

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Скоморохов Павел Игоревич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РЕЗКОПЕРЕМЕННЫМ ХАРАКТЕРОМ
НЕГАТИВНЫХ СЕТЕВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Зацепина Виолетта Иосифовна

Липецк – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Обзор литературных источников	11
1.2 Постановка задач исследования	24
2 АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГАТИВНЫХ СЕТЕВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ РЕЗКОПЕРЕМЕННОГО ХАРАКТЕРА	26
2.1 Формирование параметров режимов функционирования систем электроснабжения предприятий	26
2.2 Возмущения резкопеременного характера в системах электроснабжения предприятий с резкопеременным характером электрических нагрузок	44
2.3 Возмущения резкопеременного характера в системах электроснабжения предприятий с продолжительным режимом работы	55
2.4 Повышение безотказности систем электроснабжения при воздействии сетевых возмущений резкопеременного характера	74
Выводы	81
3. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ МИНИМИЗАЦИИ РЕЗКОПЕРЕМЕННЫХ НЕГАТИВНЫХ СЕТЕВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ	83
3.1 Компенсация негативных сетевых возмущений в условиях случайного характера их возникновения и распространения	83
3.2 Восстановление формы напряжения при резкопеременных сетевых возмущениях с разделением на составляющие	95
3.3 Повышение надежности схемы электроснабжения приемников	106
Выводы	113
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТ ВНЕДРЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ	115

4.1 Вероятностная оценка влияния динамического восстановления напряжения на функционирование систем электроснабжения	115
4.2 Применение динамического восстановления напряжения в электрических сетях на этапе планирования электрических режимов	122
4.3 Техничко-экономическая оценка эффективности функционирования систем электроснабжения от минимизации резкопеременных сетевых возмущений	128
Выводы	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	137
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 «Суточный график значений нагрузок системы электроснабжения Липецкой ТЭЦ-2»	151
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 «Акты внедрения»	153
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 «Патент РФ на полезную модель»	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Стремительное развитие технологий и модернизация промышленных производств приводят к перегруженности распределительных электрических сетей промышленных предприятий, что вызывает значительное влияние резкопеременного характера нагрузок на эффективность функционирования систем электроснабжения. Для многих производственных агрегатов данное явление достаточно критично в плане энергетической эффективности, безотказности, времени ввода в работу отказавшего оборудования и, как следствие, качества выпускаемой продукции. Неэффективное функционирование технологических агрегатов в ограниченной по мощности энергосистеме приведет к значительному ухудшению качества электроэнергии. Возникающие при их работе негативные сетевые возмущения, такие как провалы напряжения, перенапряжения, а также высшие гармоники, носят, как правило, резко изменяющийся и трудно прогнозируемый характер и вызывают сбои в работе электрооборудования, систем автоматики и защиты, что способствует значительному экономическому ущербу от недовыпуска предприятием продукции и повышенного расхода электроэнергии.

В большинстве случаев любой ненормальный режим в распределительной электрической сети ликвидируется действием устройств релейной защиты и автоматики, т.е. происходит отключение поврежденного элемента, что не всегда позволено для некоторых типов производственного процесса (например, электродуговая плавка металла, работа различных конвейерных агрегатов и т. п.). Гораздо сложнее постоянно поддерживать в норме ключевые показатели качества электрической энергии в сети. С постоянным совершенствованием элементной базы были разработаны различные синхронные компенсаторы. Основной их недостаток в том, что выдаваемое ими управляющее воздействие статично либо не приспособлено к резкопеременным сетевым возмущениям. В условиях повышенной вероятности возникновения ненормальных режимов в системах электроснабжения гораздо более эффективной будет их непрерывная динамическая компенсация.

Изучением вопросов активной компенсации отклонений параметров качества электроэнергии занимались многие отечественные и зарубежные ученые-энергетики. Однако, достигнутые на сегодняшний день результаты в вопросах динамического регулирования напряжения сети не позволяют однозначно и окончательно решить задачу комплексной компенсации амплитудно-фазных искажений напряжения одновременно по нескольким параметрам.

Разработка устройства комбинированного регулирования напряжения сети в совокупности с постоянным мониторингом существующих и разрабатываемых технических решений в области минимизации негативных сетевых возмущений позволит поддерживать показатели качества электроэнергии в допустимых пределах в соответствии с требованиями действующего ГОСТ 32144-2013 и повысить эффективность функционирования систем электроснабжения, что является актуальным.

Целью работы является повышение эффективности функционирования систем электроснабжения электротехнических комплексов промышленных предприятий за счет минимизации негативных сетевых возмущений резкопеременного характера посредством их динамической компенсации.

Идея работы заключается в минимизации негативных сетевых возмущений резкопеременного характера в промышленных системах электроснабжения электротехнических комплексов посредством разработки устройства комбинированного регулирования напряжения сети, технический результат которого обеспечивается за счет высокоскоростной и непрерывной динамической компенсации провалов, перенапряжений и высших гармоник напряжения в расширенном интервале регулирования.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Получение математических зависимостей и закономерностей возникновения и распространения сетевых возмущений с целью определения их влияния на функционирование электротехнических комплексов промышленных производств в зависимости от нагрузочного режима.

2. Моделирование воздействия негативных сетевых возмущений резкопеременного характера с целью исследования степени влияния амплитудно-фазных искажений напряжения на форму кривой напряжения в электрической сети.

3. Разработка способа комбинированного регулирования напряжения электрической сети с целью обеспечения эффективного функционирования электротехнических комплексов промышленных производств в условиях резкопеременного характера негативных сетевых возмущений.

4. Разработка способа формирования управляющего воздействия, направленного на оптимизацию динамической компенсации по критерию максимального быстродействия, а также повышение точности введения компенсирующей кривой напряжения в электрическую сеть.

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

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

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

Научная новизна:

1. Разработано устройство комбинированного регулирования напряжения сети, технический результат которого заключается в повышении качества электроэнергии за счет высокоскоростной и непрерывной динамической компенсации провалов, перенапряжений и высших гармоник в расширенном интервале регулирования, отличающееся от известных тем, что содержит в своем составе специальный логический блок, отвечающий за точное формирование формы кривой компенсационного напряжения, а также вольтодобавочный трансформатор, позволяющий осуществлять регулирование напряжения в динамическом режиме.

2. Разработана схема кодоимпульсной модуляции управляющего воздействия для тиристорного управляемого преобразователя напряжения разработанного уст-

ройства комбинированного регулирования напряжения сети, отличающаяся от известных решений повышенным быстродействием в процессе восстановления формы кривой напряжения при воздействии негативных сетевых возмущений.

3. Разработан способ повышения надежности функционирования разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети за счет обеспечения автономности его работы, отличающийся от известных решений гибридным сочетанием ионисторов и свинцовых аккумуляторных батарей, объединенных по специальной схеме.

Теоретическая и практическая значимость состоит в расширении научной базы теоретических исследований возникновения и распространения негативных сетевых возмущений, процессов их эффективной компенсации, а также в разработке нового технического устройства обеспечения комплексного регулирования параметров напряжения в распределительных электрических сетях.

Методы исследования. При решении поставленных задач использованы методы математической статистики, классической теории вероятности, теории случайных импульсных потоков, а также теоретических основ электротехники. Имитационное моделирование выполнено в программно-аппаратном комплексе Matlab R2016a. Реализация теоретического подхода сопровождалась постоянным мониторингом существующих и разрабатываемых решений, связанных с поставленными задачами научного исследования.

Научные положения, выносимые на защиту:

- разработанное устройство комбинированного регулирования напряжения сети посредством динамического восстановления формы кривой напряжения, обеспечивающееся за счет непрерывного введения в сеть через вольтодобавочный трансформатор компенсирующего напряжения при воздействии негативных сетевых возмущений;

- метод формирования управляющего воздействия для тиристорного управляемого преобразователя напряжения в составе разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети, обеспечивающий оптимизацию рабо-

ты устройства по критерию максимального быстрогодействия посредством кодоимпульсной модуляции;

- способ повышения надежности функционирования разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети, позволяющий обеспечить высокую автономность его работы посредством гибридной ионисторно-аккумуляторной схемы;

- оценка изменения вероятностных параметров системы электроснабжения и ее защищаемых уровней до внедрения устройства комбинированного регулирования напряжения сети и после.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается корректным использованием математических методов и методов, используемых в электротехнике, формулировкой задач исследования, основанных на подробном анализе существующих средств комбинированного регулирования напряжения сети, а также полученным патентом на полезную модель разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети.

Реализация работы. Научные и практические результаты диссертационной работы были внедрены в ООО «Моторинвест» с ожидаемым экономическим эффектом в 880 тыс. руб. в год, а также в ООО «Таврида Электрик» в качестве рекомендательных мероприятий при проектировании объектов электроэнергетики. Научно-исследовательские результаты внедрены в учебном процессе ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» при разработке курсов лекций и выполнении исследовательской работы по дисциплинам «Научно-исследовательская работа», «Электроснабжение и режимы» по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений».

Апробация работы. Положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на семинарах Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (Сочи, 2019 г.), IX Международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век - 2019» (Курск, 2019 г.), 9-й Международной научно-технической конференции «Современные инструментальные системы, информа-

ционные технологии и инновации» (Курск, 2019 г.), VI Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах» (Тамбов, 2019 г.), XVIII Международной научно-практической конференции «Advances in Science and Technology» (Москва, 2019 г.), IV Всероссийской молодежной научной конференции «Энергетика. Проблемы и перспективы развития» (Тамбов, 2018 г.), Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в науке, технике, образовании» (Смоленск, 2016 г.), V международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век» (Курск, 2015 г.), VII Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные аспекты современной науки» (Белгород, 2015 г.), международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах» (Тамбов, 2014 г.), III Международной научно-практической конференции «Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства» (Орел, 2014 г.), Международной научно-исследовательской конференции для молодых ученых, аспирантов, студентов и старшеклассников (Оренбург, 2014 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 19 печатных работ, из них 5 работ – в ведущих рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК России, 1 работа – в научном издании, входящем в наукометрическую базу Scopus, а также получен патент РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы и трех приложений. Общий объем диссертации – 161 стр., в том числе 136 стр. основного текста, 47 рисунков, 4 таблицы, библиографический список литературы из 132 наименований на 14 стр. и 3 приложения на 11 стр.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стремительное развитие технологий, нарастающее количество технологических присоединений и модернизация промышленных производств приводят к тому, что распределительные электрические сети постепенно перегружаются, что, в свою очередь, усиливает влияние резкопеременного характера нагрузок на процессы возникновения и распространения возмущений в системах электроснабжения. С точки зрения энергетической эффективности средних и крупных промышленных предприятий данное явление весьма существенно в конечном итоге будет влиять на качество выпускаемой данными предприятиями продукции. Очевидно, что исходя из особенностей процессов коммутации мощных электроприемников, резкопеременный характер возникновения и распространения негативных сетевых возмущений имеет прямую связь с резкопеременным характером нагрузок. Часто возникающие в системах электроснабжения электротехнических комплексов провалы напряжения, перенапряжения и высшие гармоники провоцируют отказы как отдельного электрооборудования, так и всей системы электроснабжения, что значительно снижает экономическую эффективность предприятий.

Такие производственные агрегаты, как мощные вентильные преобразователи, дуговые сталеплавильные печи, функционируют, как правило, с низким коэффициентом мощности. При этом характер их нагрузки не линейен. В целях компенсации реактивной мощности и, как следствие, восстановления параметров напряжения сети, предусматривается установка в узловых точках системы специализированных комплексов и устройств компенсации реактивной мощности. Значительные колебания нагрузки, происходящие в процессе эксплуатации мощных электроприемников (особенно емкостного и индуктивного характера) приводят к отклонениям различных параметров напряжения в распределительных электросетях. При этом величина данных отклонений параметров напряжения прямо пропорциональна мощности автотрансформатора (трансформатора) и обратно пропорциональна мощности эксплуатационного короткого замыкания (КЗ) Наихуд-

шим случаем мы будем считать, когда в группе электроприемников присутствует несколько мощных однотипных нелинейных нагрузок, характер коммутации которых хаотичен во времени. В этой ситуации также необходимо учитывать правильную синхронизацию режимов их работы. Очевидно, что наибольшие отклонения указанных параметров напряжения будут иметь место в режимах эксплуатационного короткого замыкания, то есть пиковые моменты при коммутации нагрузок. В это время резко возрастает реактивная мощность в системе электроснабжения, равно как и изменяются параметры питающего напряжения. Из чего последуют значительные экономические убытки для предприятия.

При этом в части исследования проблем влияния негативных сетевых возмущений резкопеременного характера стоит учитывать также системы электроснабжения электротехнических комплексов предприятий с продолжительным равномерным режимом технологического процесса (например, конвейерное производство). В данном случае процессы возникновения и распространения возмущений в такого рода системах трудно прогнозируемы, а классические вероятностные методы оценки малоприменимы из-за низкой точности.

Применение для решения данной проблемы установок динамического регулирования напряжения позволит минимизировать объем потребляемой реактивной мощности, вывести предприятие на более высокий уровень энергосбережения и достигнуть значительного экономического эффекта, а это, в свою очередь, позволит использовать сэкономленные финансовые средства для модернизации необходимого промышленного оборудования.

1.1 Обзор литературных источников

Дефицит активной мощности в системе электроснабжения может возникнуть непредсказуемо вследствие аварии, связанной с отключением генераторов электростанций или обрыва мощных питающих межсетевых линий электропередач (220 кВ и выше), несущих большую нагрузку, а при задержке ввода мощно-

стей – запланированный дефицит. С момента дефицита мощности начинается снижение частоты, т. к. нарушается баланс мощности, генерируемой и потребляемой в системе электроснабжения [1]. При этом чем больше дефицит генерируемой мощности в системе, тем быстрее снижается частота. Напряжение в контрольной точке территориальной энергосистемы определяется соблюдением баланса реактивной мощности по данной энергосистеме и балансом реактивной мощности в рассматриваемой контрольной точке [2]. Для устранения дисбаланса полезной активной мощности необходимо либо уменьшить нагрузку энергосистемы путем отключения части потребителей, либо увеличить генерацию мощности на электростанциях путем ввода генераторов в работу из холодного резерва, простоя или в рамках осуществимой аварийной готовности. В большинстве случаев снижение нагрузки невозможно по технологическим особенностям производственного цикла, например, в предприятиях с непрерывным технологическим циклом, где остановка работы оборудования ведет к крупным экономическим убыткам. При приближении к значительному дефициту реактивной мощности в любой рассматриваемой территориальной энергосистеме нормализовать (поднять) напряжение за счет регулирования коэффициентов РПН на трансформаторах и перенаправления потоков реактивной мощности оказывается невозможным, т. к. многие объекты данной энергосистемы могут уже находиться в ремонтной схеме и, соответственно, велика вероятность наступления «режима с высокими рисками». В такой ситуации можно только обеспечить дополнительное использование (потребление) реактивной мощности и слегка выравнить уровни напряжения в контрольных точках электрической сети. Для существенного подъема уровня напряжения нужны источники реактивной мощности, которые не всегда имеются в резерве локальной системы электроснабжения.

Режим работы системы электроснабжения характеризуется в первую очередь показателями ее состояния. Среди основных параметров электрического режима можно выделить: значения тока, напряжения и активную полезную мощность системы. Однако для более точного учета и контроля показателей качества электроэнергии используется реактивная мощность, отражающая разность фаз то-

ка и напряжения [3]. Реактивную мощность потребляют не только электроприемники предприятий, но и некоторое основное электрооборудование в электросети – от мощных (110 кВ и выше) автотрансформаторов подстанций и электростанций до понижающих трансформаторов подстанций глубокого ввода некоторых промышленных предприятий. Повышенное потребление реактивной мощности приводит к повышенным токовым нагрузкам сетей и, как следствие, к повышению капитальных затрат на сооружение самой сети, а также повышенным потерям электроэнергии, к ухудшению основных показателей качества электроэнергии, таких как провалы, перенапряжения и высшие гармонические составляющие [4, 5].

Передача реактивной мощности по сети вызывает гораздо большие потери, чем передача аналогичного количества активной мощности, т. к. реактивные сопротивления сетей высокого напряжения превышают активные и приводят к большему снижению напряжения. На практике под балансом реактивной мощности понимается равенство между генерируемой и потребляемой мощностью при допустимых отклонениях напряжения в узловых точках электросети [6, 7].

Отклонения параметров напряжения от регламентируемых национальным стандартом [8] значений возникают также из-за временных колебаний нагрузок в течение суток или осенне-зимнего и летнего периодов, а также изменении установившейся схемно-режимной ситуации в отдельно взятой энергосистеме, значительных отклонений в генерации и потреблении реактивной мощности, в том числе при резкопеременном характере протекания нагрузочного режима с участием мощных электроприемников, возникновении аварии и т. п. Восстановление параметров напряжения в контрольных пунктах энергосистемы можно обеспечить путем восстановления баланса реактивной мощности в данной энергосистеме [7]. Таким образом, особенно актуальной проблемой будет возникновение резких скачков реактивной мощности, приводящих к изменению амплитудных и фазных параметров напряжения и отклонению их от действующих норм на качество электроэнергии, что определенно приведет к дополнительным экономическим потерям для предприятия [8]. Однако даже при обеспечении общего баланса реактивной мощности в энергосистеме, может наблюдаться значительный ее дефицит в

любых контрольных пунктах, что может существенно снизить качество электрической энергии в распределительных электросетях. В целях полного приведения параметров напряжения в соответствие с [8] может использоваться принудительное перераспределение потоков мощности в сечениях энергосистемы, что обеспечивается путем осуществления оперативно-диспетчерского управления, т.е. изменением схемно-режимной ситуацией [9].

Реактивную мощность можно также рассматривать как характеристику скорости обмена электроэнергией между эквивалентным генератором и магнитным полем эквивалентного электроприемника. По сравнению с активной мощностью, она не выполняет «полезной» работы, а обеспечивает создание магнитных полей в электроприемниках с большой индуктивностью (например, асинхронные электродвигатели, автотрансформаторы и т. д.), циркулируя между условным генератором и электроприемником. В электрических сетях, где превалирует нелинейный тип нагрузок при влиянии значительной несинусоидальности напряжения, начинает протекать реактивная мощность искажений, не позволяющая в полной мере использовать указанные выше технические мероприятия. Для грамотного анализа электрических режимов в такого рода энергосистемах требуется разработка специальных подходов [10].

Актуальность задач постоянного обеспечения баланса реактивной мощности и восстановления параметров напряжения в распределительных электрических сетях обусловлена следующим:

- территориальной концентрацией и централизацией мощных электростанций. Переток реактивной мощности от электростанции к электроприемникам по линиям электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения экономически нецелесообразен. В настоящее время набирает актуальность для территориальных и объединенных энергосистем имеет малая и средняя распределенная генерация.

- популяризацией мероприятий, направленных на ресурсо- и энергосбережение. Обеспечение баланса реактивной мощности в узлах энергосистемы, особенно с помощью устройств статической компенсации, значительно снижает потери активной мощности энергии в распределительных электрических сетях;

- повышенными требованиями к показателям качества электроэнергии в соответствии с нормами обновленного национального стандарта [8];

- недостаточной мощностью устройств компенсации реактивной мощности, в том числе комплектных автоматически управляемых конденсаторных батарей, устройств продольного, поперечного и комбинированного воздействия [10, 11].

Таким образом, проблема компенсации амплитудно-фазных отклонений напряжения за счет обеспечения баланса реактивной мощности в узлах энергосистемы заключается в том, что изменения реактивной мощности приводят к значительным колебаниям напряжения в данных узлах. Однако грамотная компенсация реактивной мощности в распределительных электрических сетях позволяет минимизировать расход предприятием электроэнергии и снизить нагрузку на силовое электрооборудование, не допуская максимально допустимого и аварийно допустимого перетоков.

На крупных промышленных предприятиях ключевыми потребителями реактивной мощности, как правило, являются асинхронные двигатели с нестабильной, чаще всего резкопеременной, но высокоамплитудной нагрузкой. Асинхронные двигатели входят в состав различного прокатного, подъемно-транспортного оборудования, технологического оборудования предприятий химической промышленности, нефтепереработки и т. п. Также реактивная мощность может генерироваться нелинейной нагрузкой, большими объединенными системами вентиляции и кондиционирования помещений промышленного назначения, электроприводами насосов систем водоснабжения и теплоснабжения, источниками освещения с люминесцентными лампами [12, 13].

К подобного рода электроустановкам также следует отнести и электродуговые сталеплавильные печи, принцип работы которых из-за высокого уровня индуктивности выражает сильные броски реактивной мощности в процессе плавки металла. Резкопеременная нагрузка обусловлена, как правило, резкими набросами и провалами мощности из-за технологических особенностей электродуговой плавки металла. Таким образом, данные броски реактивной мощности порождают сильные изменения амплитудно-фазных искажений напряжения (АФИН) [14, 15].

Введение на промышленных производствах новых технологических процессов, связанных с установкой электрооборудования, обладающего мощной нелинейной и быстроизменяющейся нагрузкой, приводит к отклонению параметров напряжения от норм национального стандарта в системах электроснабжения. Причем влияние на систему непосредственно АФИН особенно ощутимо. К тому же такие агрегаты, как установки электрошлакового переплава (ЭШП), дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются не только мощными нелинейными и резко переменными нагрузками, но и крупными источниками реактивной мощности. Вентильные силовые преобразователи также вносят значительные искажения в форму кривой питающего напряжения, приводя к возникновению и дальнейшему распространению в сети высших гармонических составляющих в процессе регулирования напряжения путем изменения угла управления [16, 17]. Включение резкопеременных и ударных нагрузок (прокатные станы, агрегаты резки металла и т. п.), синхронных и асинхронных двигателей средней и большой мощности, дуговых сталеплавильных печей и т. п. провоцирует значительные колебания напряжения.

Рассмотрим основные АФИН и их параметры. Провал напряжения – непредсказуемое понижение напряжения в точке электрической сети ниже $0,9 \cdot U_{\text{ном}}$, за которым, как правило, следует процесс восстановления напряжения до исходного (или близкого к нему) за время более 10 миллисекунд. Длительность провала напряжения – это интервал времени между начальным моментом провала напряжения и моментом восстановления напряжения до первоначального или близкого к нему уровня. Провал напряжения характеризуется показателем длительности провала напряжения и его глубины [8, 18].

Существует также такое понятие, как «импульсное перенапряжение», под которым подразумевается резкое повышение уровня напряжения с последующей нормализацией по амплитуде напряжения до исходного (или близкого к нему) уровня за интервал времени до нескольких миллисекунд. Как правило, импульсные перенапряжения происходят из-за технологических особенностей работы коммутационных аппаратов в распределительной электрической сети или прово-

цируются атмосферными разрядами молний [19]. То есть главной причиной возникновения импульсных перенапряжений в системах электроснабжения являются переходные процессы, возникающие вследствие различных коммутаций, особенно при включении (отключении) мощных ударных и резкопеременных нагрузок, а также атмосферных явлений (разряды молнии во время грозы). Импульс перенапряжения проходит непосредственно по воздушным и кабельным линиям или шине заземления. Электромагнитное поле, возникающее в результате импульса тока, индуцирует наведенное напряжение на всех металлических конструкциях, включая электрические линии – это индуктивный путь попадания опасных импульсов перенапряжения на защищаемый объект [20, 21].

Несинусоидальность напряжения сети определяется следующими параметрами:

- коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициентом n -ой гармонической составляющей напряжения.

Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с разным номинальным напряжением изложены в [8, 22]. Нормально допустимые значения коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с разным номинальным напряжением $U_{ном}$ приведены в [8].

Минимизация высших гармонических составляющих, возникающих в распределительных электрических сетях, является одной из задач улучшения качества электроэнергии в энергосистемах. Решение этой задачи с помощью устройств комбинированного регулирования напряжения сети является актуальным, особенно в части повышения технико-экономических показателей промышленных предприятий. Примерами таких существующих устройств могут быть различные фильтрокомпенсаторы, которые помимо минимизации влияния на систему электроснабжения высших гармонических составляющих, генерируют в распределительную сеть дополнительную реактивную мощность. Еще одним способом применения подобного рода устройств можно считать симметрирование системы линейных напряжений в сети [23-25].

Отметим, что амплитуды высших гармоник быстро убывают с увеличением их порядка, так что на практике бывает достаточным ограничение первыми пятью-семью гармониками. Несинусоидальность вызывает также ряд нежелательных и осложняющих нормальную работу явлений такого мощного и ответственного типа электроприемников, как дуговая электросталеплавильная печь. Происходит повышение активных потерь в проводниках из-за сильной выраженности поверхностного эффекта для токов промышленной частоты. Также стоит учесть увеличение активных потерь в железе, резкое увеличение индуктивного сопротивления и снижение коэффициента мощности. Резкое повышение амплитуды одной из высших гармоник по отношению к основной гармонике при возникновении резонанса напряжений может создавать перенапряжения, приводящие к пробое изоляции токоведущих частей электроустановок. При несинусоидальных токах полная мощность цепи будет представлять собой сумму мощностей отдельных гармоник [26, 27]. В электродуговых печах характер кривых напряжения и тока дуг изменяется с изменением силы тока: при эксплуатационном коротком замыкании (отсутствии дуги) ток практически синусоидален, а с уменьшением его (увеличение сопротивления и напряжения дуги) отступления от синусоиды увеличиваются, что вызывает увеличения активного и индуктивного сопротивлений установки и, как следствие, снижение уровня напряжения в сети [28].

На основании проведенного анализа литературных источников составлена обобщенная блок-схема причинно-следственных связей параметров эффективности функционирования систем электроснабжения и искажений напряжения (рисунок 1.1) [29, 30].

Исходя из проведенного предварительного анализа определено, что основной отраслью промышленности, использующей крупные резкопеременные нагрузки, сопровождающиеся частыми амплитудно-фазными искажениями напряжения случайного характера возникновения, является металлургическая. Особенное внимание стоит уделить системам электроснабжения электродуговых сталеплавильных печей, прокатных станов и агрегатам резки и штамповки металла [31]. Очевидно, что при необходимости применения на дуговых сталеплавильных печах устройств и ком-

плексов индивидуальной компенсации должен быть решен вопрос об усилении коммутационной аппаратуры, а также предусмотрены меры, устраняющие резонансные явления [32]. Резкопеременные набросы реактивной мощности при изменении эксплуатационного состояния и режима работы электроприемников вызывают колебания питающего напряжения в распределительной электросети. Данные электроприемники, имея нелинейный характер нагрузки, провоцируют появление дополнительных искажений напряжения, что вызывает увеличение, например, времени выплавки металла в сталеплавильных производствах, а это в свою очередь уже приводит к снижению энергоэффективности промышленного предприятия [33, 34].

Для листопрокатных станов фронт наброса реактивной мощности неоднороден и соответствует следующим величинам: для блюмингов, слябингов – не более 200, для прокатных станов горячего проката – не более 400, для станов холодного проката – не более 2000 МВАр/с. На указанные значения необходимо ориентироваться при разработке компенсирующего устройства в части его быстродействия [35]. Для уменьшения резких набросов реактивной мощности от крупных синхронных двигателей с опережающим коэффициентом мощности в настоящее время рекомендуется применять автоматическое регулирование возбуждения на постоянство отдаваемой двигателем реактивной мощности. При таких набросах реактивной мощности выбор места присоединения к системе приобретает важное значение [36, 37]. На станах холодной прокатки при применении вентильных преобразователей набросы реактивной мощности могут превышать 100000 кВАр со скоростью нарастания примерно 2000000 кВАр/с. Такие быстрые изменения реактивной мощности вызывают большие колебания напряжения. Таким образом, возникновение провалов напряжения, перенапряжений и высших гармоник провоцируются в общем случае набросами реактивной мощности, сопровождающие функционирование мощных электроприемников с учетом резкопеременного характера нагрузочного режима. При этом приборы для измерения колебаний напряжения серийно не выпускаются и их производство индивидуально для каждого конкретного случая, к тому же очень затратно [38-41].

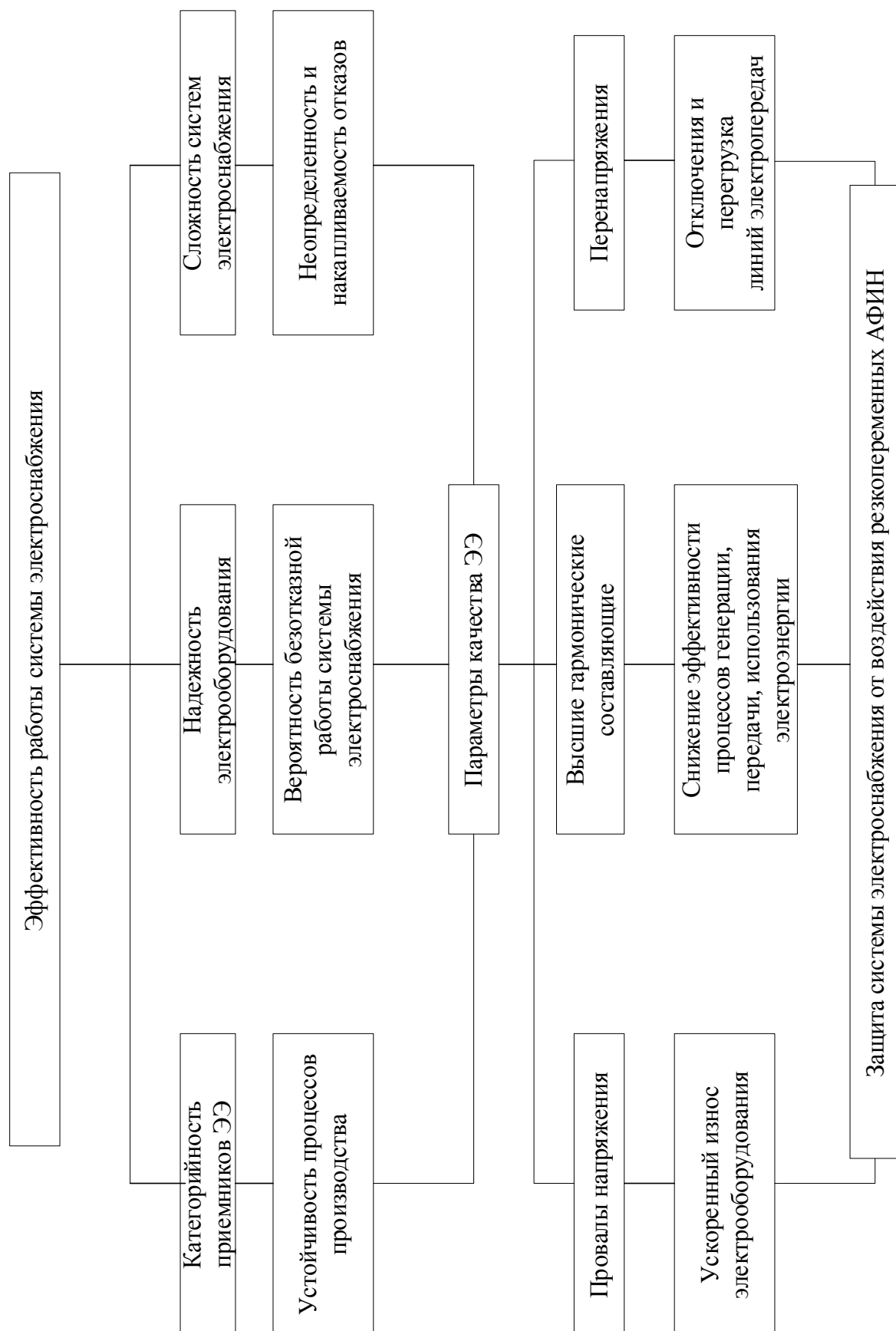


Рисунок 1.1. Структурная блок-схема причинно-следственных связей параметров эффективности функционирования систем электроснабжения и искажений напряжения

Для определения необходимого быстродействия компенсирующего устройства при работе печей важное значение имеет скорость наброса реактивной мощности. Проведенные исследования на действующих печах показали, что в ряде случаев резкий наброс реактивной мощности при работе печей от нуля до максимального значения происходит за время 0,03 с., что соответствует полутора периодам питающего напряжения [1, 42]. В этом случае для снижения колебаний напряжения также применяется автоматическое регулирование возбуждения мощных синхронных двигателей с опережающим коэффициентом мощности с целью уменьшения набросов реактивной мощности, ограничение токов пуска и самозапуска двигателей. Однако данные способы не обеспечивают постоянной динамической компенсации из-за неопределенного и случайного характера нагрузок. Выбор способа снижения колебания напряжения должен определяться технико-экономическим расчетом для каждого отдельного случая [43, 44].

Минимизация влияния резкопеременных нагрузок может обеспечиваться на этапе проектирования (модернизации) выбором рациональной схемы электроснабжения, оптимальной системы плавного пуска двигателей, а также проведением ряда мероприятий по ограничению резких выбросов реактивной мощности [45].

При проектировании систем электроснабжения, имеющих в своем составе электроприемники с резкопеременным и ударным характером нагрузки, осуществляется анализ различных режимов работы данных электроприемников, определяется влияние их на систему электроснабжения в целом, а в частности определяются интервалы колебаний параметров напряжения в распределительных электросетях и пунктах контроля напряжения на пути следования к узлам присоединения нагрузки. Особенно остро эта проблема возникает во время пусковых испытаний, когда технологическое присоединение осуществлено по временной схеме электроснабжения, а также при значительной модернизации электрической сети в случаях, когда требуется увеличение максимальной потребляемой мощности. Анализ различного проектного опыта показывает, что учет подобных факторов позволит избежать серьезных осложнений и затруднений при мощных технологических присоединениях и значительном увеличении максимальной присоединен-

ной мощности [46]. При повышенной вероятности возникновения дефицита активной мощности в территориальной энергосистеме должны подвергаться проверке экономическая целесообразность и техническая возможность применения вентильных преобразовательных агрегатов прокатных станов, функционирование которых может приводить резкопеременные выбросы реактивной мощности большой амплитуды, которые провоцируют выход из строя агрегатов высокой степени ответственности [47, 48].

При резком повышении реактивной нагрузки уровень напряжения уменьшается. Регулятор напряжения пытается при этом увеличить угол сдвига фаз, чтобы увеличить передаваемую мощность, так как он не знает причины уменьшения напряжения. Данный факт усугубляет ситуацию, так как дефицит реактивной мощности при увеличении угла возрастает, а вместе с тем возросшая при этом активная мощность инвертора остается в избытке. Несмотря на то, что регулятор напряжения пришел в действие, возникает очередное резкое увеличение нагрузки, которое вызывает увеличение скорости всех электрических машин, подключенных к сети, так как регулятор частоты обладает инерцией вследствие инерции поля машины и действует медленнее, чем система управления инвертором. Через короткое время после резкого наброса реактивной мощности вследствие повышения скорости машин и усиления магнитного потока восстанавливается первоначальное напряжение, но частота еще остается высокой. Тогда регулятор частоты еще больше увеличивает магнитный поток, что вызывает дальнейшее повышение напряжения сети. Теперь снова вмешивается регулятор напряжения: уменьшает угол и выдаваемую инвертором мощность. После нескольких повторений процесс устанавливается. При большем удельном весе активной нагрузки сети процесс после нарушения режима устанавливается быстрее. Значительно тяжелее протекает процесс регулирования, если в период ночного максимума удельный вес активной нагрузки невелик по сравнению с реактивной. В этом случае тормозящий эффект нагрузки потребителей отсутствует и после внезапного повышения скорость машин снижается очень медленно [49-51].

К основным недостаткам существующих устройств автоматического регулирования напряжения динамическим способом можно отнести:

- отсутствие плавности регулирования напряжения в виду наличия ступеней регулирования, и как следствие, ограниченность амплитуды регулирования;

- при функционировании компенсируются только отдельные виды АФИН, вследствие чего отсутствует реакция устройства на, например, квазистационарные перенапряжения и высшие гармоники напряжения в условиях изменения, как амплитуды, так и фазы добавочного напряжения;

- наличие, как правило, зарядного устройства, которое ограничивает величину компенсационного напряжения, требует постоянного технического обслуживания и контроля, периодической замены, обладает большим активным сопротивлением, имеет значительную массу и габариты при требуемом уровне выдачи мощности;

- наличие коммутируемых выключателей, которые создают коммутационные напряжения при срабатывании и искажают форму компенсированного напряжения;

- наличие трансформатора с РПН (вместо вольтодобавочного). Как показывает практика эксплуатации, трансформаторы с РПН имеют пределы регулирования напряжения $\pm 16\%$, а также обладают малой плавностью регулирования напряжения и низкой скоростью регулирования напряжения, что не оптимально для компенсации резкопеременных отклонений напряжения.

Наиболее перспективным подходом в борьбе с негативными сетевыми возмущениями резкопеременного характера является динамическая компенсация возмущений [52-57]. Среди устройств, в которых реализован данный подход, наибольшее распространение получили динамические компенсаторы искажений напряжения (ДКИН), применяемые для восстановления параметров напряжения в питающих и распределительных сетях классов напряжения 0,4 и 6(10) кВ. В общем случае они решают комплекс проблем, связанных с неудовлетворительным качеством энергии, а именно наличием в системе электроснабжения провалов и перенапряжений. Нормальное функционирование устройств ДКИН обеспечивает минимизацию потерь

электроэнергии, устранение несимметрии по фазам, а также исключение несинусоидальности во всех режимах работы. ДКИН представляет собой компенсатор-преобразователь напряжения с пофазным управлением при помощи выпрямителей. Он восстанавливает кривую напряжения в сети за счет перераспределения потока мощности с помощью вольтодобавочного трансформатора таким образом, чтобы добавочное напряжение на вторичной обмотке компенсировало кратковременные искажения [58, 59]. Однако, достигнутые результаты в вопросах динамической компенсации напряжения не позволяют однозначно и окончательно решить задачу комплексной компенсации АФИН. Их проявления не могут быть определены по месту, времени или продолжительности воздействия, особенно в иерархичных системах электроснабжения непрерывных промышленных производств [60, 61].

Таким образом, выявлены основные параметры качества электроэнергии, затрагиваемые при резкопеременных негативных сетевых возмущениях. Они носят чаще всего случайный характер возникновения и распространения по электрической сети. Равно как нагрузки на предприятиях, например металлургической отрасли, носят случайный характер, так и амплитудно-фазные возмущения будут иметь значительные статистические отклонения от допустимых норм национального стандарта [8]. В этом случае актуально решение такой задачи в комплексном виде, т. е. компенсация резкопеременных негативных сетевых возмущений, таких как провалы, перенапряжения, высшие гармонические составляющие. Однако необходимо выполнить разделение по каждому из трех основных параметров при обеспечении динамического характера компенсации, а также обеспечить высокие скорость и точность компенсации по сравнению с имеющимися техническими решениями.

