



КГЭУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, А.В. Бойчевский,  
Е.И. Грачева, Р.М. Петрова

# **ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕГАТИВНЫХ РЕЗКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК**

Учебное пособие

Казань-Липецк  
2024

УДК 621.311  
Ш835

Рецензент:  
Степанов В.М., д-р техн. наук, проф.  
(Тулский государственный университет)

**Шпиганович А.Н. и др.**

Ш835 Отказоустойчивость систем электроснабжения с учетом негативных резкопеременных нагрузок/ А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, А.В. Бойчевский, Е.И. Грачева, Р.М. Петрова. – Казань: Отечество, 2024. – 74 с.

ISBN 978-5-9222-1817-7

Учебное пособие написано на основании многолетнего опыта преподавания в вузе и результатов анализа применения теории случайных импульсных потоков для решения практических задач. Оно состоит из двух разделов. Первый раздел посвящен устойчивости электрических систем к негативным факторам. Второй раздел отображает вероятностную связь между оборудованием и эффективностью применения средств защиты для управления безотказностью электрической системы.

Учебное пособие рассчитано на широкий круг инженеров, научных работников, студентов высших учебных заведений, аспирантов, докторантов всех, кто заинтересован в безотказности работы сложных систем и его оборудования.

УДК 621.311  
ББК 31.21

ISBN 978-5-9222-1817-7

- © А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, А.В. Бойчевский,  
Е.И. Грачева, Р.М. Петрова, 2024
- © Казанский государственный энергетический университет, 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные предприятия для эффективного функционирования требуют наличия высокомошных устройств и других технологических машин, питаемых электрической энергией. Ее передача от устройств генерации к потребителю осуществляется с помощью электрических систем. Системы электроснабжения большинства предприятий по своей структуре практически ничем не отличаются друг от друга, хотя и имеют свои особенности в зависимости от типа производства. Обеспечение отказоустойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий на настоящее время является актуальной. Особенно это касается оценки элементного влияния вспомогательных систем с учетом их воздействия на длительность отказов электрооборудования систем, и, в конечном счете, на безотказное обеспечение электрической энергией технологических машин предприятия.

Необходимо отметить, что рассмотрение функционирования любой системы промышленного предприятия изолированно от работы других систем не позволяет использовать весь комплекс мероприятий, направленных на повышение уровня ее безотказности. Поэтому анализ отказоустойчивости системы электроснабжения следует осуществлять с учетом взаимодействия ее электрооборудования с оборудованием других систем. При этом объединяющим фактором является количество и качество выпускаемой продукции. Решение данной задачи возможно осуществить путем использования экономико-математического подхода к оценке выпускаемой продукции предприятия с анализом надежности его оборудования. Это будет способствовать увеличению количества и качества выпуска продукции предприятием.

Практически все задачи, относящиеся к металлургии, машиностроению, топливно-энергетическим комплексам, строительства, а также для других отраслей невозможно решить без применения вероятностных и статистических методов. Развитие кибернетики, вычислительной и микропроцессорной техники

способствует использованию прикладного значения теории вероятности. На ее основе образовался целый ряд новых наук, что связано с упрощением решения сложных задач.

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, повлияет на конкурентоспособность предприятия. Решить вопросы как технологического характера, так и экономического. 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 не решена проблема блокировки его входных ключей при возникновении эксплуатационных коротких замыканий в дуговых печах. Наиболее тяжелый электрический режим проходит без компенсации, повышая 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. Обеспечение эффективного функционирования электротехнических комплексов, содержащих нагрузки резкопеременного характера за счет выявления и компенсации негативных воздействий, необходимо. Обеспечить это можно за счет

применения нового способа деблокировки входных ключей компенсирующей установки электротехнического комплекса «ДСП – СТАТКОМ». В результате использование ЭВМ, позволяет в режиме реального времени обеспечить эффективное функционирование электротехнических комплексов без ущерба технологического процесса производства. Независимо от различных режимов при разнообразных внешних воздействиях. Решение упрощается с применением методов теоретических основ электротехники, статистического анализа, интегральных преобразований сигналов. Имитационное моделирование должно выполняться в программной среде Matlab Simulink 2014a, а анализ сигналов проводится в подпрограммном пакете Wavelet Toolbox. Имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП – СТАТКОМ», отличается реализацией в системе управления деблокировки входных ключей компенсирующей установки. Отличие состоит в применении индикаторов Боллинджера и Вейвлет обработки кривой изменения параметров режима, позволяющий идентифицировать эксплуатационные короткие замыкания и сформировать управляющий сигнал деблокировки входных ключей компенсирующей установки. Программный комплекс для ЭВМ, позволяющий выбрать наиболее рациональный режим работы электроприемника. Его анализирующий блок на основании статистических данных посылает сигнал системе управления электроприемника с целью корректировки входных электрических параметров для обеспечения максимального коэффициента полезного действия электрических процессов производств.

В результате имитационная модель, отражающая электрическое состояние электротехнического комплекса «ДСП – СТАТКОМ» учитывает процессы блокировки и деблокировки входных ключей компенсирующей установки в случае резкого наброса мощности. Достигается определение негативных возмущений, снижающих эффективность функционирования электротехнических комплексов «ДСП – СТАТКОМ» посредством совместного использования индикаторов Боллинджера и методов Вейвлет декомпозиции снятых

электрических сигналов. Определение эксплуатационного короткого замыкания системой управления СТАТКОМ, позволяет при резком набросе мощности сохранять работоспособность компенсирующих устройств с последующим анализом получаемых электрических характеристик. Обеспечивается минимизация негативных последствий в системе электроснабжения со специфическими нагрузками при резких набросах мощности. Причем, имитационные модели и программы для ЭВМ позволяют выбрать рациональный режим работы электрических установок.

## **1. СНИЖЕНИЕ НЕГАТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОТ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ С РЕЗКОПЕРЕМЕННЫМ ХАРАКТЕРОМ НАГРУЗКИ**

Современные отечественные предприятия, которые не уступают по качеству выпускаемой продукции европейским производителям и азиатским – по ценовым показателям, нуждаются в модернизации не только оборудования, но и в современных системах по автоматизации производства и управлению технологическими и энергетическими процессами. Ведущие западные производители таких систем не всегда могут удовлетворить потребности отечественных производителей, так как, во-первых, слабая отечественная валюта существенно повышает издержки на закупку и обслуживание такого оборудования, во-вторых, санкции, наложенные на ключевые сектора экономической деятельности, запрещают поставку высокотехнологического оборудования и соответствующего программного обеспечения.

В частности, возникает необходимость в создании управляющих систем, которые позволяют оперировать с электрическими характеристиками, и предоставлять в режиме реального времени необходимые показатели систем электроснабжения, а так же оценивать взаимосвязь этих характеристик с функционированием технологических установок.

В настоящее время в Российской Федерации, странах ближнего и дальнего зарубежья отмечается рост спроса на инновационные средства по обеспечению энергоэффективности предприятий. К таким средствам обычно относят устройства автоматического управления промышленными комплексами, а так же программно-аппаратные комплексы, предназначенные для автоматизации энергоуправления, энергоаудита и комплексного анализа электрической части потенциального объекта. Различные электроприемники имеют специфический технологический процесс, обусловленный резким изменением потребляемой мощности в течение определенного периода времени.

## **1.1. Выявление негативных воздействий посредством индикаторов Боллинджера и Wavelet-анализа**

В настоящее время для предположения потенциального потребления электроэнергии используются данные, основанные на предыдущих статистических данных, однако целесообразно использовать инструменты для анализа графиков потребления в режиме реального времени. Такие инструменты распространены при графическом анализе экономических показателей и наиболее привлекательными для энергетики являются линии Боллинджера.

Линии Боллинджера, являются осциллирующим индикатором, который показывает полный диапазон цен и их текущее отклонение от средневзвешенной цены, т.е. является экономическим инструментом по анализу ситуации на рынке в режиме реального времени. Благодаря нему возможно определить, является ли цена того или иного актива высокой или низкой по сравнению со средним значением за последнее время и, соответственно, спрогнозировать возможность падения или роста до его уровня (рисунок 1.1). Если график приближается к границе верхней скользящей (линия 1), то направление графика изменится к средней (центральной) скользящей (линия 2) и наоборот, если график коснётся или приблизится к нижней скользящей (линия 3), то он неуклонно устремится к нормали (линия 2). В случае высокой волатильности график может пересекать несколько раз линии 1 и 3 и вернуться в исходное положение, а при низкой волатильности – только коснуться или пересечь один раз и вернуться к средней скользящей (линия 2).

Учитывая, что работа с полосами Боллинджера ведётся в режиме реального времени с учётом волатильности рынка, то данный инструмент предполагается использовать и при анализе графиков общей нагрузки в системах электроснабжения. Если за ось ординат принять запрашиваемую мощность электроэнергии, то данный экономический инструмент имеет место быть и в электроэнергетике. В случае, когда электроэнергии требуется больше, то график становится похож на случай с высокой волатильностью (рисунок 1.1),

и наоборот, когда требуется меньше – с низкой волатильностью (рисунок 1.1).

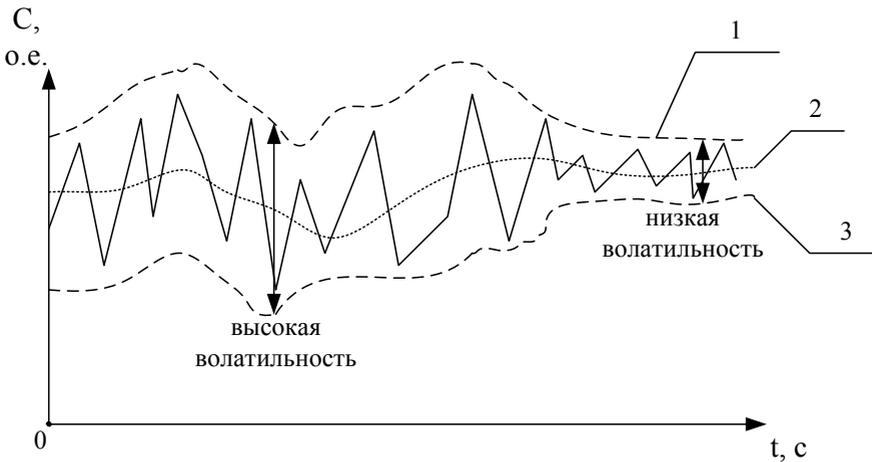


Рисунок 1.1 – Анализ данных посредством линий Боллинджера

Учитывая, что работа с полосами Боллинджера ведётся в режиме реального времени с учётом волатильности рынка, то данный инструмент предполагается использовать и при анализе графиков общей нагрузки в системах электроснабжения. Если за ось ординат принять запрашиваемую мощность электроэнергии, то данный экономический инструмент имеет место быть и в электроэнергетике. В случае, когда электроэнергии требуется больше, то график становится похож на случай с высокой волатильностью, и наоборот, когда требуется меньше – с низкой волатильностью (рисунок 1.1).

В настоящее время прогноз потребления необходимого количества электроэнергии представляет собой достаточно сложную многопараметрическую задачу. Потребление электроэнергии зависит от типа дня (рабочий день, выходной день), наличия заказов промышленных предприятий, времени суток и других факторов. Однако, если использовать все факторы и корректировать данными, поступающие в режиме реального времени (наиболее точными

данными можно располагать имея программный комплекс, основанный на Вейвлет-преобразовании) используя линии Боллинджера.

Например, рассмотрим следующий случай. Энергоснабжающая организация имеет график нагрузок комплекса предприятий (рисунок 1.2).

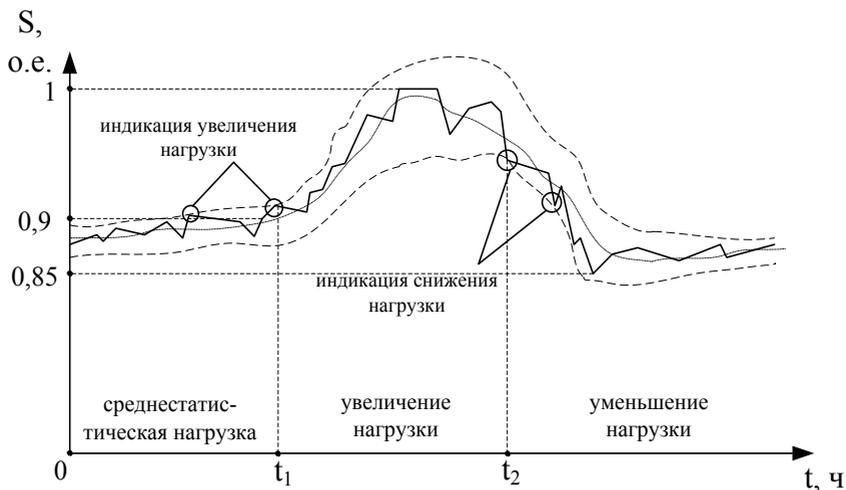


Рисунок 1.2 – Применение линий Боллинджера в энергетике

В момент времени  $t_1$  наблюдается тенденция к повышению спроса на электроэнергию, т.к. график касается верхней скользящей линии Боллинджера, следовательно, необходимо подключить дополнительные (резервные) источники электроэнергии. Пиковые нагрузки длятся до момента времени  $t_2$  (график касается нижней скользящей), затем необходимость в дополнительных источниках питания отпадает, следовательно, их можно отключить.

Таким образом, за счёт использования линий Боллинджера энергоснабжающая организация заблаговременно подключает дополнительные источники питания, тем самым удовлетворяя непрерывную подачу электроэнергии должного качества и в необходимом количестве, а так же отключает их, что снижает износ

резервных источников питания и, соответственно затраты на обслуживание.

Для точного восприятия управляющих систем всех негативных возмущений целесообразно использовать теорию случайных импульсных потоков. Она позволяет представить график нагрузки в различные временные промежутки в виде импульсов, где величина импульсов является площадь области под графиком равная площади соответствующих прямоугольников 1-7 (рисунок 1.3).

Таким образом, суммарный график будет состоять из импульсов, с различной интенсивностью ( $I_i$ ) и длительностью ( $\tau_i$ ). При таком подходе сохраняется полная энергия сигнала с возможностью прогнозирования графика нагрузки. Так, средняя длительность импульсов определяется на основании обработки аппроксимирующего графика:

$$\tau = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1} \tau_i, \quad (1.1)$$

где  $n$  – число импульсов совпадений  $i$ -ого уровня интенсивности;

$\tau_i$  – длительность  $i$ -ого импульса совпадения.

Число импульсов совпадений:

$$n_i = T \cdot \bar{\mu}_i, \quad (1.2)$$

где  $T$  – время наблюдения за изменением нагрузки,

$\bar{\mu}_i$  – частота следования импульсов совпадения  $i$ -ого уровня интенсивности.

Вероятность появления импульсов совпадения такого уровня будет:

$$P_i = \bar{\tau}_i \cdot \bar{\mu}_i \quad (1.3)$$

По параметрам импульсов совпадений определяются зависимости, характеризующие импульсы и паузы потока.

