представлен анализ эффективности внедрения модернизированной системы управления в компенсационное устройство. Расчет эффективности представлен по следующим показателям:

– эффективность от снижения негативных возмущений;

Часто при плавке шихты возникает резкий наброс мощности, что вызывает гармонические колебания характеристик приёмника сигнала системы управления, вследствие чего начинается подстройка электрического режима ДСП. Колебания отличаются от максимальной эффективной точки рабочей характеристики ($P_{\text{дmax}}$) примерно на 1,4% и подстройка системы управления ДСП длится порядка 1,5 минуты. За целый цикл плавки суммарное время подстройки может достигать до 20% от общего времени цикла, который для ДСП-150 (с учетом ФКУ) составляет 1,193 ч. Учитывая, что от этого зависит производительность ДСП, наилучшие её показатели (при установке компенсационной системы с предложенной системой управления) определяются как отношение максимальной мощности дуги к удельному расходу мощности на тонну выпускаемой продукции. При учёте производительности печи с учетом подстройки системы управления ДСП, мощность дуги разделяется на показатель $P_{\text{дmax}}$, который наблюдается в 80% времени и $P_{\text{доткл}}$ – мощность дуги при отклонении, наблюдающееся в течении 20% времени, составляет 98,6% от $P_{\text{дmax}}$. Процентные показатели эффективности ΔZ_2 при устранении параметра $P_{\text{доткл}}$ составляют

$$\Delta Z_1 = \frac{Z_{\text{СТ}} \cdot 100}{Z_{\text{ФКУ}}} - 100 = 37,667\%.$$

– эффективность от снижения повышающего коэффициента на тариф стоимости электроэнергии;

Согласно приказу ФСТ №219-Э/Б от 31.09.2010 электросталеплавильные производства имеют высокий повышающий коэффициент при расчетах за элек-

троэнергию. Величина коэффициента надбавки прямо пропорциональна величинам $\operatorname{tg} \varphi$ электроприемников. Величины $\operatorname{tg} \varphi_1$ и $\operatorname{tg} \varphi_2$ принимаем из величин $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_2$ из пункта 4.1, тогда при $\cos \varphi_1 = 0,88$, $\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,54$; при $\cos \varphi_2 = 0,9$, $\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,48$. Результирующее выражение ΔZ_3 принимает следующую форму:

$$\Delta Z_2 = 100 \cdot \frac{\Delta Z_{\text{СТ}}}{Z_{\text{ФКУ}}} = 100 \cdot \frac{\Delta K \cdot W_a \cdot C_{\text{Э}} = 0,2 \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \cdot W_{\text{уд}} \cdot n_{\text{Ме}} \cdot C_{\text{Э}}}{Z_{\text{ФКУ}}} = 16,197\%,$$

где W_a – годовой расход электроэнергии дуговой печи (из п. 4.1), ΔK – изменение повышающего коэффициента, $C_{\text{Э}}$ – цена электроэнергии (из п. 4.1).

– эффективность от снижения времени плавки печей;

При установке компенсирующего устройства СТАТКОМ с предложенной системой управления снижает время одного цикла плавки шихты. Для рабочего цикла при различных коэффициентах мощности $\cos \varphi$ необходимо постоянное количество энергии $\Delta W_{\text{печи}} = \text{const}$, разница будет только во времени получения энергии. Следовательно, увеличивается количество циклов расплавки в год, что увеличивает количество выпускаемой продукции. При работе ДСП-150 24 часа в сутки и 349 рабочих дней в году, число циклов с ФКУ составляет $n_{\text{цикл.год.1}} = 7019$, а со СТАТКОМ – $n_{\text{цикл.год.1}} = 7179$. Произведем расчет эффективности ΔZ_4

$$\Delta Z_3 = 100 \cdot \frac{\Delta Z_{\text{СТ}}}{Z_{\text{ФКУ}}} = 100 \cdot \frac{(n_{\text{цикл.год.2}} - n_{\text{цикл.год.1}}) \cdot m_{\text{Ме}} \cdot C_{\text{Ме}}}{Z_{\text{ФКУ}}} = 15,384\%,$$

где $m_{\text{Ме}}$ – масса металла, получаемая в течение одного цикла; $C_{\text{Ме}}$ – себестоимость продукции.

Отметим, что рассчитанные показатели эффективности в условиях реального производства могут составлять экономию в десятки миллионов рублей и согласно итоговым отчетам производства ОЭМК могут составлять 0,22% от годовой выручки с одной дуговой печи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения по обеспечению эффективного функционирования электротехнических комплексов с резкопеременными нагрузками, имеющие существенное значение для развития страны.