1.2 Постановка задач исследования

На основании анализа литературных источников целесообразно объективно сформулировать задачи научного исследования, которые направлены на устранение возникновения, распространения и влияния резкопеременных негативных сетевых

возмущений, появляющихся в результате непредсказуемого изменения уровня реактивной мощности в процессах коммутации нагрузок, а также ряда других причин.

На основе полученных данных в результате исследований планируется реализовать комплексный подход повышения эффективности функционирования систем электроснабжения. Главным этапом является создание, поиск способов и средств минимизации негативных сетевых возмущений резкопеременного воздействия с непредсказуемым характером возникновения, приводящих к авариям в системах электроснабжения промышленных производств, для которых последствия перерыва в электроснабжении значительны. Основными задачами исследования являются:

1. Получение математических зависимостей и закономерностей возникновения и распространения сетевых возмущений с целью определения их влияния на функционирование электротехнических комплексов промышленных производств в зависимости от нагрузочного режима.

2. Моделирование воздействия негативных сетевых возмущений резкопеременного характера с целью исследования степени влияния амплитудно-фазных искажений напряжения на форму кривой напряжения в электрической сети.

3. Разработка способа комбинированного регулирования напряжения электрической сети с целью обеспечения эффективного функционирования электротехнических комплексов промышленных производств в условиях резкопеременного характера негативных сетевых возмущений.

4. Разработка способа формирования управляющего воздействия, направленного на оптимизацию динамической компенсации по критерию максимального быстродействия, а также повышение точности введения компенсирующей кривой напряжения в электрическую сеть.

2 АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГАТИВНЫХ СЕТЕВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ РЕЗКОПЕРЕМЕННОГО ХАРАКТЕРА

2.1 Формирование параметров режимов функционирования систем электроснабжения предприятий

Для разработки методик и мероприятий, включающих комплексное воздействие на амплитудно-фазные искажения напряжения резкопеременного и случайного характера возникновения, требуется провести подробный анализ особенностей функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий, где возникают подобного рода сетевые возмущения. К потребителям данного типа относятся цементные и металлургические заводы, предприятия пищевой промышленности, тяговые подстанции и т. п. В частности, например, это может быть электрооборудование для обжига цементной смеси, сортировочные аппараты многофункционального действия, прокатные станы и их силовые агрегаты, электродуговые сталеплавильные печи, агрегаты штамповки и резки, кислородно-конвертерное электрооборудование и т. п. Также к возникновению высокоамплитудных негативных сетевых возмущений резкопеременного характера стоит отнести системы электроснабжения поездов, а именно шины тяговых подстанций.

Наибольшее внимание стоит уделять моментам пуска такого оборудования, когда пусковые токи значительно превышают допустимые и номинальные значения, что сопровождается значительными выбросами реактивной мощности в сеть [62-64]. Основными исследуемыми параметрами качества электроснабжения при проведении анализа являются: провалы напряжения, перенапряжения, высшие гармонические составляющие, колебания нагрузки, уровень реактивной мощности, вероятностные параметры отказов элементов или системы электроснабжения, а также параметры электрического режима. Блок-схема проводимого структурно-параметрического исследования представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1. Блок-схема структурно-параметрического исследования системы электроснабжения с резкопеременным характером негативных возмущений

Рассматривая электроустановки обжига цементной смеси, электросталеплавильные печи, группы электродвигателей прокатных станов, а также пусковое электрооборудование поездов, следует отметить, что в виду их технологических особенностей, они являются источником резкопеременных возмущений. Работа ус-

тановок такого рода сопровождается нестабильным потреблением реактивной мощности, определяя возникновение в электрической сети колебаний напряжения, а нелинейность и несимметрия фазных токов, потребляемых самой установкой, приводят к возникновению высших гармоник тока, а также несимметрии напряжения в самой распределительной сети [65, 66].

Эффективной компенсации негативных резкопеременных АФИН предшествует этап выявления структурных особенностей системы электроснабжения конкретного производства, целью которого в данной работе является построение обобщенной структурной схемы [67]. Все функциональные элементы системы электроснабжения должны иметь согласованные характеристики элементов и системы, и обеспечивать оптимальные показатели эффективности (экономические показатели, показатели надежности, качества электроэнергии, КПД) в различных режимах функционирования системы [68, 69]. Поэтому создание обобщенной структурной схемы имеет ряд особенностей. Во-первых, нужно оценить характер нагрузок и требования потребителей к качеству электроэнергии и бесперебойности электроснабжения [66, 70]. Во-вторых, последующая структурная оптимизация должна предполагать сравнение основных показателей эффективности системы электроснабжения для определения рационального окончательного структурного решения. В-третьих, для улучшения показателей критериев эффективности, кроме структурной рационализации, необходимо исследовать формирование параметров режимов функционирования системы электроснабжения. Перечисленные особенности структурно-параметрического анализа позволят создать наиболее достоверную обобщенную структурную схему электроснабжения. Наряду со структурно-параметрическим анализом проводится определение параметров исследуемых показателей качества электроэнергии и уровня надежности электрооборудования, а также математических зависимостей и закономерностей характера электрической нагрузки предприятия и характера сетевых возмущений [66]. Данная фаза необходима для формирования основных вероятностных показателей АФИН, что в дальнейшем позволит оптимизировать процесс поиска технического решения по комбинированному регулированию

напряжения сети, а также на последующих этапах уточнить результаты влияния АФИН на эффективность функционирования системы электроснабжения.

Следующим этапом является создание имитационной модели системы электроснабжения и моделирования воздействия негативных сетевых возмущений резкопеременного характера с последующим анализом ее работы и анализом полученных результатов в отношении исследуемых показателей АФИН. Далее следует проведение их вероятностного исследования и оценка видовых степеней влияния с целью определения параметров интервалов наихудших негативных сетевых возмущений. Заключаящими этапами являются разработка технических решений и апробация теоретически разработанных методик и мероприятий, направленных на повышение эффективности функционирования системы электроснабжения с резкопеременным характером негативных сетевых возмущений.

Опыт эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий показывает, что только лишь за счет реализации схемно-режимных мероприятий невозможно достичь такого уровня снижения набросов реактивной мощности, при котором отпадает необходимость в полной или частичной ее компенсации без существенного вреда для производства и энергоэффективности. Технологический процесс функционирования отдельных предприятий носит циклический характер, т. е. потребление реактивной мощности не постоянно, в результате чего статическая компенсация выбросов реактивной мощности малоэффективна или невозможна. Как следствие, напряжение на шинах питающей подстанции увеличивается, отклоняясь от требований действующего ГОСТ 32144-2013 на качество электрической энергии [8]. Относительно высших гармонических составляющих, выдаваемых в сеть, характер возникновения и распространения которых носит резкопеременный и случайный характер из-за технологических особенностей функционирования электроагрегатов, их компенсация осуществляется в основном многосекционными статическими фильтрокомпенсирующими устройствами (ФКУ). Выбор включаемой секции или комбинации их осуществляется исходя из усредненных значений высших гармоник токов, из-за чего компенсация происходит не всегда оптимально, а иногда и во вред энергопотреблению, в виду того, что их генерация имеет случайный характер. Это гово-

рит о необходимости разработки управляемой динамической системы управления качеством электроэнергии относительно резкопеременного характера нагрузки.

Электромагнитная энергия, затрачиваемая в процессе включения и отключения электрическим коммутационным аппаратом присоединения, содержащего значительную часть нагрузки, определяется выражением для расчета потребления коммутационной энергии [71]:

$$W_{\text{комм.э}} = \frac{Li^2}{2}. \quad (2.1)$$

где L - индуктивное сопротивление до места коммутации, Гн; i – величина тока эксплуатационного КЗ, А.

При анализе статистических данных токов высших гармоник, изложенных в работе [72] выявлено, что токи эксплуатационного короткого замыкания (КЗ) при наличии в сети высших гармонических составляющих тока будут выше до 7%, чем при их отсутствии. Таким образом, только для затрат энергии на эксплуатационные КЗ при наличии высших гармоник тока в цепи увеличение затрат на электроэнергию будет весьма значительно сказываться на технико-экономических показателях предприятий, имеющих значительную установленную мощность.

Изменение параметров электрической сети, мощности и характера нагрузки во времени являются основным влияющим фактором на изменение показателей качества электрической энергии [67, 70]. Этот аспект необходимо учитывать для составления математических и статистических зависимостей влияния негативных сетевых возмущений резкопеременного характера на качество электроэнергии. Общую зависимость можно выразить следующим аналитическим выражением:

$$F(u_{\Delta}, u_{\text{в.г.}}, t) \equiv F(X_{\text{п}}, S_{\Delta}, S_{\text{н}}, t), \quad (2.2)$$

где u_{Δ} – сумма зависимостей изменения амплитудных параметров напряжения при

изменении электрического режима; $u_{в.г.}$ – сумма зависимостей изменения гармонических параметров напряжения, характеризующих несинусоидальность напряжения при изменении электрического режима; X_{Π} – величина, характеризующая параметры электрической сети; S_{Δ} – изменение питающей мощности системы электроснабжения; S_H – величина, характеризующая зависимость характера нагрузки от времени; t – время, с.

В системах электроснабжения большинства промышленных предприятий изменение параметров электрической сети и питающей мощности маловероятны, либо их изменения незначительны и практически не влияют на оптимальную работу электрооборудования. Для таких предприятий, выражение (2.2) примет вид:

$$F(u_{\Delta}, u_{в.г.}, t) \equiv F(s_H, t). \quad (2.3)$$

В случае резкопеременного характера нагрузки влияние негативных сетевых возмущений будет тоже носить резкопеременный характер, а анализируемые в работе показатели качества электроэнергии являться случайными величинами. Их измерение и обработка базируются на вероятностно-статистических методах [32].

Наиболее полной и удобной формой представления отклонения напряжения случайного характера возникновения $U_{\Delta}(t)$ является гистограмма (рисунок 2.2). При этом весь диапазон отклонения напряжения делится на интервалы ΔU и определяется вероятностью попадания отклонения напряжения P_i в этот интервал, равной отношению количеству попаданий в i -й интервал к общему числу измерений отклонения напряжения. На основании гистограммы дается ответ, какого качества электроэнергия в точках контроля, которой соответствует определенный интервал на гистограмме величины изменения амплитуды ΔU [66].

Отклонения напряжения в системе электроснабжения прокатных станов металлургических предприятий оказывают значительное влияние на работу асинхронных электродвигателей, которые потребляют большинство энергии, которая питает данное предприятие. Причем даже если негативное воздействие каждого асинхрон-

ного двигателя на систему незначительно, их совокупность может оказывать весомое ухудшение эффективности электроснабжения, а распространение негативного сетевого возмущения носит в данном случае цепной характер. При снижении уровня напряжения частота вращения ротора значительно уменьшается в связи с изменением его скольжения, особенно если двигатель работает с полной нагрузкой. Рассчитать зависимость частоты вращения ротора двигателя от отклонения напряжения можно на основании выражения [34, 66]:

$$n = n_c \left(1 - \beta \frac{U_H^2}{(U_H - \delta U)^2} S_H \right), \quad (2.4)$$

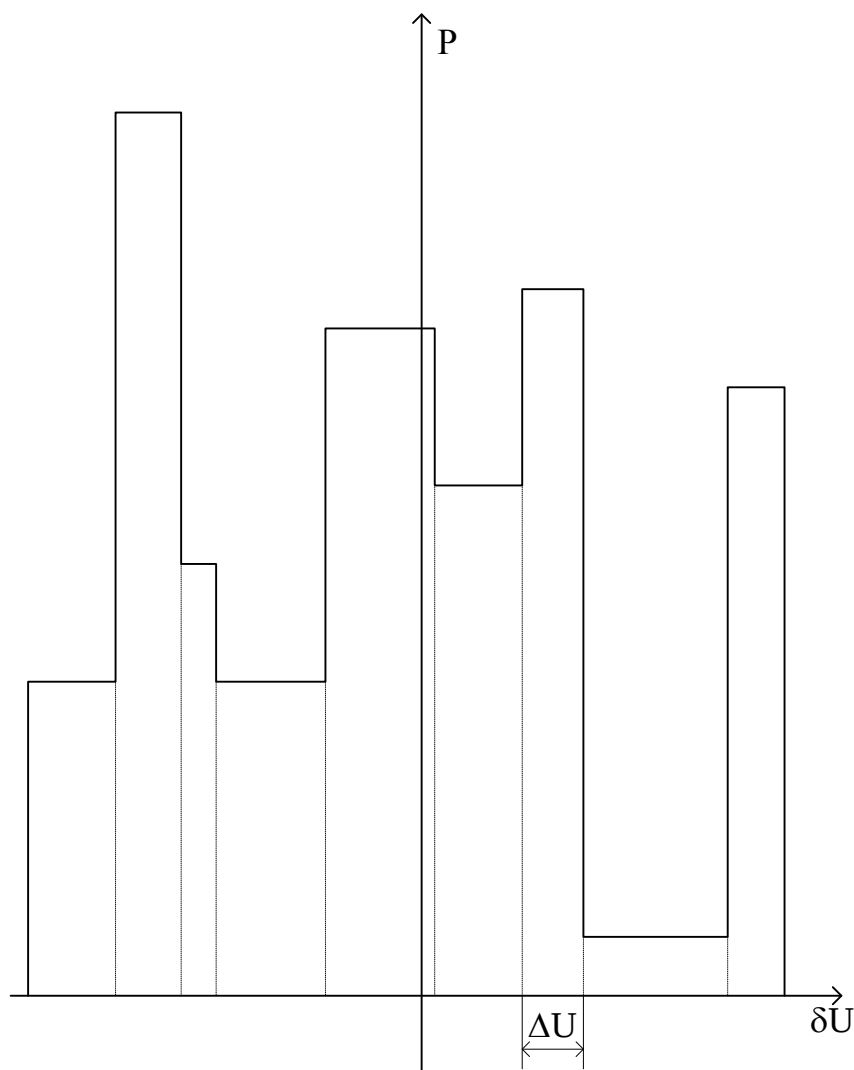


Рисунок 2.2. Гистограмма отклонения напряжения

где n – расчетная частота вращения; n_c – синхронная частота вращения; β – коэффициент загрузки; U_n – номинальное напряжение асинхронного двигателя; δU – отклонение напряжения на зажимах двигателя; S_n – номинальная рабочая мощность асинхронного двигателя.

Снижение уровня напряжения особенно негативно сказывается в условиях пуска двигателя, т. к. в значительной степени занижается его пусковой момент, а следовательно, увеличивается расход электрической энергии, а также уменьшается срок службы изолирующих материалов, как вследствие и самого асинхронного двигателя. Следовательно, с точки зрения ухудшения эффективности работы электродвигательных агрегатов предприятия наиболее опасны отрицательные отклонения напряжения (провалы), особенно если их распространение носит резкопеременный случайный характер [37, 66].

Значение уровня размаха отклонения напряжения определяется согласно выражению [66, 70]:

$$\delta U = \Delta Q \cdot \frac{100\%}{S_k}, \quad (2.5)$$

где ΔQ – размах изменений реактивной мощности в точке присоединения нагрузки, определяющийся как разность между наибольшим и наименьшим значениями при резкопеременных набросах нагрузки и значениями в предшествующем режиме работы, $ВАр$; S_k – мощность эксплуатационного короткого замыкания в месте присоединения нагрузки, $ВА$.

Таким образом, согласно выражению (2.5), характеризующего зависимость отклонений напряжения от резкопеременного уровня реактивной мощности и величины мощности эксплуатационного (коммутационного) КЗ, можно определять значения размахов напряжения по значениям бросков реактивной мощности от нагрузки [66].

В приложении 1 приводятся значения нагрузочных мощностей в течение заданного промежутка времени. Для наглядности исходные данные представлены в графической форме на рисунке 2.3. Соотнеся их с различными значениями полной мощно-

сти эксплуатационного короткого замыкания, построим график зависимости уровня отклонения напряжения от интервала размаха значений реактивной мощности для внутризаводской системы электроснабжения Липецкой ТЭЦ-2 для ее фидеров с резкопеременным характером нагрузки (рисунок 2.4). Для более удобного графического анализа рассчитаем уровень размаха отклонения напряжения для двух крайних положений: минимального и максимального значений размаха уровня реактивной мощности, согласно выражению (2.5). Это позволяет получить на графике крайние положения для самого отклонения напряжения при крайних значениях мощности [66].

$$\delta U_{\min.\min} = (63,88 - 62,81) \cdot \frac{100\%}{210,07} = 0,51\%;$$

$$\delta U_{\min.\max} = (63,88 - 62,81) \cdot \frac{100\%}{332,15} = 0,32\%;$$

$$\delta U_{\max.\min} = (137,62 - 62,81) \cdot \frac{100\%}{210,07} = 35,61\%;$$

$$\delta U_{\max.\max} = (137,62 - 62,81) \cdot \frac{100\%}{332,15} = 22,52\%.$$

Из графика видно, что с ростом мощности эксплуатационного (коммутационного) короткого замыкания возрастает приращение уровня размаха отклонения напряжения по отношению к размаху реактивной мощности. Следовательно, ограничивая мощность коммутации, можно уменьшить значения выбросов реактивной мощности, однако, в некоторых типах производства невозможно значительно снизить это значение по технологическим особенностям производства (например, плавка металла) [66, 70]. К тому же именно при малых рабочих токах в большей степени проявляются высшие гармоники в системе электроснабжения [21].

Практически все крупные промышленные производства, потребляющие электрическую энергию, в той или иной степени генерируют в электрические сети высшие гармонические составляющие, ухудшая качество электроэнергии, что снижает надежность электрического оборудования, создает дополнительные по-

тери энергии, нарушает работу систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Высшие гармонические составляющие по распределительным сетям распространяются от одного агрегата к другому, снижая эффективность их функционирования [32].

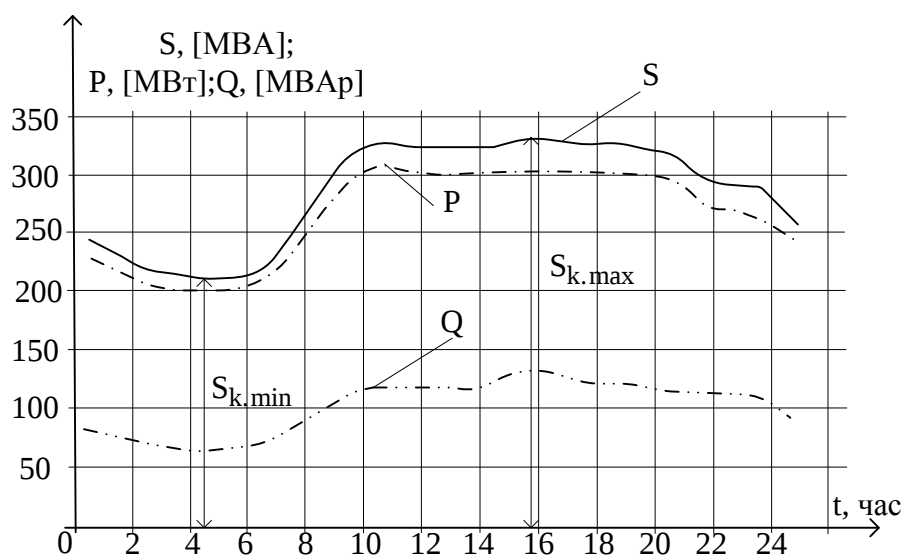


Рисунок 2.3. Суточный график нагрузки Липецкой ТЭЦ-2

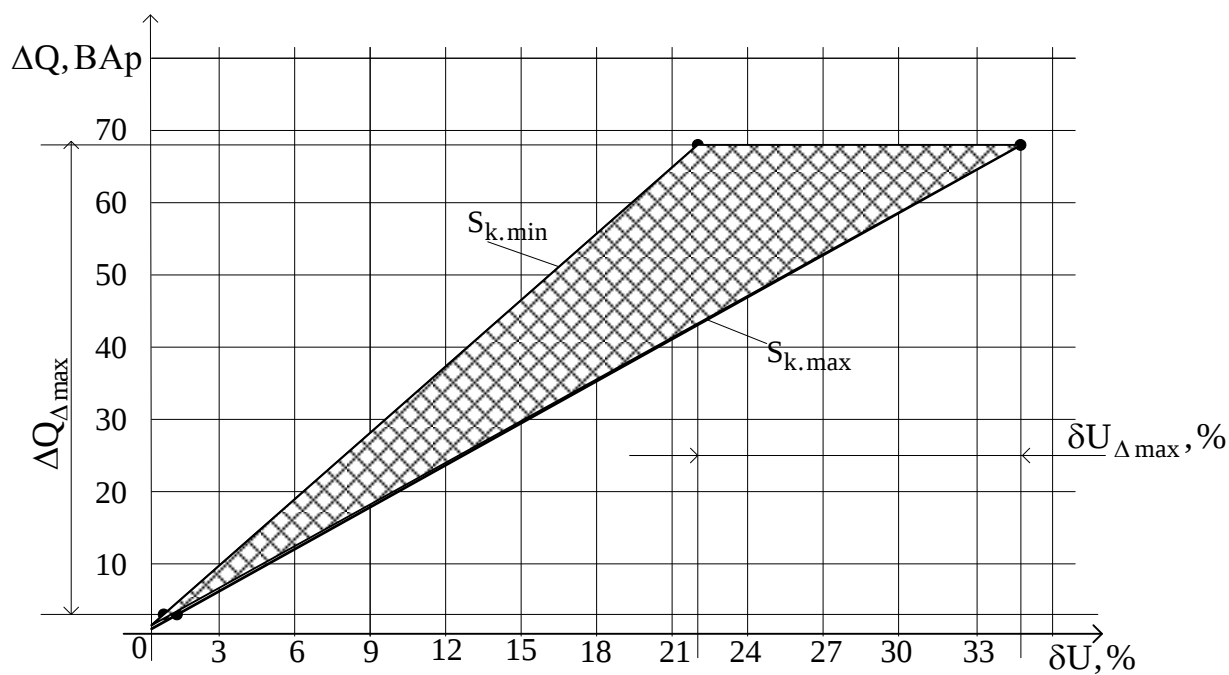


Рисунок 2.4. Зависимость отклонений напряжения от уровня набросов реактивной мощности

Под действием высших гармонических составляющих кроме дополнительных потерь возникают необратимые физико-химические процессы, вызывающие старение изоляции и нарушение электрических свойств активной части оборудования. Сокращение срока службы приводит к увеличению затрат на капитальные и текущие ремонты [1].

Снижение уровней высших гармоник в электросетях также, как компенсация отклонений напряжения, является частью поставленной задачи уменьшения влияния резкопеременных нагрузок на электрооборудование и улучшения качества электрической энергии в электрических сетях предприятий. Решение этой задачи, основанное на применении multifunctional устройств, оказывается в экономическом отношении весьма целесообразным.

Возникновение высших гармоник напряжения характеризуется следующими показателями [25]:

- коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициентом n -ой гармонической составляющей напряжения.

Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с разным номинальным напряжением, а также нормально допустимые значения коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с разным номинальным напряжением приведены в [8]. Предельно допустимое значение коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения принимается равным 150% от нормально допустимого значения коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения. Измерение значения коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)i}$ осуществляют для междуфазных (фазных) напряжений. Для каждого i -го наблюдения за период времени, равный 24 ч, определяют действующее значение напряжения n -ой гармоники $U_{(n)i}$ в вольтах, киловольтах. Вычисляют значение коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)i}$ в процентах как результат i -го наблюдения [25]:

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{(1)i}} \cdot 100, \quad (2.6)$$

где $U_{(1)i}$ – действующее значение напряжения основной частоты на i -ом наблюдении, В.

Допускается вычислять данный показатель качества по формуле [25]:

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100. \quad (2.7)$$

Относительная погрешность вычисления $K_{U(n)i}$ с использованием формулы (2.7) вместо (2.6) численно равна значению отклонения напряжения $U_{(1)i}$ от $U_{\text{ном}}$.

В целях исследования воздействия резкопеременных возмущений и влияния их на кривую напряжения в распределительной электрической сети, проведено имитационное моделирование влияния АФИН на форму кривой напряжения в распределительной электрической сети [72, 73]. Схема сформированной модели приведена на рисунке 2.5, результаты моделирования – на рисунке 2.6. Моделирование разделено на 3 этапа. На первом этапе электроприемники и генераторы АФИН не подключены. На втором этапе подключаются электроприемники и через некоторое время – генераторы АФИН. На третьем этапе генераторы АФИН отключаются и, т. к. система электроснабжения не обладает абсолютно устойчивостью, за их отключением следует кратковременное скачкообразное повышение напряжения (до 10-12%), и в заключение синусоиды всех трех фаз нормализуются. Моделирование выполнено на базе программно-аппаратного комплекса Matlab для одной из шин 6 кВ ПС 110/35/6 кВ Цементная.

Таким образом, компенсация негативных сетевых возмущений резкопеременного характера для систем электроснабжения имеет важное значение. Специфика решения этих вопросов связана с большой мощностью установок, высоким питающим напряжением и резко стохастическим характером технологических процессов.

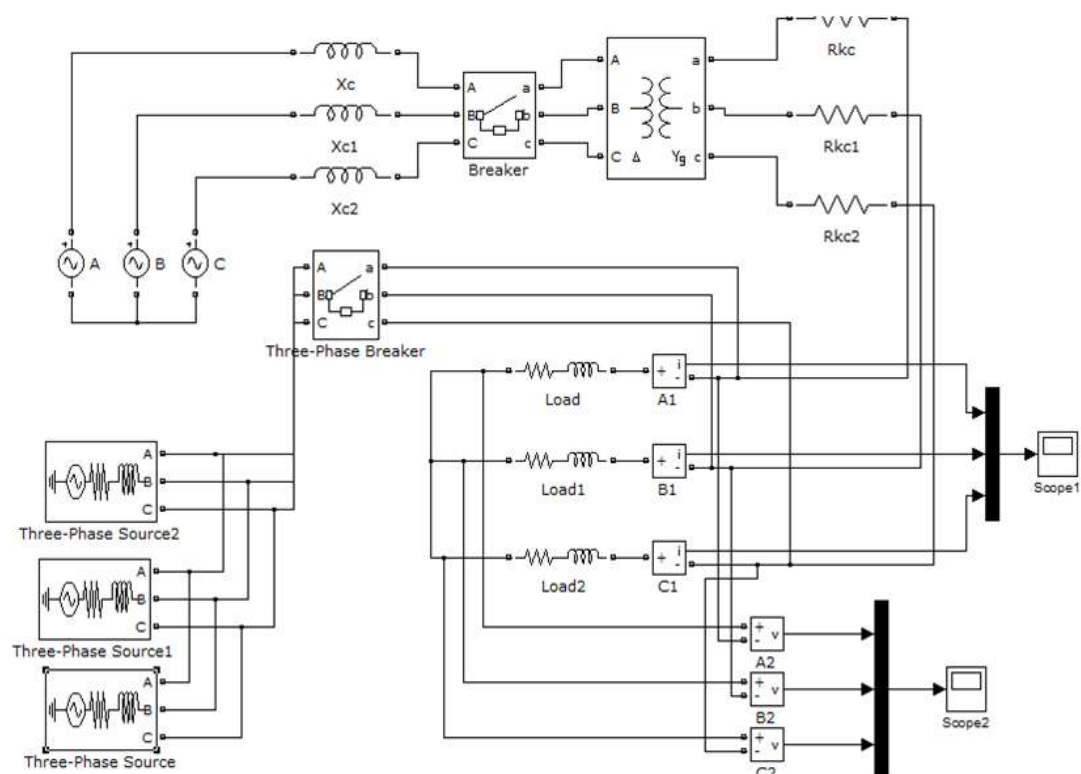


Рисунок 2.5. Схема модели в ПАК «Matlab»



Рисунок 2.6. Осциллограмма кривых напряжения с учетом воздействия АФИН резкопеременного характера (результаты моделирования)

Однако для дальнейшего поиска технических решений поставленных задач, необходимо осуществить проверку гипотезы об эффективности противофазной динамической компенсации [74]. Предполагаемое схемное решение также реализовано в программном комплексе Matlab (рисунок 2.7). Разберем подробнее реализацию технологии противофазной динамической компенсации. Система состоит из блоков. Блок «1» является блоком вывода графической информации о токе и напряжении фазы сети.

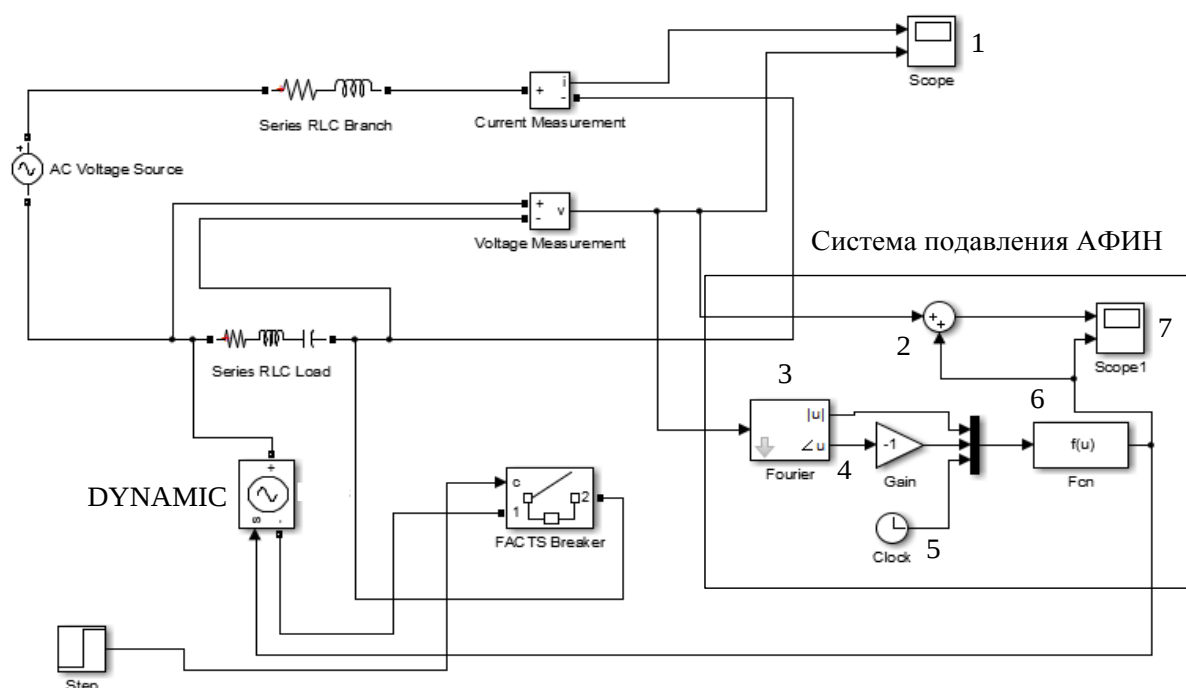


Рисунок 2.7. Упрощенная модель противофазной динамической компенсации АФИН в ПАК «Matlab»

Он задает эталонную форму синусоиды напряжения сети, к которой необходимо стремиться. Одним из основных блоков является «Fourier» - блок «3». Его функция состоит в том, что он берет информацию о форме и числовых значениях кривой напряжения на нагрузке и раскладывает ее в ряд Фурье, выделяя необходимые нам амплитуду и фазу напряжения основной частоты и высших гармоник. Далее с помощью дополнительных блоков «4» и «5» создаются исходные данные для генерации компенсирующей кривой напряжения, которая будет представлять собой по сути графическую и числовую разницу между эталонной кривой и кривой напря-

жения на нагрузке. Сгенерированная в блоке «6» компенсирующая кривая отображается в осциллографе «7», а поступает в источник DYNAMIC с программируемой функцией задачи кривой напряжения, который отдает ее в сеть, компенсируя АФИН в сети. Осциллограммы приведены на рисунках 2.8 и 2.9.

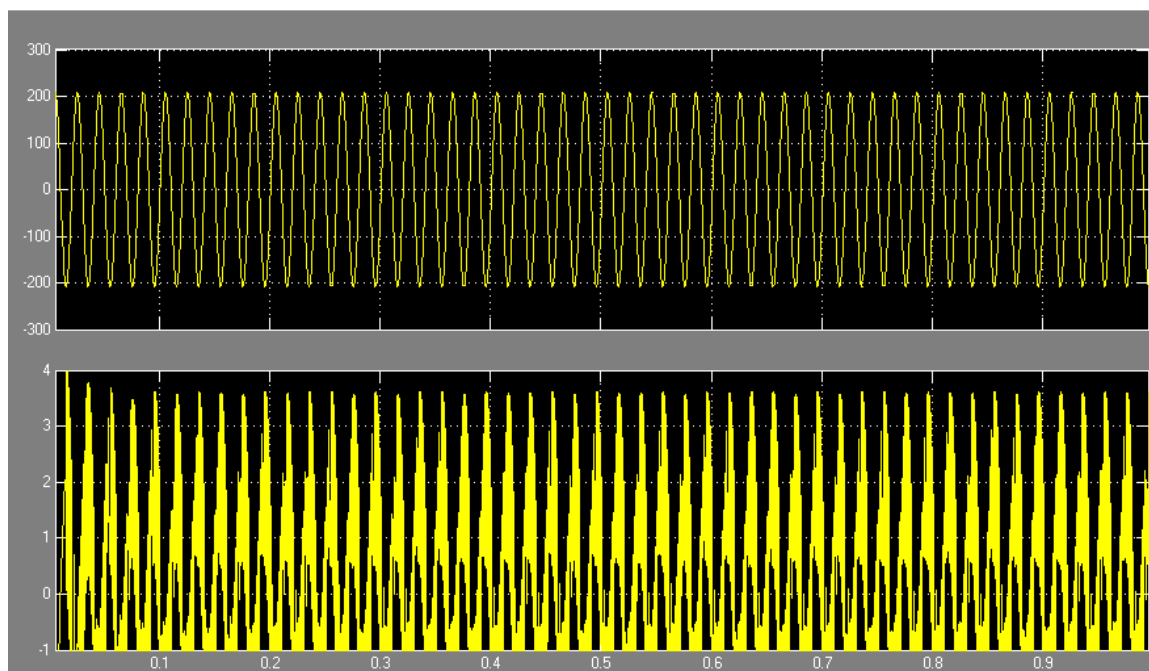


Рисунок 2.8. Осциллограммы тока в сети и напряжения на нагрузке

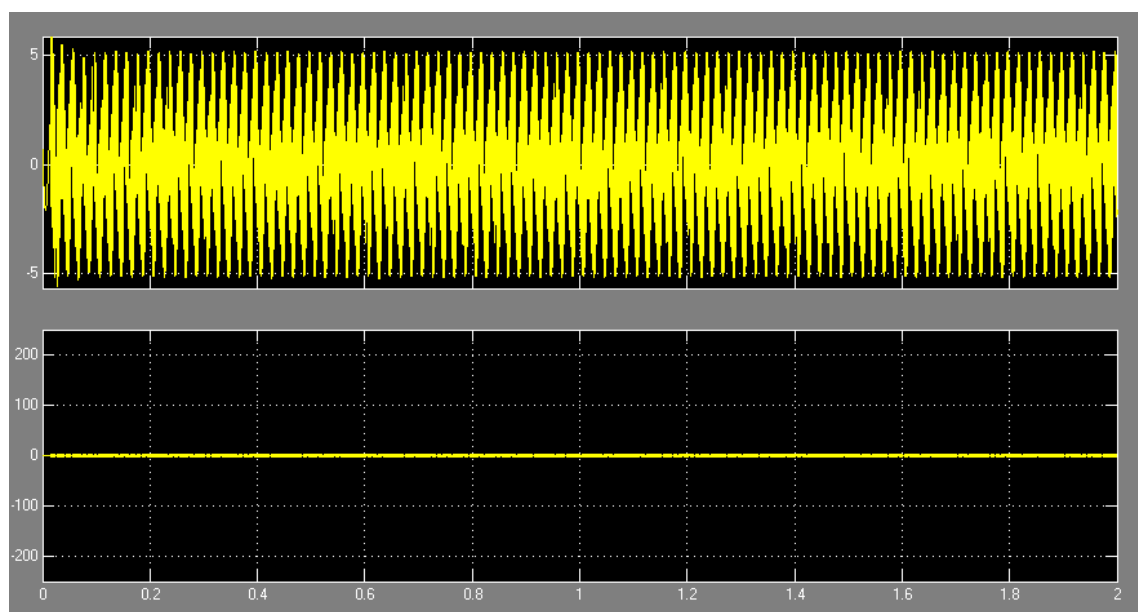


Рисунок 2.9. Генерируемая функция управляемого источника DYNAMIC и графическая разница между формами кривой напряжения на нагрузке и эталонной кривой напряжения

Данная схема является упрощенной реализацией технологии динамической противофазной компенсации АФИН. Анализируя кривые напряжения на рисунках 2.6 и 2.7, приходим к выводу, что кривая напряжения на нагрузке практически полностью скомпенсирована относительно эталонной. Однако на практике будет иметь место запаздывание генерируемого сигнала. Минимизация данного запаздывания также является одной из целей в поиске технических решений динамической противофазной компенсации амплитудно-фазных искажений напряжения резкопеременного характера.

Модернизация систем электроснабжения с все большим распространением автоматизации производственных процессов промышленных предприятий увеличивает сложность их режимов работы, так как перенастройка режимов и алгоритмов работы защитной автоматики часто затруднена. В результате требуется разработка мероприятий, повышающих рациональную эффективность функционирования таких систем электроснабжения. Появление сбоев в работе электрооборудования, а также полных отказов в их работе зависит от многих случайных факторов, что ведет к существенному снижению технико-экономических показателей работы предприятия.

Сложность решения задач, связанных с повышением рациональной эффективности систем, и, соответственно, технологических промышленных комплексов вызвана, зачастую, вероятностным характером рассматриваемых процессов. Возникновение, а следовательно, и распространение по всей питающей электросети негативных сетевых возмущений обусловлено в первую очередь случайным характером варьирования рабочих мощностей, т. е. коммутациями и отключениями нагрузок, которые происходят с определенной вероятностью. Характер возникновения АФИН и случайные по характеру возникновения и распространения коммутации нагрузок имеют прямую причинно-следственную связь. Источниками резкопеременных нагрузок в системах электроснабжения обычно являются электроприемники средней и большой мощности с нелинейным характером нагрузки. Графики изменения рабочей мощности приемников в данном случае имеют случайный и независимый характер. Скачкообразное изменение нагрузки, например, обычно происходит при включении мощных электродвигателей с большой кратностью пускового тока [37].