К ним относятся частота  $\bar{\mu}_i$ , средняя длительность  $\bar{\tau}_i$  и вероятность  $P$  импульсов, а так же плотность вероятности длительностей импульсов.

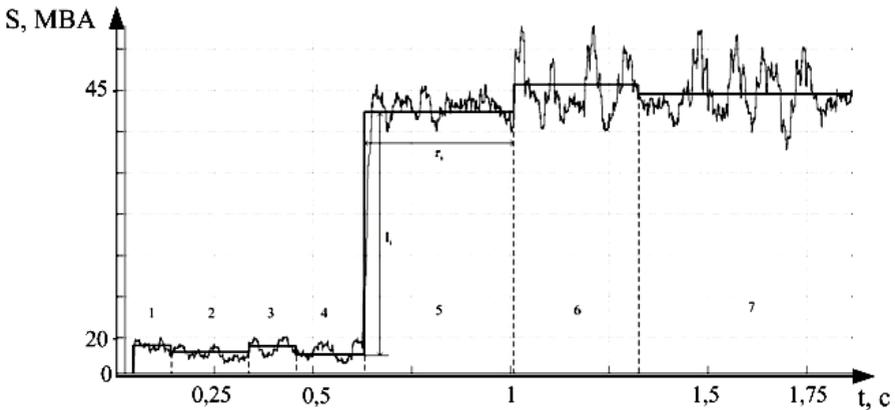


Рисунок 1.3 – Изображение нагрузки в виде импульсных потоков

В условиях производства, при работе, например дуговой сталеплавильной печи, в различных режимах плавки металла (расплав, окисление, рафинирование) при минимальных значениях импульсов, а так же при сильной разности интенсивности импульсов при неизменном технологическом процессе будет свидетельствовать о возможных отказах в системе электроснабжения. Однако теория случайных импульсных потоков может быть применена в непосредственно технологической сфере, например, при термообработке металлов. Температурные характеристики, в этом случае, позволяют корректировать составляющие импульсов для получения необходимого результата и характеристик получаемого продукта.

Выявлению негативных воздействий при непрерывных технологических процессах так же способствует сбор статистических данных, которые возможно хранить без потери энергии сигнала посредством wavelet-сжатия. Одним из современных осциллирующих индикаторов статистических данных являются линии Боллинджера, которые показывают полный диапазон нагрузок и их текущее отклонение от средневзвешенного значения, то есть является инструментом по анализу электрических нагрузок в режиме реального времени.

На продолжительный импульс 7 из рисунка 1.3 наложим индикаторы Боллинджера, включающий в себя среднюю составляющую параметров, верхнюю и нижнюю скользящие. Средняя составляющая – это среднее значение за определённый интервал времени и определяется по формуле (1.4)

$$S_{\text{cpN}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N i \cdot S_i(t)}{\sum_{i=1}^N i}, \quad (1.4)$$

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 (1.5)

$$S_{1,2}(t) = S_{Ncp}(t) \pm K \sigma = \frac{\sum_{i=1}^N i \cdot S_i(t)}{\sum_{i=1}^N i} \pm K \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N i \cdot (S_i(t) - \bar{S}(t))^2}{\sum_{i=1}^N i}}. \quad (1.5)$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение;

$\bar{S}$  – выборочное среднее значение мощности за период;

$K$  – коэффициент чувствительности.

Так, индикаторы Боллинджера позволяют спрогнозировать возможность падения или роста графика – то есть возникновения резкого негативного импульса (рисунок 1.4). Если график приближается к границе верхней скользящей, то направление графика изменится к средней (центральной) скользящей, и, наоборот, если график коснётся или приблизится к нижней скользящей, то он неуклонно устремится к нормали.

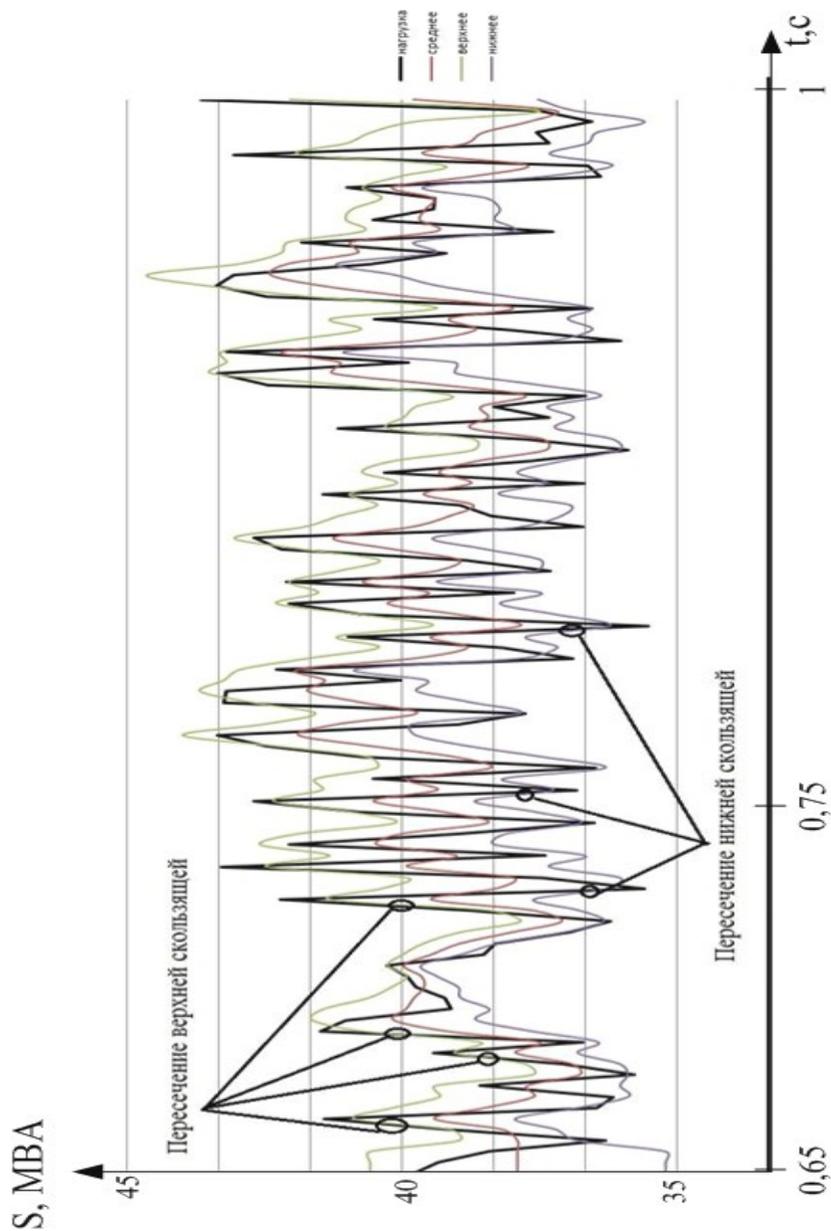


Рисунок 1.4 – График импульса с индикаторами Боллинджера

Применение же теории случайных импульсных потоков при анализе графиков нагрузок (графиков технологического процесса) позволяет системе управления управляющего комплекса реагировать на технологические возмущения, получая наиболее оптимальный режим работы посредством вычисления вероятности появления пауз суммарного импульсного потока.

Как мы отметили ранее, при работе дуговых сталеплавильных печей в электросети возникают резкие толчки потребляемой мощности. Это вызывает изменения напряжения сети, размахи которых могут достигать высоких амплитудных значений. Учитывая вышеперечисленное, влияние резкопеременных нагрузок отражаются на работе всех электроприемников, подключенных к данной сети, в том числе и вызывающих эти изменения.

С целью выявления и дальнейшего предупреждения негативных влияний на систему электроснабжения, необходим такой подход, который обеспечит точность выводимого результата, а так же быстродействие анализа резкопеременных нагрузок. Ввиду своей природы, данные нагрузки имеют большое число точек, что затрудняет их исследование традиционным преобразованием Фурье и занимает достаточно ёмкий по времени и ресурсам объём.

Использование же Вейвлет-преобразования (Wavelet) позволяет избежать вышеперечисленные проблемы. Такой анализ аналогичен термину анализу Фурье и в обоих случаях речь идет о представлении исследуемого процесса в виде линейной комбинации различных функций, именуемых базисом соответствующего преобразования.

Вейвлет-преобразование, как и преобразование Фурье, состоит в вычислении корреляций между анализируемым временным рядом и базисной функцией преобразования. Так, преобразование Фурье направлено на выявление гармонических составляющих временного ряда. Для этой цели применяется бесконечно-осциллирующая гармоническая функция, которая "накладывается" на анализируемую реализацию процесса. Затем проводится сравнение поведения гармонической функции и изучаемой реализации путем вычисления корреляции. Если в результате сравнения выяснено, что они линейно

зависимы, т.е. коррелированы между собой, то это означает, что в составе процесса имеются гармонические составляющие выбранной частоты. Затем частота гармонической функции изменяется и процедура сравнения повторяется. Результатом является спектральная функция, которая отражает исходный процесс из временной области в частотную. Вообще преобразование Фурье используется для спектрального анализа сигналов, однако имеет ряд недостатков: исходный сигнал заменяется на периодический, с периодом равным длительности исследуемого образца; плохо работает при изменении параметров процесса со временем, поскольку дает усредненные коэффициенты для всего исследуемого образца и так далее.

Для Вейвлет-анализа характерно понятие масштаб (scale), графическое представление в виде диаграммы специального вида именуется скалограмма (scalogram). Под масштабом следует понимать колебательные процессы различной периодичности. То есть низкочастотные колебания имеют более крупный масштаб, а высокочастотные – более мелкий.

Вейвлет-преобразование в большей степени позволяет преодолеть перечисленные недостатки преобразования Фурье, поскольку базисные функции обладают свойством временной локализации, т.е. обладают конечной энергией. Таким образом, свертка сигнала с одним из Вейвлетов позволяет выделить характерные особенности сигнала в области локализации этого Вейвлета и чем больший масштаб имеет Вейвлет, 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 db4 (Вейвлет Добеши) до четвертого уровня. Соответственно, на рисунке приведены график исходного сигнала  $S$  и графики компонент сигнала, восстановленных чисто по аппроксимирующим коэффициентам  $a_4$  и детализирующим коэффициентам  $d_1, d_2, d_3, d_4$ . Отметим, что Вейвлет Добеши имеет следующую математическую форму в общем виде:



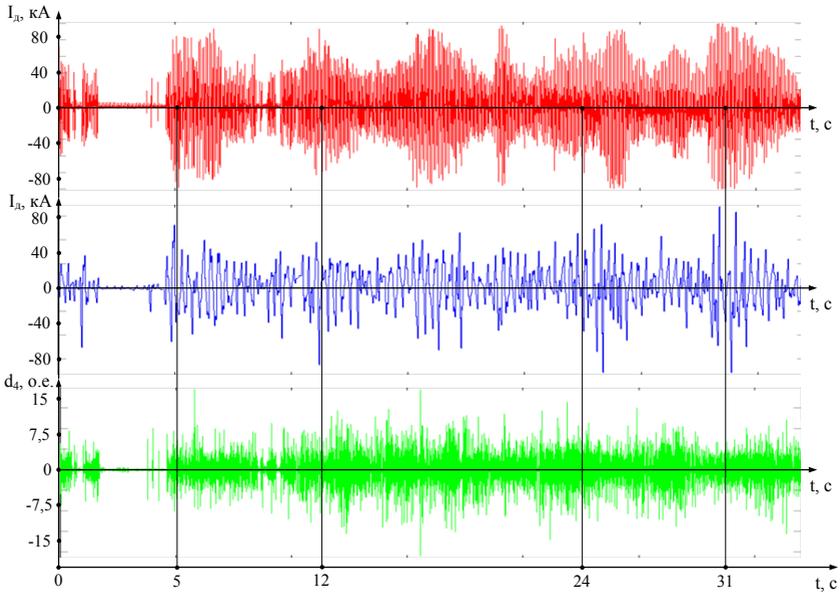


Рисунок 1.5 – Результат разложения резкопеременной нагрузки

Достоинством Вейвлет-преобразования является то, что оно не вносит дополнительной избыточности в исходные данные, и сигнал может быть полностью восстановлен с использованием тех же самых фильтров. Кроме того, отделение в результате преобразования деталей от основного сигнала позволяет очень просто реализовать сжатие с потерями – достаточно просто отбросить детали на тех масштабах, где они несутся. Отметим, что изображение, обработанное Вейвлетами, можно сжать в 3-10 раз без существенных потерь информации (а с допустимыми потерями – до 300 раз). Произведём сжатие исходного графика резкопеременной нагрузки (рисунок 1.6) используя метод пороговой обработки с учётом уровней детализирующих коэффициентов  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ,  $d_4$ . Для графика  $D_4(t)$  с учетом удаленных нулевых точек установим интервально-зависимые пороги для одномерного Вейвлета (определяется настройкой в программном пакете Matlab Wavelet Toolbox в подразделе Wavelet 1-D) на рисунке 1.7.

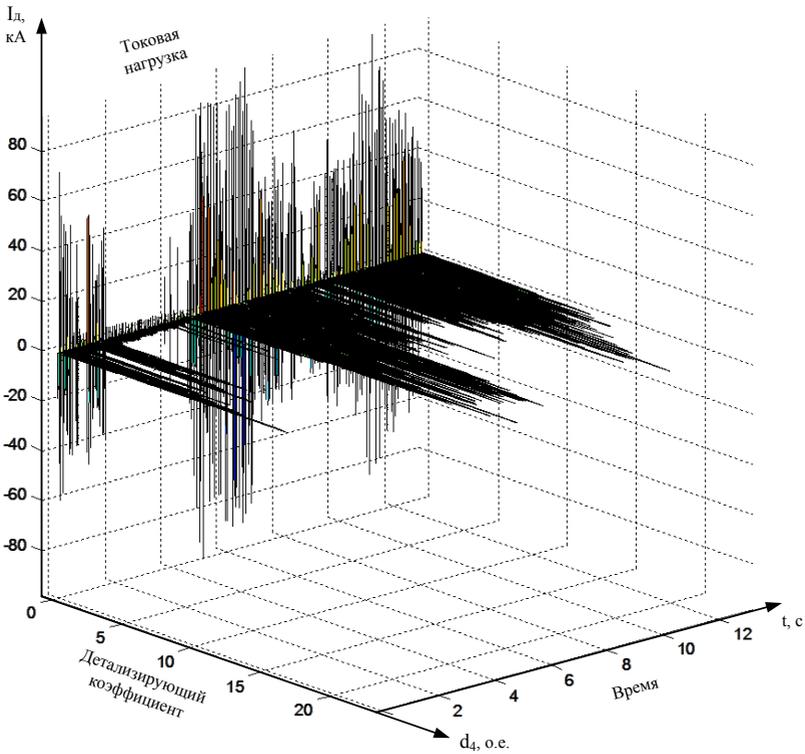


Рисунок 1.6 – Трехмерный график с отражением амплитудных и частотных колебаний резкопеременной нагрузки в течение времени

Для обеспечения необходимой степени сжатия исходного графика, необходимо выбрать сохраняемую энергию сигнала и процент удаляемых нулевых точек.