Основные результаты работы и выводы заключаются в следующем:

1. Анализ нагрузок резкопеременного характера позволил получить и апробировать имитационную модель электросталеплавильного цеха, которая отра-

жает режимы работы дуговых печей в различных условиях. Посредством модели выявлены негативные факторы, проявляющиеся в виде провалов напряжения и высокочастотных колебаниях на беспокойной шине. Выявлено, что негативные импульсы, влияющие на функционирование системы электроснабжения, целесообразно компенсировать установкой СТАТКОМ с усовершенствованным модулем системы управления, что было представлено в дополнительной имитационной модели.

2. Предложенный способ с использованием индикаторов Боллинджера для обработки электрических характеристик в системах электроснабжения позволяет определить полный диапазон значений электрических величин и их текущее отклонение от средней величины. Данный осциллирующий индикатор даёт возможность оперативно реагировать на изменение электрических характеристик и, соответственно, достигать максимального значения рабочего КПД электрической дуги.

В предложенном способе методы вейвлет-преобразования высокочастотных сигналов предлагается использовать для выявления и локализации негативных факторов (частотные и амплитудные колебания, провалы напряжения), влияющих на качество электроэнергии. Установлено, что по амплитуде и частоте негативные возмущения могут отличаться в несколько раз, и для того, чтобы автоматически отслеживать такие явления, целесообразно использовать индикаторы Боллинджера. В результате последние условно ограничивают вейвлет-функцию сверху и снизу, следовательно, при пересечении амплитудных или частотных всплесков вейвлетом любого из индикаторов на систему управления компенсационного устройства (СТАТКОМ) подаётся сигнал на отдачу нужной формы напряжения.

3. Разработан способ по определению эксплуатационных коротких замыканий дуговых печей, заключающийся в нейтрализации блокировки входных ключей системы СТАТКОМ. Если система управления СТАТКОМ фиксирует, что мгновенная частота мощностных колебаний превышает среднестатистическую, а текущее значение показателя мощности дуговой печи выше величины суммы её средней составляющей и среднеквадратичного отклонения той же величины, то в результате компенсационная система адекватно воспринимает эксплуатационное короткое замыкание и нейтрализует блокировку ключей, продолжая нормально функционировать, что позволяет устранить её кратковременные нарушения работы, обеспечивая эффективное функционирование электро-технического комплекса «ДСП – СТАТКОМ».

4. Разработаны программы для ЭВМ, являющиеся программным комплексом, отражающие процесс расплава шихты в дуговой печи и анализ электриче-

ских нагрузок. Получаемые электрические характеристики отражаются либо в реальном времени, либо вводятся самостоятельно. Результаты расчетов преобразуются, производится комплексный нагрузочный анализ, и результирующие электрические характеристики отражаются с учетом подаваемых сигналов. На конечном этапе анализирующий блок выделяет области с амплитудными или частотными возмущениями и подаёт необходимые сигналы системам управления дуговой печи и компенсирующей установке, что обеспечивает эффективное функционирование электротехнических комплексов не затрагивая технологический процесс.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованные ВАК РФ:

1. Шачнев, О.Я. Апробация использования wavelet-преобразования при выявлении негативных факторов в системах электроснабжения с резкопеременными нагрузками / В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Научный журнал. – 2015. – №1. – Новосибирск: Из-во НГАСУ, С. 186-188.

2. Шачнев, О.Я. Моделирование электрических нагрузок с резкопеременным характером посредством WAVELET – разложения / В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 12. Ч.3. – 2016. – Тула: Из-во ТулГУ, С. 56-60.

3. Шачнев, О.Я. Анализ современных исследований высшей школы касательно систем электроснабжения с высокочастотными нагрузками / В.И. Зацепина, Е.В. Чуркина, О.Я. Шачнев, Н.А. Шарапов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. – №3. – Липецк: Из-во ЛГТУ, С. 30-37.

4. Шачнев, О.Я. Повышение эффективности электротехнических комплексов посредством анализа электрических характеристик / В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2017. – №4. – Тамбов: Из-во ТГТУ, С. 207-213.

5. Шачнев, О.Я. Оценочный анализ эффективности модернизированного устройства СТАТКОМ в металлургических предприятиях / В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. – №4. Липецк: Из-во ЛГТУ, С. 31-38.

Публикации в периодических научных изданиях:

6. Шачнев, О.Я. Анализ применения FACTS-устройств в системах с резкопеременными нагрузками / В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2015. – №4. – Липецк: Из-во ЛГТУ, С. 21-26.

7. Шачнев, О.Я. Особенности моделирования потребителей с резкопеременным характером нагрузки / В.И. Зацепина, О.Я. Шачнев, Ю.П. Попоудина // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2016. – №2. – Липецк: Из-во ЛГТУ, С. 24-27.