Резкопеременные нагрузки, как было показано на результатах моделирования, снижают качество электроэнергии. Это вызвано отклонениями и колебаниями напряжения, а также возникновением высших гармонических составляющих. Усугубляющим фактором в данном случае также являются возмущения, возникающие в определенных узловых точках системы. Их воздействие распространяется дальше от шин низкого напряжения к шинам высокого напряжения. Распространение к шинам низшего напряжения происходит практически без затухания, а к шинам высшего напряжения затухание происходит только по амплитуде. Электрическое освещение особенно чувствительно к колебаниям напряжения, что приводит к понижению эффективности труда рабочего персонала предприятия при их возникновении. На рисунке 2.10 представлен график изменения потребления полной мощности группой электродвигателей, отвечающих за прокат листового металла с интервалом в один час. Соответственно, соединение таких мощных электродвигателей в группу даже при построении нагрузки отдельных приемников либо их совокупности делает характер нагрузки случайным [75]. В этом случае для оценки надежности и повышения эффективности функционирования системы электроснабжения требуется применение аппарата классической теории вероятности, а также элементов теории случайных импульсных потоков.

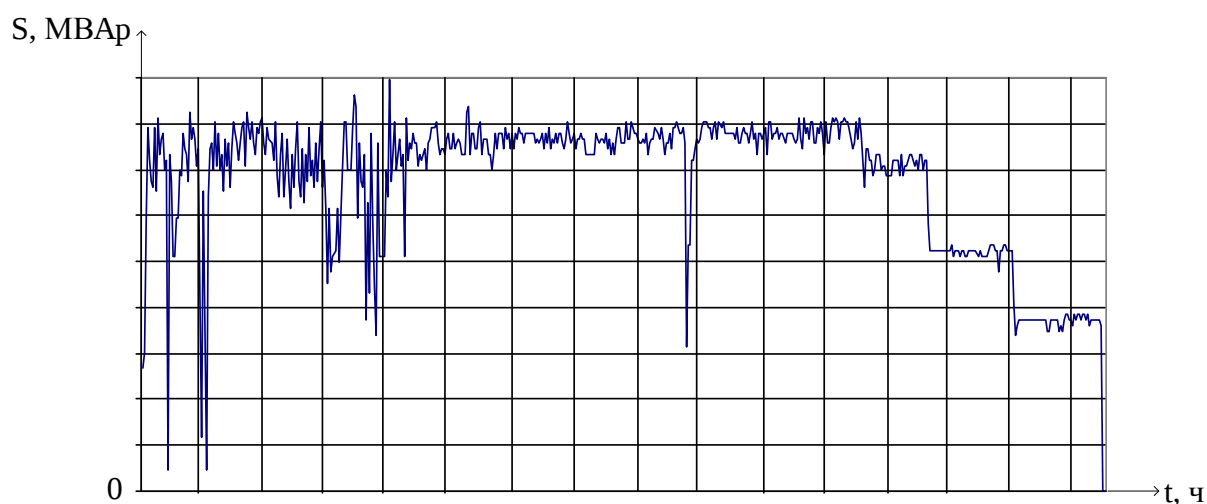


Рисунок 2.10. График активной нагрузки резкопеременного характера для системы электроснабжения прокатного стана листопрокатного производства

Рассматривание вопросов, касающихся компенсации АФИН в сети, было актуальным всегда с момента, когда распределительные электрические сети стали приобретать сложно структурированный и иерархический характер построения. Известным российским ученым Кудриным Б.И. была предложена «уровневая» модель анализа систем электроснабжения, согласно которой любая система электроснабжения представляет собой совокупность так называемых «уровней», высшим из которых (6УР) является источник электроэнергии (генератор ТЭЦ, ГЭС, АЭС и т. п.) или условный эквивалентный генератор, а низшим (1УР) – электроприемники или их совокупность. Для удобства описания процессов распространения и возникновения негативных сетевых возмущений воспользуемся уровневым принципом описания системы электроснабжения от отдельного электроприемника (1УР) до границы раздела предприятия с шинами главной понизительной подстанции (6УР) [44].

Такое деление учитывает иерархичность системы электроснабжения. Резкопеременность нагрузок определяется случайным образом варьирующимися коммутациями и отключениями отдельных электроприемников, а также аварийными отключениями транзитных элементов сети. В суммарном эффекте по 1-2 УР уже на шинах главной понизительной подстанции производства негативные сетевые возмущения имеют значительное влияние. Однако не все колебания приводят к отказам на соответствующих уровнях системы.

Отличительным аспектом резкопеременного характера негативных сетевых возмущений является условное подразделение систем электроснабжения промышленных предприятий на два типа. Первый тип предприятий имеет резкопеременный характер нагрузки, однако прогнозируемость и периодичность технологического процесса таких предприятий как, например листопрокатное производство, позволяет компенсировать возмущения в сети практически на любом из уровней. В целях повышения эффективности электроснабжения таких предприятий обычно практикуется выбор на этапе проектирования (модернизации) электрооборудования с более высокими показателями надежности. То есть всегда имеется запас по наработке на отказ в элементах системы электроснабжения. В

системах электроснабжения предприятий с непрерывным технологическим процессом используются различные статические и динамические способы компенсации амплитудных и фазных искажений напряжений. За счет динамического характера воздействия и распространения возмущения должны быть скомпенсированы в определенные моменты времени протекания технологического процесса. Возникновение АФИН в системах электроснабжения такого рода целесообразно описывать путем использования классической теории вероятности с применением аппарата теории случайных импульсных потоков [76-80]. При этом отметим, что разработанные на сегодняшний день способы компенсации негативных сетевых возмущений в таких электротехнических комплексах недостаточно эффективны по причине необходимости обеспечения высокой скорости компенсации.

Второй тип предприятий имеет относительно спокойный и плавный технологический процесс, как правило, продолжительного и цикличного режима работы. К данному типу отнесем предприятия пищевой промышленности, котельные, промышленные производства конвейерного типа (за исключением листопрокатных и других тяжелых производств) и т. п.

2.2 Возмущения резкопеременного характера в системах электроснабжения предприятий с резкопеременным характером электрических нагрузок

Функционирование систем электроснабжения предприятий первого типа и анализ основных технических решений в области компенсации негативных сетевых возмущений целесообразно рассматривать на примере системы электроснабжения листопрокатного производства металлургического завода как наиболее характерного типа технологических процессов такого рода. Оно включает в себя прокатку из стали или других металлов различных изделий и полуфабрикатов, а также дополнительную обработку их с целью повышения качества (термическая обработка, травление, нанесение покрытий и т.п.). Обычно прокатка является завершающим звеном технологического цикла выпускаемой продукции [80, 81].

В зависимости от назначения прокатных агрегатов, режимов прокатки и других технологических факторов функционирование электрооборудования анализируемых систем будет отличаться друг от друга. Режимы прокатки, как правило, являются тяжелыми для электрооборудования. Они характеризуются ударным приложением нагрузки в момент захвата металла, широким диапазоном регулирования скорости, большими динамическими перегрузками, особенно в период разгона привода с металлом в валках. Прокатка сортового металла состоит из следующих операций: нагрев заготовки до 1100-1250 °С; подача заготовки к рабочим клетям и прокатка в несколько проходов в калибрах; резка проката на пилах или ножницах на части требуемой длины или сматывание в бунты; охлаждение на холодильниках [82-84]. Все эти режимы не однотипны. Возмущающие факторы технологического процесса для отдельных режимов также будут различны, что усложняет разработку энергоэффективных мероприятий.

Для системы электроснабжения листопрокатных станов перерыв питания более чем на 0,1 с. вызывает брак продукции. При этом происходит нарушение ритма технологического процесса и, как следствие, срыв исполнения производственного плана. Простой прокатного стана ведет к снижению производительности и вызывает значительный недоотпуск продукции. Подготовленные к прокату слитки за время простоя остывают и требуют подогрева, а на нагревательные печи расходуется дополнительная энергия. Восстановление технологического процесса после устранения нарушения производительности требует значительного количества времени (вплоть до нескольких часов). Для сохранения бесперебойной работы листопрокатного стана продолжительность перерыва в его электроснабжении не должна превышать величину, допустимую по условиям технологии, с одной стороны, и быть ниже, чем допустимое по условиям самозапуска электродвигателя время – с другой. Это неравенство удовлетворяет условиям технологического процесса при наличии общепринятых электрических схем, с использованием дополнительных средств стабилизации систем электроснабжения при многократных и повторяющихся сетевых возмущениях [85-87].

Питание рассматриваемого листопрокатного производства осуществляется от главной понизительной подстанции (ГПП), на которой установлены трансформаторы серии ТРДНЦ-63000/110, ТРДЦНКМ-63000/110 и им подобные типы. Для компенсации реактивной мощности на ГПП используются батареи конденсаторных установок. Для автоматического отключения коротких замыканий или перегрузок на всех присоединениях ГПП установлены устройства релейной защиты, выполненной на постоянном оперативном токе: максимальная токовая – от коротких замыканий и замыканий на землю; дифференциальная и газовая – для трансформаторов; дифференциальная и минимального напряжения – для электродвигателей. На предприятиях используется еще и структурное резервирование для сопротивления воздействию негативных сетевых возмущений [31, 41].

Для исследования процесса «уровневого» распространения негативных сетевых возмущений резкопеременного характера проанализируем схему электропитания листопрокатного производства, представленную на рисунке 2.11. Особое внимание следует уделять возмущениям на секциях шин низшего напряжения системы электропитания (рисунок 2.12), из-за которых в основном и создаются возмущения [88-90]. Приемниками, присоединенными к секциям шин, являются клетки прокатных станов, а также моталки и разматыватели. Режимы работы данного электрооборудования являются тяжелыми из-за резкопеременных нагрузок технологических машин, т. к. подразумеваются ударные положения нагрузки в момент захвата металла. Также имеют место большие динамические перегрузки, что требует широкого диапазона регулирования скорости прокатки. Ухудшающим фактором для эффективности, рассматриваемой на рисунке 2.12 системы, является то, что все четыре клетки прокатного стана, а также разматыватель и моталка, присоединены к одной секции шин. То есть при работе, например дифференциальной защиты шин (в том числе ложной или излишней), происходит полное погашение всех приемников данной секции шин. Это также способствует распространению негативных сетевых возмущений на смежное электрооборудование системы электропитания предприятия.

Значительными по степени генерации негативных сетевых возмущений приемниками являются электроприводы реверсивных станов. Их электродвигатели работают в сильно напряженном режиме: высокая частота пусков (до 1500 в час), частые реверсы и остановки, большие перегрузки по мощности [91]. В результате генерируемые в систему негативные сетевые возмущения будут иметь большие значения как по амплитуде, так и по фазе.

В качестве математической модели, описывающей функционирование системы электроснабжения производств первого типа, используем стационарный независимый импульсный поток $S(t)$. Импульсам такого потока соответствует время коммутации нагрузок, паузам – продолжительность простоя в работе отдельного электроприемника. Если обозначить среднюю длительность импульсов через $\bar{\tau}$, а среднюю паузу через $\bar{\theta}$, то можно соответственно определить вероятность следующей коммутации P_k или отключения P_o нагрузки.

Очевидно, что подсистема электроснабжения нагрузок прокатных станов является неразветвленной и слабо структурно-резервированной. В общем случае при отказе какой-либо отдельной единицы оборудования происходит остановка всей технологической цепочки. Тогда вероятность появления импульсов рассматриваемого потока будет равна [71]:

$$P_{K(O)} = P_1 \cdot P_2 \dots P_n, \quad (2.8)$$

где 1, 2, ..., n – число рассматриваемых приемников с резкопеременным характером нагрузок.

Учитывая прямо пропорциональный характер взаимосвязи нагрузки и негативных сетевых возмущений очевидно, что в этом случае мы имеем дело с нормальным распределением, которое определяется плотностью вероятности [71, 76]:

$$f(x_{c.b.}) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} e^{\frac{-(x_{c.b.} - \gamma)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.9)$$

где γ - математическое ожидание единичного сетевого возмущения; σ - дисперсия сетевого возмущения; $x_{c.в.}$ - величина сетевого возмущения, $-\infty < x_{c.в.} < \infty$, о.е.

Для более полной характеристики потока нагрузок прокатного стана необходимо знать плотности вероятностей длительностей импульсов и пауз. Если в процессе образования импульсов искомого потока нагрузочных мощностей участвуют n единиц электрооборудования, распределение длительности выразится следующей плотностью вероятности:

$$\alpha_{\text{стан.}n}(\tau) = \frac{1}{\bar{\mu}_{\text{стан.}n}} \frac{d}{d\tau} P_{\text{стан.}n}(\tau), \quad (2.10)$$

где $\bar{\mu}_{\text{стан.}n}$ - частота следования единичных негативных возмущений от нагрузок стана; $P_{\text{стан.}n}(\tau)$ - вероятность одновременного появления во времени n возмущений.

Для любого случайного нагрузочного потока, характеризующего работу системы электроснабжения с резкопеременным характером нагрузок, частота появления негативных сетевых возмущений равна частоте их пауз. В случае, когда известен закон распределения, среднее значение рассчитывается по принципу математического ожидания на базе классической теории вероятности.

Неполадки в различных режимах работы электрооборудования (паузы) соответствуют неодинаковым по виду отказам. Отказы по их видам, относящихся к одному типу негативных сетевых возмущений, неодинаково сказываются для смежного электрооборудования. При этом каждому виду отказов соответствует своя плотность вероятности $f_i(\theta)$ [71].

В таком случае плотность вероятности длительности пауз потока резкопеременных нагрузок $S(t)$, т. е. простоя технологической цепочки, будет определяться выражением (2.11):

$$f(\theta_{c.в.}) = \frac{1}{\bar{\mu}} (\bar{\mu}_1 f_1(\theta_{c.в.}) + \bar{\mu}_2 f_2(\theta_{c.в.}) + \bar{\mu}_3 f_3(\theta_{c.в.}) + \dots + \bar{\mu}_n f_n(\theta_{c.в.})) =$$

$$= \frac{1}{\bar{\mu}} \sum_{i=1}^n \bar{\mu}_i f_i(\theta_{c.b}). \quad (2.11)$$

где $\bar{\mu}$ - частота следования изменения импульсов нагрузки; $\bar{\mu}_i$ - частота следования единичных однократных возмущений от изменения нагрузки прокатного стана; f_i - плотность вероятности отказа от возникновения отдельно взятого возмущения исследуемого вида; $\theta_{c.b}$ - средняя пауза от воздействия отдельного возмущения.

Так как $f_i(\theta_{c.b})$ и $\theta_{c.b}$ на практике трудно определимы, то для достоверной характеристики плотности вероятности длительности потока пауз в данной работе введен корректирующий коэффициент, представляющий частное от количества возмущений ($M_{\text{возм.i}}$) к количеству изменения нагрузочного потока ($N_{\text{нагр.i}}$) в технологической цепочке за рассматриваемый период времени, который определяется как:

$$K_{\text{возм}} = M_{\text{возм.i}} / N_{\text{нагр.i}}. \quad (2.12)$$

Суммарная плотность вероятности принимает следующий вид:

$$f_p(\theta_{c.b}) = \frac{K_{\text{возм}}}{\bar{\mu}} \sum_{i=1}^n \bar{\mu}_i f_i(\theta_{c.b}), \quad (2.13)$$

где $f_p(\theta_{c.b})$ - средняя плотность вероятности возмущений исследуемого вида за рассматриваемый период времени.

По данному коэффициенту $K_{\text{возм}}$ рекомендуется проводить оценку компенсации АФИН в отношении систем электроснабжения с резкопеременным характером нагрузочного режима. Таким образом, суммарная средняя плотность вероятности резкопеременных возмущений будет уменьшаться или увеличиваться в зависимости от количества возмущений и количества нагрузок за рассматриваемый период. При этом снижение $f_p(\theta_{c.b})$ будет отражать эффективность компенсации.

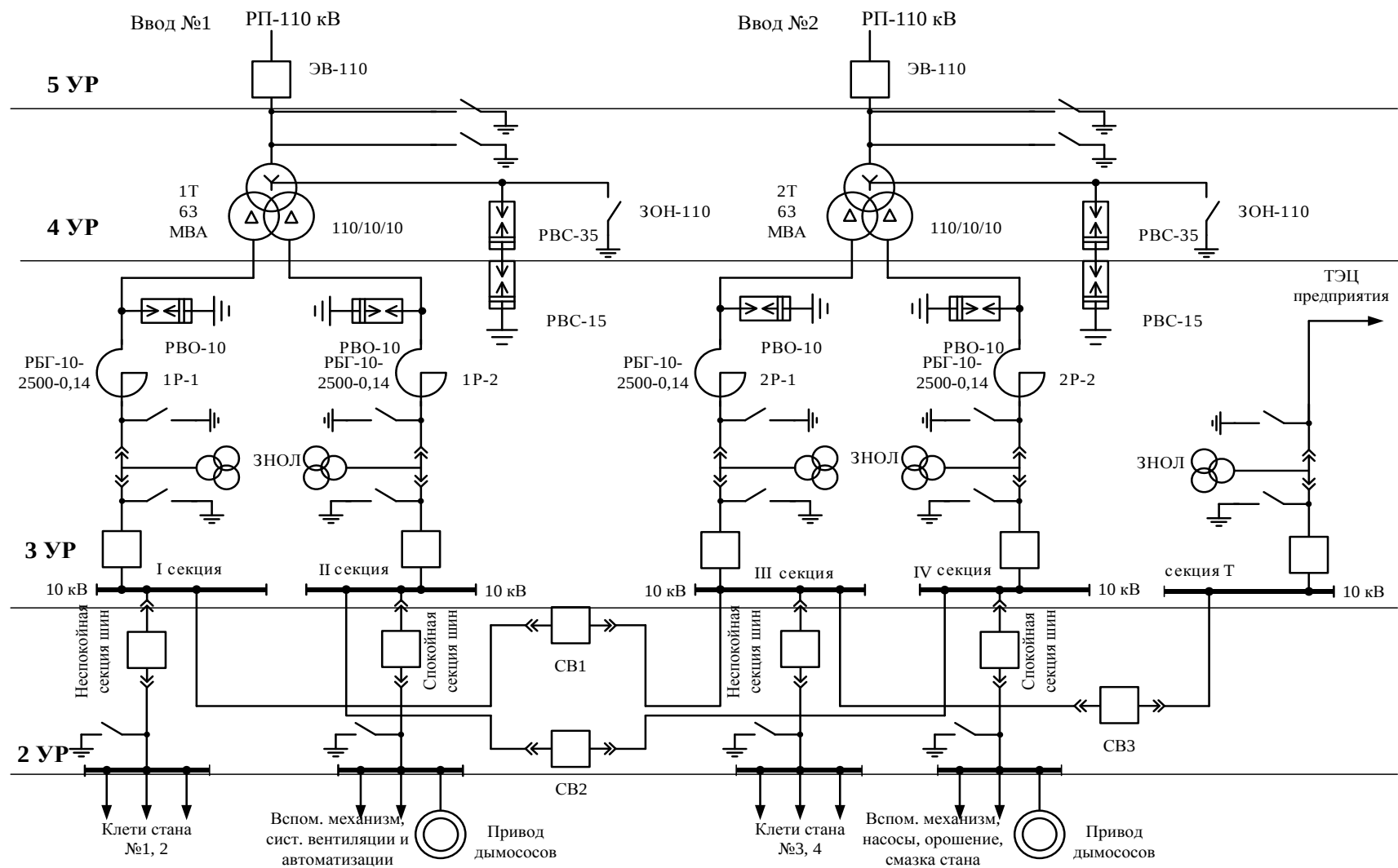


Рисунок 2.11. Однолинейная схема электроснабжения листопрокатного производства

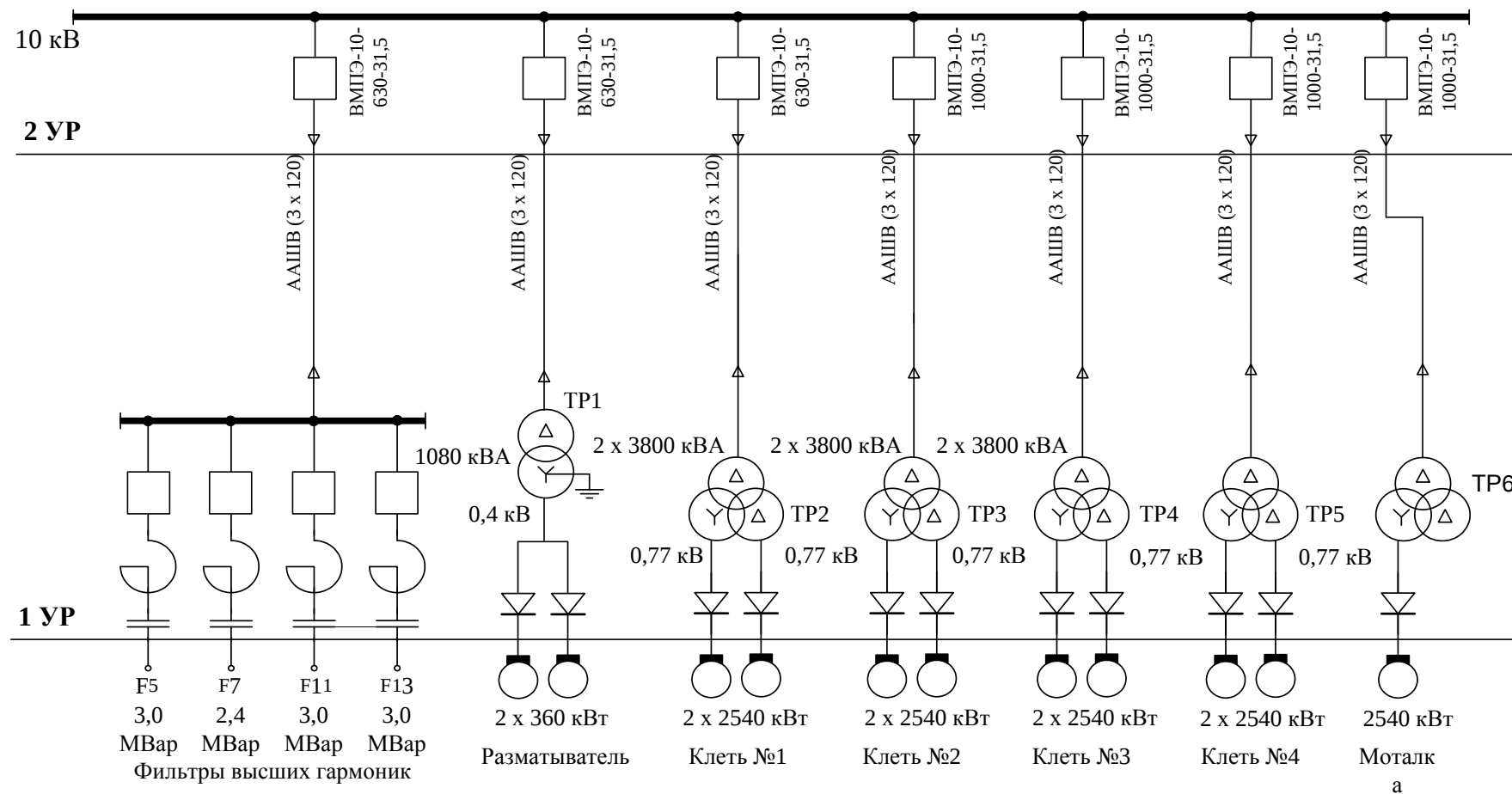


Рисунок 2.12. Схема электроснабжения агрегатов листопрокатного производства (1 УР и 2 УР)

Сложность анализа усугубляется еще и тем, что для разных нагрузок интенсивность их изменения во времени не одинакова и не периодична (например, рисунок 2.10). Эквивалентный поток $S_3^*(t)$ с усредненной высотой импульсов для этого случая представлен на рисунке 2.13, б. Длительности τ и высоты q импульсов $S_3^*(t)$ имеют случайных характер. Плотности вероятностей импульсов $\alpha_3(\tau)$ потоков $S_3^*(t)$ и $S(t)$ описываются соответственно одними и теми же законами. Чтобы установить плотности вероятностей и математические ожидания высот импульсов $S_3^*(t)$, поступим следующим образом. Каждый импульс потока $S(t)$ представим в виде непрерывно следующих друг за другом некоторых постоянных по высоте за промежутки времени $\Delta\tau$ значений (рисунок. 2.13, а). Для негативных сетевых возмущений, поступающих в питающую сеть, интенсивность высот в импульсах не зависит от длительности импульсов. В это время изменение высоты в импульсах зависит от длительности рассматриваемых импульсов [76].

При независимых изменениях амплитуды возмущения среднеквадратическое отклонение σ_τ и математическое ожидание $\bar{q}_\tau$ высот импульсов $S(t)$ определяется для $\tau > \Delta\tau$ на основании [76, 77] из уравнений:

$$\bar{q}_\tau = \bar{q}_\Delta; \sigma_\tau = \sigma_\Delta \sqrt{\frac{\Delta\tau}{\tau_\Delta}}. \quad (2.14)$$

Для решения данных уравнений необходимо знать среднеквадратическое отклонение σ_Δ и математическое ожидание $\bar{q}_\Delta$ единичного негативного сетевого возмущения длительностью $\Delta\tau$. Чтобы найти σ_Δ , когда уровень интенсивности зависит от длительности импульса, необходимо кроме среднеквадратического отклонения σ_Δ , знать его корреляционную функцию [77].

С ее помощью определяется дисперсия, по которой рассчитывается σ_Δ . Все это позволяет установить плотность вероятности высот прямоугольных импуль-

сов потока $S_s(t)$, эквивалентного реальному нагрузочному потоку. Исследования в производственных условиях показали, что распределение изменения интенсивности высот импульсов за промежутки времени Δt для электрических систем подчиняется нормальному закону, а периоды их поступления и отсутствия – экспоненциальному [71].

На основании наблюдений определяются значения σ_Δ , $\bar{q}_\Delta$ и корреляционная функция, отображающая зависимость изменения высоты в импульсе от его длительности. По корреляционной функции дисперсия определяется следующим образом:

$$D_\tau = \left[(2 \cdot \sigma^2) / \rho^2 \right] [\rho \cdot \tau_\Delta - 1 + \exp(-\rho \cdot \tau_\Delta)], \quad (2.15)$$

где ρ - параметр, характеризующий быстроту убывания корреляционной функции от длительности воздействия единичного сетевого возмущения.

Среднеквадратическое отклонение за единицу времени для импульсов длительностью τ_s будет равно

$$\sigma_\tau = \tau_s^{-1} \sqrt{D}. \quad (2.16)$$

С учетом нормального закона распределения изменения высоты импульсов за промежутки времени Δt , плотность вероятности высот прямоугольных импульсов расчетного потока $S(t)$ выразится зависимостью (2.8). Таким образом, чтобы произвести достаточно полное описание возникновения и распространения негативных сетевых возмущений, процессов коммутации и отключения нагрузок резкопеременного характера, предварительно необходимо изучить рассматриваемый технологический процесс. То есть установить средние параметры и законы распределения длительностей возмущений и их отсутствия, а также изменение амплитудно-фазных параметров реальных возмущений.

Математическое описание, представленное случайным импульсным потоком для электрических систем и работы их электрооборудования является приемлемым, потому что возникновение и распространение по электрической сети негативных сетевых возмущений в ходе коммутации и отключения нагрузок резкопеременного характера не является величиной постоянной, а время работы конкретных нагрузок предприятия с момента его коммутации до отключения чередуется со временем его восстановления не всегда в одинаковой периодичности.

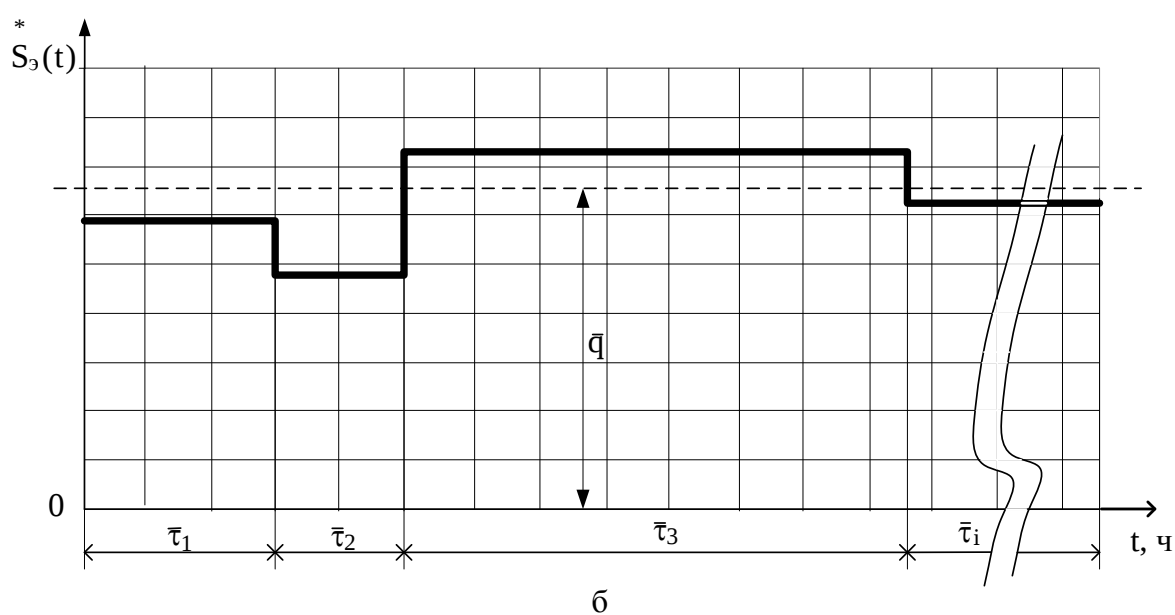
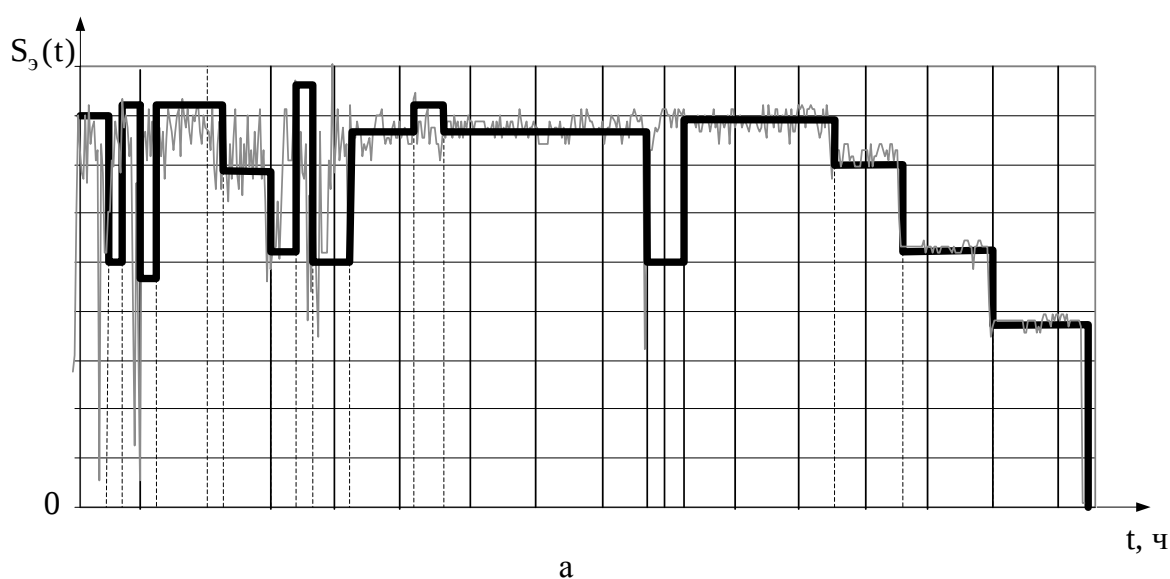


Рисунок 2.13. Суммарный реальный (а) и эквивалентный (б) потоки резкопеременных нагрузок системы электроснабжения листопрокатного производства

Применение единого математического аппарата случайных импульсных потоков при описании процессов возникновения и распространения негативных сетевых возмущений в значительной мере облегчает оценку влияния негативных сетевых возмущений резкопеременного характера на технологический процесс предприятия с учетом дальнейшего повышения надежности систем электроснабжения.

2.3 Возмущения резкопеременного характера в системах электроснабжения предприятий с продолжительным режимом работы

Спрогнозировать появление негативных сетевых возмущений на предприятиях с продолжительным равномерным режимом технологического процесса практически невозможно. Электрооборудование таких систем является не готовым к сопротивлению воздействиям резкопеременных возмущений. Это приводит к отказам в обеспечении электроэнергией приемников. В результате понижается безотказность электрооборудования. Его отказы приводят к изменению параметров, характеризующих технологический процесс предприятия. Решение этой проблемы возможно осуществить установкой электрооборудования аналогично предприятиям с беспокойным технологическим процессом как например, листопрокатное производство. Это будет способствовать значительному повышению надежности. Однако стоимость такой замены весьма высока для такого рода производств. Появление негативных сетевых возмущений в данном случае предсказать невозможно. В то же время ввод в действие мощных резервных технологических машин увеличивает потребление электроэнергии. В данном случае их использование представляется экономически невыгодным для рассматриваемого типа предприятий [82-84, 95-97].

Очевидно, что для негативных сетевых возмущений существует направленность в пространстве и времени, концептуально исключающая обратимость процесса. Параметры рассматриваемых возмущений в любой момент времени не определены. Применение методов классической теории вероятности здесь нелогично и не оправдано. Даже увеличение количества замеров параметров, как свидетельствует

опыт, не приводит к повышению точности. Для описания и исследования процесса возникновения и распространения негативных сетевых возмущений в системах с продолжительным равномерным режимом работы предлагается использовать другие постулаты, отличные от классической теории вероятности. В этом случае математическую модель негативных сетевых возмущений предлагается базировать на исследовании видовой степени влияния АФИН [95-101].

Апробированным инструментом такого подхода является структурирование исследуемого параметра по степени его влияния относительно видообразующих параметров на электротехнический комплекс, заключающийся в исследовании больших систем и имеющий целью их статистическое описание, а также оптимизацию, полагающую в качестве основного критерия форму видообразующих распределений [97, 101]. Блок-схема практической реализации анализа видовых степеней влияния для данного исследования поэтапно представлена на рисунке 2.14.

Движущим фактором такого подхода является признание существования таких систем, в которых выборки параметров, описывающих влияние негативных сетевых возмущений на отдельные элементы системы электроснабжения, не имеют математического ожидания, а дисперсия равна бесконечности. Данными объектами являются системы электроснабжения с продолжительным равномерным режимом работы. В них практически невозможно по месту, времени и другим характеристическим параметрам предсказать возникновение и распространение резкопеременных негативных сетевых возмущений. Для данного исследования будем анализировать совокупность идентифицируемых негативных сетевых возмущений, каждое из которых классифицируется своей принадлежностью к тому или иному виду: провалы, перенапряжения, несинусоидальность.

Отличие такого подхода от классического вероятностного заключается именно в их идентификации [97]. Совокупность видовых степеней влияния, как объект исследования, следует выделить и описать системой показателей. В этом случае она становится элементом, неделимым объектом, который рассматривается по какому-либо одному параметру в ряду других объектов этого множества. Тогда выстраивание объектов по какому-либо одному параметру означает, что рассматривается но-

вая совокупность видовых степеней влияния. Например, анализ влияния глубины провалов напряжения в определенной точке сети на величину продолжительности его воздействия. Именно распределение видовых степеней влияния по параметру дает возможность свидетельствовать об оптимальности и эффективности их в целом.

Применительно к промышленным предприятиям со спокойным характером технологического процесса определяется связь между количеством видов сетевых возмущений и потреблением мощности электроприемниками:

$$S_r = \frac{S_1}{r^\beta}, \quad (2.17)$$



Рисунок 2.14. Основные этапы практической реализации исследования видовых степеней влияния негативных сетевых возмущений

где S_r - потребление мощности нагрузкой со степенью влияния r ; S_1 - максимальное потребление мощности нагрузкой при $r = 1$; r - степень влияния; β - коэффициент, характеризующий форму кривой распределения негативных сетевых возмущений.

Для распределения по степени влияния показатель β меняется в пределах $0,5 \leq \beta \leq 1,5$ [95-98]. На основе зависимости потребления мощности электрооборудованием, взятого за определенный длительный промежуток времени, от типа и степени воздействия негативных сетевых возмущений, корректируются параметры электропотребления, опираясь на объем выпускаемой продукции на производстве.

Отношения количества видов сетевых возмущений к числу их возникновения за рассматриваемый период определяется выражением [97]

$$Z = c / n^m, \quad (2.18)$$

где m и c – константы, значение которых определяет характер зависимости.

Можно интерпретировать выражение (2.18) следующим образом:

$$Z_n = \frac{\lg(n)}{\lg(W_\Sigma)}, \quad (2.17)$$

где W_Σ – общий объем потребляемой производством электроэнергии (показатель энергоэффективности предприятия).

Математический анализ выражения (2.19) свидетельствует о том, что чем больше величина потребляемой мощности, тем более негативно сказываются самые часто возникающие (10%) сетевые возмущения (обратно – роль остальных возмущений (90%) уменьшается с увеличением нагрузки) [97]. Для системы электроснабжения с технологическим процессом продолжительного равномерного характера функционирования повышение эффективности функционирования может достигаться путем получения рациональных значений параметров сетевых возмущений или их совокупности. Исследование видовых степеней влияния АФИН для

достижения данной цели включает несколько этапов. Необходимо решить три основные задачи [97]. Решение основной задачи возможно при использовании всех этапов (рисунок 2.14). С их помощью выявляется необходимость изменения структуры видовой совокупности, вызванной отклонениями зависимости видového распределения от нормальной. В случае если структурное изменение осуществить невозможно, это определяется решением второй задачи. В основе ее решения лежит совместный анализ видовых по степеням и параметрических зависимостей, отражающих взаимосвязь между видовыми и параметрическими степенями влияния. Необходимость в решении третьей задачи вызвана в использовании осуществляющейся на основе результатов анализа степеней влияния параметрических распределений функциональных параметров системы. Все задачи предназначены для получения видového распределения анализируемой системы с оптимальными зависимостями.