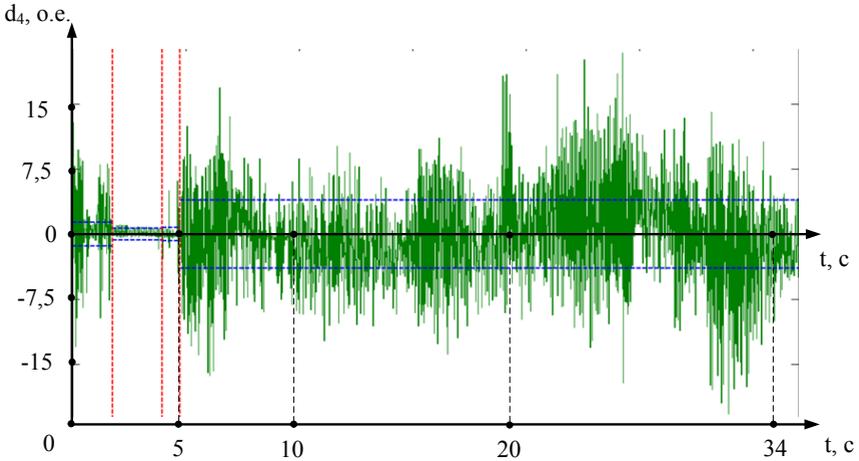


Рисунок 1.7 – Обозначение интервально-зависимых уровней Вейвлета

Отметим, что последние не влияют на амплитудные значения уровня исходного графика резкопеременной нагрузки, тем самым не искажая сути протекаемых процессов в электротехнической установке. Однако при анализе частотных составляющих графика возможны погрешности. Наиболее оптимальным сжимаемый график будет в случае примерно одинаковых значений показателей  $E$  – сохраняемая энергия сигнала (в %) и показателя  $N_0$  – количество удаляемых нулевых точек (в %). Графически это отображено на рисунке 1.8 в точке А, где  $N = 91,14\%$ , а  $E = 91,67\%$ . Отметим, выбирают процент энергии сигнала близким к 99 – 100%. Как видно из рисунка 1.8, в этом случае процент удаленных нулевых значений стремится к нулю, также, что при необходимости получения более точного сжатого сигнала.

Установив для выбранного сигнала разложение до уровня 4 и выбрав вручную пороговые значения видно, что сжатие удаляет большую часть шума и сохраняет почти 92% энергии сигнала. Сжатая скалограмма сохранила все свойства, используемые для анализа сигнала. Сложные сигналы, имеющие высокое разрешение, имеют достаточно большие объемы, что актуально для электроприемников с

резкопеременным характером нагрузки и, следовательно, проблема их хранения является актуальной.

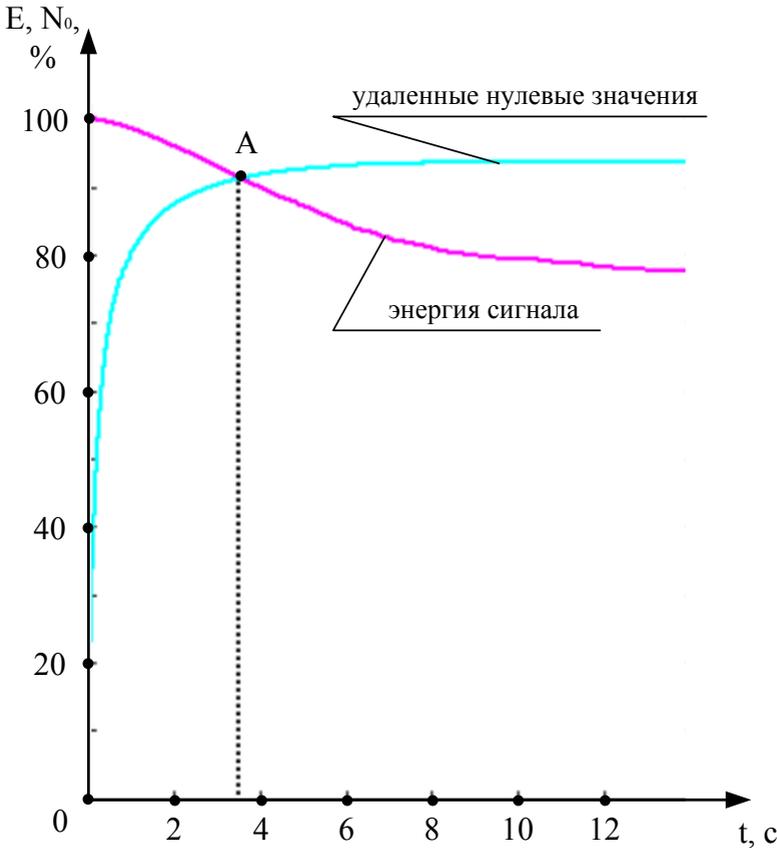


Рисунок 1.8 – Выбор показателей сохраняемой энергии сигнала и количества удаляемых нулевых точек для оптимального сжатия графика

В нашем случае сигнал сжат почти в 4 раза. Процент сжатия показывает преимущества того или иного Вейвлет-метода в обработке и хранении информации. Для более тщательного анализа

проведенного Вейвлет-сжатия одномерного сигнала посредством операции «More on Residual for Wavelet 1-D» в «Wavelet Toolbox», были выведены графики кумулятивной (верхний левый) и обыкновенной гистограммы (верхний правый) плотности распределения частотных возмущений; функции автокорреляции (нижний левый), отражающей статистическую взаимосвязь между значениями частотных величин из временного ряда с её предыдущими или последующими значениями; функции частотного спектра (нижний правый), отражающую зависимость энергии сигнала от показателя частоты. Все вышеперечисленные разностные характеристики представлены на рисунке 1.9.

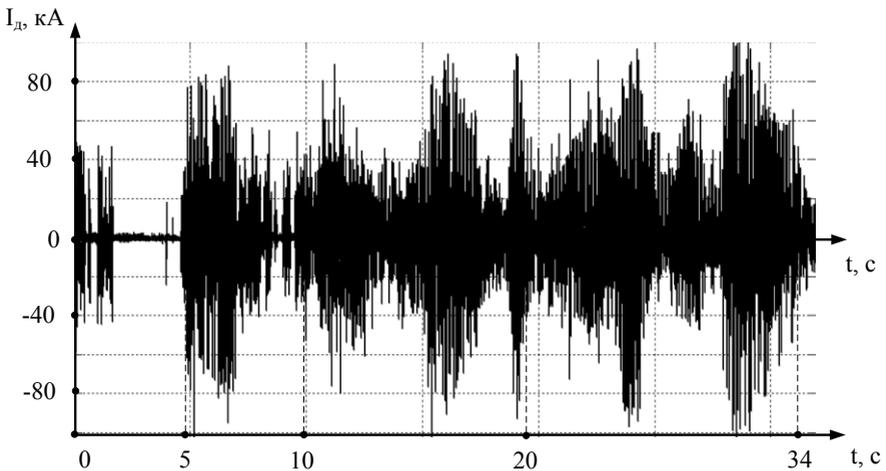


Рисунок 1.9 – Полученный сжатый сигнал

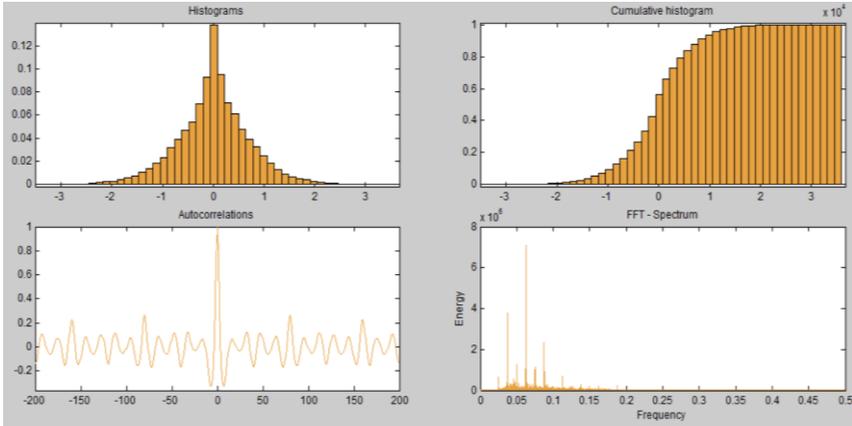


Рисунок 1.10 – Разностные характеристики исходного и сжатого сигналов

Исходя из рисунков 1.1 – 1.6 видно, что Вейвлет-преобразование является мощным инструментом в тех областях, где использовались другие методы анализа данных, например, преобразование Фурье. Возможность применения уже существующих методов обработки результатов преобразования, а также характерные особенности поведения Вейвлет-преобразования в частотно-временной области позволяют существенно расширить и дополнить возможности подобных систем.

При обработке сигналов резкопеременной нагрузки целесообразно использовать Вейвлеты Добеши третьего или четвертого уровня (db3 или db4), так как получается наиболее оптимальное сжатие сигнала с минимальным занимаемым пространством.

Так же при Wavelet-разложении необходимо учитывать белый гауссов шум, который наблюдается в канале передачи данных.

Рассмотрим сигнал  $S(t)$  для последующего разложения

$$S(t) = \sin(2\pi f \cdot t + \varphi) + n(t),$$

где  $\sin(\omega t + \varphi)$  – обычная синусоида;

$n(t)$  – белый гауссов шум с нулевым математическим ожиданием и произвольно выбранным значением среднеквадратического отклонения.

Для примера возьмём параметры синусоид  $f = 10^4$ ,  $\varphi = 45$ . Моделируемую нагрузку разложим с использованием Вейвлета db3 (Вейвлет Добеши) до третьего уровня (рисунок 1.11 (а), (б)), используя метод пороговой обработки с учётом уровней детализирующих коэффициентов  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ .

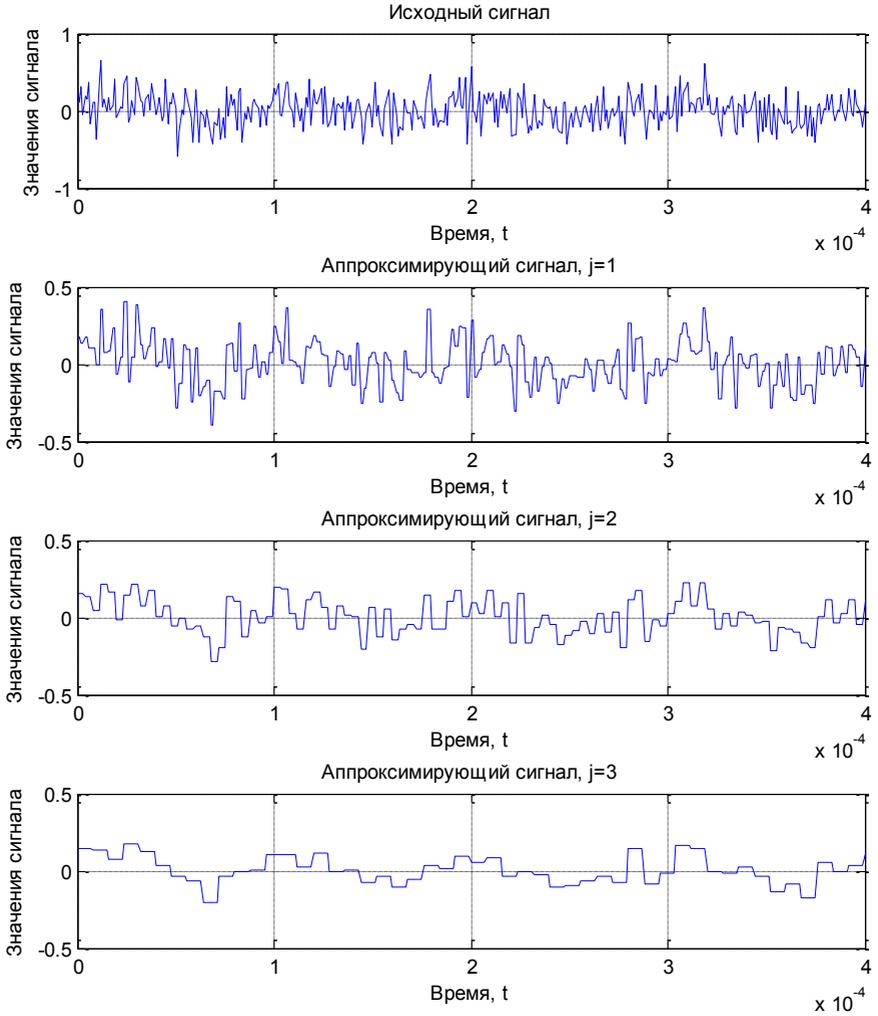
Из рисунка 1.11 видно, что при восстановлении аппроксимирующих сигналов более высокого уровня разложения структура колебания без белого гауссова шума проявляется более четко. Это связано с тем, что детали сигнала, обусловленные в данном случае наличием шума, изображаются детализирующими коэффициентами Вейвлет-разложения и содержатся в детализирующих сигналах.

Отметим, что аппроксимирующий (детализирующий) сигнал, восстановленный с третьего уровня разложения, имеет более ступенчатую структуру, по сравнению с аппроксимирующими сигналами, восстановленными с первого второго уровней разложения.