Международные конференции:

8. Шачнев, О.Я. Визуальное моделирование электротехнических комплексов металлургии / Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Сборник статей Международной научной конференции 23.11.14. – 2014. – Уфа: Из-во РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, С. 24-27.

9. Шачнев, О.Я. Обеспечение эффективности функционирования электротехнических комплексов металлургии / Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции 17-21.11.14. – 2014. – Липецк: Из-во ЛГТУ, С. 163-168.

10. Шачнев, О.Я. Моделирование функционирования электротехнических комплексов с резкопеременной нагрузкой / Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // XII Международная конференция 15-17.10.14. – 2014. – Калининград: изд-во КГТУ, С. 329-331.

11. Шачнев, О.Я. Влияние дуговых сталеплавильных печей на объекты спокойной системы шин / В.И. Зацепина, О.Я. Шачнев // Тезисы докладов 2-ой Международной конференции с элементами научной школы 22-24.04.15. Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах. – 2015. – Тамбов: изд-во ТГТУ, С. 246-248.

12. Шачнев, О.Я. Регулирование напряжения статическими компенсаторами реактивной мощности в системах с резкопеременными нагрузками / В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // XIV Международная научно-практическая интернет-конференция «Энерго- и Ресурсосбережение XXI век» 15.03 – 30.06.16. – 2016. – Орел: изд-во ОГУ, С. 73-76.

13. Шачнев, О.Я. Моделирование электрических процессов в системах с непрерывным циклом работы / В.И. Зацепина, О.Я. Шачнев // Энергосбережение и эффективность в технических системах. Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – 2017. – Тамбов: изд-во ТГТУ, С. 107-109.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

14. Шачнев, О.Я. Программа построения характеристик основных электрических параметров электроприемников: свид. №2014616662. Российская Федерация, правообл. ФГБОУ ВО «ЛГТУ» / А.Н. Шпиганович, В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев; заявл. 14.05.2014; опублик. 01.07.2014, 1 с.

15. Шачнев, О.Я. Программа анализа электрических характеристик систем электроснабжения: свид. №2014616663. Российская Федерация, правообл. ФГБОУ ВО «ЛГТУ» / А.Н. Шпиганович, В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев; заявл. 14.05.2014; опублик. 01.07.2014, 1 с.

16. Шачнев, О.Я. Программа преобразования и адаптации сохраненных данных для дальнейшей обработки: свид. №2014616664. Российская Федерация, правообл. ФГБОУ ВО «ЛГТУ» / А.Н. Шпиганович, В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев; заявл. 14.05.2014; опублик. 01.07.2014, 1 с.

17. Шачнев, О.Я. Программа преобразования и адаптации сохраненных данных для дальнейшей обработки: свид. №2017616161. Российская Федерация, правообл. Шачнев О.Я. / О.Я. Шачнев, В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, А.В. Галкин, Д.В. Овчинников; заявл. 04.04.2017; опублик. 02.06.2017, 1 с.

Личный вклад автора в работах, написанных в соавторстве, заключается в следующем: в [1] проведено начальное вейвлет-преобразование резкопеременного графика нагрузки; в [2] отражена эффективность вейвлет-преобразования при его внедрении в блоки управления электрической части производства; в [3] отражены и проанализированы фундаментальные и прикладные исследования научных работников высшей школы по теме диссертации; в [4] рассмотрен способ управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи и предложен актуальный программно-аппаратный комплекс по управлению электрическим режимом электрической установки; в [5] произведен анализ эффективности внедрения в предприятие модернизированного устройства управления СТАТКОМ относительно установленного тиристорного фильтрокомпенсирующего устройства; в [6] проанализировано взаимовлияние потребителей с резкопеременными нагрузками; в [7] разработаны имитационные модели резкопеременных нагрузок схожих с производственными мощностными графиками; в [8] разработана имитационная модель электросталеплавильного цеха; в [9] проанализированы способы устранения негативных факторов в системах электроснабжения с резкопеременными нагрузками; в [10] отражены результаты работы имитационной модели электросталеплавильного цеха; в [11] выявлены негативные воздействия, влияющие на дуговые печи и на их систему управления; в [12] отражена формула расчета мощности компенсирующей установки для работы с группой дуговых печей; [13] разработана имитационная модель системы электроснабжения, отражающая различные режимы работы дуговых печей; в [14, 15, 16] проведены проверки применимости моделей работы к результатам экспериментальных данных, отражен статистический анализ результатов экспериментов; в [17] разработана архитектура программы, формирующая техническое задание.

Подписано в печать

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Ризография. Печ. л. 1,0. Тираж 130 экз. Заказ №

Издательство Липецкого государственного технического университета.

398055 Липецк, ул. Московская, 30.