Выявление пути изменения видového распределения, которое обеспечивает получение идеального распределения, является начальным этапом и выражается зависимостью [97, 100]

$$\lambda(k) = z(k^\beta)^{-1}, \quad (2.20)$$

где z – количество рассматриваемых типов возмущений; k – тип степени влияния.

При построении идеального видového распределения коэффициент β , характеризующий его, стремится к единице. В действительности для систем электроснабжения это практически невыполнимо [97, 100]. Графические изображения идеального и реального распределений видовых степеней влияния не совпадают друг с другом, но возможны точки их пересечения. Для возникающих негативных сетевых возмущений со степенью влияния выше точки пересечения должны быть проведены соответствующие мероприятия по их компенсации. Второй этап анализа включает непосредственно выявление исследуемых возмущений и дальнейшую компенсацию значительных отклонений. Результаты внедренных мероприятий можно проследить по зависимостям видového распределения аппроксимирующего

графика. В рассматриваемом случае аппроксимирующее выражение аналогично (2.20). Оно имеет вид [98]:

$$\lambda(v) = v(v^\varepsilon)^{-1}, \quad (2.21)$$

где λ - количество видов негативных сетевых возмущений в рассматриваемой системе электроснабжения; v - исследуемый параметр анализируемого типа возмущения; v и ε - параметры, характеризующие аппроксимирующий вид распределения.

Анализ видов возмущений позволяет оценить их воздействие на функционирование системы. В данном случае отклонения статистической зависимости параметров возмущений вверх от теоретической свидетельствуют о том, что на производстве недостаточно или вовсе отсутствует компенсация анализируемого вида возмущений. При «избыточной» компенсации, такой как установка неоправданно дорогого более мощного и надежного оборудования, наблюдается отклонение статистической зависимости относительно теоретической вниз [97]. Качественный график отношения количества видов возмущений к их возможному числу применительно к провалам напряжения представлен на рисунке 2.15.

В рассматриваемом случае первый этап определяет необходимые действия, направленные на изменение видовой структуры распределения по степени влияния. На втором этапе устанавливаются отклонения, выявляющие те возмущения, которые свидетельствуют о наиболее негативном влиянии на систему электроснабжения. В нашем случае производится планирование мероприятий, направленных на компенсацию негативных сетевых возмущений резкопеременного характера, таких как структурное резервирование системы, установка устройств динамической компенсации амплитудных искажений напряжения, применение фильтрокомпенсирующих устройств, а также автоматических систем векторного регулирования напряжения и т. п.

Спокойный технологический процесс для системы электроснабжения характеризуется тем, что появление негативных сетевых возмущений невозможно

спрогнозировать по времени. В таком случае для выполнения первых двух, а затем и последующих этапов необходимо построить табулированные распределения по степени влияния для различных типов возмущений [97]. В нашем случае табличное и графическое представления будут строиться для трех основных возмущений: провал напряжения, перенапряжение, высшие гармонические составляющие (таблицы 2.1-2.3).

В работе анализируются суммарные статистические данные искажений различных типов, зафиксированных на сторонах 6-35 кВ на ПС 110 кВ «Цементная» (Филиал ПАО «МРСК Центра» - «Липецкэнерго»), расположенной в энергосистеме Липецкой области. Особенность данной подстанции в том, что почти все ее электроприемники промышленно-производственного типа. Средние значения глубин провалов напряжений и вероятности их возникновения также определяются для смешанных воздушно-кабельных линий при средних интервалах появления. Они приведены в [102, 103]. Анализ большого количества литературных источников и статистических данных свидетельствует о том, что вероятность возникновения провалов определенной глубины относительно их длительности имеет показательный закон распределения [71-78, 96].

Аппроксимирующие и статистические кривые распределения видовых степеней влияния по глубине и длительностям провалов напряжений представлены на рисунках 2.16-2.18. На основании полученных данных сформирован график трехмерного распределения по провалам напряжения, представленный на рисунке 2.18. Он позволяет оценить существующую ситуацию по структуре распределения и разработать необходимые методики и мероприятия, направленные на изменение видовой структуры системы электроснабжения. Это приведет к существенному приближению статистических кривых к идеальным, что свидетельствует о повышении эффективности электроснабжения. Отметим также, что в отличие от распределений по видовым степеням влияния перенапряжений и высших гармоник, для провалов наивысшей степенью является совокупность данных хоть и с наименьшей глубиной провала, но наиболее резкопеременным характером при приблизительно одинаковой частоте возникновения в системе [101]. Таким образом,

применяемый метод обладает определенной универсальностью в части того, что построение распределений может производиться в любую сторону относительно поставленных исследовательских задач.

Значения коэффициента временного перенапряжения и его длительности не должны превышать величин, приведенных в [104]. Учитывая это, формируется аппроксимирующая кривая для распределения параметров, характеризующих перенапряжения. При повышении напряжения на секциях шин подстанции или в распределительной сети более чем на 10% необходимо динамическое погашение перенапряжения за счет разработанных мероприятий. Это обеспечивает повышенную безотказность системы. Атмосферные перенапряжения для предприятий со спокойным технологическим циклом обычно не учитываются. В нашем случае исследуется влияние внутренних перенапряжений.

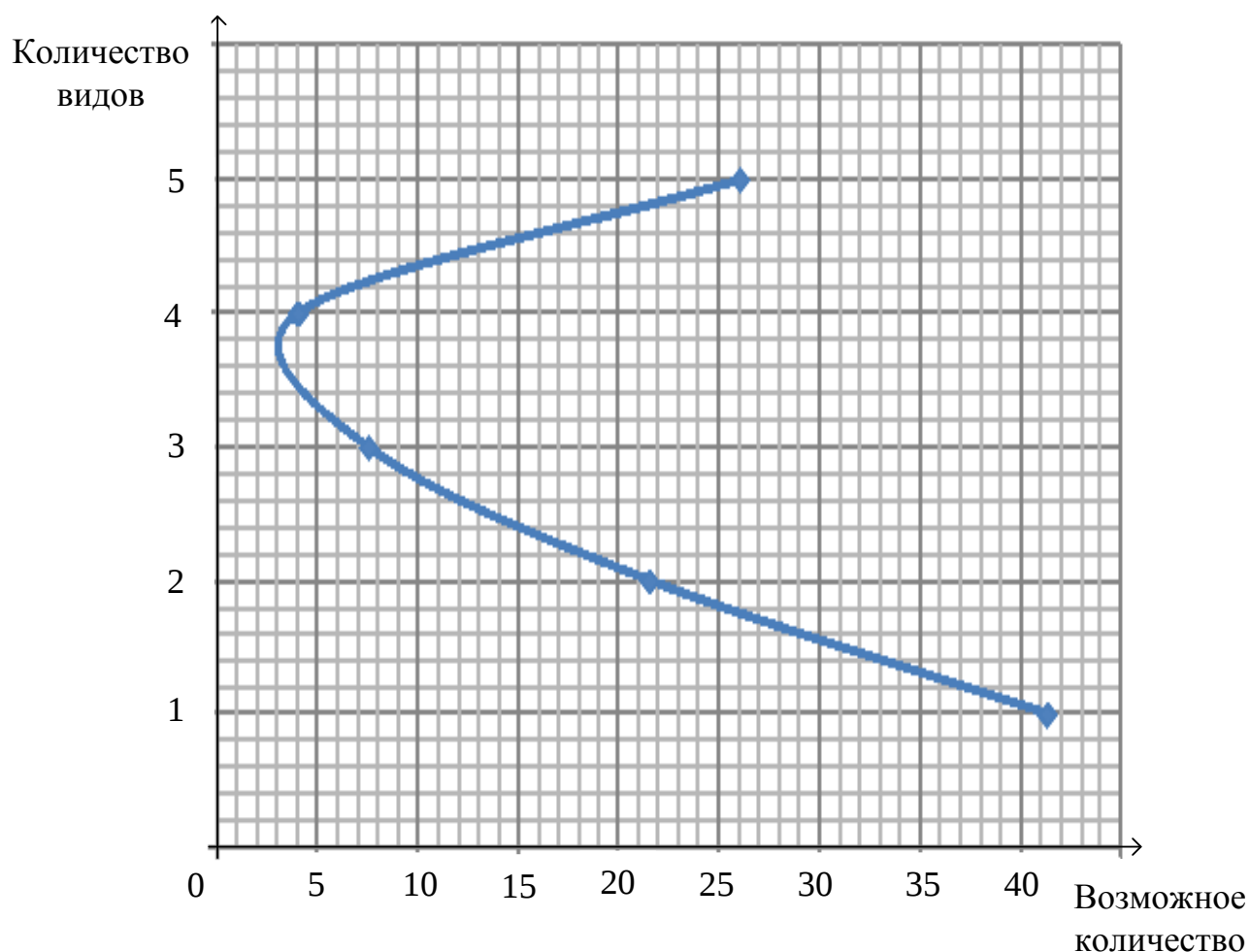


Рисунок 2.15. График отношения количества видов возмущений к их возможному числу применительно к провалам напряжения

Статистические данные для табличного представления распределения по видовым степеням влияния видообразующих параметров внутренних перенапряжений представлены в [105, 106]. Зависимость коэффициента временного перенапряжения от длительности принимается показательной на основании статистики, также полученной в результате анализа статистических данных искажений различных типов, зафиксированных на сторонах 6-35 кВ на ПС 110 кВ «Цементная». Для построения распределения такого вида возмущений, как перенапряжения, данные берутся на основании вероятностной выборки, что не является критичным в построении методики анализа возмущений на базе применяемого метода. Графики видового распределения негативных сетевых возмущений по параметрам перенапряжений представлены на рисунках 2.20-2.21. Зависимость возможного количества таких возмущений от числа их видов отражена на рисунке 2.21. Коэффициенты n -ой гармонической составляющей берутся аналогично провалам и перенапряжениям из статистических данных искажений различных типов, зафиксированных на стороне низкого напряжения на ПС 110 кВ «Цементная» [84]. Видовое распределение высших гармоник напряжения по коэффициенту n -й гармонической составляющей графически отображено на рисунке 2.20.

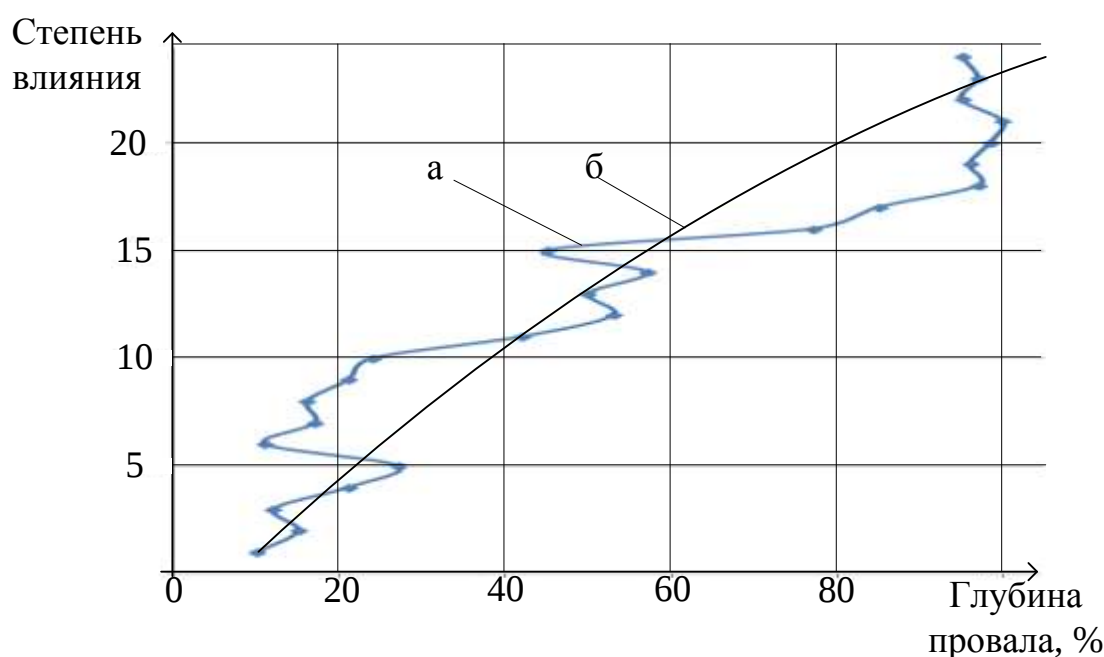


Рисунок 2.16. Статистическая (а) и аппроксимирующая (б) кривая видового распределения по глубине провалов напряжения

Таблица 2.1. Видовое распределение по степени влияния провалов напряжения

Степень влияния	Вид возмущения (по уровню провала), %	Вероятность возникновения	Видообразующие параметры	
			Длительность провала напряжения, с	Глубина провала напряжения, %
1	10-30	3,7	0,02	10
2		3,9	0,04	15
3		3,6	0,06	12
4		4	0,08	21
5		3,8	0,1	27
6		4,5	0,2	11
7		4	0,3	17
8		4,2	0,4	16
9		4,3	0,5	21
10		5,5	0,75	24
11	30-60	3,85	0,05	42
12		4,15	0,1	53
13		5	0,25	50
14		5,5	0,5	57
15		3	0,8	45
16	60-95	4	0,3	77
17		3,5	0,65	85
18	95-100	4	0,45	97
19	95-100	4,2	0,5	96
20		4,3	0,6	98,5
21		4	0,75	100
22		4,5	0,85	95
23		3,5	5	97
24		5,5	21	95

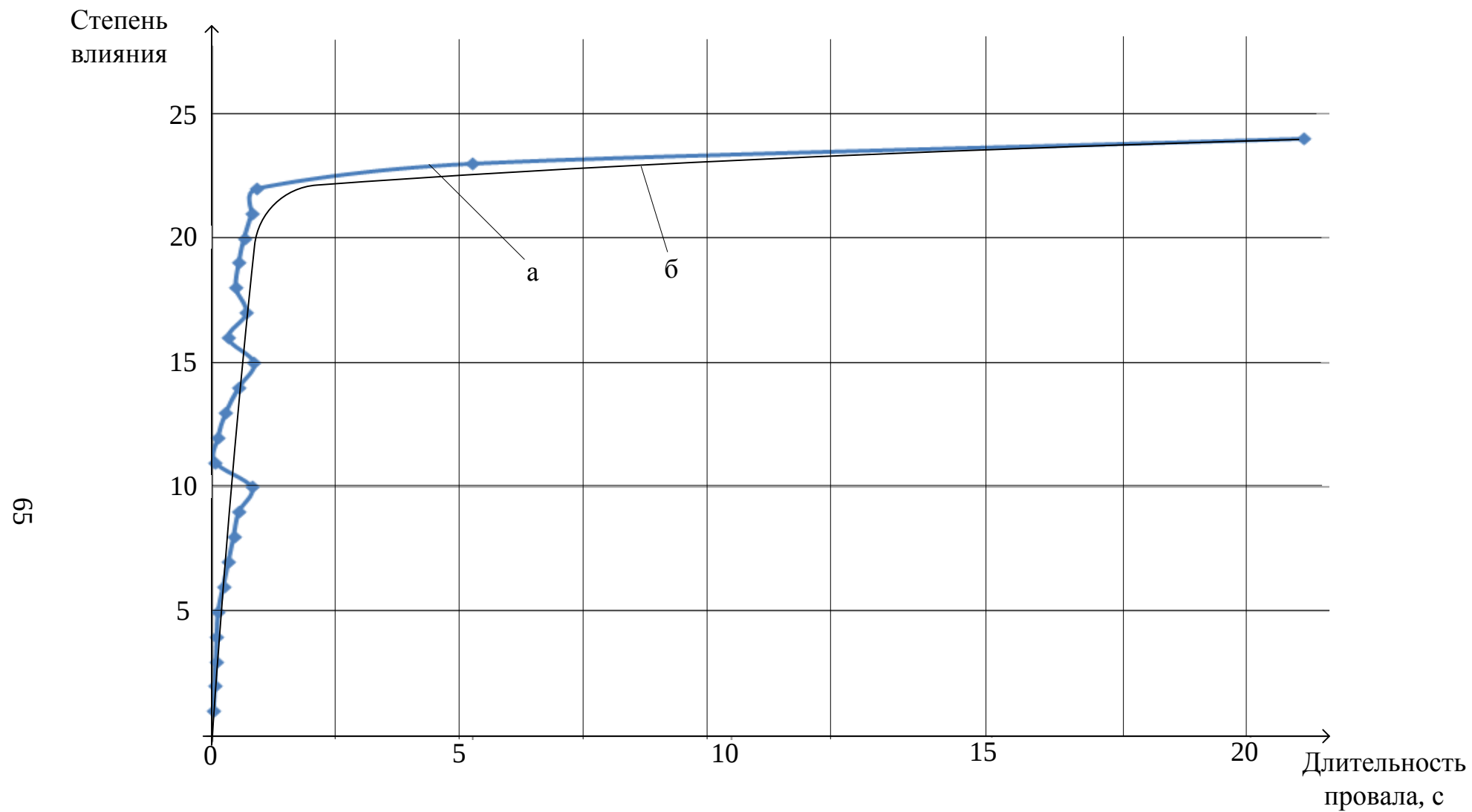


Рисунок 2.17. Статистическая (а) и аппроксимирующая (б) кривая видового распределения по длительности провалов напряжения

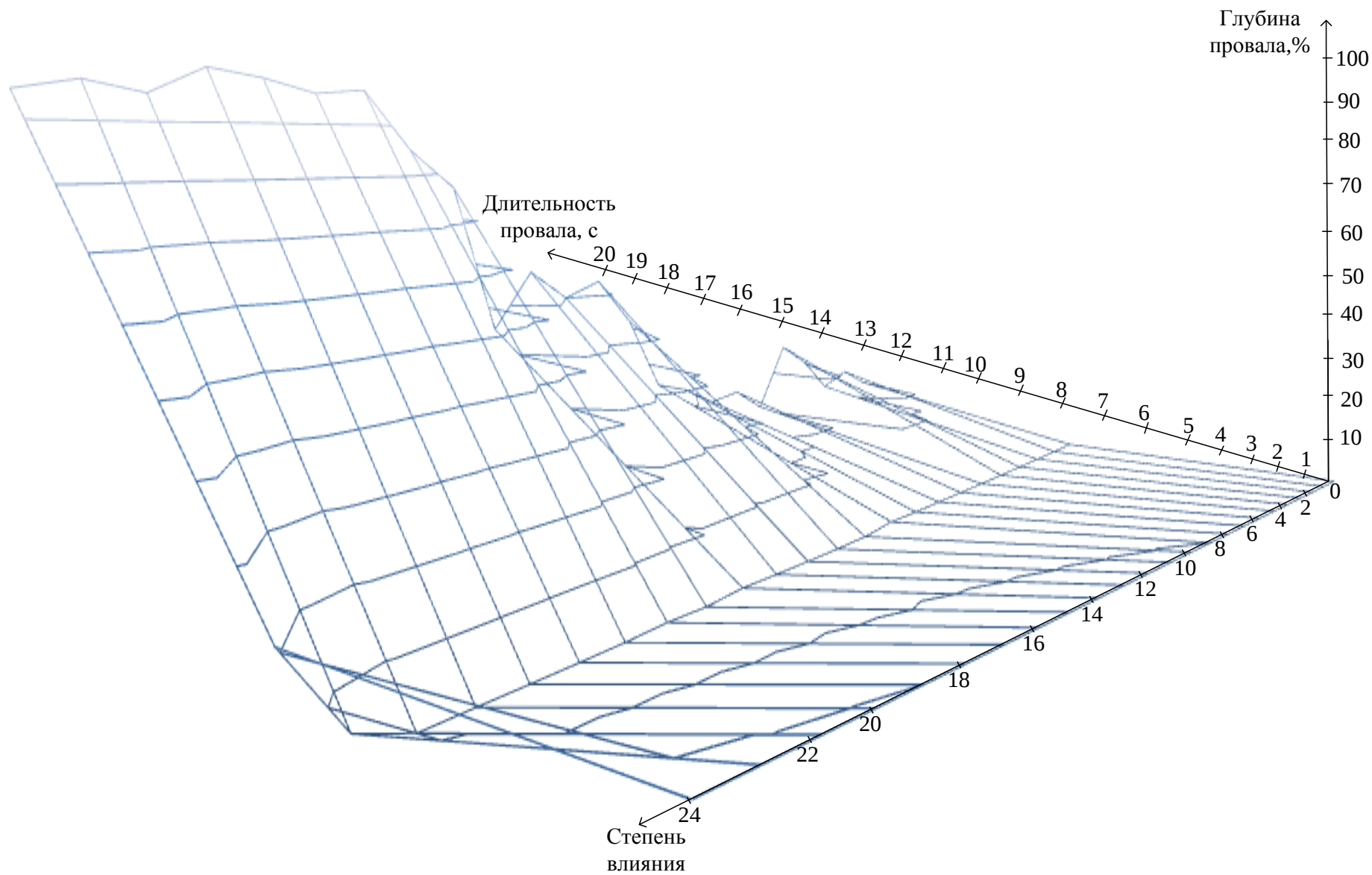


Рисунок 2.18. Графическое распределение степеней влияния провалов напряжения по глубине и длительности

Таблица 2.2. Видовое распределение по степени влияния перенапряжений

Степень влияния	Вид временного перенапряжения	Вероятность возникновения, %	Видообразующие параметры	
			Коэффициент временного перенапряжения	Длительность временного перенапряжения, с
11	Резонансные повышения напряжения	25	2	63
10	Отключение двухфазных КЗ	19	2,5	47
9	Дуговые замыкания на землю	17	2,7	40
8	Неодновременное включение фаз	11	3,2	33
7	Отключение двойного КЗ на землю	9	3,3	28
6	Включение воздушных и кабельных линий	8	3,5	25
5	Включение электродвигателей при АВР или АПВ	6,5	4,2	20
4	Отключение воздушных и кабельных линий	6	4,3	18
3	Отключение электродвигателей	3	5	13
2	Отключение ненагруженных трансформаторов	1	5,5	11
1	Коммутация нагрузки вакуумными выключателями	0,5	7	3

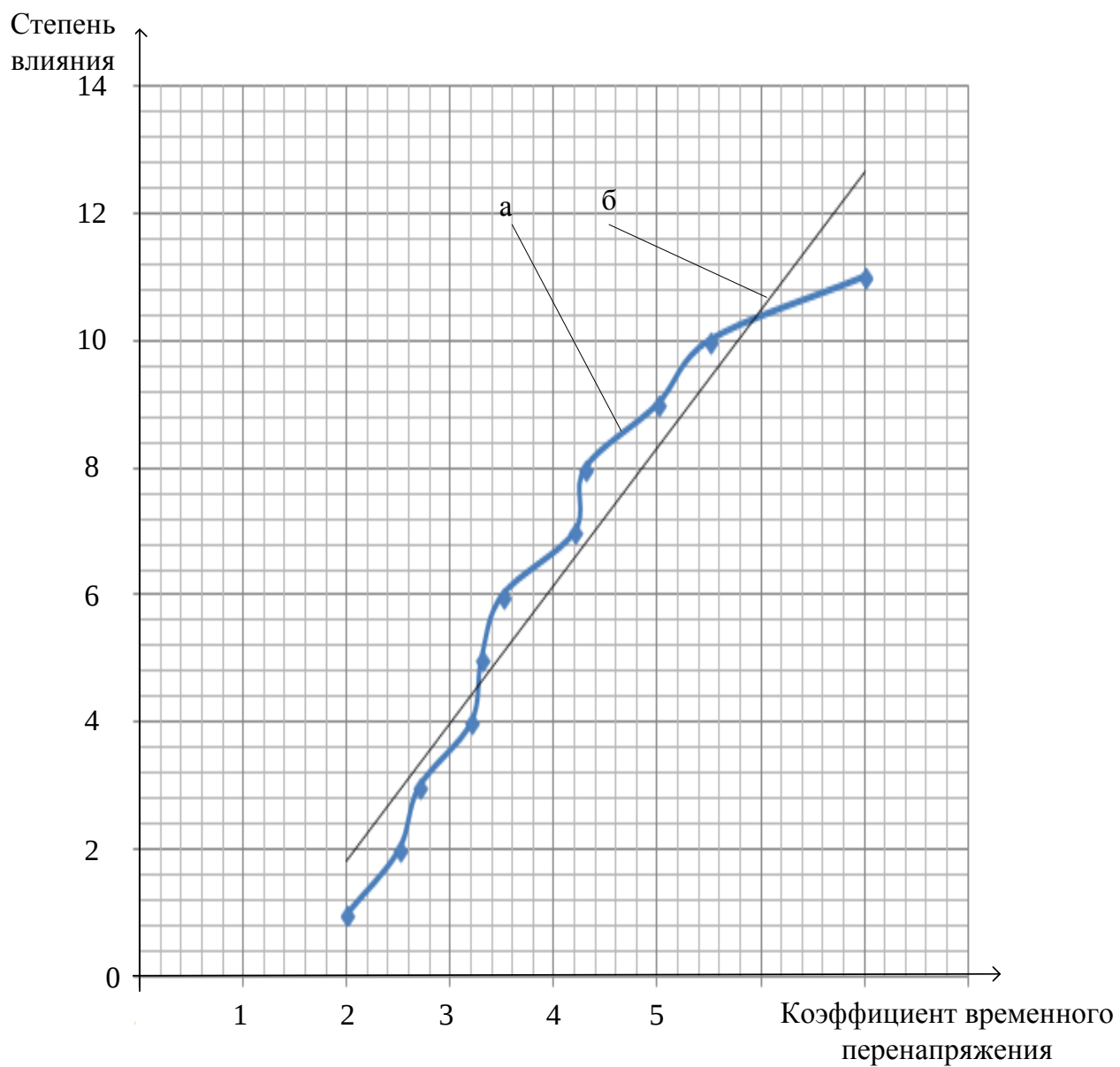


Рисунок 2.19. Статистическая кривая (а) и аппроксимирующая (б) прямая видового распределения по коэффициенту временного перенапряжения

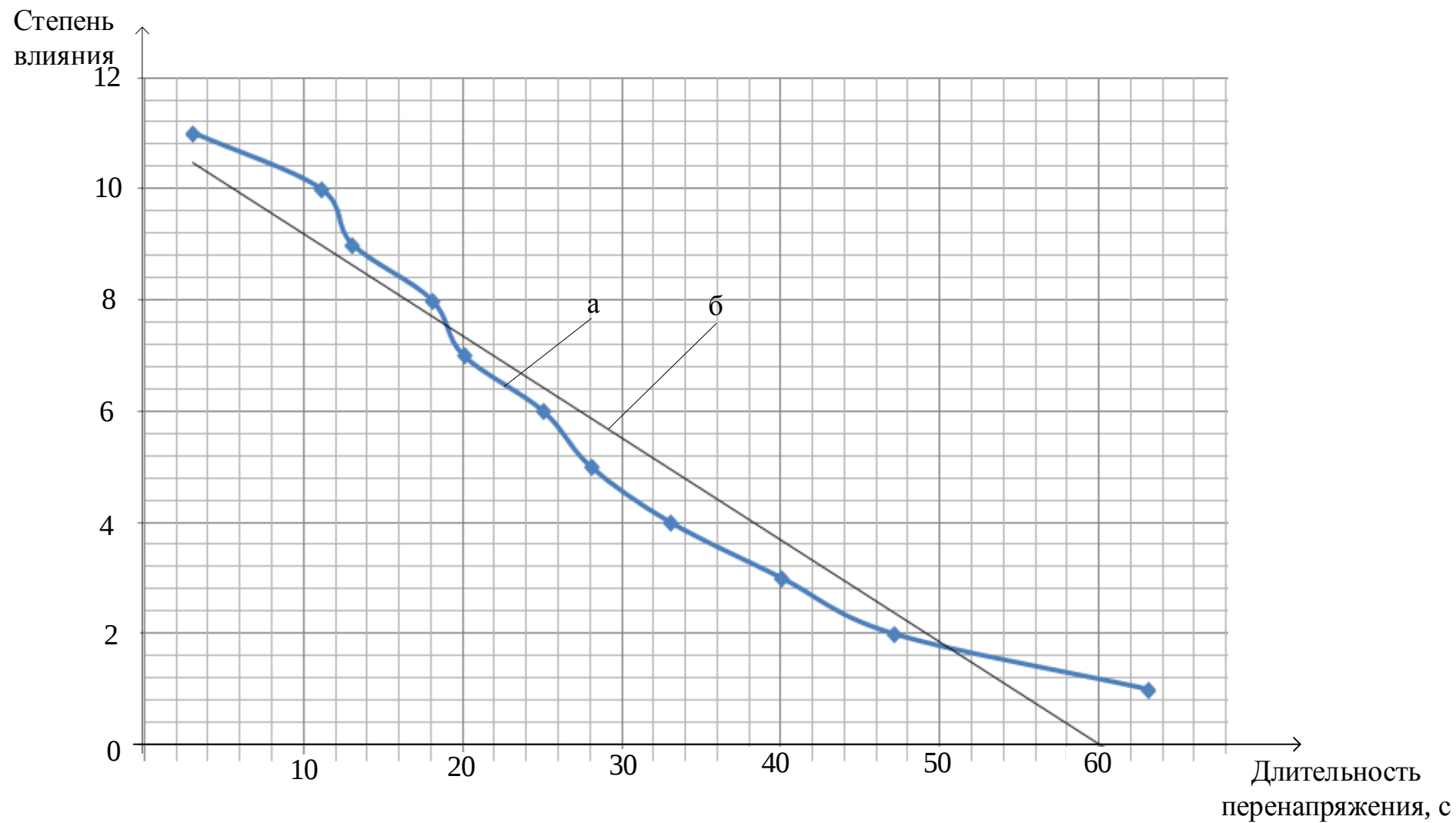


Рисунок 2.20. Статистическая кривая (а) и аппроксимирующая (б) прямая видового распределения по длительности перенапряжений

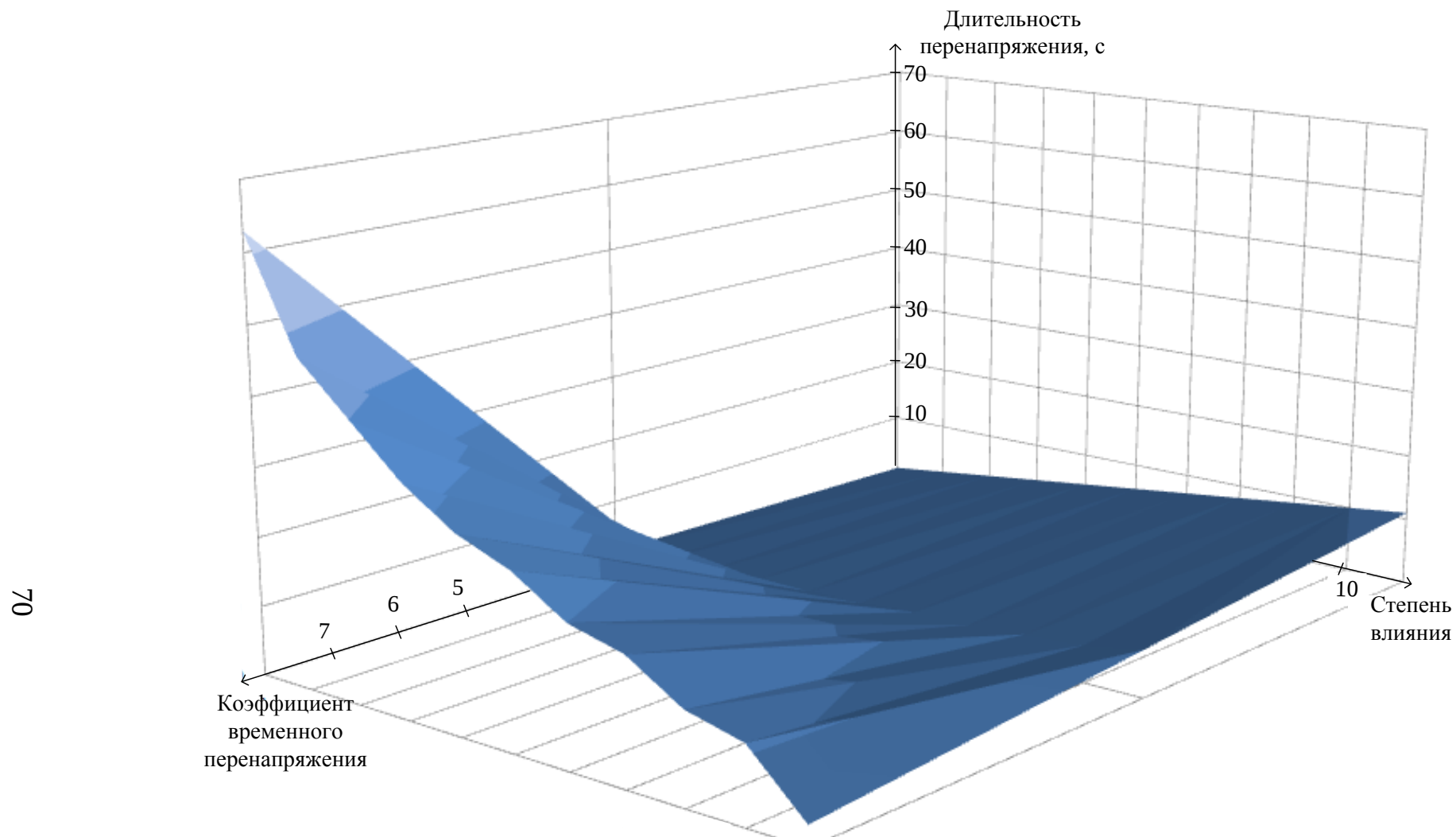


Рисунок 2.21. Графическое распределение степеней влияния перенапряжений по коэффициенту перенапряжения и длительности

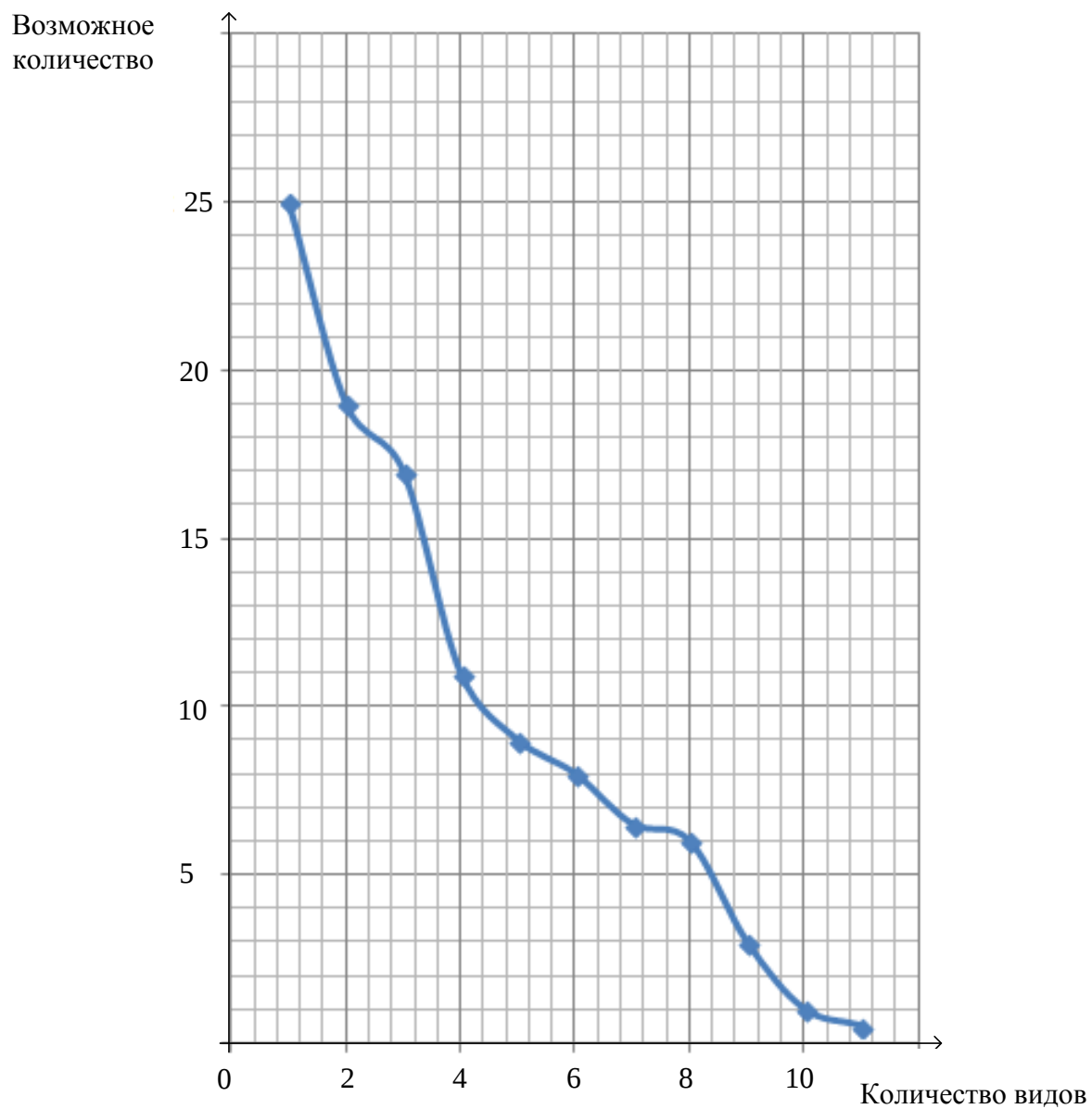


Рисунок 2.22. График отношения количества видов возмущений к их возможному числу применительно к перенапряжениям

Таблица 2.3. Видовое распределение по степени влияния высших гармоник

Степень влияния	Вид Возмущения (номер гармоники)	Среднее количество появления в системе	Видообразующий параметр
			Коэффициент n-ой гармонической составляющей
1	3	53	5
2	5	20	6
3	7	11	5
4	9	7	1,5
5	11	4	3,5
6	13	2	3
7	15	1	0,3
8	17	0,5	2
9	19	0,5	1,5
10	21	0,39	0,2
11	23	0,2	1,5
12	25	0,1	2,5
13	27	0,1	0,2
14	29	0,05	0,2
15	31	0,05	0,2
16	33	0,05	0,2
17	35	0,025	0,2
18	37	0,025	0,2
19	39	0,012	0,2
20	41	0,01	0,2
21	> 41	< 0,01	0,2

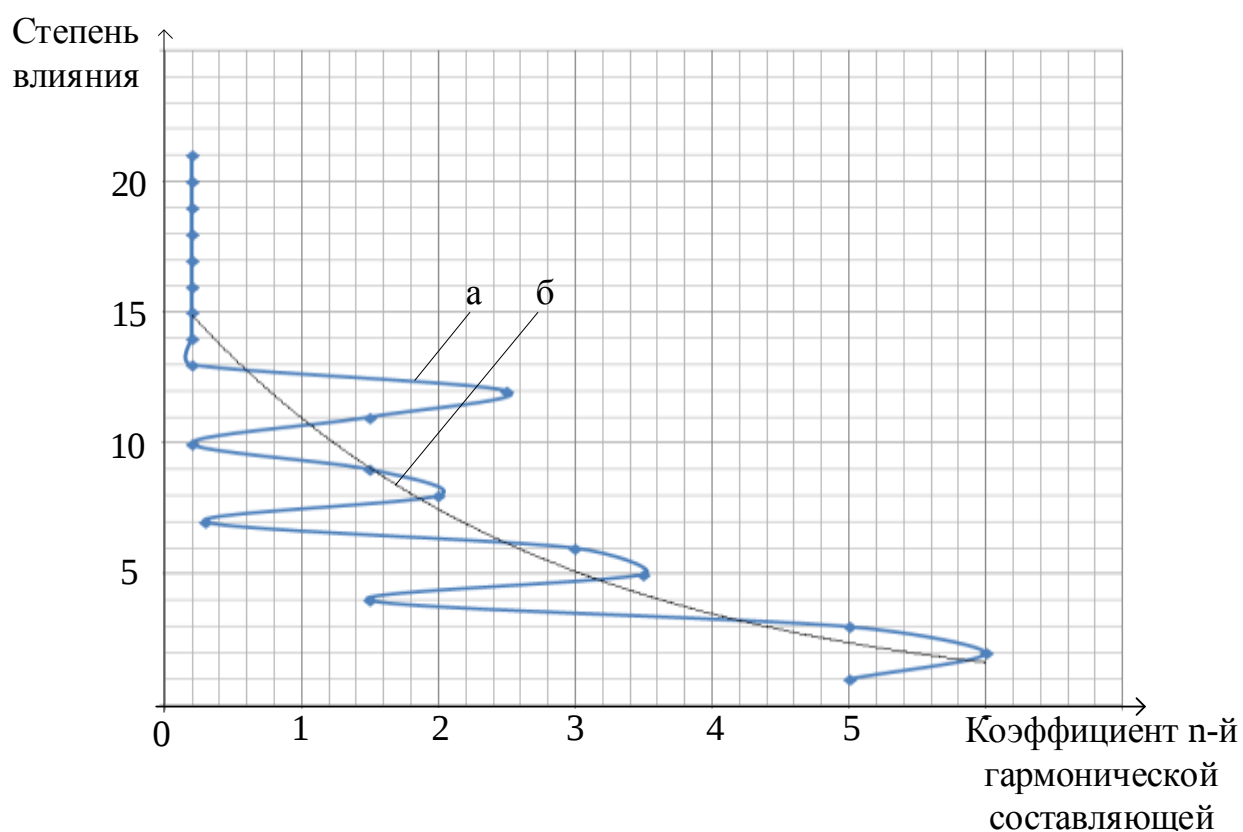


Рисунок 2.23. Статистическая (а) и аппроксимирующая (б) кривые видового распределения высших гармоник напряжения по коэффициенту n -й гармонической составляющей

Аппроксимирующая кривая имеет логарифмический вид. Коэффициент искажения синусоидальности измеряется в процентах и согласно [107] его предельно допустимое значение для номинального напряжения в сетях низкого напряжения не должно превышать 12%. Согласно многочисленным исследованиям, амплитудное значение гармоник не пропорционально уменьшается в зависимости от номера гармоники. Четвертая гармоника не превышает 1% от первой гармоники, а пятая и последующие настолько малы, что практически не влияют на эффективность работы электрооборудования. Построение видовых распределений по степени влияния на первых двух этапах для высших гармоник напряжения ограничивается двухмерным распределением. Вероятностная зависимость количества видов возмущений от их возможного числа имеет показательный характер и показана на рисунке 2.24. Она определяется на основании измеренного спектра высших гармонических составляющих, полученного на основании анализа статистических данных.