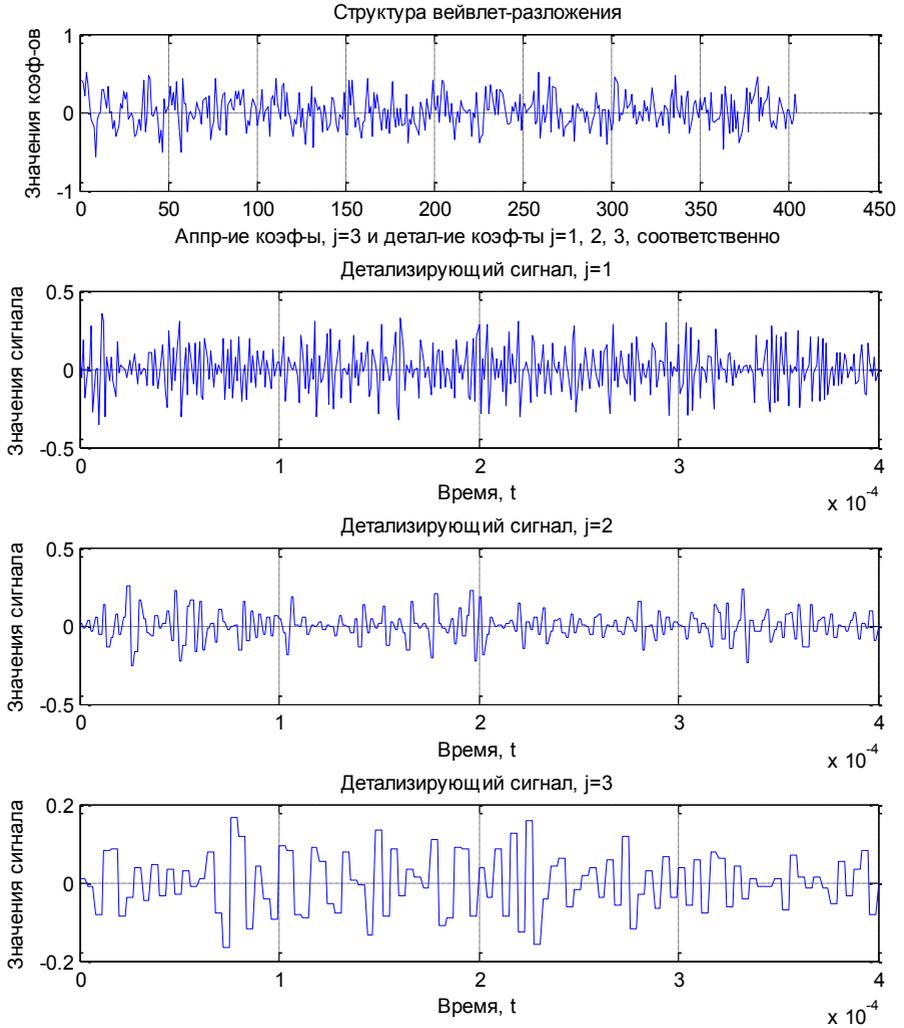
Получаемые детализирующие коэффициенты и восстановленные по ним графики представляют собой частотные характеристики, по которым можно обнаружить даже самые слабые частотные возмущения. Амплитудные коэффициенты, получаемые вместе с детализирующими, представляют высокую ценность, так как видимая амплитудная область, освобожденная от высокочастотных возмущений, отражает общий ход рабочего процесса и электрический режим электроприемника. Ввиду того, что рассматриваемая выше резкопеременная нагрузка содержит 32000 точек целесообразно увеличить уровень Вейвлет-разложения на произвольную величину. Для удобного оценочного восприятия эксперимент проведем в программном пакете MATLAB Simulink. Полученную нагрузку посредством блока «To file» переводим в одномерный сигнал.

Получаемые детализирующие коэффициенты и восстановленные по ним графики представляют собой частотные

характеристики, по которым можно обнаружить даже самые слабые частотные возмущения. Амплитудные коэффициенты, получаемые вместе с детализирующими, представляют высокую ценность, Для этого в системе Workspace выделяем только амплитудные значения сигнала. Следующим этапом необходимо вызвать окно Wavelet Toolbox и запустить одномерный пакетный Вейвлет-анализ дискретного сигнала «Wavelet Packet 1-D». После открытия сохраненного сигнала модели задаем уровень (выбран произвольно восьмой уровень) и тип Вейвлета (Вейвлет Добеши), а также тип энтропии (Шеннона). Отразим результат на рисунке 1.12.



a)



б)

Рисунок 1.11 – Вейвлет-разложение исходного сигнала, где представлены аппроксимирующие (а) и детализирующие (б) сигналы на трёх уровнях

После выгрузки сигнала и его анализа, в левой части появляется дерево Вейвлет-разложения. В данной ситуации представлено пакетное дерево Вейвлет-разложения, которое отличается от быстрого разложения тем, что раскладываются как аппроксимирующие коэффициенты (низкочастотные, левая составляющая Вейвлета), так и детализирующие коэффициенты (высокочастотные, правая составляющая Вейвлета). Для быстрого анализа достаточно раскладывать только аппроксимирующие коэффициенты, однако для комплексного анализа необходимо разложение и детализирующих с целью их восстановления уровня.

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 (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.

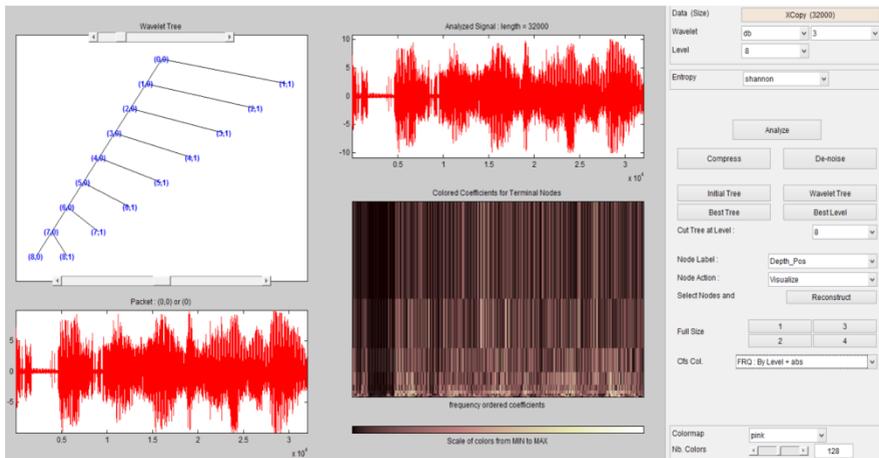


Рисунок 1.12 – Задача параметров сигнала в Wavelet Packet 1-D

При восстановлении аппроксимирующих сигналов более высокого уровня разложения структура колебания без белого гауссова шума проявляется более четко. Это связано с тем, что детали сигнала, обусловленные в данном случае наличием шума, изображаются детализирующими коэффициентами Вейвлет-разложения и содержатся в детализирующих сигналах, приведенных на рисунке 1.12.

В программной среде дерево Вейвлет-разложения представлено в виде характерных точек, где при их нажатии открывается график соответствующего уровня. Ниже на рисунке 1.13 представлен график всех уровней за исключением крайнего восьмого, так как представленная линия уже не несёт смысловой нагрузки относительно анализа амплитудных значений.

Точка  $(0,0)$  (программное дерево указано на рисунке 1.12 в верхнем левом окне) в данном случае является исходной с исходным графиком, соответствующий функции  $S(t)$  согласно (1.6). Точка  $(1,0)$  представляет собой  $A_1(t)$  – аппроксимированный график исходной точки  $(0,0)$ . Согласно дереву, по левой стороне координаты формата  $(n,0)$  соответствуют графикам  $A_n(t)$ . Точка  $(1,1)$  отражает функцию  $D_1(t)$  – детализирующий график исходной точки  $(0,0)$ , а координаты формата  $(n,1)$  соответствуют графикам  $D_n(t)$ . Не трудно заметить по ветвям, что каждая пара графиков точек  $(n,0)$  и  $(n,1)$  соответствуют родительскому аппроксимированному графику  $(n-1,0)$ . Каждый ниже идущий график на рисунке 3.9 имеет меньшее количество точек в 2 раза и не трудно заметить, что при изначальном значении в 32000 на седьмом уровне наблюдается всего лишь 250 (на восьмом уровне 125, что на таком промежутке времени несёт мало информации относительно проходящих электрических процессов). Фактически, при наложении статистических инструментов на функции  $A_6(t)$  и  $A_7(t)$  (при грубых расчетах) можно выделить коридор рабочих амплитудных значений и определить порог максимальных и минимальных значений, за который график нагрузки электроприемника при нормальном режиме работы не должен выходить. По графикам  $D_1(t)$  –  $D_5(t)$  определяются частотные

возмущения, которые впоследствии негативно влияют на общие показатели качества электроэнергии.

Отметим, что любые сжатые сигналы имеют потерю качества сигнала (энергии), тем самым идентифицировать точку, подходящей к порогу нормального режима работы, достаточно проблематично. Исходя из рисунков выше видно, что Вейвлет-преобразование является мощным инструментом в тех областях, где использовались другие методы анализа данных, например, преобразование Фурье. Возможность применения уже существующих методов обработки результатов преобразования, а также характерные особенности поведения Вейвлет-преобразования в частотно-временной области позволяют существенно расширить и дополнить возможности подобных систем.

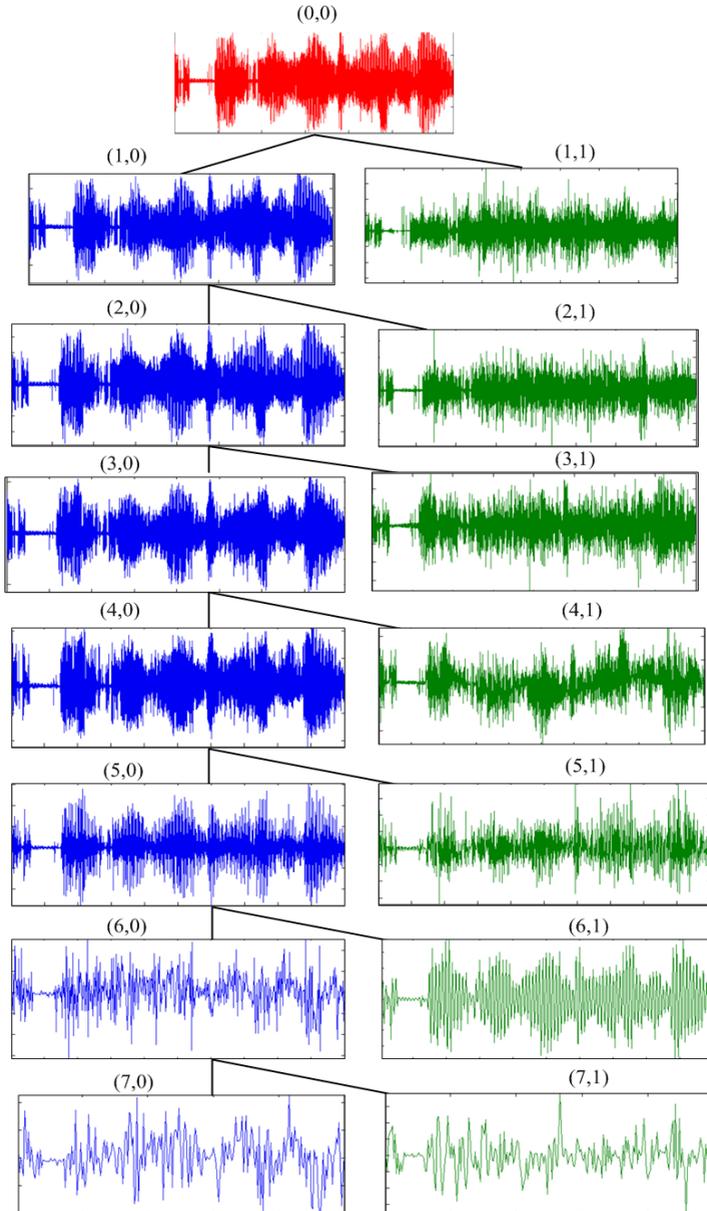


Рисунок 1.13 – Графическое изображение дерева Вейвлет-разложения

Для повторно-кратковременных сигналов можно использовать Вейвлет Хаара (принадлежит к классу Вейвлетов Добеши). Он имеет масштабирующую функцию формы прямоугольника, а Вейвлет-функция – форму меандра. Именно эти структуры и проявляются, когда число коэффициентов Вейвлет-разложения, используемых для представления аппроксимирующих (детализирующих) сигналов, уменьшается, подобно тому, как это происходит в теории рядов Фурье.

Таким образом, Вейвлет-преобразование достаточно перспективно в области анализа резкопеременных нагрузок. Представляя график нагрузок в виде сверток, будут не только обнаружены высокочастотные колебания, которые невозможно было бы обнаружить 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.**

## **1.2. Устранение нарушения функционирования компенсирующего устройства**

Потребители электрической энергии с резкопеременными нагрузками широко используются на металлургических предприятиях. Их режим работы обусловлен высокочастотными колебаниями значений мощности, что вызывает в дальнейшем изменения напряжения в «неспокойной» сети, негативно влияя на работу всех электроприемников, входящие в данную сеть. Наиболее тяжелым режимом обычно считают режим расплавки холодной шихты в дуговых сталеплавильных печах. Однако, исходя из известных электрических параметров системы, а так же статистического анализа предыдущих процессов плавки холодной шихты можно обеспечить

наиболее эффективный способ управления электрической нагрузкой дуговой печи. Для этого необходимо предусмотреть следующий комплекс мер: применить Wavelet-анализ вместо традиционного Фурье-анализа получаемого сигнала с целью идентификации негативных воздействий и характерных амплитудных всплесков; применить методы статистического анализа для идентификации возможного электрического фликера с целью минимизации его негативных последствий; за счет максимального сжатия получаемого сигнала обеспечить высокую точность выводимого результата и, соответственно, быстродействие анализа резкопеременных нагрузок. Нагрузки такого рода имеют большое число точек, что затрудняет их быстрое исследование традиционными средствами идентификации, и они занимают весьма ёмкий по времени и ресурсам объём. При использовании всех вышеперечисленных мер по управлению ДСП с соответствующей автоматикой, можно добиться максимального результата по энергоэффективности работы данных электроприемников.

Всё больше зарубежных ученых исследуют и практикуют wavelet-анализ в различных сферах: от теории сигналов и графов до стратегических областей радиосвязи и электроэнергетики. Разумеется, использование Wavelet-преобразования (Вейвлет) позволяет сжать график без существенной потери энергии сигнала, что положительно сказывается на быстродействии с возможностью анализа в режиме реального времени и занимаемом в итоге объёме.

Методы Вейвлет-преобразования высокочастотных сигналов предлагается использовать для выявления и локализации негативных факторов (явление фликера), влияющих на качество электроэнергии. Однако по амплитуде негативные возмущения могут отличаться в несколько раз и для того, чтобы автоматически отслеживать такие явления целесообразно использовать инструменты статистического анализа. Например, при использовании линий Боллинджера, при должной настройке, можно отследить в автоматическом режиме негативные возмущения.

В металлургических производствах эффективно использовать современные компенсирующие системы типа СТАТКОМ, но не уделяется внимание его нормальному функционированию при возникновении наиболее тяжелого режима дуговой печи – режима расплавки колодцев. При возникновении эксплуатационных коротких замыканий (неотъемлемая часть такого режима) в дуговой печи происходит блокировка входных ключей компенсирующего устройства СТАТКОМ, то есть происходит переход в аварийный режим и наиболее тяжелый электрический режим дуговой печи проходит без компенсации.

Для нейтрализации блокировки ключей необходимо отразить алгоритм определения эксплуатационных коротких замыканий. Инициализация эксплуатационного короткого замыкания в дуговой печи достигается посредством Вейвлет-анализа, где определяется область частотных возмущений, возникающие только при нормальном режиме работы. А так же достигается посредством применения индикаторов Боллинджера, где выделяется коридор рабочих амплитудных значений и определяется порог максимальных и минимальных значений. Таким образом, одновременно должны выполняться следующие условия:

- а) мгновенная частота превышает среднестатистическую частоту колебаний  $f_{K3} > f_2$ , где  $f \in [f_1 \dots f_2]$ ;
- б) значение  $S_i$  превышает область верхней скользящей, полученной в результате построения линий Боллинджера, а именно удовлетворяет следующему условию

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

где  $i$  – численное значение периода;

$S_i$  – значение мощности в  $i$ -ый период;

$N$  – установленный максимальный период (при  $N \in Z$ );

$\overline{S}$  – выборочное среднее значение мощности за период;

$K$  – коэффициент чувствительности.