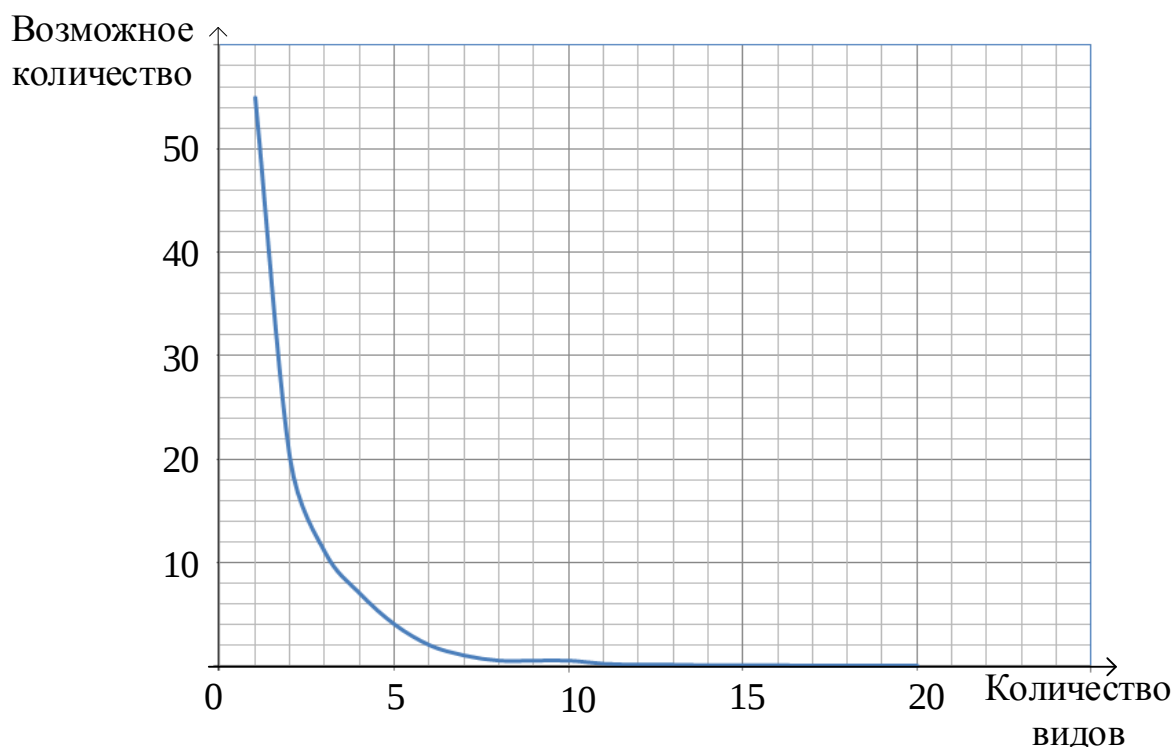


Рисунок 2.24. График отношения количества видов возмущений к их возможному числу применительно к высшим гармоникам

Отметим, что подобный подход может в равной степени быть применим как для предприятий для резкопеременной нагрузкой, так и в общем случае для решения задач по повышению эффективности электроснабжения за счет улучшения показателей качества электроэнергии.

2.4 Повышение безотказности систем электроснабжения при воздействии сетевых возмущений резкопеременного характера

Компенсация резкопеременных негативных сетевых возмущений на предприятиях с продолжительным технологическим процессом необходима для устремления статистического видового распределения к идеальному. Изменения в структуре системы электроснабжения, позволяющие минимизировать влияние возмущений на электрооборудование, могут быть осуществлены только в течение длительного времени. Так как на практике это вызывает определенные трудности

объективного и субъективного характера. В этом случае целесообразно выполнение третьего этапа исследования видовых степеней влияния – верификации негативных сетевых возмущений. Осуществление этого этапа требует сбора статистической информации о возмущениях за достаточно длительный промежуток времени. На ее основании формируется зависимость изменения видообразующего параметра β от времени t . В той же системе координат совместно с зависимостью $\beta(t)$ целесообразно для рассматриваемых случаев построить зависимость, характеризующую показатель оценки эффективности функционирования системы электроснабжения – вероятность отказов $P(t)$. Необходимо, чтобы расхождение между зависимостями $\beta(t)$ и $P(t)$ для каждого из видообразующих параметров распределения было минимальным. Взаимообусловленность отказов оборудования и возникновения негативных сетевых возмущений резкопеременного характера является значимой для эффективности функционирования системы электроснабжения.

Амплитудно-фазные искажения напряжения для электрической системы с продолжительным характером технологического процесса являются случайными событиями с неопределенным законом распределения. В силу высокой частоты их возникновения и возможному лавинообразному распространению от них энергетических аварий их крайне важно учитывать. Момент и место возникновения таких явлений неопределимы. Совокупность показателей вероятности отказа сетевого элемента должна рассматриваться в виде прогнозного распределения, которое целесообразно строить как на краткосрочную, так и долгосрочную перспективу. Исходя из жестких требований технологического процесса, устанавливается максимально допустимое время перерывов электроснабжения. Допустимое число нарушений технологического цикла в течение года и будет, в конечном счете, определять данный показатель. Это необходимо для создания граничных условий, определяющих соотношение реального количества негативных сетевых возмущений в системе и допустимого числа отказов с позиции соблюдения требований технологии конкретного производства, так как на рассматриваемых предприятиях подобных зависимостей не существует [37].

Появление в n воздействиях негативных сетевых возмущений резкопеременного характера m отказов электрооборудования соответствует вероятности $\bar{p}_n(m)$. При i -ом воздействии отказ появится с вероятностью $\bar{p}_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). В этом случае данная вероятность с учетом $p_i + \bar{p}_i = 1$ рассчитывается по следующей формуле [99]:

$$\bar{p}_n(m) = \frac{1}{m!} \frac{d^m}{dx^m} \prod_{i=1}^n (p_i + x\bar{p}_i) \Big|_{x=0}, \quad (2.22)$$

где x – функция случайной величины.

Вероятность длительностей отказов при условии, что на функционирование электрооборудования воздействует группа негативных сетевых возмущений, определяется выражением

$$p(\theta) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (2.23)$$

где σ – среднеквадратичное отклонения при возникновении возмущения.

Правая часть выражения соответствует нормальному (Гауссовскому) распределению. В нашем случае происходит выполнение центральной предельной теоремы. То есть с увеличением числа слагаемых законом распределения провалов напряжения, перенапряжений и высших гармоник, полученная сумма этих величин неограниченно приближается к нормальному закону. Однако литературный анализ показал, что при одновременном воздействии трех и менее негативных сетевых возмущений распределение отказов электрооборудования аппроксимируется экспоненциальной зависимостью. В тоже время согласно статистическим данным, на каждую единицу электрооборудования системы электроснабжения промышленного предприятия действует одновременно не менее четырех видов негативных сетевых возмущений, что свидетельствует о возможном изменении законов распреде-

ления длительностей отказов. Согласно вышеизложенному, а также на основании [98, 99], принимается зависимость вероятности отказа от времени, показанная на рисунке 2.25. В этих же координатных осях строятся зависимости видообразующего параметра $\beta(t)$. На рисунке штриховкой отмечена зона оптимальной вероятности отказа, по которой ведется оценка эффективности функционирования системы. Чем ниже расположен график зависимости $\beta(t)$ по отношению к $P(t)$, тем выше будет безотказность системы электроснабжения в целом [108].

Рассмотренные этапы анализа непосредственно связаны с выявлением параметров интервалов негативных сетевых возмущений, по которым необходимо осуществлять мероприятия по динамической компенсации. В повышении эффективности функционирования системы электроснабжения с резкопеременным характером негативных сетевых возмущений важное значение имеет рационализация параметров с изменением параметров отдельных типов сетевых возмущений. Между данными этапами анализа существует жесткая взаимосвязь, так как они дополняют друг друга.

Для рассматриваемого видового распределения всегда принимается идеальное параметрическое распределение, которое всегда будет отличаться от статистического. Установив по идеальному и статистическому видовым распределениям параметры возмущений, вызвавшие значительные отклонения распределений друг от друга, определяются их параметрические степени влияния. Разработка соответствующих мероприятий направлена на сближение статистического распределения с идеальным. Следовательно, можно технико-экономически обосновать комплекс мероприятий, направленных на динамическую защиту от негативных сетевых возмущений резкопеременного характера.

В общем случае решение поставленных задач состоит в том, что по видовому распределению выявляется допустимое количество сетевых возмущений за определенный временной интервал, а по параметрическому устанавливается необходимый для компенсации интервал параметров амплитудно-фазных искажений напряжения. В дальнейшем определяют ключевые свойства проводимых защитных мероприятий.

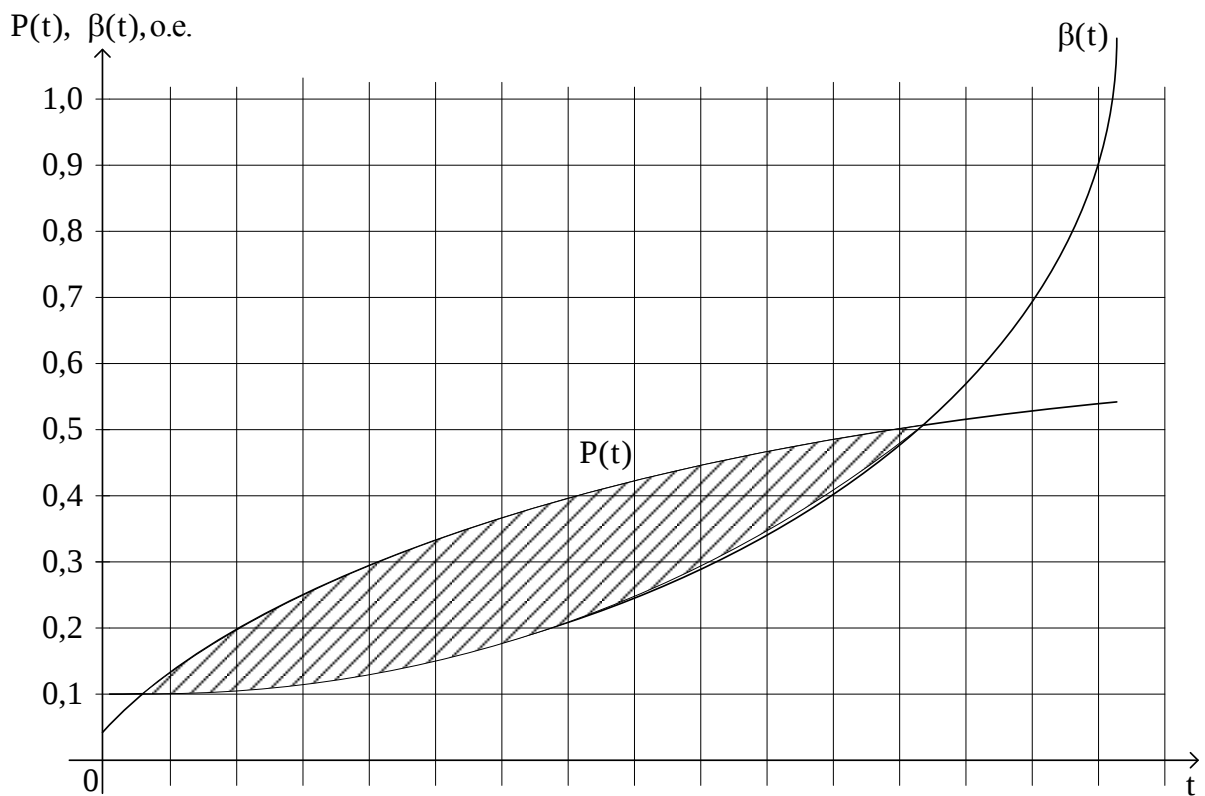


Рисунок 2.25. Взаимосвязь видообразующего параметра и вероятности возникновения отказов

На практике рационализация видовых распределений по степени влияния помимо рассмотренных действий осуществляется путем включения двух дополнительных этапов. Суть их заключается в установлении связи между видовым и параметрическим распределениями, а также рационализации функциональных параметров процесса компенсации выявленных негативных сетевых возмущений. В одной и той же системе координат строятся видовое и параметрическое распределения, а также график, связывающий их зависимости. С их помощью определяются по численности видов возмущения значения его видообразующих параметров. Обратное также верно: зная значения параметров негативных сетевых возмущений, можно оценивать безотказность анализируемой системы электроснабжения.

Описание процесса построения графических распределений для выявления интервала воздействия наиболее негативных возмущений (на примере перенапряжений) представлено на рисунке 2.26.



Рисунок 2.26. Описание процесса построения графических распределений для выявления интервала наиболее негативных возмущений (на примере перенапряжений)

Заключительный этап исследования видовых степеней влияния негативных сетевых возмущений резкопеременного характера характеризуется рационализацией свойств мероприятий процесса компенсации и защиты системы электроснабжения. К ним относятся безотказность, экономичность, производительность и основные технико-экономические показатели. По данным параметрам осуществляется рационализация управления процессами защиты электрооборудования и динамической компенсации амплитудно-фазных искажений напряжения. В рассматриваемом случае используется интервальная оценка статистических распределений, значения которой ограничены доверительными интервалами относительно аппроксимирующей зависимости. Однако в рассматриваемом случае применяется только положительный характер интервала, т. к. основной задачей ставится минимизация параметров возмущений.

Заключительный этап исследования видовых степеней влияния проведен на основании анализа по коэффициенту временного перенапряжения (рисунок 2.27). Данный анализ основывается на статистических данных, которые выражаются в виде полученных видовых распределений. Оптимизация глобальных распределений негативных сетевых возмущений достигается за счет специальных мероприятий, направленных на минимизацию негативных сетевых возмущений, а также на повышение эффективности функционирования системы электроснабжения в целом. Используемый подход позволяет упорядочить и тем самым упростить процесс оценки качества электроэнергии и функционирования электрооборудования.

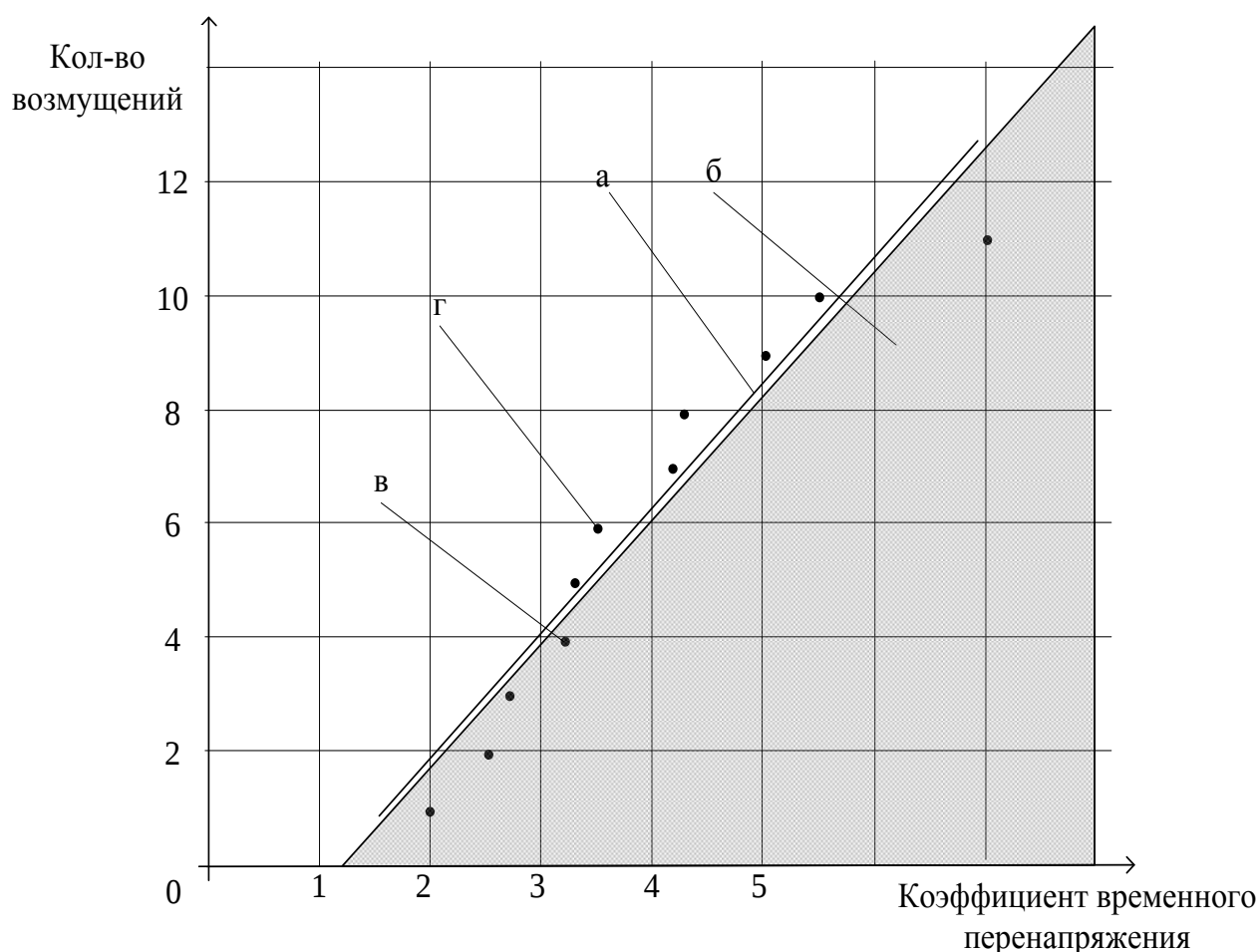


Рисунок 2.27. Оптимизация процесса компенсации возмущений:
а – аппроксимирующая кривая; б – аномальная (недопустимая) зона распределения параметра возмущения; в – аномальные точки; г – эмпирические (допускаемые) точки

Ключевым является определение влияния как отдельных мероприятий, так и их комплекса на безотказность системы электроснабжения. При этом появляется возможность учитывать развитие технологического процесса предприятия и даже отрасли в целом.

Предложенная методология позволяет проводить исследования безотказности систем электроснабжения предприятий со спокойным технологическим процессом, чтобы повысить их научно-технический уровень. Данный анализ осуществляется для любых воздействий, направленных на изменение параметров функционирования системы электроснабжения.

Выводы

1. Определена зависимость отклонений напряжения от уровня набросов реактивной мощности при крайних значениях мощности эксплуатационного короткого замыкания на примере системы электроснабжения Липецкой ТЭЦ-2. По результатам расчета видно, что с ростом мощности эксплуатационного (коммутационного) короткого замыкания возрастает приращение уровня размаха отклонения напряжения по отношению к размаху реактивной мощности. Следовательно, ограничивая мощность коммутации, можно уменьшить значения выбросов реактивной мощности, однако, в некоторых типах производства невозможно значительно снизить это значение по технологическим особенностям производства (например, плавка металла).

2. По результатам проведенного в программно-аппаратном комплексе «Matlab» версии R2016a имитационного моделирования влияния резкопеременных сетевых возмущений на форму кривой напряжения в распределительной электрической сети была определена степень воздействия такого рода сетевых возмущений, выражающаяся в существенном (более 40 %) отклонении параметров формы кривой напряжения сети относительно нормативных значений. Данные результаты

были получены посредством анализа осциллограммы напряжения в процессе проведенного имитационного моделирования.

3. По результатам проведенного для системы электроснабжения листопркатного стана сталеплавильного производства анализа полученных математических зависимостей и закономерностей возникновения и распространения негативных сетевых возмущений резкопеременного характера получена суммарная плотность вероятности длительности пауз потока резкопеременных нагрузок, определяемая с учетом введенного корректирующего коэффициента возмущений. Контролируя значения коэффициента возмущения, обеспечивается эффективность динамической компенсации возмущений.

4. Проведено полное исследование видовых степеней влияния провалов, перенапряжений и высших гармоник для системы электроснабжения 6-35 кВ на ПС 110/35/6 кВ «Цементная» Филиала ПАО «МРСК Центра» - «Липецкэнерго». Построены аппроксимирующие и статистические кривые распределений по параметрам исследуемых возмущений, а также объемные видовые распределения по степени влияния по всем ключевым параметрам. Предложено рационализировать полученные распределения по вероятности возникновения отказов от их влияния.

3. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ МИНИМИЗАЦИИ РЕЗКОПЕРЕМЕННЫХ НЕГАТИВНЫХ СЕТЕВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

3.1 Компенсация негативных сетевых возмущений в условиях случайного характера их возникновения и распространения

Подробный анализ причинно-следственных связей резкопеременных негативных сетевых возмущений и характеров нагрузочных режимов, изложенный в разделе 2, отражает предпосылки развития аварий в системах электроснабжения, среди которых более 80% составляют амплитудно-фазные искажения напряжения. Эти параметры нормируются ГОСТ 32144-2013 [8], в котором не регламентированы технические решения динамической защиты, а лишь указаны статистические показатели длительности воздействия возмущений на систему электроснабжения. Известные подходы минимизации АФИН, в том числе в мировой практике, основаны на снижении суммарного времени перерыва подачи электроэнергии за счет ухудшения ее качества, что с позиции потребителя является не решением сложившейся проблематики, а только способом ухода от нее. Также последнее время ведутся активные разработки динамической защиты систем электроснабжения. Данные системы имеют существенные преимущества по сравнению со статическими компенсирующими устройствами. Однако имеют достаточно высокую стоимость, особенно для предприятий со спокойным продолжительным характером технологического процесса. Главным недостатком таких систем является их узкая направленность использования [51-54, 58]. Таким образом, разработка устройства комплексного подавления амплитудно-фазных искажений напряжения является весьма актуальной даже с учетом перспектив реализации схем и программ развития единой энергетической системы России и регионов.

Для обеспечения требуемой безотказности электроснабжения рассматриваемых двух типов промышленных производств в аварийных ситуациях, вызванных неопределенным по месту и времени воздействием АФИН, предлагается разрабо-

тать систему комплексного динамического воздействия на них, адаптированную к выполнению множественных задач алгоритмов идентификации и динамической компенсации провалов, перенапряжений и высших гармонических составляющих. Обобщенная структурная схема такой системы представлена на рисунке 3.1. На сегодняшний день наиболее эффективным способом компенсации импульсных перенапряжения являются последовательные RC-цепочки, параметры которой настраиваются конкретно под каждый класс электрического напряжения сети [83].

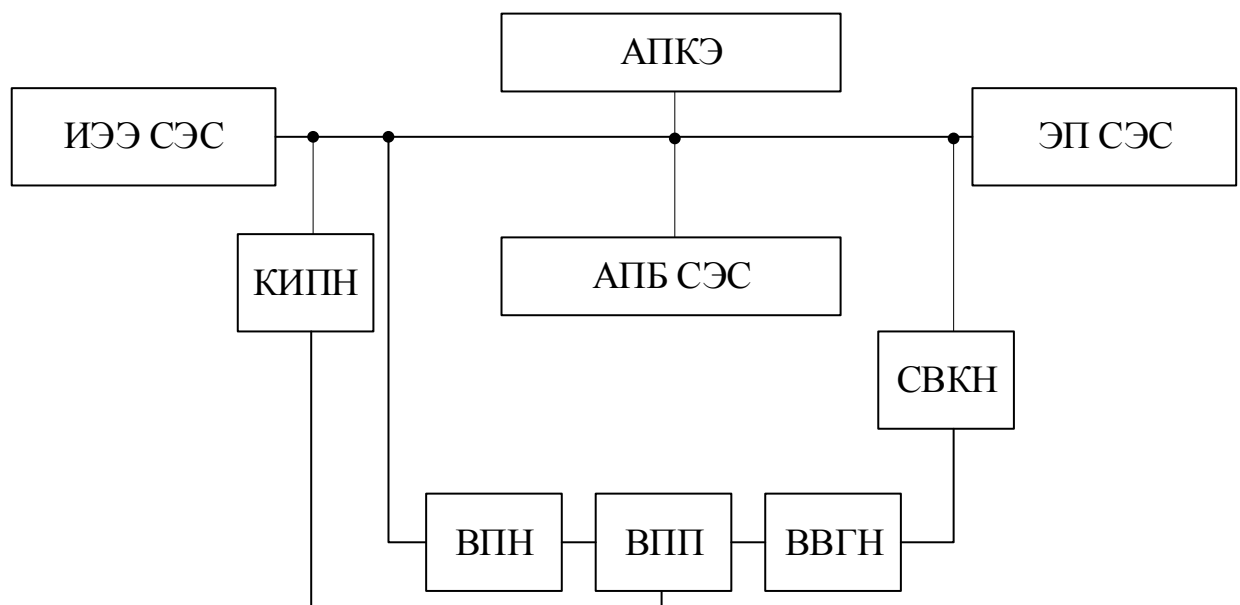


Рисунок 3.1. Обобщенная структурная схема системы компенсации амплитудно-фазных искажений напряжения:

ИЭЭ СЭС – источники электроэнергии системы электроснабжения;

АПКЭ – анализатор показателей качества электроэнергии;

АПБ СЭС – анализатор показателей безотказности системы электроснабжения;

ЭП СЭС – электроприемники системы электроснабжения;

ВПН – восстановитель провалов напряжения;

ВПП – восстановитель перенапряжения;

ВВГН – восстановитель высших гармоник напряжения;

КИПН – компенсатор импульсных перенапряжений;

СВКН – синхронизаторы ввода компенсирующего напряжения

В роли анализатора показателей безотказности системы электроснабжения выступает определенный алгоритм сбора данных о состоянии системы электроснабжения с последующим анализом и формированием последовательных мероприятий, целеполагающими критериями которых является доведение показателей безотказности до оптимальных. В рассматриваемом случае в роли АПБ выступают изложенные в разделе 2 математические зависимости и закономерности распространения и возникновения негативных сетевых возмущений резкопеременного характера [76-79, 97-99].

Опираясь на предложенную структуру было разработано устройство комбинированного регулирования напряжения сети [110]. Технический результат заключается в повышении качества электрической энергии за счет плавной непрерывной компенсации в распределительной электрической сети провалов, перенапряжений и высших гармонических составляющих в расширенном интервале регулирования напряжения.

Технический результат достигается тем, что устройство комбинированного регулирования напряжения сети включает в себя: трансформатор с первичной и вторичной обмотками, тиристорный управляемый преобразователь напряжения, входной фильтр с датчиком направления тока, синхронизированную и сфазированную с сетью систему регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения сети. Также в состав устройства входят выпрямитель, синхронизированный с частотой сети и сфазированный с напряжением нагрузки система управления выпрямителем, ведомый сетью инвертор, синхронизированный с частотой сети и сфазированный с напряжением сети система управления ведомого сетью инвертора, узел раздельного управления выпрямителем и ведомым сетью инвертором, датчик отклонения напряжения нагрузки, датчик реактивной мощности сети, блок автоматического управления тиристорным управляемым преобразователем напряжения, включенного во вторичную обмотку вольтодобавочного трансформатора, синхронизированная и сфазированная с нагрузкой система регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения отно-

сительно напряжения нагрузки, датчик отклонения напряжения сети, нагрузка, блок синхронизации. При этом оно отличается от аналогичных, близких по принципу действия устройств тем, что дополнительно содержит демпфирующий контур постоянного тока, подключенный между выпрямителем и ведомым сетью инвертором, состоящий из параллельно включенного конденсатора и последовательно включенной катушки индуктивности, логический блок, измеритель провалов напряжения и перенапряжений, анализатор высших гармоник [111-115]. В состав логического блока входят: элемент суммирования сигналов с измерителя провалов напряжения и перенапряжений и анализатора высших гармоник, элемент умножения сигнала на отрицательную единицу, элемент преобразования сигнала в двоичный код. При этом трансформатор с первичной и вторичной обмотками выполнен в виде вольтодобавочного трансформатора. Причем к вторичной обмотке вольтодобавочного трансформатора подключен выход тиристорного управляемого преобразователя напряжения, параллельно которому включен входной фильтр с датчиком направления тока. К входам фильтра с датчиком направления тока подключены выходы выпрямителя и входы ведомого сетью инвертора.

К сети подключены: первичная обмотка вольтодобавочного трансформатора, датчик реактивной мощности сети, ведомый сетью инвертор, синхронизированная и сфазированная с сетью система регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения сети, датчик отклонения напряжения сети, измеритель провалов напряжения и перенапряжения, анализатор высших гармоник [110, 111].

К нагрузке подключены: датчик отклонения напряжения нагрузки, выпрямитель, синхронизированная с частотой сети и сфазированная с напряжением нагрузки система управления выпрямителя, синхронизированная и сфазированная с нагрузкой система регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения нагрузки. Выход датчика реактивной мощности соединен с входом синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением сети системы управления ведомо-

го сетью инвертора, входом блока автоматического управления тиристорным преобразователем напряжения, включенного во вторичную обмотку вольтодобавочного трансформатора, входы синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением нагрузки системы управления выпрямителем. Параллельно выходам выпрямителя и входам ведомого сетью инвертора подключен демпфирующий контур постоянного тока. Выходы блока раздельного управления выпрямителя и ведомого сетью инвертора соединены с входами синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением нагрузки системы управления выпрямителя и синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением сети системы управления ведомого сетью инвертора. Выход входного фильтра с датчиком направления тока соединен с входом блока раздельного управления. Выходы синхронизированной и сфазированной с сетью системы регулирования фазы выходного напряжения основного тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения сети и синхронизированной и сфазированной с нагрузкой системой регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения нагрузки подключены к входам блока синхронизации. Выход блока синхронизации соединен с входом тиристорного управляемого преобразователя напряжения. Входы блока автоматического управления тиристорным управляемым преобразователем напряжения, включенного во вторичную обмотку вольтодобавочного трансформатора, соединены с выходами синхронизированной и сфазированной с сетью системы регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения сети, датчика отклонения напряжения сети, синхронизированной и сфазированной с нагрузкой системой регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения нагрузки, датчика отклонения напряжения нагрузки, датчика реактивной мощности сети [110, 111].

Выход блока автоматического управления тиристорным управляемым преобразователем напряжения соединен с входом тиристорного управляемого преобразователя напряжения. Выход синхронизированной с частотой сети и сфазиро-

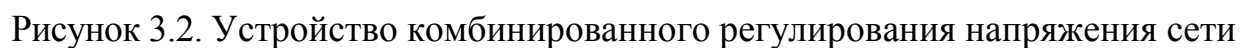
ванной с напряжением нагрузки системы управления выпрямителя соединен с входом выпрямителя, выход синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением сети системой управления ведомого инвертора соединен с входом ведомого инвертора. Выход датчика отклонения напряжения сети подключен к входу синхронизированной и сфазированной с нагрузкой системой регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения нагрузки [110, 111].

Выход датчика отклонения напряжения нагрузки подключен к входу синхронизированной и сфазированной с сетью системы регулирования фазы выходного напряжения основного тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения сети [110, 111]. Выходы измерителя провалов напряжения и перенапряжений и анализатора высших гармоник подключены к входу элемента суммирования сигналов, расположенного на входе логического блока, в состав которого также входят элемент умножения сигнала на отрицательную единицу и элемент преобразования сигнала в двоичный код, выход элемента суммирования сигналов подключен к входу элемента умножения на отрицательную единицу. Выход элемента умножения на отрицательную единицу подключен к входу элемента преобразования сигнала в двоичный код, выход которого подключен к входу тиристорного управляемого преобразователя напряжения. Схема устройства представлена на рисунке 3.2.

Сущность изобретения поясняется рисунком, на котором изображена структурная схема устройства комбинированного регулирования напряжения сети. В состав устройства входят [110]:

- 1 – вольтодобавочный трансформатор (ВТ);
- 2 – демпфирующий контур постоянного тока (ДК), подключенный между выпрямителем 6 и ведомым инвертором 8, состоящий из параллельно включенного конденсатора и последовательно включенной катушки индуктивности;
- 3 – тиристорный управляемый преобразователь напряжения (ТУПН);
- 4 – входной фильтр с датчиком направления тока (ВФ);
- 5 – синхронизированная и сфазированная с сетью система регулирования

9 – синхронизированная с частотой сети и сфазированная с напряжением сети система управления ведомого сетью инвертора 8 (СУИ);



10 – узел раздельного управления выпрямителем и ведомым сетью инвертором (УРУ);

11 – датчик отклонения напряжения нагрузки (НН);

12 – датчик реактивной мощности сети (РМ);

13 – блок автоматического управления тиристорным управляемым преобразователем напряжения 3, включенным во вторичную обмотку вольтодобавочного трансформатора 1 (БАУ);

14 – синхронизированная и сфазированная с нагрузкой система регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3 относительно напряжения нагрузки (СРФН);

15 – датчик отклонения напряжения сети (НС);

16 – нагрузка (Н);

17 – блок синхронизации (БС);

18 – логический блок (ЛБ);

19 – измеритель провалов напряжения и перенапряжений (ИПП);

20 – анализатор высших гармоник (АВГ);

21 – элемент суммирования сигналов с измерителя провалов напряжения и перенапряжений 19 и анализатора высших гармоник 20(ЭС);

22 – элемент умножения сигнала на отрицательную единицу (ЭУО);

23 – элемент преобразования сигнала в двоичный код (ЭП).