В случае (а) видно возрастающую величину частотного возмущения мощности, в случае (б) 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. На рисунке 1.14 представлены возможные режимы работы электропечной установки и, соответственно, реакция системы управления компенсирующим устройством на текущий режим работы. Отметим, что некоторые электрические показатели должны отражаться в диспетчерской службе либо должна присутствовать функция реакции системы управления электроприемником (дуговой печью) для устранения негативных последствий.

Таким образом, было найдено решение по нейтрализации блокировки входных ключей компенсирующей установки СТАТКОМ. Благодаря быстрой реакции последнего, реализация данного алгоритма возможна в отличие от большинства тиристорных компенсирующих устройств.

### **1.3. Повышение эффективности работы дуговых печей**

Электрические печные агрегаты являются мощными потребителями электроэнергии, где протекают быстрые процессы, имеющие нелинейный вид и негативно влияющие на энергосистему. В качестве особенности стадии расплавления можно выделить беспокойное горение электрической дуги, которое характеризуется стохастическими высокочастотными графиками электрических нагрузок, как циклического, так и хаотического характера.

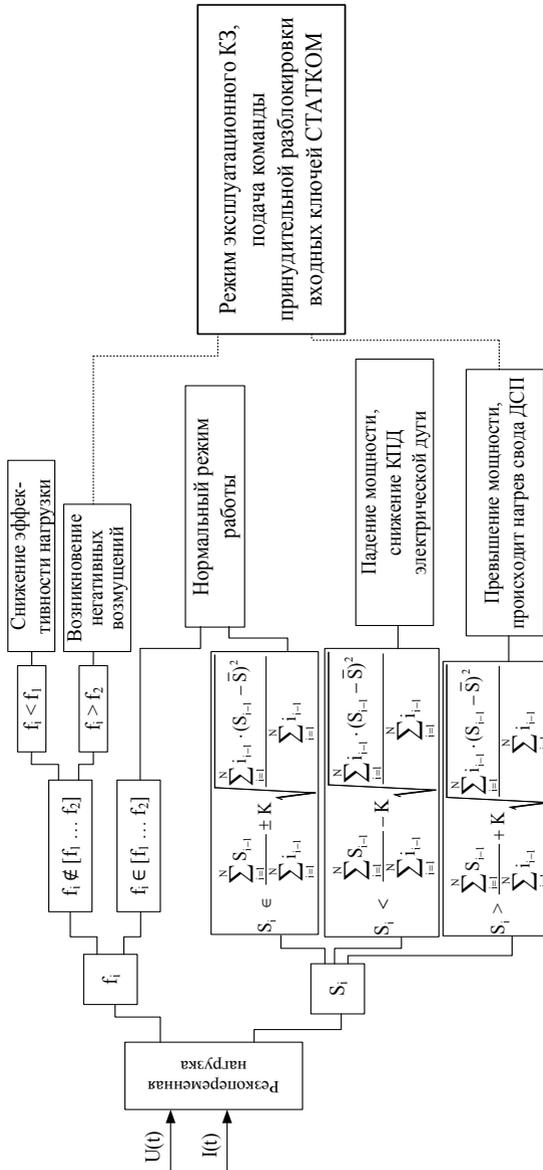


Рисунок 1.14 – Алгоритм действия системы управления СТАТКОМ при возможных режимах работы электроприемника

Данный продукт позволяет в реальном времени отобразить распределение напряженности электрического поля в ванне печных агрегатов (рисунок 1.15), что способствует оптимизации регулирования электрического режима печи посредством автоматическим переходом на другую ступень напряжения вторичной обмотки трансформатора или аппаратами автоматики приводных систем механизма перемещения электродов, что способствуют снижению энергетических и временных затрат, необходимых для работы объекта.

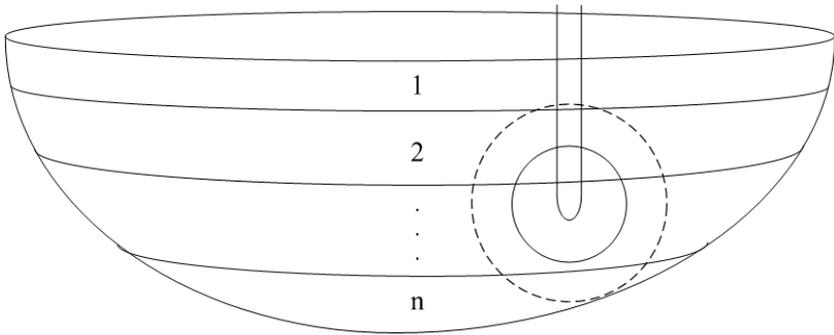


Рисунок 1.15 – Условно разбитая на слои ванна печного агрегата

Выполнение программы делится на 2 этапа:

- разбиение исходной области методом сеток;
- вычисление значений напряжения в полученной на первом этапе сетке.

Для выполнения первого этапа пользователю необходимо либо вручную ввести входные параметры (указаны ниже), либо они могут получаться через СОМ-порт и расчет будет происходить в режиме реального времени (рисунок 1.16):

- радиус дуговой печи, м;
- число разбиений исходной области по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . По оси  $X < 30$ , по оси  $Y < 30$ , по оси  $Z < 7$ . Большее число по осям  $X$  и  $Y$  брать не целесообразно, т.к. при малом увеличении точности существенно нагружает ЭВМ и увеличивает время расчета;

- координаты положения  $X, Y$  одного из электродов;
- радиус электродов, м.

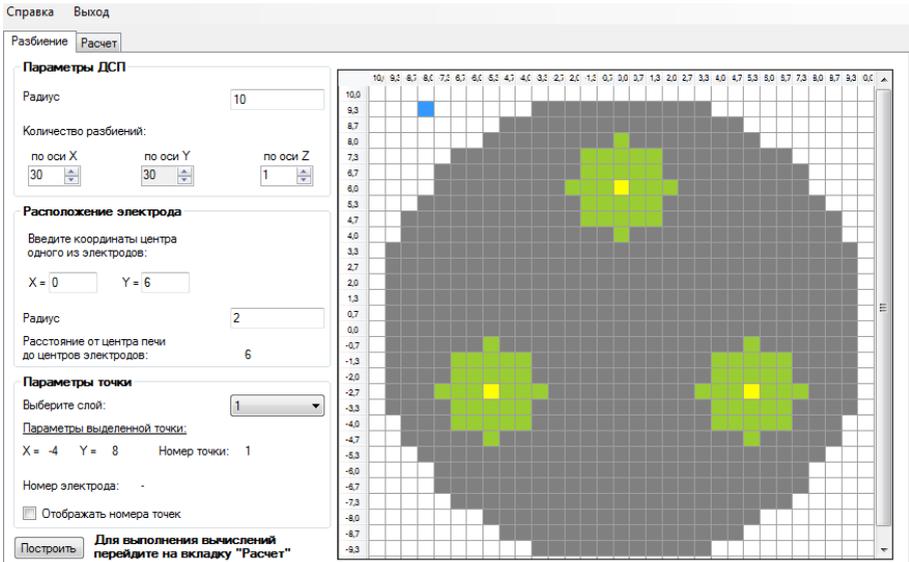


Рисунок 1.16 – Графическая область с задачей параметрических координат

В результате будет построена дискретизированная область с цветовыми обозначениями: желтым цветом отмечаются центры электродов; зеленым цветом – область электрода с учетом радиуса; серым цветом – остальная часть печного агрегата.

Для второго этапа входные данные следующие (рисунок 1.17):

- шаг по оси  $Z$ , м;
- высота расположения 1-го слоя шихты, м;
- удельная электрическая проводимость среды,  $\text{См/м}$ ;
- магнитная проницаемость среды,  $\text{Гн/м}$ ;
- частота тока, Гц;
- время, с;
- вектор  $U$  для электродов.

После выполнения расчетов в таблице отобразятся результаты вычислений. Также имеется возможность графически сравнить значения напряжений в разных точках или в одной и той же точке, но при разных исходных данных (рисунок 1.18). После выполнения расчетов дискретизированная область, которая отображается на вкладке «Разбиение», наглядно в цветовом формате отображает распределение напряжений на разных слоях ДСП. При этом ячейки желтых оттенков имеют самое высокое значение напряжения, сине-голубых – самое низкое, зеленых имеют промежуточное значение напряжения. Серым цветом отображаются ячейки, значения в которых близки к нулю, черным – сами электроды.

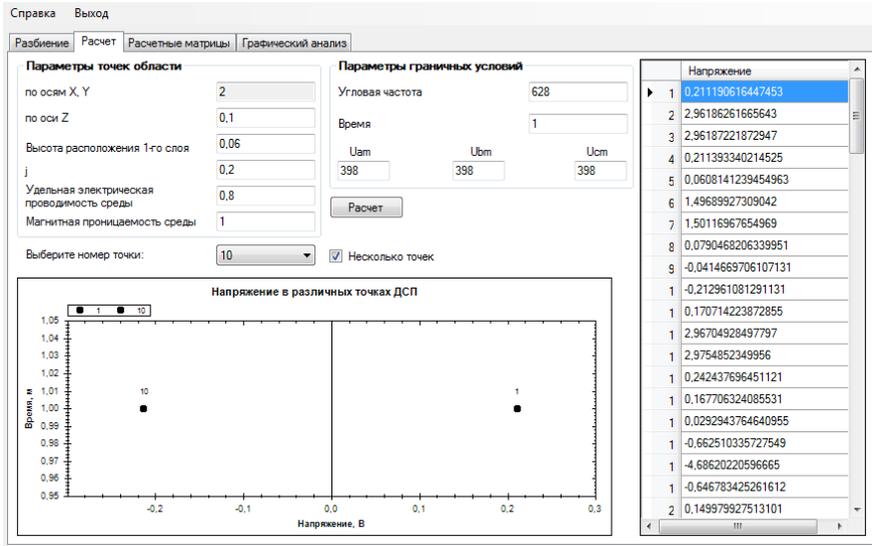


Рисунок 1.17 – Окно расчета отображаемых узлов каждого слоя

После выполнения вычислений появляются вкладки «Расчетные матрицы» и «Графический анализ». Если размерность системы уравнений больше 250, вкладка «Расчетные матрицы» не отображается из-за отсутствия наглядности. Важной составляющей в повышении быстродействия программы является верный выбор метода расчета

матричных систем значений напряжения. Все численные методы решения системы матричных уравнений делятся на две группы: точные и итерационные.

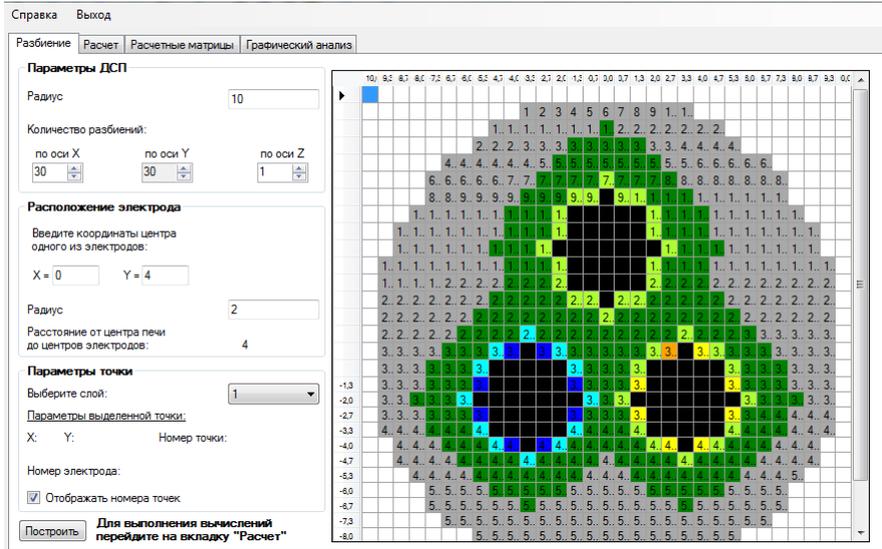


Рисунок 1.18 – Распределение напряжений в исходной области

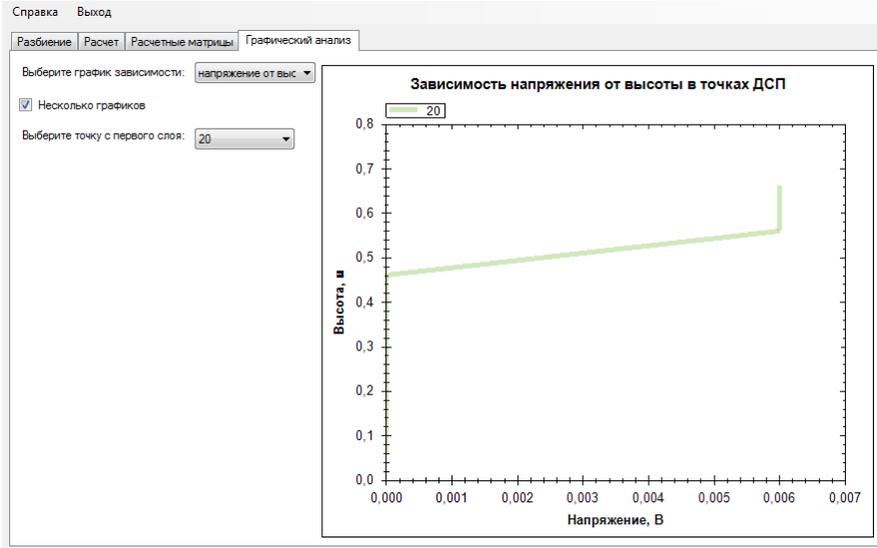


Рисунок 1.19 – Зависимости напряжения от высоты расположения точки разбиения

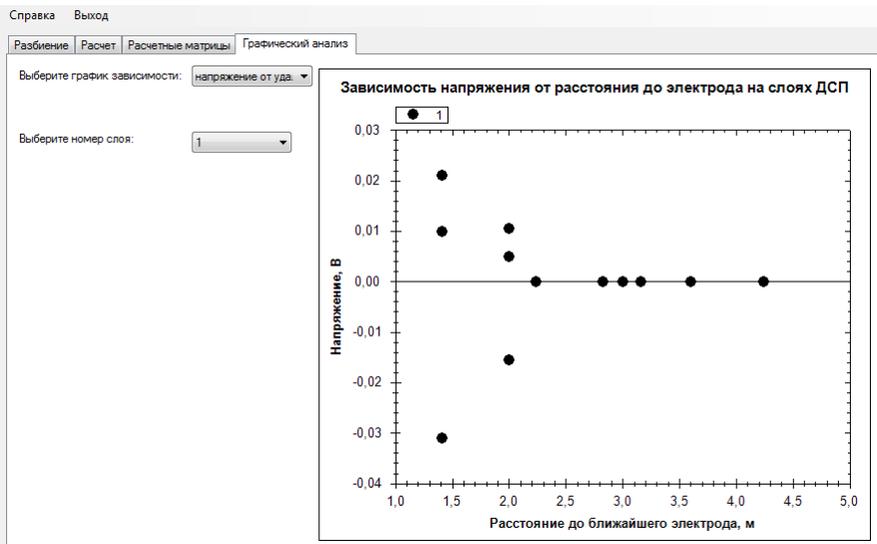


Рисунок 1.20 – График зависимости напряжения от удаленности от электрода

У обоих типов есть как недостатки, так и преимущества. В качестве преимущества точных методов можно выделить то, что данная группа методов позволяет получить численное решение СЛАУ за конечное число арифметических операций. Использование же итерационных методов позволяет найти приближенное решение системы с заданной степенью точности (метод простой итерации, метод Зейделя, метод последовательной релаксации). Был выбран прямой метод Гаусса для решения системы матричных уравнений, так как в случае расчетов реального времени, данный метод обеспечивает более высокую точность вычислений в сравнении с итерационными методами. Установив метод Гаусса в качестве основного расчетного, удалось обеспечить реализацию графика зависимости напряжения от высоты расположения для отдельной точки разбиения (рисунок 1.19), а так же зависимости напряжения от удаленности от электрода (рисунок 1.20).