Устройство комбинированного регулирования напряжения сети работает следующим образом. К сети переменного тока подключен вольтодобавочный трансформатор 1. К вторичной обмотке вольтодобавочного трансформатора 1 подключен выход тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3, параллельно которому включен входной фильтр с датчиком направления тока 4, ко входам которого подключены выходы выпрямителя 6 и входы ведомого сетью инвертора 8. К сети подключены: датчик реактивной мощности сети 12, ведомый сетью инвертор 8, синхронизированная и сфазированная с сетью система регулирования 5 фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения сети, датчик 15 отклонения напряже-

ния сети, измеритель провалов напряжения и перенапряжения 19, анализатор высших гармоник. К нагрузке 16 подключены: датчик 11 отклонения напряжения нагрузки, выпрямитель 6, синхронизированная с частотой сети и сфазированная с напряжением нагрузки система управления 7 выпрямителя 6, синхронизированная и сфазированная с нагрузкой система регулирования 14 фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3 относительно напряжения нагрузки. Выход датчика реактивной мощности 12 соединен с входом синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением сети системы управления 9 ведомого сетью инвертора 8, входом блока 13 автоматического управления тиристорным преобразователем напряжения 3, включенного во вторичную обмотку вольтодобавочного трансформатора 1, в который также входит синхронизированная с частотой сети и сфазированная с напряжением нагрузки система 7 управления выпрямителем 6 [110, 111]. Параллельно выходам выпрямителя 6 и входам ведомого сетью инвертора 8 подключен демпфирующий контур 2 постоянного тока. Выходы блока 10 отдельного управления выпрямителя 6 и ведомого сетью инвертора 8 соединены с входами синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением нагрузки системы управления 7 выпрямителя 6 и синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением сети системы управления 9 ведомого сетью инвертора 8. Выход входного фильтра 4 с датчиком направления тока соединен с входом блока отдельного управления 10. Выходы синхронизированной и сфазированной с сетью системы 5 регулирования фазы выходного напряжения основного тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3 относительно напряжения сети и синхронизированной и сфазированной с нагрузкой системой 14 регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3 относительно напряжения нагрузки подключены к входам блока синхронизации 17. Выход блока синхронизации 17 соединен с входом тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3. Входы блока 13 автоматического управления тиристорным управляемым преобразователем напряжения 3, включенного во вторичную обмотку вольтодобавочного трансформатора 1, соединены с выходами синхронизи-

рованной и сфазированной с сетью системой 5 регулирования фазы выходного напряжения основного тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3 относительно напряжения сети, датчиком 15 отклонения напряжения сети, синхронизированной и сфазированной с нагрузкой системой 14 регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3 относительно напряжения нагрузки, датчиком 11 отклонения напряжения нагрузки, датчиком 12 реактивной мощности сети. Выход блока 13 автоматического управления тиристорным управляемым преобразователем напряжения 3 соединен с входом тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3. Выход синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением нагрузки системы управления 7 выпрямителя 6 соединен с входом выпрямителя 6. Выход синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением сети системой управления 9 ведомого сетью инвертора 8 соединен с входом ведомого сетью инвертора 8. Выход датчика 15 отклонения напряжения сети подключен к входу синхронизированной и сфазированной с нагрузкой системой 14 регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3 относительно напряжения нагрузки. Выход датчика 11 отклонения напряжения нагрузки подключен к входу синхронизированной и сфазированной с сетью системы 5 регулирования фазы выходного напряжения основного тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3 относительно напряжения сети [110, 111].

Выходы измерителя 19 провалов напряжения и перенапряжений и анализатора 20 высших гармоник подключены к входу элемента суммирования сигналов 21, расположенного на входе логического блока 18, в состав которого также входят элемент 22 умножения сигнала на отрицательную единицу и элемент 23 преобразования сигнала в двоичный код. Выход элемента 21 суммирования сигналов подключен к входу элемента 22 умножения на отрицательную единицу. Выход элемента 22 умножения на отрицательную единицу подключен к входу элемента 23 преобразования сигнала в двоичный код. Выход элемента 23 преобразования

сигнала в двоичный код подключен к входу тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3 [110].

В условиях наличия большого количества приемников с нелинейной нагрузкой, высокого уровня потребления реактивной мощности, наличия большого числа мощных электроприемников, а также воздействия нагрузок резко переменного характера, необходима полноценная компенсация отклонений напряжения от российских и международных норм качества электроэнергии. Основным недостатком существующих аналогичных устройств является наличие трансформатора с РПН. Как показывает практика эксплуатации, трансформаторы с РПН имеют весьма низкие пределы регулирования напряжения, которые лежат в пределах $\pm 16\%$, а также обладают малой плавностью регулирования напряжения, что негативно сказывается на компенсации резкопеременных отклонений напряжения. Замена трансформатора с РПН на вольтодобавочный трансформатор 1 позволяет обеспечивать большую плавность добавки напряжения, а также увеличенную амплитуду добавляемого напряжения, ограниченную номинальным напряжением сети.

Алгоритм, заложенный в блок автоматического управления 13 тиристорным преобразователем напряжения 3, включенного во вторичную обмотку вольтодобавочного трансформатора 1, предусматривает синхронизацию по амплитуде добавляемого напряжения, фазе, частоте и интервалу времени восстановления кривой напряжения до требуемой с учетом уровня отклонения напряжения до и после вольтодобавочного трансформатора 1.

На вход блока 13 поступает измерительная информация с датчиков отклонения напряжения 11 и 15 сети и нагрузки соответственно, датчика 12 реактивной мощности сети, а также сигналы от систем 5 и 14, которые, осуществляя синхронизацию параметров со стороны сети и со стороны нагрузки соответственно, дают блоку 13 информацию о синхронизированных параметрах помимо информации о фактических параметрах от датчиков 11 и 15 [110, 111].

Измеритель провалов напряжения и перенапряжений 19 получает из сети информацию об амплитуде отклонения напряжения от требуемого, которая по-

ступает на вход логического блока 18, а анализатор высших гармоник 20 получает из сети информацию о высших гармонических составляющих напряжения сети, которая также поступает на вход логического блока 18. Сигнал, поступающий с элемента 21 суммирования сигналов с измерителя провалов напряжения и перенапряжений 19 и анализатора высших гармоник 20, поступает на вход элемента 22 умножения сигнала на отрицательную единицу, с выхода которого поступает на вход элемента 23 преобразования сигнала в двоичный код и далее в виде системы двоичных кодов поступает с выхода логического блока 18 на тиристорный управляемый преобразователь напряжения 3, где на основании заданного алгоритма формирует из двоичных кодов синусоидальный сигнал требуемой формы посредством кодоимпульсной модуляции.

Тиристорный управляемый преобразователь напряжения 3 на базе кодоимпульсной модуляции формирует добавочное напряжения требуемой формы, фазы и частоты. Алгоритм блока 13 по результатам сравнения информации от блоков 11, 15, 5, 14 и 12 вырабатывает сигнал на тиристорный управляемый преобразователь напряжения 3, который корректирует в зависимости от режима напряжения сети добавочное напряжение, вводимое в сеть с помощью вольтодобавочного трансформатора 1, сформированное по результатам кодоимпульсной модуляции на основании сигнала с выхода логического блока 18. Алгоритм, заложенный в блок 13, предусматривает задание надлежащего уровня, частоты и фазы напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3 на каждом интервале времени регулирования на основании сигналов от датчиков 11, 15 и систем 5, 14. Также блок 13 помимо сигналов от блоков 14, 15, 5 и 11 учитывает уровень реактивной мощности со стороны питающей сети с помощью сигнала от датчика 12, что окончательно определяет фазу добавочного напряжения. При формировании выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения 3, приложенного к вторичной обмотке вольтодобавочного трансформатора 1, учитывается сигнал от блока синхронизации 17, который на основании сигналов от систем 5 и 14 генерирует соответствующий сигнал синхронизации параметров сети и нагрузки в зависимости от режима напряжения [110, 111].

Таким образом, повышение качества электрической энергии за счет компенсации в электрической сети провалов, перенапряжений и высших гармонических составляющих в расширенном интервале регулирования напряжения обеспечивается введением с помощью вольтодобавочного трансформатора кривой компенсационного напряжения, которая дополняет кривую действующего в сети напряжения до требуемой формы.

3.2 Восстановление формы напряжения при резкопеременных сетевых возмущениях с разделением на составляющие

Ключевой особенностью функционирования устройства комбинированного регулирования напряжения сети является наиболее точное формирование компенсирующей кривой напряжения. При этом важно также учитывать быстроту ее введения в сеть через вольтодобавочный трансформатор. Пример графика кривой напряжения с учетом воздействия амплитудно-фазных искажений напряжения с разделением на составляющие представлен на рисунке 3.3.

Выражение для формирования кривой компенсационного напряжения определяется следующим образом:

$$u_{\Delta}(t) = -(u_{ВГ}(t) + u_{ПЕР}(t) + u_{ПРОВ}(t)) = -u_{АФИН}(t), \quad (3.1)$$

где $u_{ВГ}(t)$ – изменение кривой напряжения от воздействия высших гармонических составляющих напряжения, В; $u_{ПЕР}(t)$ – изменение кривой напряжения от воздействия перенапряжений, В; $u_{ПРОВ}(t)$ – изменение кривой напряжения от провала напряжения, В; $u_{АФИН}(t)$ – изменение напряжения от АФИН, В.

В существующих подобных устройствах реализация подачи компенсирующего напряжения, кривая которого имеет требуемую форму, осуществляется на базе тиристорного управления преобразователем напряжения при помощи ши-

отно-импульсной модуляции (ШИМ) сигнала [115]. При ШИМ под действием мгновенных значений сообщения изменяется длительность и ширина импульсов переносчика, увеличивая ширину при возрастании мгновенного значения сообщения и уменьшая ширину при его снижении за счет особого положения заднего фронта импульса. Частота и амплитуда импульсов при ШИМ остаются постоянными.

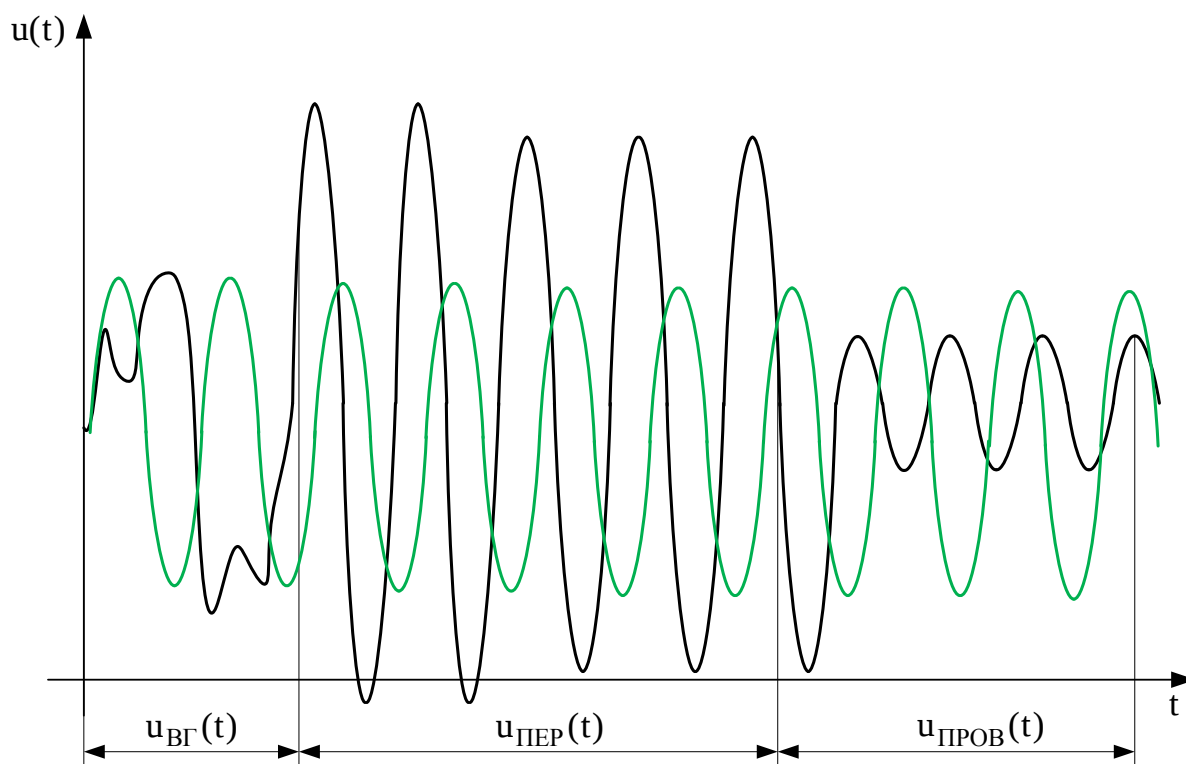


Рисунок 3.3. Гипотетическая кривая напряжения с учетом раздельного воздействия АФИН

При ШИМ информацию несет только длительность импульса $\tau_{\text{и}}$. Неизбежное искажение фронтов импульса приводит к погрешности передачи информации, а с учетом резкопеременного характера негативных сетевых возмущений искажение может быть весьма существенным (рисунок 3.4). На выходе линии связи за счет условия ограниченности полосы ее пропускания $\Delta f_{\text{связи}}$ формируется вместо требуемого прямоугольного импульса трапецидальный с длительностью фронта

$t_{\text{фронта}} = 1/\Delta f_{\text{связи}}$. За счет порога срабатывания приемника это дает погрешность при передаче информации.

Таким образом, для ШИМ необходимо иметь малое искажение фронтов при передаче сигнала, формирующего в ТУПН разработанного устройства компенсирующую кривую напряжения $U_{\Delta}(t)$. Данная особенность в условиях требуемого уровня компенсации негативных сетевых возмущений резкопеременного характера не имеет места быть реализованным. В связи с этим наиболее рациональным вариантом модуляции, чем ШИМ, принимается кодоимпульсная модуляция (КИМ) [116]. Ширина спектра КИМ-сигнала определяется длительностью элементарного импульса $\tau_{\text{э}}$. При КИМ каждому значению амплитуды и/или фазы сигнала соответствует определенный набор импульсов, а количество уровней квантования определяется разрядностью двоичного кода. Например, для передачи сигнала с погрешностью квантования не превышающей 1% необходимо каждый «отчет» кодировать шестиразрядным кодом [117]. Спектр КИМ-сигнала определяется выражением

$$\Delta f_{\text{КИМ}} = 2nf_{\text{и.с.}}, \quad (3.2)$$

где n – разрядность кода; $f_{\text{и.с.}}$ – спектр информационного сигнала.

Тогда спектр КИМ-сигнала будет примерно в 12 раз шире спектра информационного сигнала. Такая широкополосность КИМ позволяет достигать гораздо более лучшей помехоустойчивости, чем ШИМ, что является оптимальным условием применения КИМ для формирования синусоиды требуемой формы при компенсации резкопеременных сетевых возмущений, особенно в условиях повышения быстродействия [118]. В целом к преимуществам КИМ в реализации комбинированного регулирования напряжения в электрической сети относятся:

- более высокое быстродействие по сравнению с ШИМ;
- большая широкополосность (до 45 МГц);
- охват широкого спектра высших гармоник;

–лучшая помехоустойчивость.

Разберем подробнее процесс формирования компенсирующей кривой напряжения путем анализа логической составляющей устройства (рисунок 3.5). Измеритель провалов напряжения и перенапряжений ИПП получает из сети информацию об амплитуде отклонения напряжения от требуемого, которая поступает на вход логического блока ЛБ, а анализатор высших гармоник АВГ получает из сети информацию о высших гармонических составляющих напряжения сети, которая также поступает на вход логического блока.

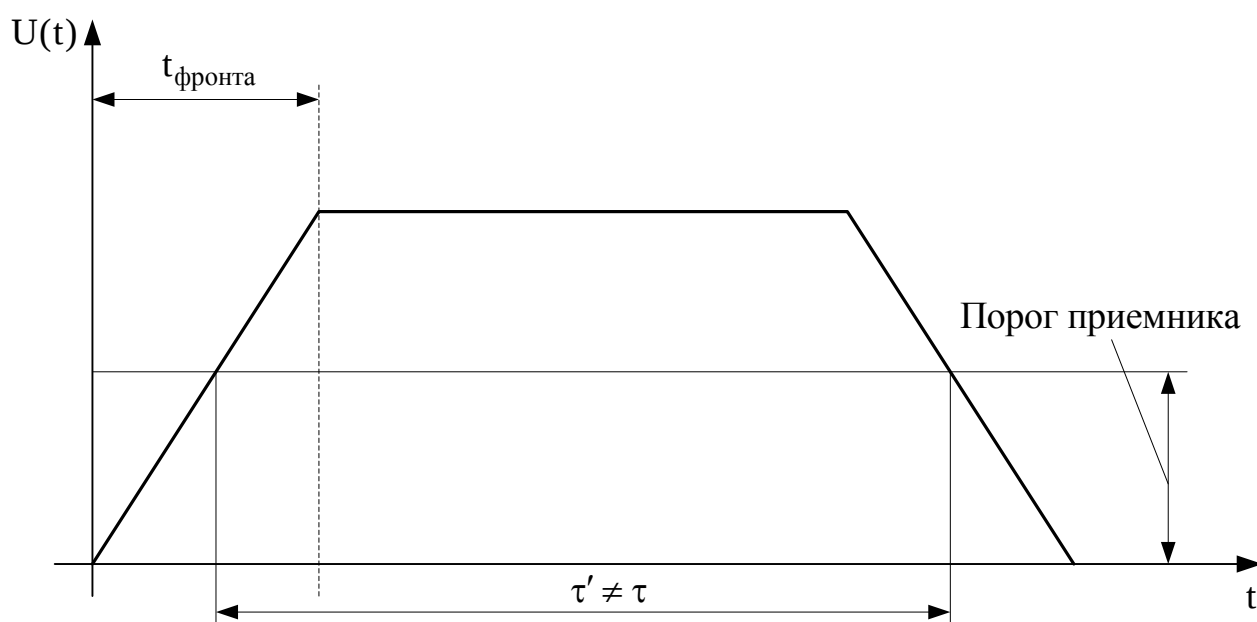


Рисунок 3.4. К пояснению искажения фронтов при ШИМ

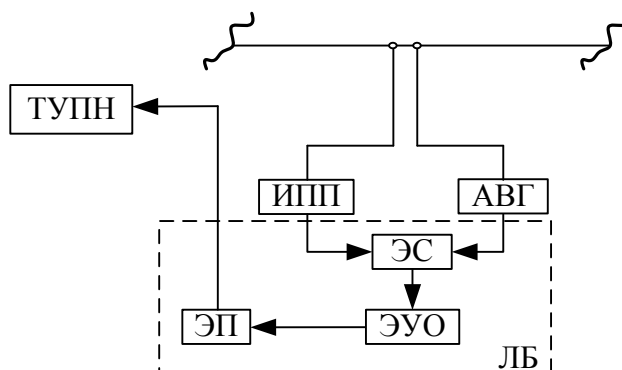


Рисунок 3.5 К пояснению формирования компенсационной кривой напряжения

Сигнал, поступающий с элемента суммирования сигналов ЭС с ИПП и АВГ, поступает на вход элемента умножения сигнала на отрицательную единицу (ЭУО), с выхода которого поступает на вход преобразования сигнала в двоичный код и далее поступает с выхода логического блока на тиристорный управляемый преобразователь напряжения ТУПН, где он на базе КИМ формирует добавочное напряжения требуемой формы, фазы и частоты.

Так как разработанное устройство представляет собой по принципу действия подобие автоматической системы регулирования, а процесс компенсации является переходным, то наибольшую оптимальность по сравнению с аналогичными устройствами целесообразно описать через оптимизацию по критерию максимального быстродействия, который соответствует минимальной длительности переходного процесса компенсации. Учитывая, что разработанный принцип динамического восстановления формы кривой напряжения базируется на противофазной компенсации, выражение (3.1) можно описать следующей системой:

$$\begin{cases} u_{\Delta}(t) = -U_{\text{АИН}} - \sum_{i=1}^n U_{\Gamma,i} \sin(i \cdot 2\pi f \cdot (t + K_M) - \varphi_{\Gamma,i}); \\ K_M = \int_{t_0}^{t_k} F\left(U, \frac{dU}{dt}, t\right) \cdot dt \rightarrow \min; K_M \Leftrightarrow (t_k - t_0) \rightarrow 3 \cdot \tau, \end{cases} \quad (3.3)$$

где $U_{\text{АИН}}$ - величина отклонения напряжения сети по амплитудной составляющей искажений, В; $U_{\Gamma,i}$ - амплитуда i -ой гармонической составляющей, В; i - номер гармоники; $\varphi_{\Gamma,i}$ - отставание по фазе напряжения i -ой гармоники, рад; K_M - критерий максимального быстродействия, с; t_0 и t_k - начальный и конечный моменты переходного процесса компенсации, с; τ - постоянная времени.

Т. к. комбинированное регулирование напряжения в данном случае рассматривается в рамках переходного процесса, то критерий максимального быстродействия K_M будет устремлен к наименьшему времени окончания переходного процесса, определяемого как $3 \cdot \tau$. В этом случае справедливым будет описание

схемы замещения процесса компенсации через активный двухполюсник (рисунок 3.6). В указанной схеме в роли активного двухполюсника выступает разработанное устройство, а в роли пассивной части – участок электрической сети между выходными зажимами вольтодобавочного трансформатора.

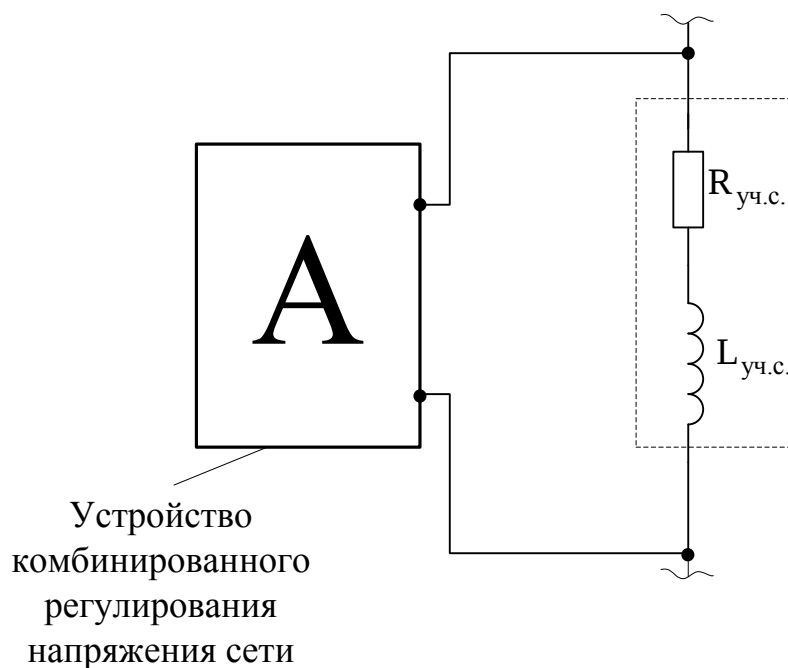


Рисунок 3.6. Схема замещения переходного процесса компенсации:

$R_{\text{уч.с.}}$ - активное сопротивление участка сети;

$L_{\text{уч.с.}}$ - реактивное сопротивление участка сети

Исходя из принятой схемы замещения и корня ее характеристического уравнения, равного $p = -\frac{R_{\text{уч.с.}}}{L_{\text{уч.с.}}}$, можно определить выражения для расчета времени окончания переходного процесса:

$$\tau = \left| \frac{1}{p} \right| = \left| -\frac{L_{\text{уч.с.}}}{R_{\text{уч.с.}}} \right| = \frac{L_{\text{уч.с.}}}{R_{\text{уч.с.}}} \Rightarrow T_{\text{п.п.}} = 3 \cdot \tau = \frac{3 \cdot L_{\text{уч.с.}}}{R_{\text{уч.с.}}}, \quad (3.4)$$

где $T_{\text{п.п.}} = t_k - t_0$ - время окончания переходного процесса, с.

Остается выбрать способ двоичного кодирования информации, содержащейся в выражении (3.3), а также определить параметры, которые необходимо будет преобразовывать в двоичный код для дальнейшей их транспортировки от ЭП к ТУПН, где на основании полученного набора кодов будет формироваться компенсирующее напряжение требуемой формы с помощью КИМ [119].

Для секции шин 6 кВ, рассматриваемой в разделе 2.3 ПС 110/35/6 кВ «Цементная» (филиал ПАО «МРСК Центра» - «Липецкэнерго»), следует принять следующие ограничения и допущения:

- амплитудную составляющую компенсирующего напряжения основной частоты $U_{\text{АИН}}$ принимаем для номинального напряжения сети в 6 кВ и формируем его интервалы кратно 60 В, т. е. 1% от номинального. Следовательно, количество комбинаций для провалов напряжения и для перенапряжений в сумме составит $6000 / 60 = 100$ комбинаций;

- отставание по фазе напряжения i -ой гармоники φ_i принимаем с учетом противофазной особенности компенсации, т. е. для интервала $[0; \pi/2]$ кратно $\pi/360$. Следовательно, количество комбинаций составит $\left[\frac{\pi}{2} / \frac{\pi}{360} \right] = 180$ комбинаций;

- для амплитуд i -ой гармонической составляющей, превышающих допустимую $U_{\text{Г.д}}$, вводим ограничение по количеству регистрируемых нечетных гармоник напряжения [21, 32], которое равно 21-ой учитываемой гармоникам с третьей по сорок первую. Количество комбинаций для амплитуд высших гармоник напряжения принимаем равным 100 для каждой гармоники.

На основании принятых допущений определяем разрядность кодов для каждого из регулируемых параметров первого выражения системы (3.3), которые будет передавать преобразователь ЭП в ТУПН. Для двухсот комбинаций напряжения и ста восьмидесяти комбинаций значений фаз разрядности кодов будут равны: $N = 2^n$, где n – число разрядов двоичного кода, а N – число уровней квантования; $\log_2 100 = 6,64 \approx 7$; $\log_2 180 = 7,48 \approx 8$. Таким образом, в рассматриваемом

случае все переменные параметры задаются семи- и восьмиразрядными двоичными кодами и для наглядности сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1. Задание параметров компенсационного напряжения двоичным n -разрядным кодом для $U_{ном} = 6 \text{ кВ}$

Параметр кривой	Передаваемый n -разрядный код на уровень компенсации ($n = 7, 8$)							
	% от номинального напряжения							
	1%	2%	...	50%	...	75%	...	100%
$U_{АИН}$	0000001	0000010	...	0110010	...	1001011	...	1100100
$U_{г.3}$	0000001	0000010	...	0110010	...	1001011	...	1100100
$U_{г.5}$	0000001	0000010	...	0110010	...	1001011	...	1100100
...	0000001	0000010	...	0110010	...	1001011	...	1100100
$U_{г.i}$	0000001	0000010	...	0110010	...	1001011	...	1100100
	Значение фазы кратное $\pi/360$ (1 град.)							
	$\pi/360$	$2\pi/360$	...	$90\pi/360$	...	$135\pi/360$	...	$180\pi/360$
Φ	00000001	00000010	...	01011010	...	10000111	...	10110100
$\Phi_{г.3}$	00000001	00000010	...	01011010	...	10000111	...	10110100
$\Phi_{г.5}$	00000001	00000010	...	01011010	...	10000111	...	10110100
...	00000001	00000010	...	01011010	...	10000111	...	10110100
$\Phi_{г.i}$	00000001	00000010	...	01011010	...	10000111	...	10110100

В связи с компенсацией АФИН с учетом разделения на амплитудную (АИН) и фазную (ФИН) составляющие, изложенные в таблице 1 коды, поступают на вход управляемого преобразователя напряжения по двум группам независимых информационных каналов. Схема кодоимпульсной модуляции изображена на рисунке 3.7.

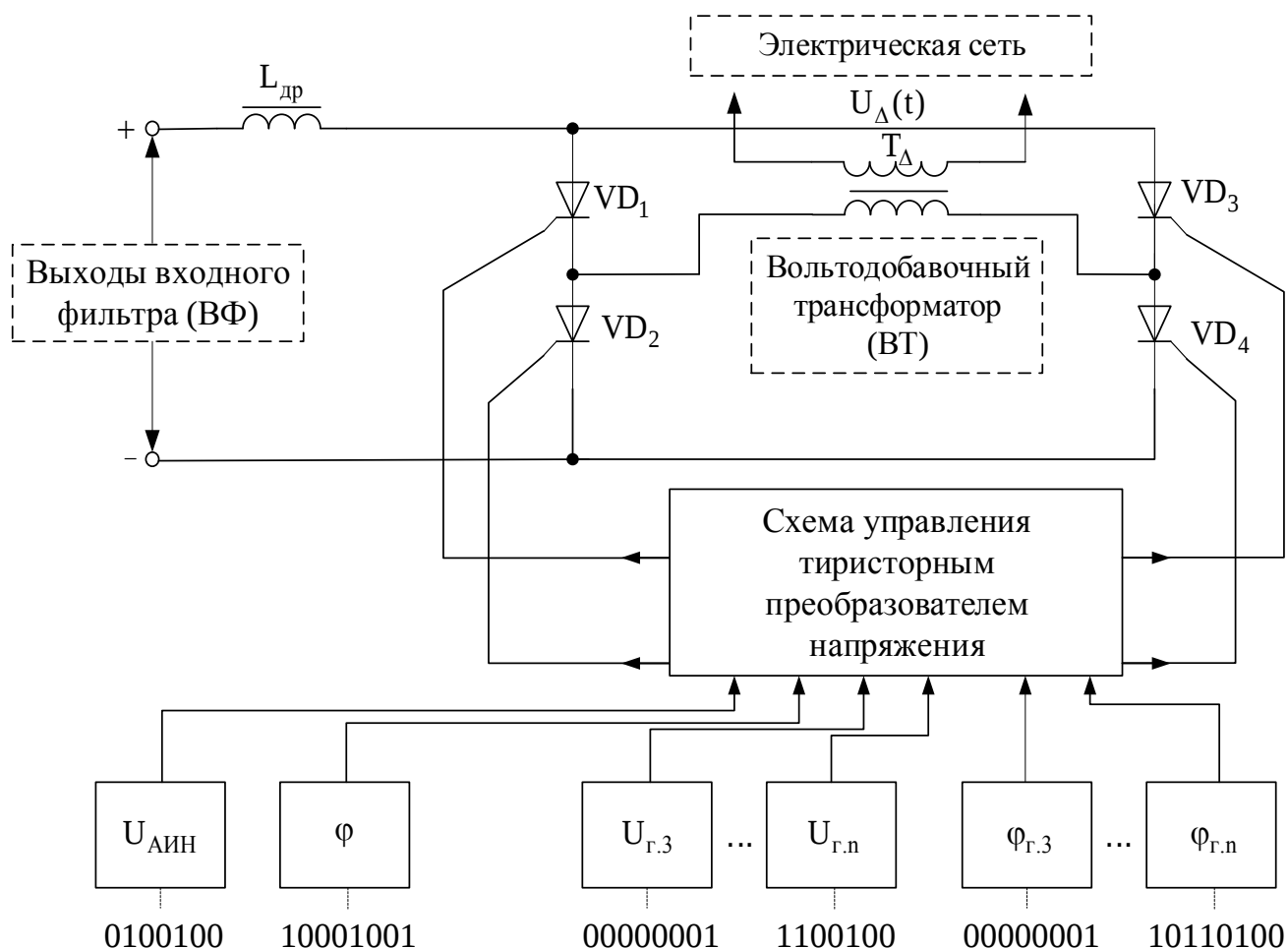


Рисунок 3.7 Схема кодоимпульсной модуляции напряжения

Для наглядной демонстрации решения проблемы воздействия резкопеременных АФИН, процесса их компенсации и вида компенсирующей кривой построим характеризующие графики для линии 6 кВ первой секции шин главной понижающей подстанции 110/35/6 «Цементная» (рисунок 3.8-3.10). Учтем, что в данном случае рассматривается гипотетическое влияние 3, 5 и 7-й высших гармоник напряжения, а также провал напряжения основной частоты в размере 67% от амплитуды. При этом напряжение основной частоты имеет отставание по фазе от номинального в 0,07 рад. Т. е. исходная кривая напряжения имеет следующий вид:

$$U(t) = 6000\sin(2\pi ft - 0,07) + 3000\sin(6\pi ft) + \\ + 500\sin(10\pi ft) + 900\sin(14\pi ft) - 4000\sin(2\pi ft). \quad (3.5)$$

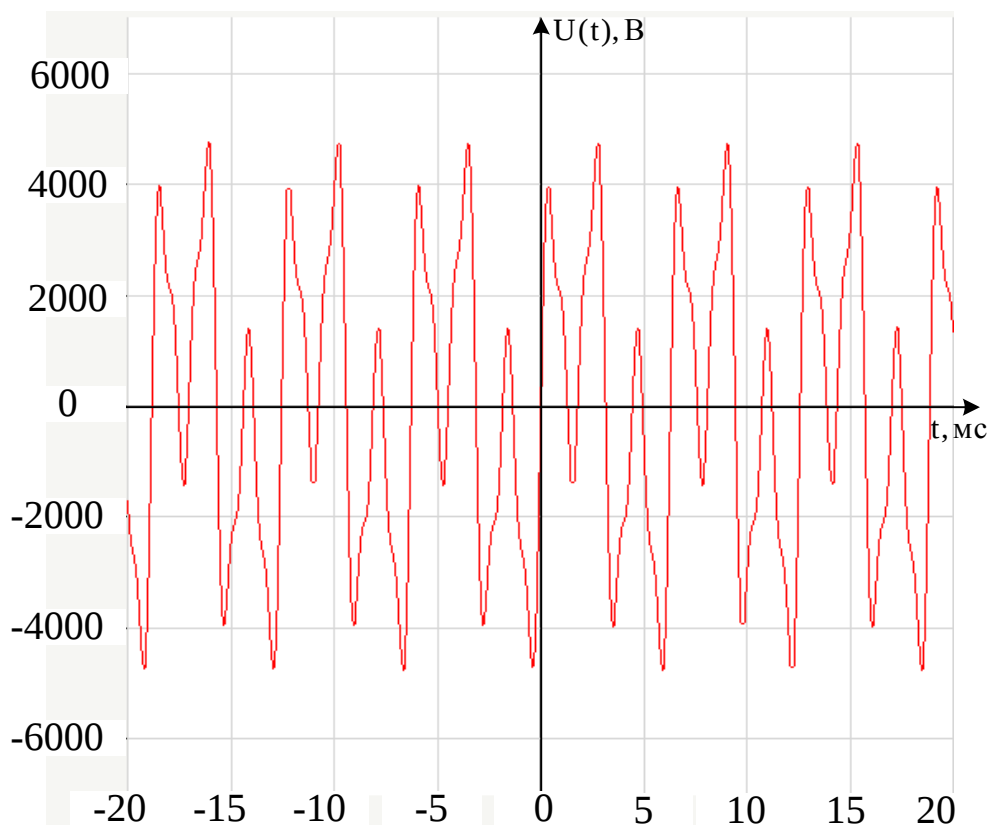


Рисунок 3.8. График кривой исходного напряжения при воздействии негативных сетевых возмущений

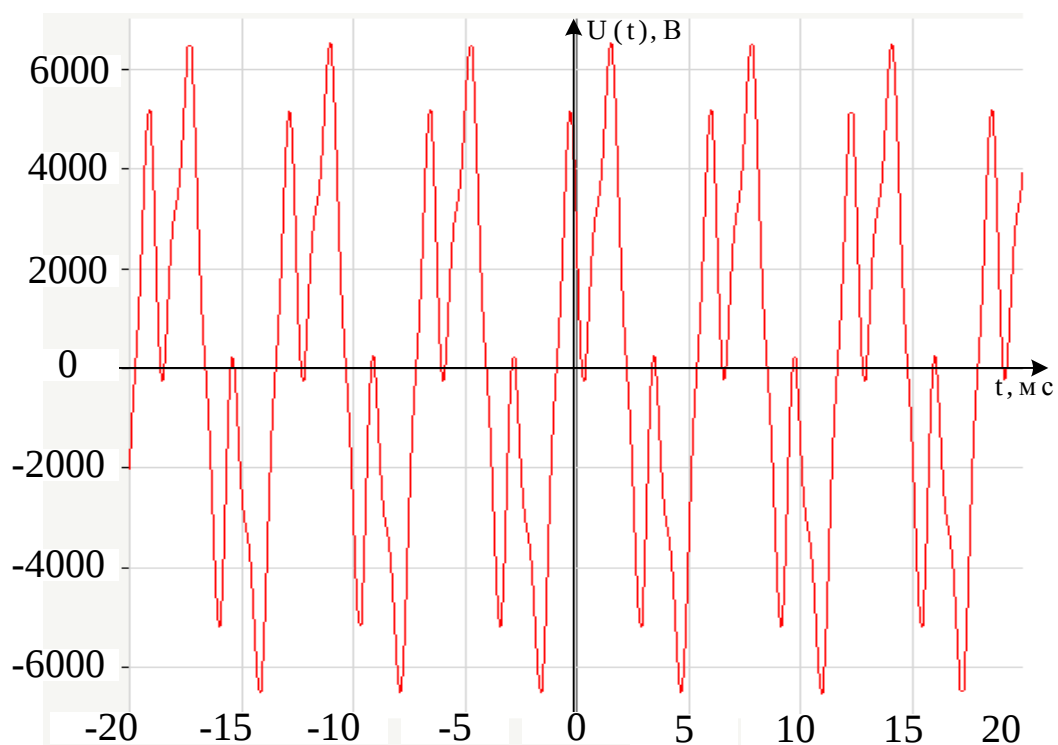


Рисунок 3.9. График кривой компенсационного напряжения при воздействии возмущений

На основании первого выражения системы (3.3) выражение для компенсационной кривой будет выглядеть следующим образом:

$$U_{\Delta}(t) = -3000\sin(6\pi ft) - 500\sin(10\pi ft) - 900\sin(14\pi ft) + 4000\sin(2\pi ft + 0,07). \quad (3.6)$$

Как при графическом, так и при аналитическом суммировании выражений (3.5) и (3.6) в результате получается кривая, совпадающая с кривой номинального напряжения, график которого изображен на рисунке 3.10. Данные иллюстрации достоверно отображают разработанный принцип комбинированного регулирования напряжения сети.

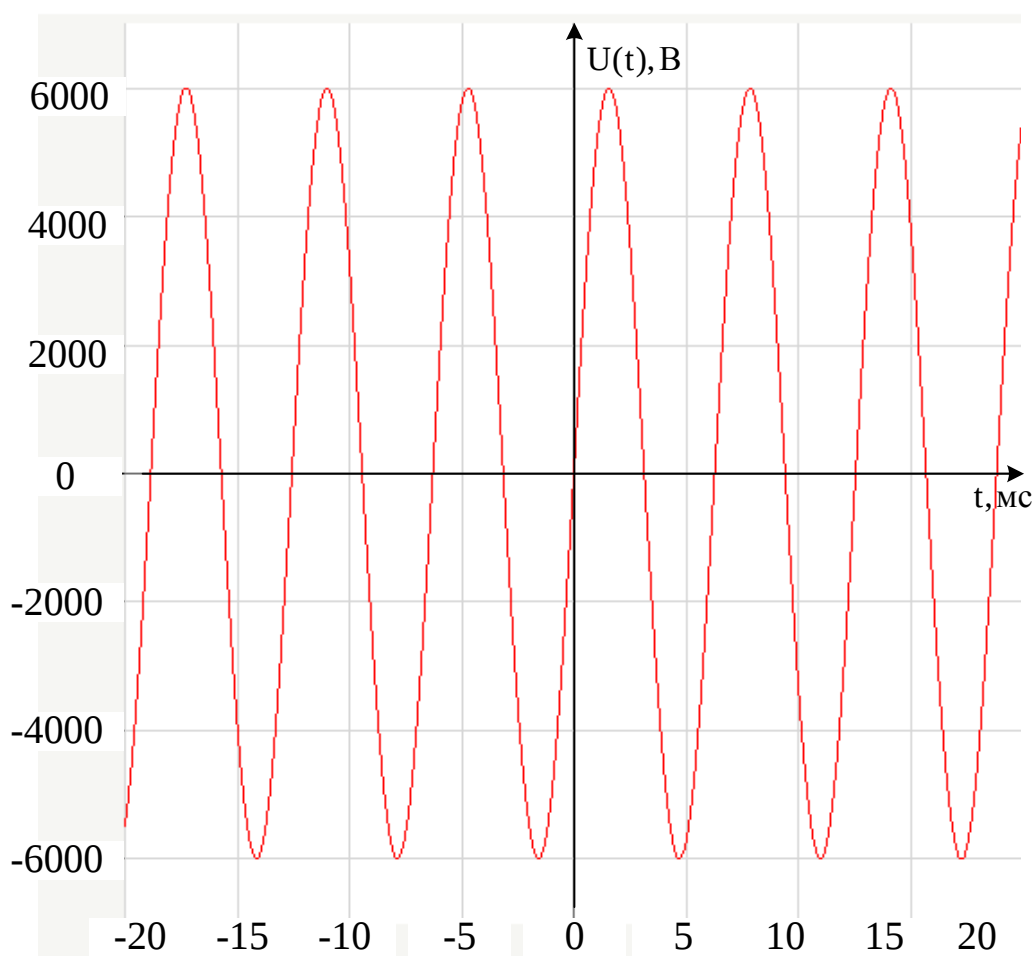


Рисунок 3.10. График кривой скомпенсированного напряжения, совпадающего с номинальным

Также отобразим перечень кодов, необходимый для правильной передачи КИМ-сигнала на тиристорный управляемый преобразователь напряжения. Схема управления ТУПН принимает на вход внутреннего декодера сигнал следующего вида:

$$U_{\Delta}(t) = -\{0110010\} \sin(6\pi ft) - \{0001000\} \sin(10\pi ft) - \{0001111\} \sin(14\pi ft) + \{1000011\} \sin(2\pi ft + \{00000010\}). \quad (3.7)$$

Далее преобразователь формирует компенсирующую кривую и подает ее на вход вольтодобавочного трансформатора. С учетом воздействия датчиков синхронизации разработанного устройства компенсирующее напряжение вводится в сеть, где и происходит восстановление напряжения в сети. Преимуществом разработанной системы управления помимо быстродействия является еще и ее замкнутость, и отсутствие коммутационных элементов, что позволяет непрерывно обеспечивать потребителей электроэнергией требуемого качества непрерывно. Данный факт существенно повышает безотказность системы электроснабжения и отдельных ее элементов.

3.3 Повышение надежности схемы электроснабжения приемников

Для конкретного теоретического апробирования приведенных разработок комбинированного регулирования напряжения сети, приводящих к улучшению технико-экономических показателей промышленных предприятий, в качестве исследуемого объекта была выбрана первая секция шин номинального напряжения 6 кВ ПС 110/35/6 кВ «Цементная» (рисунок 3.11). Очевидно, что электроприемники данной подстанции, секционированные выключателями, имеют в целом спокойный характер технологического процесса, исключая резкое изменение нагрузки. Процесс повышения надежности схемы электроснабжения приемников в рассматриваемом случае является неотъемлемой частью этапа параметрической и структурной рационализации на заключительных этапах исследования видовых степеней влияния [97, 98].

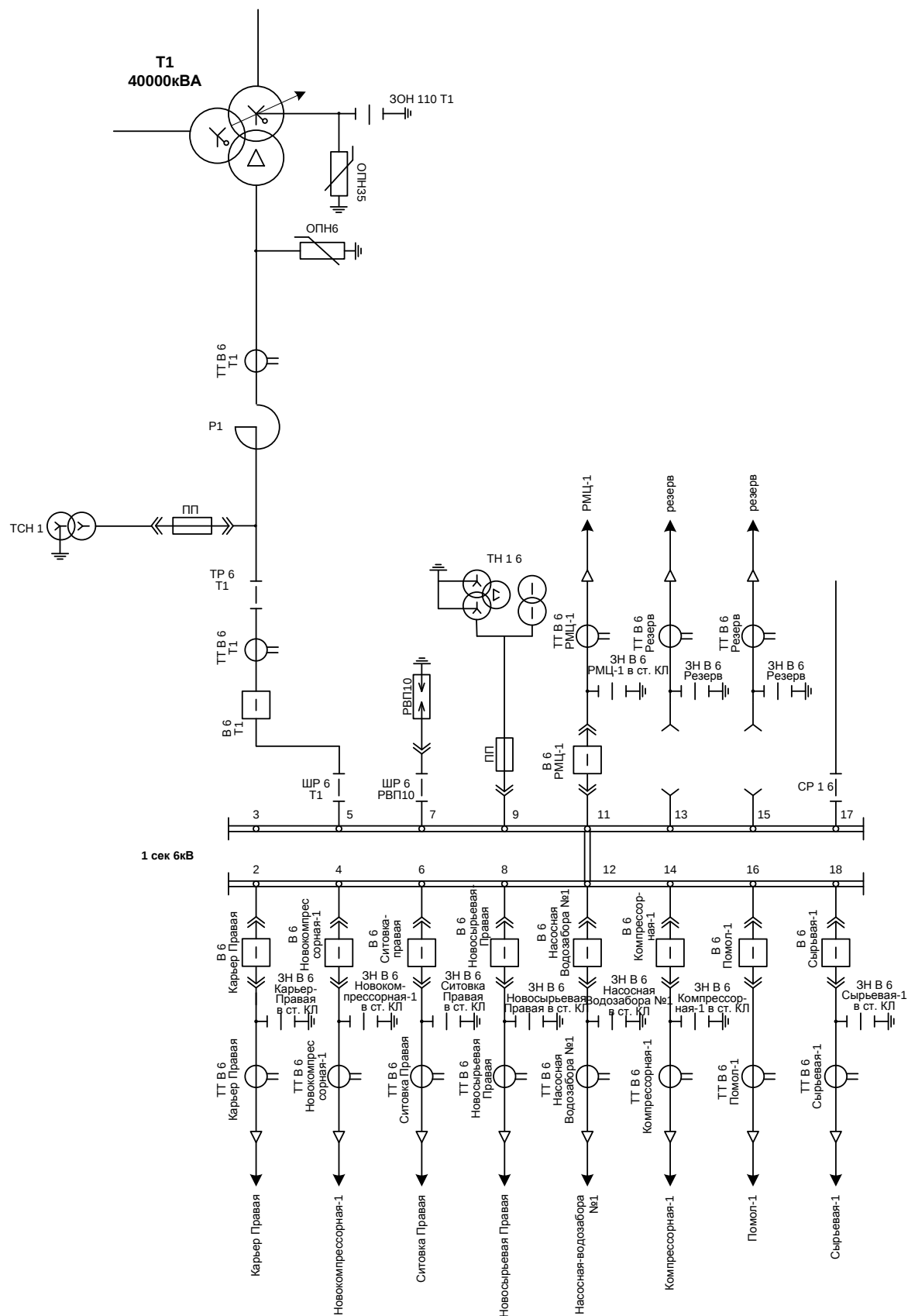


Рисунок 3.11. Нормальная схема электрических соединений первой секции шин 6 кВ ПС 110/35/6 кВ «Цементная»

Решаются одновременно несколько ключевых задач: повышение надежности системы электроснабжения; улучшение качества электроэнергии в защищаемой сети по амплитудно-фазным показателям; увеличение технико-экономических показателей предприятия. Основной проблемой, которую должно решать повышение надежности в системах электроснабжения экономически значимых промышленных предприятий, является исключение как полного отключения приемников отдельной секции шин, так и отказ защитных устройств из-за потерь цепей питания, что ведет к простоя технологических агрегатов, влекущему за собой соответствующие проблемы для предприятия.

Оптимальным решением проблемы является введение в цепь постоянного тока в разработанном устройстве комбинированного регулирования напряжения сети промышленных аккумуляторных батарей (АКБ) повышенной емкости, что позволит избежать простоя агрегатов и дать время на устранение неисправности в сети. Запитывать же их предлагается от соседней секции шин. Стационарные свинцовые аккумуляторы хорошо зарекомендовали себя в роли аварийных источников питания. Также стоит отметить тяговые аккумуляторы, имеющие возможность глубокого разряда и относительно небольшую стоимость. Наряду с данными преимуществами свинцовые аккумуляторные батареи имеют следующие недостатки: негативное влияние глубокого разряда на надежность эксплуатации батареи; значительные (около 30%) потери электроэнергии при заряде, что вынуждает держать их в режиме постоянной зарядки либо увеличивать емкость совместно с габаритами [120].

Особое внимание стоит уделить таким элементам как ионисторы (суперконденсаторы). К уникальным свойствам ионисторов относятся высокая удельная емкость (несколько фарад), длительность и надежность сохранности заряда. Они могут практически безотказно работать в цепях постоянного тока даже при значительных механических воздействиях и климатических колебаниях. Главными преимуществами применения ионисторов в промышленности являются следующие: большой срок службы; быстрый заряд; практически неограниченное количество циклов «заряд/разряд»; относительная дешевизна; отсутствие необходимости кон-

троля за режимом зарядки [121]. Однако независимое использование ионисторов как высоковольтных источников питания перекрывается их следующими недостатками:

- не обеспечивают достаточного накопления энергии;
- для получения требуемого напряжения необходимо последовательное подключение нескольких элементов;
- высокий саморазряд;
- малая энергетическая плотность.

Ионистор запасает энергию равную приблизительно 10% энергии никель-металлогидридного или свинцового аккумулятора. В то же время аккумулятор выдает относительно постоянное рабочее напряжение. Стоит учитывать, что электронные элементы, к которым относится ионистор, функционируют при ограниченных значениях питающего напряжения. Заряд, остающийся в ионисторе при достижении минимального напряжения, остается неиспользованным [122].

Для питания высоковольтных потребителей ионисторы предлагается использовать совместно (в параллельном соединении групп) с аккумуляторными батареями. В предложенной комбинации ионисторы снижают нагрузку на аккумуляторные батареи, что значительно повышает срок ее службы, одновременно с этим возрастает и стартовый ток, который способна отдавать данная гибридная установка. К тому же, при совместном использовании АКБ с ионисторами уменьшаются вес и габариты первых, что немаловажно в промышленности.

Для рассматриваемой секции шин номинального напряжения 6 кВ необходимо определить количество ионисторов, необходимое для обеспечения напряжением приемников, включая ответственные [123].

Способ определения необходимой в нашем случае емкости группы последовательно соединенных ионисторов заключается в том, чтобы рассчитать количество энергии, необходимой для обеспечения приемников достаточно мощностью в период максимального потребления, который представляет собой отказ системы питания шины, или в период отказа систем защит.

$$W_{\text{и}} = \frac{1}{2} C_{\text{и}} (U_{\text{нач}}^2 - U_{\text{кон}}^2), \quad (3.8)$$

где $C_{\text{и}}$ - суммарная емкость группы ионисторов, Ф; $U_{\text{нач}}^2$ - напряжение на входе группы ионисторов непосредственно перед началом пикового потребления, В; $U_{\text{кон}}^2$ - напряжение на входе группы ионисторов в момент окончания пикового потребления, В.

Учитывая, что полностью заряженная гибридная аккумуляторная установка (ГАУ) до момента отказа находится в состоянии так называемого бездействия или постоянной подзарядки, выражение (3.8) примет вид

$$W_{\text{и}} = \frac{1}{2} C_{\text{и}} U_{\text{ном}}^2. \quad (3.9)$$

Принимая во внимание тот факт, что на предприятии функционируют ответственные электроприемники большой мощности, требуется достаточно большой ток зарядки и разрядки ионисторов, а также максимальное снижение габаритов гибридной аккумуляторной установки. В качестве наиболее оптимального варианта принимаем высокоемкие ионисторы типа К58-15 на основании [124] с номинальным напряжением $U_{\text{н}} = 5,5$ В и емкостью $C = 10$ Ф. Допустимый ток зарядки и разрядки одного ионистора составляет не более 1,2 А. К тому же ионисторы данного типа имеют наработку на отказ равную 15000 циклов в нормальном режиме эксплуатации со сроком службы не менее 12 лет, что не маловажно.

При этом, чтобы эффективно запасть необходимую для батарей энергию, необходимо ограничить напряжение заряда ионистора до уровня несколько меньшего, чем его допустимое напряжение. С учетом этого примем необходимое количество ионисторов равное

$$N_{\text{и}} = U_{\text{ном}} / U_{\text{и}} = 6000 / 5,5 = 1090,9 \approx 1100.$$

Суммарный запас энергии и мощности группы ионисторов для рассматриваемого случая (секции шин номинального напряжения 6 кВ) будет определяться на основании справочных данных следующим образом:

$$\begin{cases} W_{\text{и.сумм.}} = C \cdot \frac{U^2}{2} \cdot N_{\text{и}} = 10 \cdot \frac{5,5^2}{2} \cdot 1100 = 165,02 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \\ P_{\text{и.сумм.}} = \frac{U^2}{4R} \cdot N_{\text{и}} = \frac{5,5^2}{4 \cdot 0,2} \cdot 1100 = 41,25 \text{ кВт}, \end{cases} \quad (3.10)$$

где C – емкость ионистора, Ф; U – напряжение на электродах, В; R – эффективное последовательное сопротивление, Ом.

Касательно автономности работы при полученных значениях энергии группы ионисторов можно сделать вывод, что полностью заряженные они способны несколько дней питать ряд бытовых электроприемников. Что же касается промышленных электроприемников, например, электродвигателей, то работы такой группы ионисторов хватит максимум на несколько часов, однако для устранения неисправности, приведшей к полному погашению секции, этого может быть вполне достаточно. А учитывая, что в разрабатываемой ГАУ они будут работать совместно с аккумуляторными батареями, при этом запитываясь от другой секции шин, то подобное структурное резервирование значительно будет снижать вероятность отказа оборудования и погашения питания электроприемников.

Согласно принятому типу ионисторов в условиях их гибридной работы со свинцовыми аккумуляторными батареями необходимо соответствие емкостей этих двух составляющих. Принимаем в качестве свинцовых аккумуляторных источников три батареи марки СК-104 с номинальной емкостью 3744 А · ч каждая. На рисунке 3.12 изображена разработанная схема подключения гибридной аккумуляторной установки к нагрузочной шине. Установка состоит из $N_{\text{и}}$ параллельно соединенных ионисторов марки К58-15, которые подключены к трем параллельно соединенным аккумуляторным батареям. Если рассматривать схему разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети, то в качестве нагрузки $R_{\text{н}}$ выступает вход тиристорного управляемого преобразователя напряжения. А для схемы

секции 6 кВ ПС 110/35/6 кВ «Цементная» в качестве нагрузки выступает участок самой шина. Отметим, что указанные на рисунке 3.12 марки и количество ионисторов и аккумуляторных батарей применительны только к конкретной схеме на рисунке 3.10, в других случаях требуется аналогичный подбор на основании выражений, указанных выше.

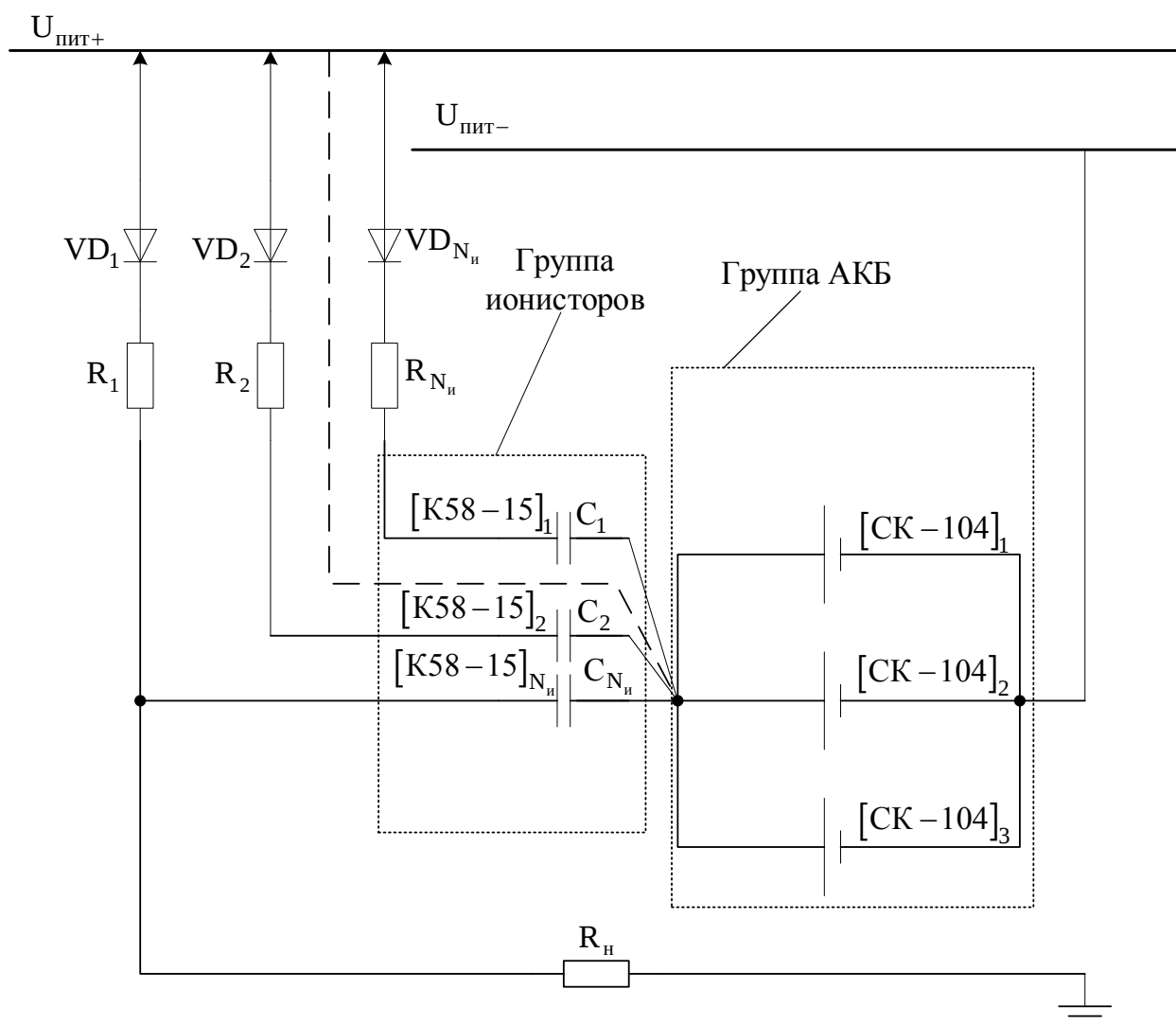


Рисунок 3.12. Схема подключения гибридной аккумуляторной установки

Отметим, что разработанная схема подключения универсальна. Предложенный на рисунке 3.12 способ позволяет:

- запитывает все приемники секции бесперебойно. Этого достаточно для устранения даже серьезных неполадок время (аварийный режим работы системы электроснабжения);

- объединяет в себе достоинства ионисторов и свинцовых аккумуляторных батарей как источников резервного питания, нивелируя основные недостатки обоих;
- повышает надежность системы электроснабжения в целом посредством структурного резервирования, за счет внедрения в систему резервного инновационного элемента питания;
- обеспечивает максимальную автономность работы устройства комбинированного регулирования напряжения сети.

Стоит также отметить, что для повышения времени автономной работы ГАУ рекомендуется отключать некоторые неответственные электроприемники намеренно, в особенности те, кратковременный перерыв в электроснабжении которых не ведет к значительному снижению технико-экономических показателей. Однако подобное решение необходимо использовать только в случаях, отраженных в инструктивных материалах административного, оперативного и оперативно-диспетчерского персонала.

Выводы

1. Разработано устройство комбинированного регулирования напряжения сети, технический результат которого заключается в повышении качества электроэнергии за счет высокоскоростной и непрерывной динамической компенсации провалов напряжения, перенапряжений и высших гармоник в расширенном интервале их регулирования. Осуществляемый устройством способ подавления амплитудно-фазных искажений напряжения основан на динамическом восстановлении формы кривой напряжения сети за счет непрерывного введения в сеть противофазного компенсирующего напряжения через вольтодобавочный трансформатор.

2. Обосновано применение в логическом блоке разработанного устройства кодоимпульсной (дискретной) модуляции управляющего воздействия для тиристорного управляемого преобразователя напряжения. Данное решение позволяет осуществлять введение компенсирующего напряжения в электрическую сеть с гораздо более

высокой скоростью, чем аналогичные разработанные устройства.

3. Разработана схема кодоимпульсной модуляции управляющего воздействия для тиристорного управляемого преобразователя напряжения и обосновано ее применение в логическом блоке разработанного устройства. Данное решение позволяет осуществлять оптимизацию процесса компенсации по критерию максимального быстродействия посредством введения компенсирующего напряжения в электрическую сеть с гораздо более высокой скоростью, чем аналогичные разработанные устройства, тем самым повышая точность и быстродействие компенсации.

4. Разработан способ повышения надежности функционирования разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети за счет обеспечения автономности его работы посредством ионисторно-аккумуляторной схемы. Практическая значимость разработанного способа заключается в повышении надежности работы устройств динамической компенсации, а также других защитных устройств за счет резервирования их питания от гибридной аккумуляторной установки.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТ ВНЕДРЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ

4.1 Вероятностная оценка влияния динамического восстановления напряжения на функционирование систем электроснабжения

При условии рассмотрения амплитудно-фазных искажений напряжения как причины отказов элементов (групп элементов) системы электроснабжения, процессы их возникновения и распространения стоит считать случайными и трудно прогнозируемыми. Исходя из принятого в разделе 2 условного подразделения процессов возникновения и распространения негативных сетевых возмущений по двум типам производств, анализ и построение защиты систем электроснабжения от воздействия АФИН осуществлялось исходя из выводов, построенных на классической теории вероятности, теории случайных импульсных потоков и методов исследования видовых степеней влияния [77-79, 97-100, 125].

Повышение показателей надежности системы электроснабжения, и, как следствие, эффективности ее функционирования реализуется посредством минимизации вероятности отказов элементов системы. Применение устройства комбинированного регулирования напряжения сети позволит в динамическом режиме осуществлять восстановление формы кривой напряжения в распределительной сети за счет чего снизится вероятность случайных отказов элементов системы электроснабжения от воздействия АФИН.

Вначале сравним работу электроприемников отдельной секции шин, к которой подключено устройство комбинированного регулирования напряжения сети, до его использования и во время использования. При этом отметим, что вероятностные параметры самой секции шин и ее присоединений (со всеми сопутствующими элементами: ТТ, ТН, ОВ и т. п.) мы не станем учитывать, т. к. они остаются практически неизменными. Если рассматривать группу ответственных электроприемников, например, мощные электродвигатели прокатного стана (рисунок

2.8), то наиболее оптимальным будет осуществлять сравнение по частоте вынужденных остановок электроприемников. В этом случае суммарное уменьшение частоты остановок (отказов) будет определяться следующим образом [126]:

$$\Delta \bar{\mu}_{\text{сниж.}} = \bar{\mu}_{\text{б.к.}} - (\bar{\mu}_{\text{к.пр.}} + \bar{\mu}_{\text{к.пн.}} + \bar{\mu}_{\text{к.вг.}}) = \bar{\mu}_{\text{б.к.}} - \bar{\mu}_{\text{к.АФИН}}, \quad (4.1)$$

где $\Delta \bar{\mu}_{\text{сниж.}}$ - уменьшение частоты отказов электроприемников; $\bar{\mu}_{\text{б.к.}}$ - частота отказов без использования разработанного устройства; $\bar{\mu}_{\text{к.пр.}}$ - частота отказов при компенсации провалов напряжения; частота отказов при компенсации перенапряжений; $\bar{\mu}_{\text{к.вг.}}$ - частота отказов при компенсации высших гармоник; $\bar{\mu}_{\text{к.АФИН}}$ - частота отказов при полной компенсации рассматриваемых АФИН.

При принятии допущения, что длительность отказа электроприемника $\theta_{\text{эп}}$ в обоих рассматриваемых случаях останется одинаковой, то вероятности отказа работы электроприемников (полный останов двигателей) будут определяться как:

$$\begin{cases} \bar{p}_{\text{б.к.}} = \bar{\mu}_{\text{б.к.}} \cdot \theta_{\text{эп}}; \\ \bar{p}_{\text{к.АФИН}} = \bar{\mu}_{\text{АФИН.к.}} \cdot \theta_{\text{эп}}, \end{cases} \quad (4.2)$$

где $\bar{p}_{\text{б.к.}}$ - вероятность отказа без компенсации; $\bar{p}_{\text{к.АФИН}}$ - вероятность отказа при полной компенсации рассматриваемых АФИН.

Тогда при учете данного допущения и выражений (4.1), (4.2) снижение вероятности будет определяться следующим образом:

$$\Delta \bar{p}_{\text{сниж.}} = \bar{p}_{\text{б.к.}} - \bar{p}_{\text{к.АФИН}} = \Delta \bar{\mu}_{\text{сниж.}} \cdot \theta_{\text{эп}}. \quad (4.3)$$

Далее производится определение вида нового закона распределения времени отказов электроприемников.

Он будет определяться следующим выражением:

$$\beta_{\text{сниж.}}(\theta_{\text{эп}}) = \frac{\bar{\mu}_{\text{б.к.}} \cdot \bar{f}_{\text{б.к.}}(\theta_{\text{эп}}) \cdot \bar{\mu}_{\text{к.АФИН}} \cdot \bar{f}_{\text{к.АФИН}}(\theta_{\text{эп}})}{\bar{\mu}_{\text{б.к.}} + \bar{\mu}_{\text{к.АФИН}}}, \quad (4.4)$$

где $\bar{f}_{\text{б.к.}}(\theta_{\text{эп}})$ - плотность вероятности продолжительности отказов электроприемников без использования устройства комбинированного регулирования напряжения сети; $\bar{f}_{\text{к.АФИН}}(\theta_{\text{эп}})$ - плотность вероятности продолжительности отказов электроприемников при использовании устройства комбинированного регулирования напряжения сети.

Вышеуказанные доводы справедливы для существующих систем электроснабжения. Очевидно, что гораздо эффективнее учитывать использование разработанного устройства и мероприятия еще на стадии проектирования объекта (либо его реконструкции, модернизации). В этом случае в проектируемую систему электроснабжения вносится новое оборудование и, как следствие, изменяются параметры надежности ее элементов и системы в целом. Расчеты, проводимые по выражениям (4.1) – (4.4), становятся малоприменимы из-за возрастающей погрешности. Необходимо производить расчет показателей надежности проектируемой (модернизируемой) системы электроснабжения на основании планируемой топологии сети.

Например, схема, представленная на рисунке 3.11, имеет всего 3 уровня согласно уровневой теории Б.И. Кудрина [44]. В отношении расчета показателей надежности проектируемой (модернизируемой) системы электроснабжения каждый из уровней заменяется эквивалентным элементом (рисунок 4.1). В этом случае эквивалентная схема будет представлять собой последовательное соединение трех эквивалентных элементов. Параметры надежности общего эквивалента будут определяться следующим образом [127]:

$$\bar{P}_{\text{СЭС.экв.}} = \sum_{i=1}^3 \bar{P}_i = \bar{P}_{\text{СШ-110кВ}} + \bar{P}_{\text{сек-6кВ}} + \bar{P}_{\text{эп}}; \quad (4.5)$$

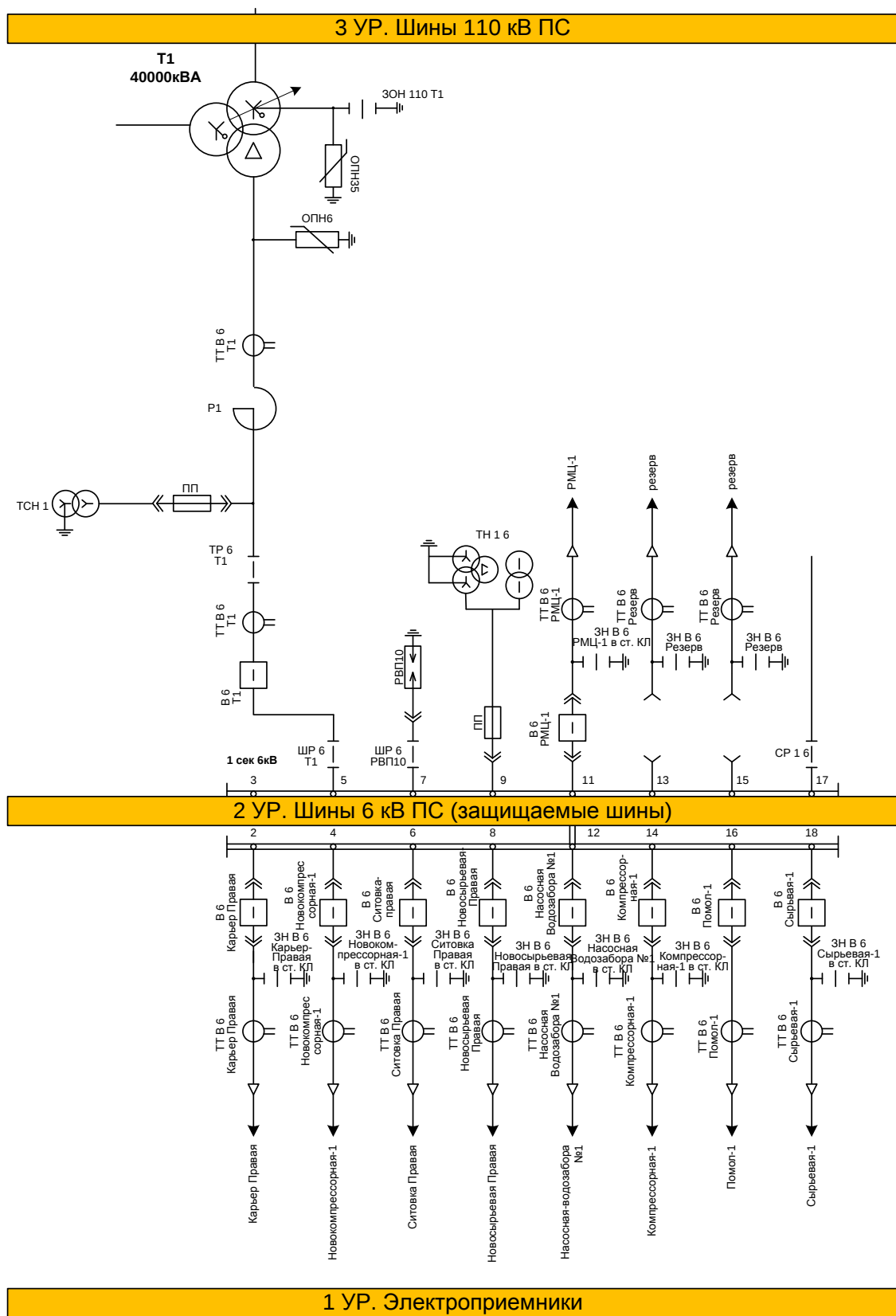


Рисунок 4.1. Рассматриваемая часть схемы электроснабжения
ПС 110/35/6кВ «Цементная»

$$\bar{\mu}_{\text{СЭС.экв.}} = \sum_1^3 \bar{\mu}_i = \bar{\mu}_{\text{СШ-110кВ}} + \bar{\mu}_{\text{сек-6кВ}} + \bar{\mu}_{\text{ЭП}}; \quad (4.6)$$

$$\bar{\theta}_{\text{СЭС.экв.}} = \frac{\bar{P}_{\text{СЭС.экв.}}}{\bar{\mu}_{\text{СЭС.экв.}}}; \quad (4.7)$$

$$P_{\text{Э(1)}} = 1 - \bar{P}_{\text{СЭС.экв.}}; \quad (4.8)$$

$$\bar{\tau}_{\text{Э(1)}} = \frac{P_{\text{СЭС.экв.}}}{\bar{\mu}_{\text{СЭС.экв.}}} = \frac{1 - \bar{P}_{\text{СЭС.экв.}}}{\bar{\mu}_{\text{СШ-110кВ}} + \bar{\mu}_{\text{сек-6кВ}} + \bar{\mu}_{\text{ЭП}}}; \quad (4.9)$$

$$f_{\text{Э(1)}} = \sum_1^3 \bar{\mu}_i \cdot f_i(\theta) \cdot (\bar{\mu}_i)^{-1} = \bar{\mu}_{\text{СШ-110кВ}}(\theta) \cdot f_{\text{СШ-110кВ}}(\theta) \cdot (\bar{\mu}_{\text{СШ-110кВ}})^{-1} + \\ + \bar{\mu}_{\text{сек-6кВ}}(\theta) \cdot f_{\text{сек-6кВ}}(\theta) \cdot (\bar{\mu}_{\text{сек-6кВ}})^{-1} + \bar{\mu}_{\text{ЭП}}(\theta) \cdot f_{\text{ЭП}}(\theta) \cdot (\bar{\mu}_{\text{ЭП}})^{-1}, \quad (4.10)$$

где $\bar{P}_{\text{СЭС.экв.}}$, $\bar{P}_{\text{СШ-110кВ}}$, $\bar{P}_{\text{сек-6кВ}}$, $\bar{P}_{\text{ЭП}}$ - суммарная вероятность отказа общего эквивалента, системы шин (СШ) 110 кВ, секции 6 кВ и электроприемника соответственно; $\bar{\mu}_{\text{СЭС.экв.}}$, $\bar{\mu}_{\text{СШ-110кВ}}$, $\bar{\mu}_{\text{сек-6кВ}}$, $\bar{\mu}_{\text{ЭП}}$ - частота отказа общего эквивалента, СШ 110 кВ, секции 6 кВ и электроприемника соответственно; $\bar{\theta}_{\text{СЭС.экв.}}$ - средняя длительность отказа общего эквивалента; $P_{\text{Э(1)}}$ - вероятность работы общего эквивалента; $\bar{\tau}_{\text{Э(1)}}$ - средняя длительность возмущения в общем эквиваленте; $f_{\text{Э(1)}}$, $f_{\text{СШ-110кВ}}$, $f_{\text{сек-6кВ}}$, $f_{\text{ЭП}}$ - плотность вероятности длительностей отказа всех рассматриваемых уровней общего эквивалента, СШ 110 кВ, секции 6 кВ и электроприемника соответственно.

Однако данную схему (рисунок 4.1) можно рассмотреть и отдельно в отношении защищаемого уровня (УР-2, секция шин 6 кВ, к которой присоединены электроприемники). В этом случае защищаемые элементы уровня будут соединены параллельно, т. к. они все присоединены к одной секции.

Следовательно, параметры надежности проектируемой (модернизируемой) системы электроснабжения с учетом подключения устройства комбинированного регулирования напряжения сети будут определяться следующим образом:

$$P_{CЭC(YP)} = 1 - \prod_{i=1}^n \bar{p}_i; \quad (4.11)$$

$$\bar{\tau}_{CЭC(YP)} = \left(\prod_{i=1}^n \bar{\tau}_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \right); \quad (4.12)$$

$$\bar{\tau}_{CЭC(H.YP)} = \frac{\prod_{i=1}^n \bar{\tau}_{H.YP} \bar{\theta}_i}{\sum_{i=1}^n (\bar{\tau}_{H.YP} + \bar{\theta}_i)}; \quad (4.13)$$

$$\bar{\tau}_{CЭC(B.YP)} = \frac{\prod_{i=1}^n \bar{\theta}_i \bar{\tau}_{B.YP}}{\sum_{i=1}^n \bar{\theta}_i + \bar{\tau}_{B.YP}}; \quad (4.14)$$

$$\bar{\mu}_{CЭC(YP)} = \prod_{i=1}^n (1 - \bar{p}_i) (\bar{\tau}_i)^{-1}; \quad (4.15)$$

$$\bar{\theta}_{CЭC(YP)} = \prod_{i=1}^n \bar{p}_i (\bar{\mu}_i)^{-1}; \quad (4.16)$$

$$f_{CЭC(YP)} = \prod_{i=1}^n f_i(\theta_{эп.i}), \quad (4.17)$$

где n – количество электроприемников, подключенных к защищаемой секции шин; $P_{CЭC(YP)}$ – вероятность работы элементов защищаемого уровня; $\bar{\tau}_{CЭC(YP)}$ – средняя длительность возмущения уровня; $\bar{\tau}_{CЭC(B.YP)}$ – средняя длительность возмущения уровня с учетом средней длительности отказа вышестоящих уровней; $\bar{\tau}_{CЭC(H.YP)}$ – средняя длительность возмущения уровня с учетом средней длительности отказа нижестоящих уровней; $\bar{\mu}_{CЭC(YP)}$ – частота отказов защищаемого уровня; $\bar{\theta}_{CЭC(YP)}$ – средняя длительность отказов защищаемого уровня; $f_{CЭC(YP)}$ – плотность вероятности длительностей отказов защищаемого уровня.

Стоит отметить, что рассмотренные выше выражения (4.11) – (4.17) описывают работу защищаемого уровня при любом количестве параллельно подключенных присоединений. Исходя из условий установки устройства комбинированного регулирования напряжения сети на одну секцию шин, к которой присоединены электроприемники, другие схемы расчета не рассматривались.