Таким образом, комбинированное применение модернизированной системы управления компенсирующим устройством, а также разработанной программы для ЭВМ позволяет максимально снизить негативные воздействия на систему электроснабжения повышая качество электроэнергии, устранить в максимально возможных пределах взаимовлияние электроприемников с резкопеременным характером нагрузки, находящихся на одной шине, а также обеспечить бесперебойную подачу качественной электроэнергии, что положительно скажется на динамике выпускаемой продукции и её качестве.

#### 1.4. Выводы по главе

1. Использование индикаторов Боллинджера 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. Использование Вейвлет-анализа позволяет выявить различные негативные факторы, 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.

2. Совместное использование способов минимизации негативных факторов посредством индикаторов Боллинджера и Вейвлет-анализа позволяет представить возможные режимы работы электропечной установки для адекватного восприятия систем управления электротехническим комплексом «ДСП-СТАТКОМ на текущий режим работы.

3. Использование программного комплекса для ЭВМ, отражающий процесс расплава шихты в дуговой печи, обеспечивает анализ кривых нагрузок, а анализирующий блок выделяет области с амплитудными или частотными возмущениями и подаёт необходимые сигналы системам управления электротехнического комплекса «ДСП – СТАТКОМ», что обеспечивает эффективное функционирование электротехнических комплексов с резкопеременными нагрузками.

### 1.5. Контрольные вопросы

1. Опишите применение линий Боллинджера в энергетике.
2. Что позволяет определить использование индикаторов Боллинджера? Что позволяет определить использование Вейвлет-анализа?
3. Какие достоинства и недостатки Вейвлет-преобразования?
4. Как происходит устранение нарушения функционирования компенсирующего устройства?
5. Как выглядит алгоритм действия системы управления СТАТКОМ при возможных режимах работы электроприемника?

## 2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

В главе 1 были выявлены факторы, влияющие на систему электроснабжения и, как следствие, на производительность дуговых сталеплавильных печей. Для наглядности приведена результирующая ситуационная диаграмма на рисунке 2.1 для одной ДСП. При наличии группы электропечей взаимовлияние одной на другую увеличивается.

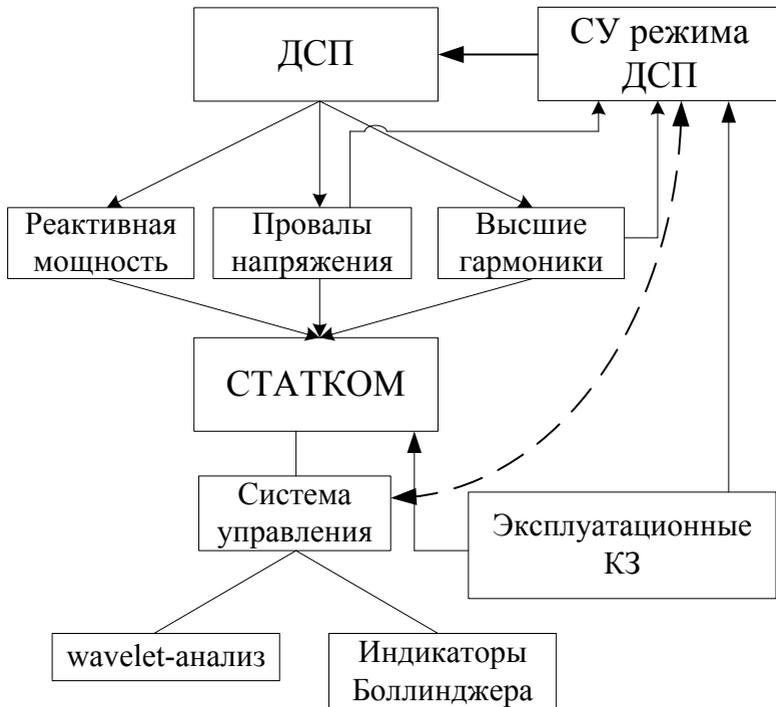


Рисунок 2.1 – Влияние негативных факторов и их компенсация

Согласно рисунку 2.1 компенсирующее устройство СТАТКОМ влияет не только на показатели качества системы электроснабжения предприятия, но и на эффективность работы электрической установки.

Нейтрализация блокировки входных ключей преобразовательного тиристорного элемента позволяет обеспечить безотказную компенсацию, что удовлетворяет условию безостановочного производства. В таком случае, при соблюдении мер безопасности, замена отказавшего элемента может производиться под нагрузкой.

Включение на «неспокойную» шину 35 кВ компенсационной системы типа СТАТКОМ с системой управления основанной на Вейвлет-анализе и статистической составляющей – индикаторах Боллинджера позволяет в результате:

- снизить в системе электроснабжения значения реактивной мощности;
- снизить воздействие высших гармоник, обусловленных работой дуговой сталеплавильной печи, что позволяет повысить эффективность работы системы управления режимом ДСП;
- снизить время одного цикла работы ДСП, за счет увеличения активной мощности электрической дуги.

Для того чтобы наглядно определить результативность внедрения компенсирующего устройства типа СТАТКОМ с модернизированной системой управления, проведем расчет показателей эффективности в ЭСПЦ ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат». Сталеплавильное производство основывается на электродуговой расплавке шихты дуговыми печами ДСП-150. В настоящий момент там компенсатором реактивной мощности является тиристорное фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ). Отметим, что при установке тиристорной ФКУ на «неспокойной» шине показатели провалов напряжения снизились до стандартных, а коэффициент мощности  $\cos \varphi$  электрической установки увеличился со среднего значения 0,75 до 0,88. В этом случае время одной выплавки снижается с  $t = 1,4$  часа до  $T_{p1} = 1,193$  часа. Однако, высшие гармоники высокого порядка (250 Гц и выше) остаются в системе электроснабжения, влияющие на работу системы управления электрического режима ДСП. При установке системы

СТАТКОМ средний показатель электрической установки  $\cos \varphi \approx 0,9$ . В таком случае для отражения величины изменения показателей эффективности целесообразно рассматривать переход с  $\cos \varphi_1 \approx 0,88$  до  $\cos \varphi_2 \approx 0,9$ . Отразим величину изменения показателей эффективности ниже, в пунктах 2.1 – 2.4.

### 2.1. Эффективность повышения коэффициента мощности

Ранее был описан принцип действия компенсационной системы СТАТКОМ, в результате напряжение на «неспокойной» шине нормализуется до стандартных значений, но при этом снижается реактивная мощность при неизменной полной мощности, что даёт прирост активной мощности, полезно передаваемая в электрическую дугу на нагрев шихты. В связи с этим кратно увеличивается значение коэффициента мощности электрической установки  $\cos \varphi$ . Учитывая вышеперечисленное, при изменении максимальной активной мощности с 34,125 МВт (при тиристорной ФКУ) на 34,91 МВт (при установке СТАТКОМ с управляющим блоком) величина  $\cos \varphi$  увеличится в 1,023 раза. При работе дуговой печи величина  $\cos \varphi$  изменяется в некоторых пределах, так, например, в период расплава ДСП-150 разброс коэффициента мощности лежит в пределах [0,7...0,8] (средняя 0,75), а с установленной тиристорной ФКУ –  $\cos \varphi \in [0,83...0,93]$ . При установке компенсационной системы СТАТКОМ, показатель  $\cos \varphi$  вырастает до значений [0,82...0,95]. Тогда величина экономии  $\Delta Z_{СТ}$  электроэнергии в процентном отношении от повышения показателя  $\cos \varphi$  будет равна

$$\Delta Z_{СТ} = 0,05 \cdot W_a \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right)^2 \right] \cdot \Pi_{\varphi}, \quad (2.1)$$

где  $W_a$  – годовой расход электроэнергии дуговой печи,

$\cos \varphi_1$  – коэффициент мощности дуговой печи до введения компенсации,

$\cos \varphi_2$  – коэффициент мощности дуговой печи после введения компенсации,

$\text{Ц}_э$  – цена электроэнергии за 3,87 р/кВт = 3870 р/МВт.

Параметр годового расхода электроэнергии ДСП-150:

$$W_a = W_{уд.} \cdot n_{Me}, \quad (2.2)$$

где  $W_{уд.}$  – величина удельного расхода электроэнергии, принимает значение 396 кВт·ч/т = 0,396 МВт·ч/т согласно ГОСТ 27729-88 (переиздание в марте 2006 г., является действующим) «Печи дуговые сталеплавильные. Нормативы расхода энергии»;

$n_{Me}$  – количество годового выпуска продукции, определяется делением общей продукции на количество печей (данные предоставлены в годовом отчете ОЭМК за 2016 г.): 4,3 млн. т. / 4 = 1,075 млн. т.

Таким образом, с учетом (2.1) и (2.2) величина годовой экономии  $\Delta Z_1$  от повышения показателя  $\cos \varphi$  будет равна

$$\begin{aligned} \Delta Z_1 &= 100 \cdot \frac{\Delta Z_{сг}}{Z_{ФКУ}} = 100 \cdot \frac{0,05 \cdot W_{уд.} \cdot n_{Me} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right)^2 \right] \cdot \text{Ц}_э}{Z_{ФКУ}} = \\ &= 100 \cdot \frac{0,05 \cdot 0,396 \cdot 1,075 \cdot 10^6 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,88}{0,9} \right)^2 \right] \cdot 3870}{225376,67} = 16,062\% . \end{aligned}$$

## 2.2. Эффективность от снижения негативных возмущений

Известно, что резкопеременные нагрузки негативно влияют не только на параллельную работу дуговых печей, но и на различные системы освещения и оборудование с элементной базой. Особенно сильно будет выражен эффект от негативных воздействий на системе управления режимами дуговой сталеплавильной печи. Так, в случае глубокой проплавки шихты возникает резкий наброс мощности, что вызывает гармонические колебания характеристик непосредственно приёмника сигнала системы управления, вследствие чего начинается подстройка электрического режима ДСП. Данные колебания отличаются от максимальной эффективной точки рабочей характеристики (точка  $P_{\text{дmax}}$  – точка экстремума данной характеристики).

Такие колебания отклоняются от  $P_{\text{дmax}}$  примерно на 1,4% и подстройка системы управления ДСП длится порядка 1,5 минуты, однако за целый цикл плавки суммарное время подстройки может достигать до 20% от общего времени цикла, который для ДСП-150 составляет 1,193 ч. Учитывая, что от этого напрямую зависит производительность ДСП, то наилучшие её показатели (при установке компенсационной системы с предложенной системой управления) определяются как

$$g_2 = \frac{P_{\text{дmax}}}{W_{\text{уд.расх.}}}, \quad (2.3)$$

где  $P_{\text{дmax}}$  – значение активной мощности, при которой достигается максимальная производительность ДСП;

$W_{\text{уд.расх.}}$  – величина удельного потребления мощности на тонну продукции и отличается от показателя в формуле (2.2) тем, что принимается в кВт/т.

Так как известно время одного цикла ДСП (1,193 ч. с установленной ФКУ), то показатель  $W_{уд.расх.} = W_{уд.} \cdot t = 0,396 \cdot 1,193 = 0,473$  МВт/т.

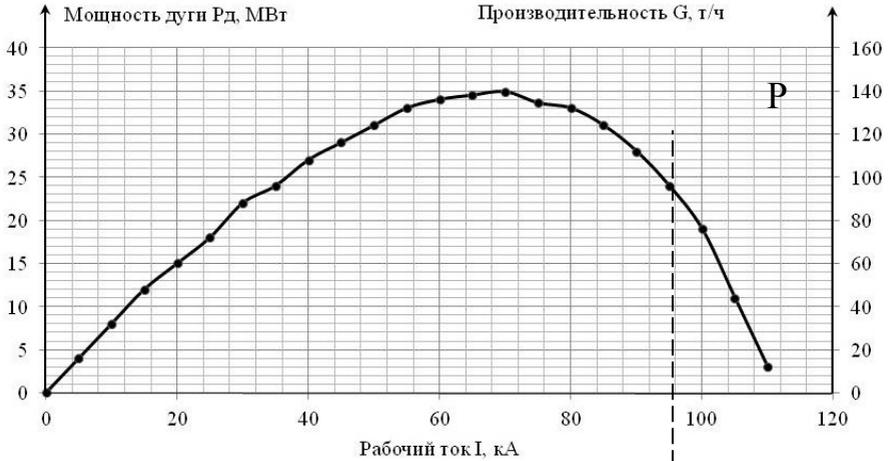


Рисунок 2.2 – Рабочая характеристика ДСП-150

Учитывая (2.3) отразим производительность печи с учетом подстройки системы управления ДСП. Мощность дуги в этом случае разделяется на показатель  $P_{дmax}$ , который наблюдается в 80% времени и  $P_{д.откл.}$  – мощность дуги, при отклонении, наблюдающееся в течении 20% времени и составляет 98,6% от  $P_{дmax}$ . В этом случае величина производительности

$$g_1 = \frac{0,8 \cdot P_{дmax} + 0,2 \cdot P_{д.откл.}}{W_{уд.расх.}}. \quad (2.4)$$

С учетом (2.3) и (2.4) разница производительности в двух случаях

$$\Delta g = g_2 - g_1 = \frac{P_{д.мах} - 0,8 \cdot P_{д.мах} - 0,2 \cdot P_{д.откл.}}{W_{уд.расх.}} = \frac{0,2 \cdot (P_{д.мах} - P_{д.откл.})}{W_{уд.расх.}} \quad (2.5)$$

Величину экономии  $\Delta Z_2$  с учетом (2.5) можно представить как

$$\Delta Z_{СТ} = \Delta g \cdot n_{цикл.год.} \cdot Ц_{Ме} = \frac{0,2 \cdot (P_{д.мах} - P_{д.откл.})}{W_{уд.расх.}} \cdot n_{цикл.год.} \cdot Ц_{Ме}; \quad (2.6)$$

$$\Delta Z_2 = \frac{Z_{СТ} \cdot 100}{Z_{ФКУ}} - 100 = \frac{\left( \frac{0,2 \cdot (35 - 34,51)}{0,473} \cdot 7019 \cdot 4500 \right) \cdot 100}{4759310,51} - 100 = 37,667\%$$

где  $\Delta g$  – разница производительности печи в разных случаях (2.5);

$n_{цикл.год.}$  – количество циклов ДСП в год, при работе в 24 часа и 349 рабочих суток в год, т.е.  $(24/1,193) \cdot 349 = 7019$ ;

$Ц_{Ме}$  – себестоимость выпускаемой продукции.

### 2.3. Эффективность от снижения времени плавки печей

При установке компенсирующего устройства СТАТКОМ с предложенной системой управления позволит снизить время одного цикла плавки шихты. Для рабочего цикла при различных коэффициентах мощности  $\cos \varphi$  необходимо постоянное количество энергии  $\Delta W_{печи} = \text{const}$ , разница будет только во времени получения энергии. Выделим каждое из этих значений:

$$\cos \varphi = \frac{P_d}{S}, \quad (2.7)$$

где  $P_d$  – мощность дуги в ДСП;

$S$  – полная затрачиваемая мощность.

$$\Delta W_{\text{печи}} = P_{\text{д}} \cdot T_{\text{р}}, \quad (2.8)$$

где  $P_{\text{д}}$  – мощность дуги в ДСП;  $T_{\text{р}}$  – время, затраченное на расплав.

Учитывая выражение (2.8), увеличение значения  $P_{\text{д}}$  при  $\Delta W_{\text{печи}} = \text{const}$ , кратно снижает значение  $T_{\text{р}}$ . Следовательно, увеличивается количество циклов расплавки в год, что, соответственно, увеличивает количество выпускаемой продукции. При  $\Delta W_{\text{печи}} = \text{const}$  и выразив  $P_{\text{д}1,2}$  (из 2.7) выражение (2.8) примет следующий вид в случаях различных  $\cos \varphi$ :

$$\Delta W_{\text{печи}} = P_{\text{д}1} \cdot T_{\text{р}1} = P_{\text{д}2} \cdot T_{\text{р}2}, \quad (2.9)$$

где  $P_{\text{д}1,2}$  – мощность дуги в ДСП в случаях отсутствия и присутствия компенсирующей установки;

$T_{\text{р}1,2}$  – время, затраченное на расплав в случаях отсутствия и присутствия компенсирующей установки.

Преобразуем выражение (2.9) через известные в п. 2.1  $\cos \varphi_{1,2}$ .

$$\cos \varphi_1 \cdot S \cdot T_{\text{р}1} = \cos \varphi_2 \cdot S \cdot T_{\text{р}2}. \quad (2.10)$$

При известном значении  $T_{\text{р}1} = 1,193$  ч., выразим  $T_{\text{р}2}$ , используя (2.10)

$$T_{\text{р}2} = \frac{\cos \varphi_1 \cdot T_{\text{р}1}}{\cos \varphi_2} = \frac{0,88 \cdot 1,193}{0,9} = 1,167 \text{ ч.} \quad (2.11)$$

При работе ДСП-150 24 часа в сутки и 349 рабочих дней в году, определим число циклов с компенсирующей установкой и без неё:

$$n_{\text{цикл.год.1}} = \frac{24 \cdot 349}{T_{p1}} = \frac{24 \cdot 349}{1,193} = 7019;$$

$$n_{\text{цикл.год.2}} = \frac{24 \cdot 349}{T_{p1}} = \frac{24 \cdot 349}{1,167} = 7179.$$

Произведем расчет эффективности  $\Delta Z_4$

$$\Delta Z_{\text{СТ}} = (n_{\text{цикл.год.2}} - n_{\text{цикл.год.1}}) \cdot m_{\text{Ме}} \cdot \text{Ц}_{\text{Ме}}; \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z_3 &= 100 \cdot \frac{\Delta Z_{\text{СТ}}}{Z_{\text{ФКУ}}} = 100 \cdot \frac{(n_{\text{цикл.год.2}} - n_{\text{цикл.год.1}}) \cdot m_{\text{Ме}} \cdot \text{Ц}_{\text{Ме}}}{Z_{\text{ФКУ}}} = \\ &= 100 \cdot \frac{(7179 - 7019) \cdot 143,85 \cdot 4500}{Z_{\text{ФКУ}}} = 15,384\%, \end{aligned}$$

где  $m_{\text{Ме}}$  – масса металла, получаемая в течении одного цикла;

$\text{Ц}_{\text{Ме}}$  – себестоимость продукции.

При включении системы СТАТКОМ на «неспокойную» шину показатель реактивной мощности снижается, следовательно, нормализуется синусоида напряжения и колебания напряжения с высшими гармоническими составляющими не влияет на параллельно работающие дуговые сталеплавильные печи. В связи с этим производительность печей увеличивается при постоянном значении максимальной активной мощности. Так же уменьшается коэффициент  $k_{\text{ц}}$ , так как реактивная мощность компенсируется. Нейтрализация блокировки входных ключей к преобразовательным блокам СТАТКОМ позволяет безостановочно работать в электрической системе, что позволяет иметь необходимый уровень напряжения на «неспокойной» шине, и как следствие, обеспечить максимальную производительность электротехнических устройств.

Выявление негативных возмущений посредством Вейвлет-анализа с последующим анализом данных индикатором Боллинджера блоком управления СТАТКОМа также позволяет представлять зависимость удельного расхода электроэнергии на выплавку металла и удельный расход электродов. При использовании электродов одной марки, данные зависимости коррелируют в определенных пределах. Следовательно, параметры  $W_{уд} \sim N_{уд.эд.}$ . Изменение статистических пределов соответствует возникновению негативных возмущений, что может влиять на процесс работы дуговых сталеплавильных печей, а так же на электрическое оборудование и расходующий материал – графитовые электроды.

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

## 2.4. Выводы по главе

1. Снижение в системе электроснабжения значения реактивной мощности позволяет снизить эксплуатационные издержки электротехнического комплекса «ДСП-СТАТКОМ». Снижение реактивной мощности при неизменной полной мощности обеспечивает прирост активной мощности, которая полезно передается в электрическую дугу на нагрев шихты. В связи с этим кратно увеличивается значение коэффициента мощности электрической установки  $\cos \varphi$ .

2. Влияние уменьшения воздействия высших гармонических составляющих, обусловленных работой дуговой сталеплавильной печи, позволяет повысить эффективность работы системы управления режимом дуговой печи, что в результате обеспечивает максимальный коэффициент полезного действия электрической дуги, так как отсутствует подстройка электрического режима.

3. Если снизить время одного цикла работы дуговой печи, то это

позволяет производить больше продукции за выбранный интервал времени, что повышает конкурентоспособность предприятия.

4. Перечисленные оценочные показатели эффективности отражают преимущества использования устройства СТАТКОМ с предложенным алгоритмом управления в системах электроснабжения при эксплуатации мощных электротехнических комплексов, таких как «ДСП – СТАТКОМ».

## **2.5. Контрольные вопросы**

1. Опишите принцип действия компенсационной системы СТАТКОМ.
2. Какие параметры системы можно снизить при включении на «неспокойную» шину 35 кВ компенсационной системы типа СТАТКОМ с системой управления основанной на Вейвлет-анализе и статистической составляющей – индикаторах Боллинджера?
3. Какая результативность от внедрения компенсирующего устройства типа СТАТКОМ?
4. Как производится расчет эффективности системы?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном учебном пособии изложены новые научно обоснованные технические решения по обеспечению эффективного функционирования электротехнических комплексов с резкопеременными нагрузками, имеющие существенное значение для развития страны.

Анализ нагрузок резкопеременного характера позволил получить и апробировать имитационную модель электросталеплавильного цеха, которая отражает режимы работы дуговых печей в различных условиях. Посредством модели выявлены негативные факторы, проявляющиеся в виде провалов напряжения и высокочастотных колебаниях на беспокойной шине. Негативные импульсы, влияющие на функционирование системы электроснабжения, целесообразно компенсировать установкой СТАТКОМ с усовершенствованным модулем системы управления, что было представлено в дополнительной имитационной модели.

Использование индикаторов Боллинджера для обработки электрических характеристик в системах электроснабжения позволяет определить полный диапазон значений электрических величин и их текущее отклонение от среднего значения. Данный осциллирующий индикатор даёт возможность оперативно реагировать на изменение электрических характеристик и, соответственно, достигать максимального значения рабочего КПД электрической дуги. В рассматриваемом подходе методы Вейвлет-преобразования высокочастотных сигналов предлагается использовать для выявления и локализации негативных факторов (частотные и амплитудные колебания, провалы напряжения), влияющих на качество электроэнергии. 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.

Представленный 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 электроприемника.

Используемые программы для ЭВМ, в совокупности, являющиеся программным комплексом, отражающие процесс расплава шихты в дуговой печи и анализ электрических 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.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Технология электросталеплавильного производства. Электронная библиотека.
2. Шпиганович А.Н., Захаров К.Д. Электроснабжение металлургических предприятий. Липецк: ЛГТУ. 2006. 568 с.
3. Рысс М. А. Производство ферросплавов, 2 изд. / М. А. Рысс. – М., 1957. –355 с.
4. Щедровицкий Я.С. Производство ферросплавов в закрытых печах / Я.С. Щедровицкий. – М., 1975. – 420 с.
5. Тарасов Р.С. Стратегия развития металлургической промышленности России второй половины XIX века // Фундаментальные исследования. 2012. № 11-5. с. 1085-1088.
6. Тревоги прошедшей весны. Информационно-аналитический журнал Металлургический бюллетень.
7. Иванов В.С., Соколов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат. 1987. 337 с.
8. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Интермет Инжиниринг. 2005. 672 с.
9. Карапетян. Справочник по проектированию электрических сетей. 4 изд. 2012. 376 с.
10. Зацепин Е.П. Колебания и отклонения напряжения в дуговых сталеплавильных печах // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета в 2-х ч. Ч 1., 2012, 345 с.
11. Фомин А.В. Построение имитационной модели дуговой сталеплавильной печи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №3. 2009. с. 315 – 321.
12. Arash Kiyoumars, Mohhamad Ataei, Rahmatollah Hooshmand. Electric Arc Furnace Voltage Flicker Mitigation by Applying a Predictive Method with Closed Loop Control of the TCR/FC Compensator // Arash Kiyoumars, Mohhamad Ataei, Rahmatollah Hooshmand, Arash Dehestani Kolagar / Journal of Electrical Engineering & Technology. Vol. 5. No. 1.

2010. pp. 116 – 128.

13. Николаев А.А., Анохин В.В., Тулупов П.Г. Разработка математической модели электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор». // Электротехнические системы и комплексы. №4. 2016. с. 61 – 71.

14. Парсункин Б.Н., Петрова О.В., Полухина Е.И. Исследование влияния электрического режима ДСП на себестоимость выплавляемой стали. Теория и технология металлургического производства. 2014. С. 44 – 46.

15. Tabachnikova, T.V., Gracheva, E.I., Naumov, O.V., Gorlov, A.N. Forecasting technical state and efficiency of electrical switching devices at electric complexes in oil and gas industry// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. "International Conference on Advances in Energy Industry and Power Generation, AdvEnGen 2020". – 2020. P. 012014.

16. Пешков М.В. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук на тему «Разработка и исследование системы управления статическим компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ для электроэнергетических систем». Москва. 2009. 154 с.

17. Шкутова М.А. Диссертация на соискание степени магистра на тему «Разработка и тестирование математических моделей силовых устройств режимного регулирования». СПбПУ им. Петра Великого. 2017. 134 с.

18. Ненахов А.И. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук на тему «Разработка методик подавления колебаний напряжения и коррекции формы токов резкопеременных промышленных нагрузок с помощью быстродействующих управляемых устройств». Москва. 2017. 152 с.

19. Шачнев О.Я., Зацепина В.И. Визуализация токовых нагрузок в спектрально-частотных областях Вейвлет-анализа. // Летняя школа молодых ученых ЛГТУ – 2017. Сборник научных трудов научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк, 2018. С. 54-56.

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

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

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

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

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

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

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

27. Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев. Визуальное моделирование

электротехнических комплексов металлургии // «Сборник статей Международной научной конференции 23.11.14». 2014 г. – Уфа: Из-во РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, с. 24-27.

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

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

30. В.И. Зацепина, О.Я. Шачнев. Влияние дуговых сталеплавильных печей на объекты спокойной системы шин // «Тезисы докладов 2-ой Международной конференции с элементами научной школы 22-24.04.2015. Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах». 2015 г. - Тамбов: изд-во ТГТУ, с. 246-248.

31. В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев. Регулирование напряжения статическими компенсаторами реактивной мощности в системах с резкопеременными нагрузками // «XIV Международная научно-практическая интернет-конференция «Энерго- и Ресурсосбережение XXI век» 15.03 – 30.06.2016». 2016 г. – Орел: изд-во ОГУ им. И.С. Тургенева, с. 73-76.

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

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014616662 от 01.06.2014. Программа построения характеристик основных электрических параметров электроприемников. Российская Федерация, правообл. ФГБОУ ВПО ЛГТУ / А.Н. Шпиганович, В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев.

34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014616663 от 01.06.2014. Программа анализа электрических характеристик систем электроснабжения. Российская Федерация, правообл. ФГБОУ ВПО ЛГТУ / А.Н. Шпиганович, В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев.

35. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014616664 от 01.06.2014. Программа преобразования и адаптации сохраненных данных для дальнейшей обработки. Российская Федерация, правообл. ФГБОУ ВПО ЛГТУ /А.Н. Шпиганович, В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, А.В. О.Я. Шачнев.

36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616161 от 02.06.2017. Электрический режим электротехнической установки. Российская Федерация, правообл. Шачнев О.Я. / О.Я. Шачнев, В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, А.В. Галкин, Д.В. Овчинников.

37. Иванов В. С., Соколов В. С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат. 1987. 337 с.

38. Синьчугов Ф. И. Надежность электрических сетей для энергетических систем. М.: НУЦ ЭНАС, 1998. 382 с.

39. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Ростов-на-Дону.: Феникс. 2004. 320 с.

40. Шилов И. Г., Зацепина В. И. Расчет числа провалов напряжения в системе при запрете автоматического резервирования. Вести высших учебных заведений Черноземья. 2009. №3. С. 15-18.

41. Кощеев, Л.А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической. Электрические станции, 2005. №12.

42. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Высшая школа. 2001. 336 с.

43. Ершов М.С. Егоров А.В., Зарубицкая Ю.В. Анализ некоторых методов повышения устойчивости электротехнических систем при внешних возмущениях. Промышленная энергетика. 2003. №10. С. 25-29.

44. Шахматов С.П. Анализаторы качества электроэнергии и параметров электросетей. Энергетик. 2004. №9. С. 42-43.
45. Кальдон Р., Фаура М., Феллин Л. Анализ влияния сетевых возмущений на установки промышленных потребителей. Промышленная энергетика. 1994. №2.
46. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Интермет Инжиниринг. 2005. 672 с.
47. ГОСТ Р 54149-2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2013-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2013. 36 с.
48. Фишман В.С. Провалы напряжения в сетях промышленных предприятий. Новости электротехники. 2004. №5.
49. Шилов И.Г., Зацепина В.И. Имитационная модель устройства динамической компенсации перенапряжений. Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. №1. С. 379-383.
50. Забровский С.Г. Перенапряжения в системах с тиристорными преобразователями. Кишинев: Штиинца. 1979. 160 с.
51. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергия. 1984. 160 с.
52. Гаврилов Ф.А. Качество электрической энергии. Приазовский ГТУ. 2007. 97 с.
53. Шпиганович А.Н., Зацепина В.И., Шилов И.Г. О восстановлении электроснабжения при кратковременных провалах напряжения. Промышленная энергетика. 2008. №10. С. 15-17.
54. Черных И.А., Шилов И.Г. Повышение устойчивости работы электродвигателей при провалах напряжения. Электрика. 2006. №2. С. 36-38.
55. Манилов А.М. Повышение чувствительности релейной защиты электродвигателей напряжением меньше 1000 В. Энергетик. 2004. №2.
56. Красинский В.Н. Об указателях и сигнализаторах проверки напряжения. Энергетик. 2005. №11. С. 2-9.
57. Джус И.Н. Бесперебойное питание потребителей.

Энергетик. 2004. №5. С. 22-24.

58. Шпиганович А.Н., Черных И.А., Шилов И.Г. Провалы напряжения в высоковольтных электрических сетях. Вести высших учебных заведений Черноземья. 2006. №1. С. 16-19.

59. Прокопчик В.В. Повышение качества электроснабжения и эффективности электрооборудования для предприятий с непрерывными технологическими процессами. Гомель: Гом. ГТУ. 2002. 283 с.

60. Черных И.А., Шилов И.Г. Провалы напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий. Вести высших учебных заведений Черноземья. 2005. №1. С. 23-25.

61. Гуревич Ю.Б., Файбисович Д.Л., Хвоцинская З.Г. Особенности электроснабжения промышленных предприятий с непрерывными технологическими процессами. Электричество. 1990. №1.

62. Карташев И.И., Рыжов Ю.П. Способы и средства управления режимами электроэнергетических систем. Электричество. 2007. №9. С. 20-25.

63. Овчаренко А.С., Розинский Д.И. Повышение эффективности в электроснабжении промышленных предприятий. Киев: Техника. 1989. 286 с.

64. Зацепина В.И., Шилов И.Г. Параметрический подход минимизации провалов напряжения компенсацией реактивной мощности. Вести высших учебных заведений Черноземья. 2009. №3.

65. Блок В.М. Электрические сети и системы. М.: Высшая школа, 1986. 430 с.

66. Веников В. А., Глазунов А. А., Жуков Л. А. Электрические системы и электрические сети: учеб. для электроэнерг. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1998. 511 с.

67. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. М.: Высшая школа, 1975. 280 с.

68. Шпиганович А. Н., Гамазин С. И., Калинин В. Ф. Электроснабжение: монография. Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2003. 224 с.

69. Птицын О.В. Анализатор напряжения с компенсацией погрешности. Промышленная энергетика. 1999. №10.

70. Мозгалев В. С. Оценка эффективности контроля качества электроэнергии в ЭЭС. Электрические станции. 1999. № 1.

71. Пат. 2244313 Российская Федерация, МПК G 01 R 21/00. Способ определения потребителя, искажающего показатели качества электрической энергии в узле энергоснабжающей организации. Баглейбтер О.И., Висящев А.Н., Луцкий И.И., Тигунцев С.Г.; заявители и патентообладатели Висящев А.Н., Тигунцев С.Г. – 2000117164; заявл. 27.06.2000; опубл. 10.01.2005.

72. Соколов В. С. Проблемы мониторинга качества электрической энергии. Промышленная энергетика. 2004. №1. С. 55-58.

73. Шпиганович А. Н., Красичков А. А. Электрооборудование. Липецк: ЛГТУ, 2003. 159 с.

74. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 1986. 167 с.

75. Кокорин С. А., Ней Е. Е., Новиков В. К. Системы измерения показателей качества электроэнергии на базе промышленно выпускаемых средств автоматизации. Электротехника. 2003. №10.

76. Пат. 2290731 Российская Федерация, МПК Н 02 J 9/06. Устройство защиты потребителей от кратковременных нарушений электроснабжения. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. Шляхов Н.А., Захаров К.Д., Зацепин Е.П., Бош В.И.; заявитель и патентообладатель Липецкий государственный технический университет. – 2005115387/09; заявл. 20.05.2005.

77. Федоров А. А. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию (том 2) Электрооборудование М.: Энергоатомиздат, 1987. 592 с.

78. Гамазин О. Е. Новые устройства обеспечения надежности электроснабжения и качества электроэнергии потребителей. Рынок электротехники, журнал-справочник. 2006. №2.

79. Кудинов Ю. И., Кудинов И. Ю. Нечеткие модели

- динамических процессов: монография. М.: Научная книга, 2007. 184 с.
80. Баширов М. Г. Экономика электропотребления в промышленности. Уфа: Изд-во: УГНТУ, 2004. 156 с.
81. Карташев И. И., Тульский В. Н. Управление качеством электроэнергии. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 320 с.
82. Арриллага Дж. Гармоники в электрических схемах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
83. Пат. 2364875 Российская Федерация, МПК G 01 R 19/00. Способ выявления фактического вклада субъектов электрических сетей и искажение качества электрической энергии в точках общего присоединения для электрической сети. Геворкян В.М., Казанцев Ю.А.; заявитель и патентообладатель Московский энергетический институт (технический университет). – 2008103232; заявл. 01.02.2008; опублик. 20.08.2009.
84. Кутузов С. И. Взаимная компенсация гармоник, вносимых в автономную энергосистему статическими и электромеханическими преобразователями. Электричество. 2002. №3. С. 16-19.
85. Алферов Д. Ф., Белкин Г. Н., Будовский А. И. и др. Применение быстродействующих управляемых коммутирующих устройств в электроэнергетике. Электричество. 1998. №7.
86. Шухардин С.В. Техника в её историческом развитии. М.: Наука, 1982. 499 с.
87. Л.П. Горева, Р.А. Бикеев. Электротермические процессы и установки. М.: НГТУ, 2014. 20 с.
88. Зацепин, Е.П. К вопросу об эффективности функционирования дуговых сталеплавильных печей переменного тока / Вести вузов Черноземья, 2012. №2, с. 23-30.
89. Зацепин Е.П., Зацепина В.И. Качество электрической энергии по напряжению в системах электроснабжения металлургических предприятий / Вести вузов Черноземья, 2013. №1, с. 21-25 с.
90. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 472с.

91. Минин Г.П. Реактивная мощность. М.: Энергия, 1978. 88с.
92. Коновалова Л.А., Рожкова Л.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 528с.
93. Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: Учебник для учащихся техникумов. М.: Высшая школа, 1981. 376 с.
94. Дирацу В.С. и др. Электроснабжение промышленных предприятий. К.: Вища школа, 1974. 280с.
95. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. Т.1. Электроснабжение / Под общ. ред. А.А. Федорова. М.: Энергоатомиздат, 1986. 568 с.
96. Зимин Е.Н., Кацевич В.Л., Козырев С.К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоиздат, 1981. 192с.
97. Мукосеев Ю.Л. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Энергия, 1973. 584с.
98. Красник В.В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136с.
99. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. К.: Техніка, 1981. 160 с.
100. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / Под ред. В.М. Перельмутера. М.: Энергоатомиздат, 1988. 319с.
101. Федоров А.А., Старкова Л.Е. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
102. Добрусин Л.А. Широкополосные фильтрокомпенсирующие устройства для тиристорных преобразователей // Электричество. 1985. №4. с. 27-30.
103. Бортник И.М., Буряк С.Ф., Олышванг М.В., Таратута И.П. Статические тиристорные компенсаторы для энергосистем и сетей

электроснабжения // Электричество. 1985. №2 с. 13-19.

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. 174с.

105. Хохлов Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. Челябинск: ЧГТУ, 1995. 355с.

106. Кашкалов В.И., Половинкин Б.И. Улучшение энергетических показателей управляемых выпрямителей. К.: Тэхника, 1988. 159с.

107. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592с.

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

109. Богаенко И. Н., Борисенко В. Я., Розинский Д. И., Рюмшин Н. А. Регулируемые компенсирующие устройства реактивной мощности / Справочник. К.: Техніка, 1992. 152 с.

110. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Ибатуллин Э.Э., Петрова Р.М., Синюкова Т.В. Анализ основных показателей промышленного производства объектов средней мощности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №2 (58). С. 93-108.

111. Абдуллазянов, Э.Ю., Грачева, Е.И., Горлов, А.Н., Шакурова, З.М. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. Т.23. – №3. С. 3-13.

112. Абдуллазянов, Э.Ю., Грачева, Е.И., Альзаккар, А., Низамиев, М.Ф., Шумихина, О.А., Valtchev, S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах // Известия высших учебных заведений.

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 3-12.  
DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.

113. Грачева, Е.И., Наумов, О.В., Горлов, А.Н., Шакурова, З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутриводского электроснабжения// Проблемы энергетики. – 2021. №1. С. 93-104.

114. Грачева, Е.И., Сафин, А.Р. Оценка потерь электроэнергии в радиальных электрических сетях низкого напряжения с помощью алгоритмов нечеткого регрессионного анализа// Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. Т.12. №4(48). С. 116-125.

115. Задачи надежности современного электроснабжения: монография/ Б.В. Папков, А.Л. Куликов, П.В. Илюшин. – М.: Инфра-Инженерия, 2021. – 260 с.

116. Петрова Р. М. и др. Методы оценки надежности схем внутрицехового электроснабжения. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 395–409. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>.

117. Петрова Р.М, Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Valtchev S., Yousef Ibragim. Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. No1 (57). С. 93-105.

118. Petrova, R. M. et al. 2023. Methods for assessing the reliability of in-shop power supply. Vestnik of MSTU, 26(4), pp. 395–409. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>.

119. Петров А. Р., Грачева Е. И. Моделирование потерь мощности в контактных системах низковольтных коммутационных аппаратов // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 126–133. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-126-133.

120. Петров А. Р., Грачева Е. И. Комплексный подход к исследованию функциональных параметров низковольтных коммутационных аппаратов // Электрические станции. 2023. № 11, С. 29-36. doi:<http://dx.doi.org/10.34831/10.34831/EP.2023.1108.11.004>.

121. Петров А. Р., Грачева Е. И., S. Valtchev Исследование

технических параметров магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых в цеховых сетях. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 384–394. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-384-394>.

122. Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, Ibatullin EE, Petrova P.M, Sinyukova TV. Analysis of the main indicators of industrial production of facilities of average capacity. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023;15;2(58):93-108.

123. Gracheva E., Gorlov A., Alimova A. Features of Structure of Electric Supply Systems of Industrial Enterprises // International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2020. P. 910-913.

124. Gracheva, E.I., Naumov, O.V., Gorlov, A.N. Influence of value resistance contact units of switching devices on losses of the electric power in shop networks of low tension// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019. – 2019. P. 012060.

125. Gracheva E., Gorlov A., Alimova A. Features of Structure of Electric Supply Systems of Industrial Enterprises // International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2020. P. 910-913.

126. E. Gracheva, R. M. Petrova, S. Valtchev and T. Sinyukova, "Study of Probability Characteristics of the Reliability of Electrical Equipment in Internal Power Supply Systems," 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, 2023, pp. 460-465, doi: 10.1109/GPECOM58364.2023.10175821.

127. E. I. Gracheva, R. M. Petrova, T. Sinyukova, S. Valtchev, R. Miceli and M. Caruso, "Reliability and Overload Capacity of Power Transformers," 2023 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Terrasini, Italy, 2023, pp. 684-689, doi: 10.1109/ICCEP57914.2023.10247425.

128. Petrova RM, Abdullazyanov EYu, Grachieva EI, Valtchev S, Yousef Ibragim. Study of probability characteristics of reliability of electrical equipment in internal power supply systems. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57):93-

105.

129. Petrova R. M. et al. 2023. Methods for assessing the reliability of in-shop power supply. Vestnik of MSTU, 26(4), pp. 395–409. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>.

130. R. M. Petrova and E. Gracheva, "Reliability Parameters of Low-Voltage Switchgear and Cable Lines of Workshop-Floor Network Schemes," 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2023, pp. 1049-1055, doi: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349643.

131. R. M. Petrova and E. Gracheva, "Comparison Of Methods Of Calculation Of The Electrical System Of In-Plant Power Supply," 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2023, pp. 1056-1061, doi: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349401.

132. Soluyanov Y.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Soluyanov V.I. Application of intelligent electricity metering systems for timely adjustment of standard values for electrical load calculation// Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021. 3. – 2021. P. 9388018.

133. Абдуллазянов Э.Ю. и др. Работоспособность и надежность электрических контактов: монография / Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, А.Р. Петров, Р.М. Петрова, Т.В. Синюкова – Казань: Отечество, 2024. – 126 с. ISBN 978-5-9222-1804-7.

134. Петрова Р. М., Грачева Е. И. Алгоритмы оценки основных параметров надежности низковольтного оборудования схем цеховых сетей // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.

135. Шпиганович А.Н. и др. Основы анализа отказоустойчивости сложных систем электроснабжения / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, Е.И. Грачева, Р.М. Петрова. – Казань: Отечество, 2024. – 81 с. ISBN 978-5-9222-1801-6.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. СНИЖЕНИЕ НЕГАТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОТ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ С РЕЗКОПЕРЕМЕННЫМ ХАРАКТЕРОМ НАГРУЗКИ .....	7
1.1. Выявление негативных воздействий посредством индикаторов Боллинджера и Wavelet-анализа .....	8
1.2. Устранение нарушения функционирования компенсирующего устройства .....	33
1.3. Повышение эффективности работы дуговых печей.....	36
1.4. Выводы по главе .....	44
1.5. Контрольные вопросы.....	45
2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА .....	46
2.1. Эффективность повышения коэффициента мощности.....	48
2.2. Эффективность от снижения негативных возмущений .....	50
2.3. Эффективность от снижения времени плавки печей .....	52
2.4. Выводы по главе .....	55
2.5. Контрольные вопросы.....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	57
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	59

Шпиганович Александр Николаевич  
Шпиганович Алла Александровна  
Бойчевский Александр Валерьевич  
Грачева Елена Ивановна  
Петрова Рената Маратовна

ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С  
УЧЕТОМ НЕГАТИВНЫХ РЕЗКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК

Учебное пособие

---

Издательство «Отечество»  
420032 г.Казань, ул. Шоссейная, 22А

Подписано в печать 23.04.2024. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 4,75. Тираж 500. Заказ № 2404/1.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)  
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92  
e-mail: westfalika@inbox.ru

---