Внедрение в систему электроснабжения устройства комбинированного регулирования напряжения сети напряжения не меняет величину продолжительности восстановления отказов отдельных электроприемников. Однако оно значительно снижает их частоту и, как следствие, увеличивает время наработки на отказ, вероятность работы электроприемника и т. п. Из чего следует, что после внедрения устройства комбинированного регулирования напряжения сети в систему электроснабжения показатели надежности на основании выражений (4.11) – (4.17) будут иметь следующие изменения:

$$\Delta p_{\text{СЭС(УР)}} = P_{\text{б.к.(УР)}} - P_{\text{СЭС(УР)}} = P_{\text{б.к.(УР)}} - \left(1 - \prod_{i=1}^n \bar{p}_i \right); \quad (4.18)$$

$$\Delta \bar{\tau}_{\text{СЭС(УР)}} = \bar{\tau}_{\text{б.к.(УР)}} - \bar{\tau}_{\text{СЭС(УР)}} = \bar{\tau}_{\text{б.к.(УР)}} - \frac{\prod_{i=1}^n \bar{\tau}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i}; \quad (4.19)$$

$$\Delta \bar{\tau}_{\text{СЭС(Н.УР)}} = \bar{\tau}_{\text{б.к.(УР)}} - \bar{\tau}_{\text{СЭС(Н.УР)}} = \bar{\tau}_{\text{б.к.(УР)}} - \frac{\prod_{i=1}^n \bar{\tau}_{\text{Н.УР}} \bar{\theta}_i}{\sum_{i=1}^n (\bar{\tau}_{\text{Н.УР}} + \bar{\theta}_i)}; \quad (4.20)$$

$$\Delta \bar{\tau}_{\text{СЭС(В.УР)}} = \bar{\tau}_{\text{б.к.(УР)}} - \bar{\tau}_{\text{СЭС(В.УР)}} = \bar{\tau}_{\text{б.к.(УР)}} - \frac{\prod_{i=1}^n \bar{\theta}_i \bar{\tau}_{\text{В.УР}}}{\sum_{i=1}^n \bar{\theta}_i + \bar{\tau}_{\text{В.УР}}}; \quad (4.21)$$

$$\Delta \bar{\mu}_{\text{СЭС(УР)}} = \bar{\mu}_{\text{б.к.(УР)}} - \bar{\mu}_{\text{СЭС(УР)}} = \bar{\mu}_{\text{б.к.(УР)}} - \prod_{i=1}^n (1 - \bar{p}_i) (\bar{\tau}_i)^{-1}; \quad (4.22)$$

$$\Delta \bar{\theta}_{\text{СЭС(УР)}} = \bar{\theta}_{\text{б.к.(УР)}} - \bar{\theta}_{\text{СЭС(УР)}} = \bar{\theta}_{\text{б.к.(УР)}} - \prod_{i=1}^n \bar{p}_i (\bar{\mu}_i)^{-1}, \quad (4.23)$$

где $\Delta p_{\text{СЭС(УР)}}$ - изменение вероятности работы защищаемого уровня; $p_{\text{б.к.(УР)}}$ - вероятность работы защищаемого уровня без компенсации; $\Delta \bar{\tau}_{\text{СЭС(УР)}}$ - изменение средней длительности возмущения защищаемого уровня; $\bar{\tau}_{\text{б.к.(УР)}}$ - средняя длительность возмущения защищаемого уровня без компенсации; $\Delta \bar{\tau}_{\text{СЭС(Н.УР)}}$ и $\Delta \bar{\tau}_{\text{СЭС(В.УР)}}$ - изменение средней длительности возмущения защищаемого уровня с учетом средней длительности отказа нижестоящих и вышестоящих уровней соответственно; $\Delta \bar{\mu}_{\text{СЭС(УР)}}$ - изменение частоты отказов защищаемого уровня; $\bar{\mu}_{\text{б.к.(УР)}}$ - частота отказов защищаемого уровня без компенсации; $\Delta \bar{\theta}_{\text{СЭС(УР)}}$ - изменение средней длительности отказов защищаемого уровня; $\bar{\theta}_{\text{б.к.(УР)}}$ - средняя длительность отказов защищаемого уровня без компенсации.

Таким образом обосновывается эффективность от внедрения в систему электроснабжения устройства комбинированного регулирования напряжения сети [128]. Представленные выше выражения (4.18) - (4.23) являются универсальными для оценки изменений показателей надежности отдельных защищаемых уровней системы электроснабжения.

4.2 Применение динамического восстановления напряжения в электрических сетях на этапе планирования электрических режимов

Осуществление технологических присоединений в рамках реализации схем и программ развития (СиПР) единой энергетической системы России (ЕЭС) приводит к постепенной перегруженности распределительных электрических сетей, что ощутимо сказывается на колебаниях параметров режимов работы систем электроснабжения на всех «уровнях» системы электроснабжения. Соответствен-

но, начинает падать энергоэффективность промышленных предприятий, надежность и безотказность их систем электроснабжения. Применение разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети во многом повышает энергоэффективность работы систем электроснабжения. Однако помимо анализа многочисленных статистических данных об отклонениях параметров напряжения сети от допустимых значений следует также учитывать некоторые особые электрические режимы, на первый взгляд не связанные с возникновением и распространением АФИН. Рассмотренные ниже режимы наглядно доказывают необходимость использования именно постоянной, непрерывной динамической компенсации напряжения [129].

Рассмотрим первую схемно-режимную ситуацию (рисунок 4.2). Двухтрансформаторная подстанция, шины низкого напряжения которой помимо присоединенной транзитной ЛЭП до энергосистемы 3 (ЭС-3) питают ряд крупных потребителей (ЭП-1 – ЭП-5) электроэнергии. Шины высокого напряжения соединены с энергосистемами 1 и 3 (ЭС-1 и ЭС-2). Оба трансформатора АТ-1 и АТ-2 оснащены устройствами автоматики ограничения перегрузки оборудования (АОПО), срабатывающими при превышении уставки по току через трансформаторы для исключения их перегрузки.

В обмотках АТ-1 возникает короткое замыкание, которое ликвидируется без выдержки времени работой дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ). При этом схемно-режимная ситуация в ЭС-2 или ЭС-3 зачастую может сложиться таким образом, что токи через АТ-1 и АТ-2 протекали уже на близких к уставкам срабатывания АОПО значениях.

Соответственно, после ликвидации короткого замыкания (КЗ) на АТ-1 ток через второй трансформатор (АТ-2) возрастает еще больше и достигает уставки срабатывания АОПО, которая отключает переток мощности к шинам низкого напряжения подстанции и создает дефицит электропотребления для ЭП-1...ЭП-5, что значительно искажает кривую напряжения, поступающего к потребителям. Вывод: в данной схемно-режимной ситуации задача устройства комбинированного регулирования напряжения сети состоит в сдерживании срабатывания АОПО

до момента восстановления нормального режима во внешних энергосистемах либо до момента включения одного из трансформаторов.

Рассмотрим вторую схемно-режимную ситуацию (рисунок 4.3). Имеются две подстанции – ПС «А» и ПС «Б», соединенные транзитным фидером. На каждой подстанции имеются присоединения, питающие потребителей. Предположим, что на шинах низкого напряжения ПС «Б» произошло короткое замыкание. Очевидно, что КЗ должно быть ликвидировано защитами ввода на ПС «Б», однако исходя из обширного анализа работы устройств РЗА [130], может произойти отказ защит (как в рассматриваемом случае – отказ защит ввода). Согласно п.3.2.15 и 3.2.25 действующих правил устройства электроустановок для действия при отказах защит или выключателей смежных элементов сети следует предусматривать резервную защиту, имеющую функции дальнего резервного действия [18].

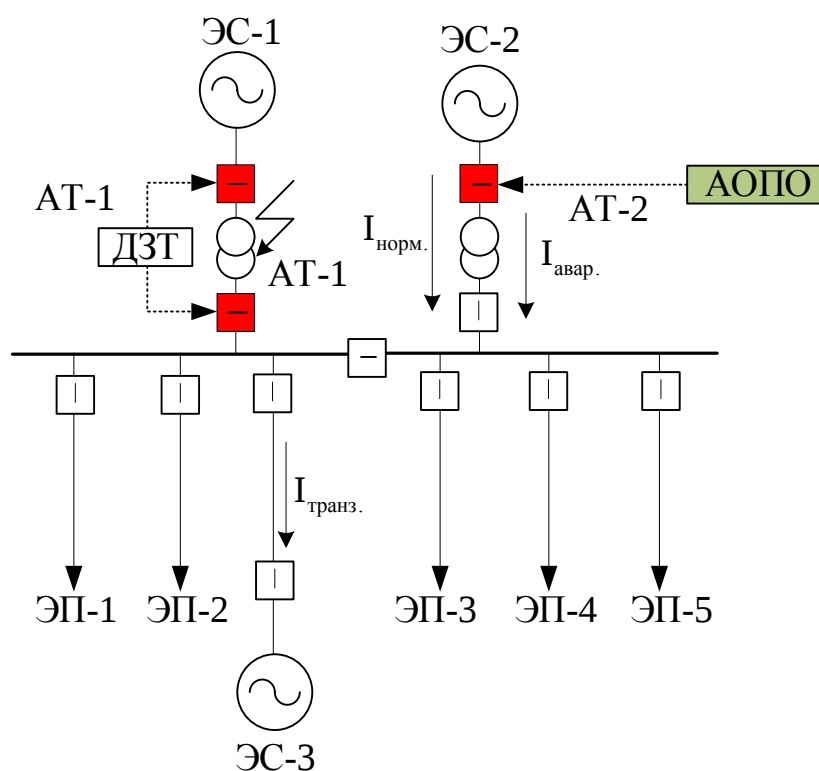


Рисунок 4.2. Изменение режима при работе АОПО

В этом случае при КЗ на шинах ПС «Б» и отказе защит ввода ПС «Б», на ПС «А» с выдержкой времени (до 3-4 сек.) защита транзитного фидера отключит ввод дальним резервированием, т. к. защиты дальнего резервирования обычно отстраи-

ваются от времени работы других защит. Такая длительная ликвидация КЗ приводит в эти 3-4 с. к существенному отклонению показателей качества электроэнергии (в том числе и параметров напряжения) на вводах электроприемников ЭП-1...ЭП-5 ввиду распространения по сети возмущений от КЗ. Значительно возрастает вероятность повреждения электросетевого оборудования и оборудования потребителей электроэнергии. Вывод: в данной схемно-режимной ситуации задача устройства комбинированного регулирования напряжения сети состоит в непрерывной динамической компенсации распространяющихся от воздействия КЗ сетевых возмущений на время до срабатывания защит дальнего резервирования.

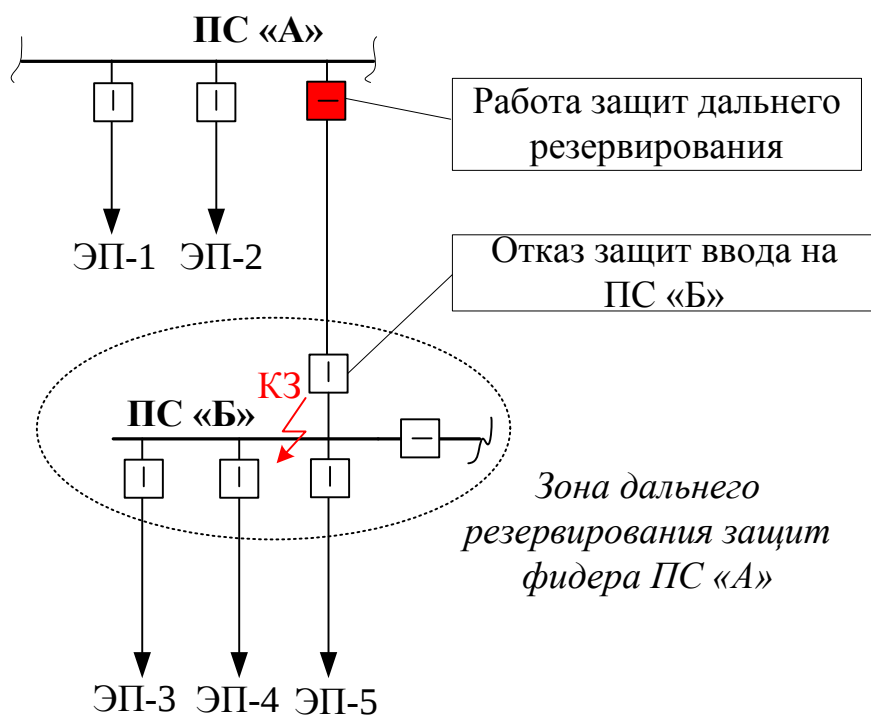


Рисунок 4.3. Изменение режима при работе защит дальнего резервирования

Далее рассмотрим такой режим как возникновение в сети синхронных качаний и их переход в асинхронный режим (рисунки 4.4 - 4.6). Казалось бы, данный процесс происходит очень далеко от конечного потребителя электроэнергии, где-то на высших «уровнях» системы электроснабжения. Результаты проведенного расчета в программном комплексе RastrWin показывают, что синхронные качания

В заключении рассмотрим схемно-режимную ситуацию (рисунок 4.7), когда выходные связи устройства комбинированного регулирования напряжения сети связаны одновременно с двумя секциями одной системы шин, соединенных шинно-соединительным выключателем (ШСВ). Решением данной схемно-режимной ситуации для разработанного устройства будет являться отстройка от коротких замыканий на всех смежных с защищаемой шиной участках, в том числе и от соседней секции при включенном в работу шинно-соединительном выключателе.



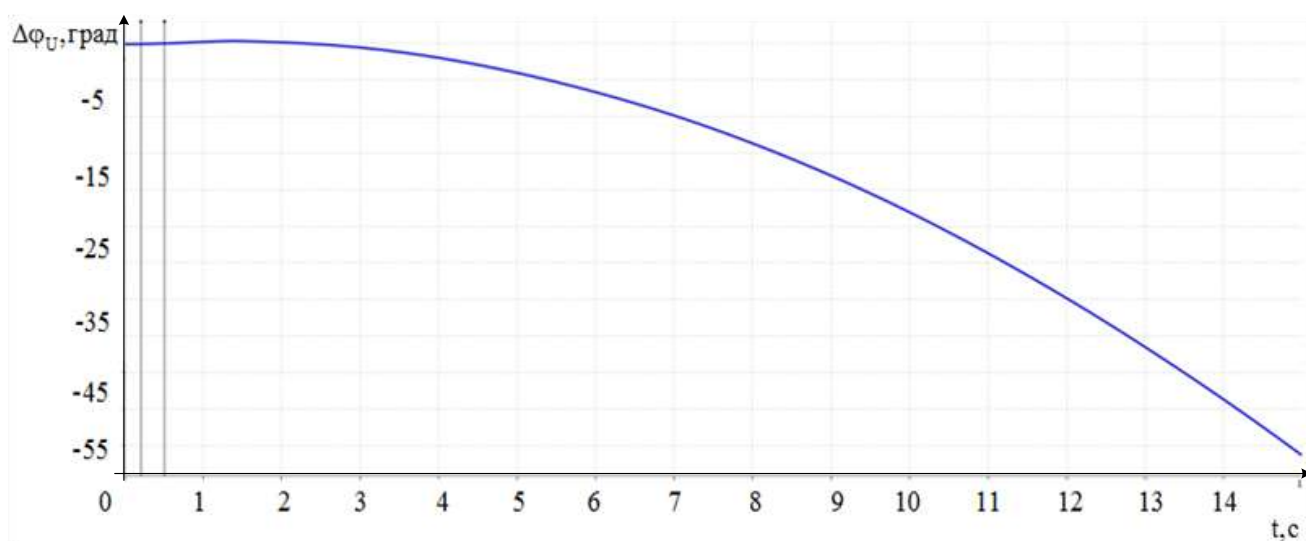


Рисунок 4.5. Разность углов ЭДС генератора и напряжения в месте замера

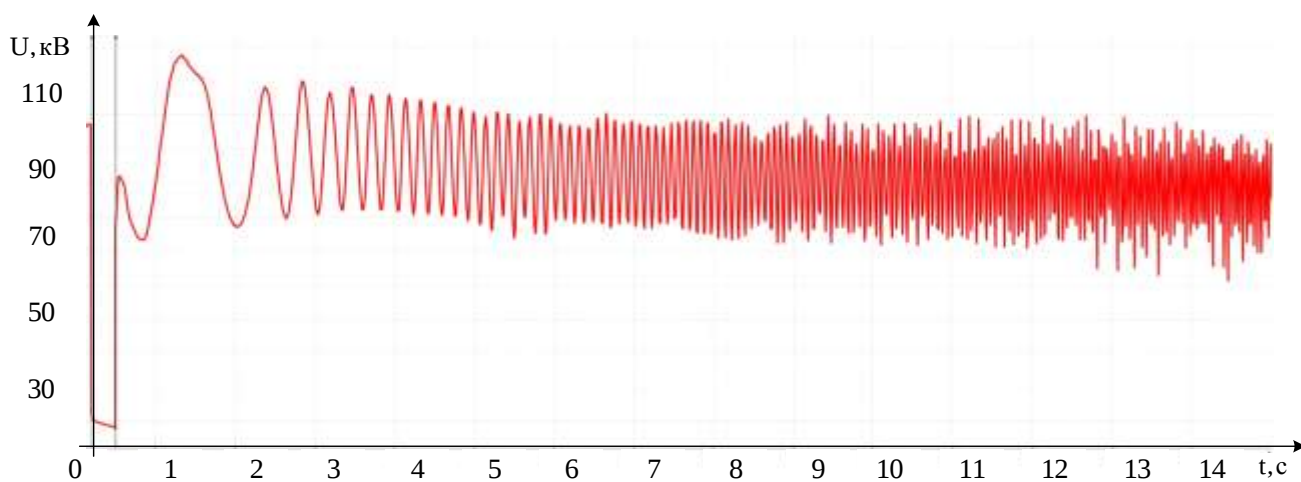


Рисунок 4.6. График колебания напряжения в месте замера

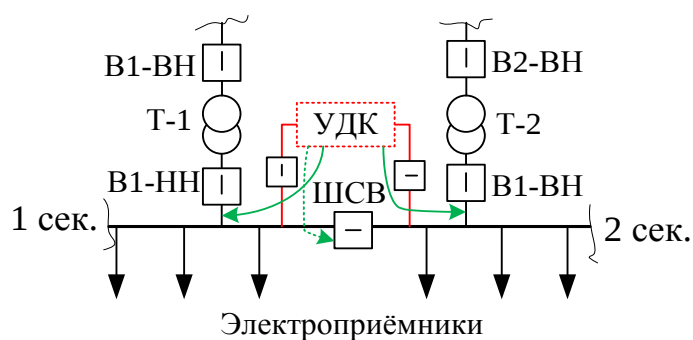


Рисунок 4.7. Техническое решение отстройки от режима сети:

Т-1, Т-2 – трансформаторы 1 и 2 секции соответственно; УДК – устройство динамической компенсации; В1-ВН, В2-ВН и В1-НН, В2-НН – выключатели по высокой и низкой сторонам напряжения трансформатора первой и второй секции соответственно

Т. е. при коротком замыкании на защищаемой секции необходимо работать на компенсацию возмущений на соседней секции пока не будет ликвидировано КЗ на защищаемой секции. Для резервирования может предполагаться также отправка сигнала на отключение ШСВ в комплекты релейной защиты шин. Отстройку предполагается осуществлять при помощи блокирующего реле мощности.

Таким образом, при разработке мероприятий, направленных на компенсацию АФИН в распределительных сетях, следует учитывать необходимость рассмотрения следующих особых режимов:

- при неправильной работе устройств РЗА (отказ, ложная и излишняя работа);
- при работе устройств противоаварийной и режимной автоматики в ремонтных и аварийных схемах;
- при возникновении синхронных качаний и асинхронного режима в системе, сопровождающихся глубоким снижением напряжения в питающей сети;
- при помощи направленного реле мощности производить отстройку от коротких замыканий на всех смежных с защищаемой шиной участках, в том числе и от соседней секции при включенном в работу шинно-соединительном выключателе.

4.3 Техничко-экономическая оценка эффективности функционирования систем электроснабжения от минимизации резкопеременных сетевых возмущений

Любая модернизация и реконструкция объектов электроэнергетики, в том числе с целью повышения параметров качества электроэнергии (в рассматриваемом случае – параметров напряжения), требуют затрат. Очевидно, что разработанное устройство и мероприятия могут быть применены только в том случае, если затраты на среднесрочную перспективу их использования значительно меньше экономического эффекта за тот же период. Разработанное устройство комбинированного регулирования напряжения сети позволяет существенно повысить эффек-

тивность функционирования систем электроснабжения за счет быстрой компенсации провалов, перенапряжений и высших гармоник.

Анализ экономической эффективности выполним классическим методом. Разовые единовременные вложения для внедрения устройства комбинированного регулирования напряжения сети в систему электроснабжения определяются на основании следующего выражения [96]:

$$Z_{\text{кап}} = E_H K_D, \quad (4.24)$$

где $E_H = 0,15$ - нормативный коэффициент эффективности единовременных капитальных вложений (принимается для индустриального сектора); K_D - дополнительные капитальные вложения при внедрении устройства комбинированного регулирования напряжения сети.

Размер дополнительных капитальных вложений при внедрении устройства комбинированного регулирования напряжения сети рассчитывается для рассматриваемого случая следующим образом:

$$K_D = (1 + K_T) \cdot K_Y, \quad (4.25)$$

где $K_T = 0,06$ - коэффициент транспортных затрат; K_Y - стоимость устройства комбинированного регулирования напряжения сети.

Таким образом, на основании выражения (4.25) размер дополнительных капитальных вложений будет определяться как

$$K_D = (1 + 0,06) \cdot K_Y = 1,06 \cdot K_Y. \quad (4.26)$$

Далее рассчитываются расходы на амортизацию при внедрении разработанного устройства и дальнейшей его эксплуатации:

$$З_A = \frac{K_y \cdot H_A \cdot K_{сн}}{100}, \quad (4.27)$$

где H_A - нормированный размер амортизационных отчислений на текущие, капитальные и восстановительные ремонтные работы устройства комбинированного регулирования напряжения сети; $K_{сн}$ - коэффициент снижения надежности системы электроснабжения при выводе в ремонт устройства комбинированного регулирования напряжения сети.

Затраты на материалы и запасные части принимаются, как правило, из расчета 5% стоимости устройства на весь срок его эксплуатации, т.е. $З_M = 0,05 \cdot K_y$. Далее рассчитываются затраты на монтаж и демонтаж устройства комбинированного регулирования напряжения сети (при выполнении квалифицированным персоналом в установленные проектной документации сроки):

$$З_{М.Д.} = K_{доп} \cdot n_{М.Д.} \cdot \sum_{i=1}^{m_{Д.М.}} N_i \cdot K_{тар.i.}, \quad (4.28)$$

где $K_{доп}$ – коэффициент, учитывающий среднюю доплату к заработной плате персонала, осуществляющего монтаж (демонтаж) устройства комбинированного регулирования напряжения сети; $n_{М.Д.}$ – количество дней на монтаж и демонтаж устройства комбинированного регулирования напряжения сети; $m_{М.Д.}$ – число рабочих, осуществляющих монтаж (демонтаж) устройства комбинированного регулирования напряжения сети; N_i – число монтажников i -го разряда, осуществляющих монтаж (демонтаж) устройства комбинированного регулирования напряжения сети; $K_{тар.i.}$ – тарифная ставка монтажников i -го разряда.

Очевидно, что периодическое обслуживание разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети потребует дополнительной квалификации для персонала объектов электроэнергетики. Следовательно, в дальнейших расчетах необходимо учесть увеличение фонда заработ-

ной платы персонала, осуществляющего периодические профилактические обслуживание и ремонт устройства комбинированного регулирования напряжения сети. Данные затраты будут определяться следующим образом:

$$З_{зф} = K_{доп} \cdot n_{м.д.} \cdot \sum_{i=1}^m (N'_i \cdot K'_{тар.i.} - N''_i \cdot K''_{тар.i.}), \quad (4.29)$$

где m – общая численность персонала, занятого обслуживанием и ремонтом электрооборудования на объекте; N' и N'' – численность обслуживающего персонала i -го разряда до и после внедрения на объекте устройства комбинированного регулирования напряжения сети соответственно; $K'_{тар.i.}$ и $K''_{тар.i.}$ – тарифная ставка обслуживающего персонала i -го разряда обслуживающего электрооборудование до и после внедрения устройства комбинированного регулирования напряжения сети соответственно.

Таким образом, прибыль от внедрения и применения устройства комбинированного регулирования напряжения сети составит:

$$\mathcal{E}_y = \mathcal{E} - \left(E_H K_D + \frac{K_y \cdot H_A \cdot K_{сн}}{100} + З_M + З_{м.д.} + З_{зф} \right), \quad (4.30)$$

где $\mathcal{E}$ и $\mathcal{E}_y$ – суммарные затраты на эксплуатацию и обслуживание защищаемого электрооборудования объекта электроэнергетики до и после внедрения устройства комбинированного регулирования напряжения сети соответственно.

Однако для наиболее точного определения экономической эффективности от внедрения устройства комбинированного регулирования напряжения сети необходимо произвести расчет относительно компенсируемого ущерба от неиспользования устройства.

Прибыль от внедрения и применения устройства комбинированного регулирования напряжения сети в отношении компенсируемого ущерба составит [131, 132]:

$$\mathcal{E}'_y = Y_P + Y_{cp} + Y_{ЭП.АФИН} + Y_{АФИН} - I_{yк}, \quad (4.31)$$

где Y_P - ущерб от дополнительных потерь мощности, связанных с воздействием АФИН; Y_{cp} - ущерб от снижения срока службы электрооборудования; $Y_{ЭП.АФИН}$ - ущерб от дополнительных потерь мощности, связанных с воздействием АФИН; $Y_{АФИН}$ - средний ущерб от последствий воздействия АФИН; $I_{yк}$ - приведенные затраты на компенсацию реактивной мощности опытно-конструкторские работы при внедрении устройства комбинированного регулирования напряжения сети.

Далее требуется произвести расчет неизвестных переменных в выражении, при этом значение $Y_{АФИН}$ определяется по среднегодовому ущербу предприятия (4.31):

$$Y_P = 0,01 \cdot C_{э} \sum_{i=1}^m \Delta P_i \cdot T_i, \quad (4.32)$$

где $C_{э}$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб./кВт·ч; ΔP_i – дополнительные потери активной мощности в i -ой группе электроприемников, кВт; T_i – продолжительность работы в году i -ой группы электроприемников, ч/год.

$$Y_{cp} = \sum_{i=1}^m Z_i \cdot \frac{\gamma_i - 1}{1 + E_n \cdot T_{ni}}, \quad (4.33)$$

где Z_i – приведенные затраты на i -ую группу электроприемников, руб./год; γ_i – кратность снижения срока службы для i -ой группы электроприемников; T_{ni} – номинальный срок службы отдельного электроприемника, год; E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, год⁻¹.

$$Y_{ЭП.АФИН} = \Delta P_{доп} \cdot \tau_n \cdot C_{э} \cdot 10^{-2}, \quad (4.34)$$

где $\Delta P_{\text{доп}}$ – дополнительные потери мощности, кВт; $\tau_{\text{п}}$ – время максимума потерь, ч.

$$I_y = (E_H + H_A) \cdot K_y. \quad (4.35)$$

Подставляя результаты выражений (4.32)-(4.35) в (4.31), получим значение прибыли от внедрения и применения устройства комбинированного регулирования напряжения сети в отношении компенсируемого ущерба. Отметим, что, опираясь на инженерный опыт, для наиболее точного расчета следует принимать во внимание наименьшее из значений $\mathcal{E}'_y$ и $\mathcal{E}_y$.

Выводы

1. Определена эффективность от внедрения разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети посредством оценки изменения вероятностных параметров систем электроснабжения, например: суммарное уменьшение частоты отказов, снижение вероятности отказов, вид нового закона распределения и т. п.

2. Обоснована необходимость применения устройства комбинированного регулирования напряжения сети в целях восстановления параметров кривой напряжения сети в различных электрических режимах таких как неправильная работа устройств РЗА, работа устройств РЗА в аварийных и ремонтных схемах сети, синхронных качаниях и асинхронном ходе.

3. Обоснована необходимость отстройки устройств комбинированного регулирования напряжения сети от коротких замыканий на смежных участках электрической сети.

4. Определен технико-экономический эффект от внедрения в систему электроснабжения разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети. При этом оценка проведена двумя способами: относительно производимых затрат на установку, ремонт и дальнейшее обслуживание устройства и относительно компенсируемого ущерба от неиспользования устройства, т. е. относительно текущих потерь. По итогам оценки предлагается выбирать более низкий показатель от двух способов определения технико-экономического эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена задача по повышению эффективности функционирования систем электроснабжения электротехнических комплексов промышленных предприятий за счет минимизации негативных сетевых возмущений резкопеременного характера посредством их динамической компенсации. Основные результаты работы и выводы заключаются в следующем:

1. По результатам проведенного для системы электроснабжения листопркатного стана сталеплавильного производства анализа полученных математических зависимостей и закономерностей возникновения и распространения негативных сетевых возмущений резкопеременного характера получена суммарная плотность вероятности длительности пауз потока резкопеременных нагрузок, определяемая с учетом введенного корректирующего коэффициента возмущений. Также для системы электроснабжения 6-35 кВ на ПС 110/35/6 кВ «Цементная» Филиала ПАО «МРСК Центра» - «Липецкэнерго» получены табулированные и графические распределения видовой степени влияния провалов напряжения, перенапряжений и высших гармоник посредством оценки видообразующих параметров интервалов наихудших возмущений. Контролируя значения коэффициента возмущения, обеспечивается эффективность динамической компенсации возмущений. А результаты исследования видовых степеней влияния могут быть использованы в качестве подхода к упорядочиванию и, тем самым, упрощению процесса оценки качества электроэнергии и других параметров функционирования систем электроснабжения.

2. По результатам проведенного в программно-аппаратном комплексе «Matlab» версии R2016a имитационного моделирования влияния резкопеременных сетевых возмущений на форму кривой напряжения в распределительной электрической сети была определена степень воздействия такого рода сетевых возмущений, выражающаяся в существенном (более 40 %) отклонении параметров формы кривой напряжения сети относительно нормативных значений. Данные результаты были получены посредством анализа осциллограммы напряжения в процессе проведенного имитационного моделирования.

3. Разработано устройство комбинированного регулирования напряжения сети, технический результат которого заключается в повышении качества электроэнергии за счет высокоскоростной и непрерывной динамической компенсации провалов напряжения, перенапряжений и высших гармоник в расширенном интервале их регулирования. Осуществляемый устройством способ подавления амплитудно-фазных искажений напряжения основан на динамическом восстановлении формы кривой напряжения сети за счет непрерывного введения в сеть противофазного компенсирующего напряжения через вольтодобавочный трансформатор.

4. Разработана схема кодоимпульсной модуляции управляющего воздействия для тиристорного управляемого преобразователя напряжения и обосновано ее применение в логическом блоке разработанного устройства. Данное решение позволяет осуществлять оптимизацию процесса компенсации по критерию максимального быстродействия посредством введения компенсирующего напряжения в электрическую сеть с гораздо более высокой скоростью, чем аналогичные разработанные устройства, тем самым повышая точность и быстродействие компенсации. Дополнительно был разработан способ повышения надежности функционирования разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети за счет обеспечения автономности его работы посредством ионисторно-аккумуляторной схемы. Практическая значимость разработанного способа заключается в повышении надежности работы устройств динамической компенсации, а также других защитных устройств за счет резервирования их питания от гибридной аккумуляторной установки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов В.С, Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат. 1987. 315 с.
2. Пелисье Р. Энергетические системы. М.: Высшая школа. 1982. С. 566.
3. Ермилов А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат. 1983. 228 с.
4. Zatsepina V.I., Zatsepin E.P. Reliability of power supply systems under the influence of negative factors // 2017 Int. Conf. on Industrial Engineering, Application and Manufacturing (ICIEAM). 2017. pp. 1–4.
5. Shpiganovich A.N., Zatsepina V.I., Shpiganovich A.A, Stepanov V.M. Power-supply systems reliability control // EAI Endorsed Transactions on Energy Web. 2018. vol. 5. is. 19. p. 155083.
6. Мельников А.Н. Электрические сети и системы. М.: Энергия. 1975. 462 с.
7. Регулирование напряжения и обеспечение баланса реактивной мощности
Режим доступа URL: <https://www.elec.ru/articles/regulirovanie-napryazheniya-i-obespechenie-balansa>. (дата обращения: 01.07.2015).
8. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартиформ. 2014. 20 с.
9. Zatsepina V.I., Zatsepin E.P., Shachnev O.Y. Ensuring effective functioning of compensating device STATCOM in metallurgical enterprises // Int. Russian Automation Conf. 2018. pp. 1–6.
10. Filimonova A.A., Zatsepin E.P., Zatsepina V.I. Multilevel control of power consumption at metallurgical plants // Int. Russian Automation Conf. 2018. pp. 1–4.
11. Зацепина В.И., Зацепин Е.П., Шачнев О.Я. 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.

12. Зорин В.В., Тисленко В.В. Системы электроснабжения общего назначения. Чернигов: ЧГТУ. 2005. С.341.
13. Компенсация реактивной мощности. Режим доступа URL: <http://www.matic.ru/reactive-power-compensation>. (дата обращения: 18:07.2017).
14. Gracheva E.I., Naumov O.V. Estimation of power losses in electric devices of the electrotechnical complex // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi. Russia. 2019. pp. 1-6.
15. Алексеев СВ., Трейвас В.Г. Влияние дуговых сталеплавильных печей на нагрузку и качество напряжения промышленных электрических сетей // В кн. Регулирование напряжения в электрических сетях. М.: Энергия. 1968. С. 194-204.
16. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат. 1986. 167 с.
17. Рыжнев Ю.Л., Минеев Р.В. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения. М.: Энергия. 1975. 82 с.
18. Правила устройства электроустановок: 7-е издание (ПУЭ)/ Главгосэнергонадзор России. М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. 610 с.
19. Справочник технического переводчика. Импульсное перенапряжение. Режим доступа URL: <http://intent.gigatran.com/article/?id=5279>. (дата обращения: 22.11.2016).
20. Пфайлер Ф. Компенсация реактивной мощности и фильтрация высших гармоник в преобразовательных установках // Электричество. 1968. № 4. С. 30-34.
21. Зацепин Е.П., Зацепина В.И. Качество электрической энергии по напряжению в системах электроснабжения металлургических предприятий // Вести вузов Черноземья. 2013. №1. с. 21-25.
22. Куско А., Томпсон М. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии. М.: Изд-во «Додэка-XXI», 2010. 334 с.
23. Минин Г.П. Реактивная мощность. М.: Энергия. 1978. 87 с.
24. Зацепина В.И., Шачнев О.Я. 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 энергосбере-

жения и энергоэффективности в технических системах. 2015 г. - Тамбов: изд-во ТГТУ. С. 246-248.

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

26. Куро Ж. Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении // Новости электротехники. 2010. № 2. С. 21-25.

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

28. Зацепин Е.П. Особенности функционирования электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – система электроснабжения» // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2012. № 1. С.18-22.

29. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве. М.: Энергоатомиздат. 2003. 479 с.

30. Карташев И. И., Тульский В. Н. Управление качеством электроэнергии. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. 320 с.

31. Шпиганович А.Н., Захаров К.Д. Электроснабжение металлургических предприятий. Липецк: ЛГТУ. 2006. 568 с.

32. Бош В.И. Повышение эффективности функционирования в системах электроснабжения с резонансными явлениями гармонических составляющих в сталеплавильных и прокатных производствах: Монография. Липецк: ЛГТУ. 2005. 156 с.

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

34. Федоров А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий (издание 4) Электрооборудование. М.: Энергоатомиздат. 1984. 472 с.

35. ПУЭ 8. Схемы специфических подстанций. Режим доступа URL: <http://pue8.ru/sistemy-elektrosnabzheniya/79-shemy-specificheskikh-podstanciy.html>. (дата обращения: 03.08.2016).

36. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Fedorov O.V. Concerning the opportunity of fail-safe systems development // 2017 International Conference on Industrial Engineer-

ing, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings 2017. pp. 8076255.

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

38. Шидловский А.К., Борисов Б.П., Вагин Г.Я., Куренный Э.Г., Крахмалин И.Г. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий. Киев: Наукова думка. 1992. 236 с.

39. Львова Э.Л., Миронова А.Н. Вопросы применения компенсирующих устройств в электрических сетях с резкопеременной нагрузкой // «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» - 5-я Международная Конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Материалы конференции: ТулГУ, Тула, 2009. Т.2. 476 с.

40. Немцев Г.А., Львова Э.Л., Иоша Н.Б. Определение реактивной мощности дуговых сталеплавильных печей // Промышленная энергетика. 1991. № 5. С. 39-41.

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

42. АО Энергетик. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения с преобразовательными установками. Режим доступа URL: http://www.energetik-ltd.ru/statii/statii5/Kompensatsiya_reaktivnoy_moshchnosti_v_sistemakh_elektrosnabzheniya_s_preobrazovatelnyimi_ustanovkami. (дата обращения: 07.12.2017).

43. Макаричев Ю.А., Овсянников В.Н. Синхронные машины: учебное пособие. Самара: Самарский гос. техн. ун-т. 2010. 156 с.

44. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Интернет Инжиниринг. 2005. 672 с.

45. НТП ЭПП-94. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий. Нормы технологического проектирования. 1-я редакция // Тяжпромэлектропроект имени Ф. Б. Якубовского. Москва. 1994.

46. Gracheva E.I., Naumov O.V. Probabilistic forecasting changes in magnitude of insulation resistance of line cable and wire workshop networks // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Moscow, Russia. 2018. pp. 1-4.

47. 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.

48. Fedorov O.V. Expeditious forecasting of power consumption // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings. 2017. pp. 8076221.

49. Львова Э. Л., Миронова А. Н. Вопросы применения компенсирующих устройств в электрических сетях с резкопеременной нагрузкой // «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» - 5-я Международная Конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Материалы конференции: ТулГУ, Тула. 2009. Т.2. С. 273-280. 476 с.

50. Вагин Г. Я., Лоскутов А. Б., Соснина Е. Н. и др. Исследование динамики изменения показателей электрических нагрузок для металлургических предприятий // Электромеханика. 1993. № 6. С. 65-68.

51. Туманов И.М., Корженков М.Г., Голиков В.А. Регулирование уровня напряжения на мощном потребителе электроэнергии // Электричество. 2000. № 10. С. 54-64.

52. Шилов И. Г. Система управления комплексом динамического восстановления напряжения // V Всероссийский семинар «Управление большими системами»: Сб. трудов. Липецк: ЛГТУ. 2008. С. 310-315.

53. Шилов И. Г. Моделирование режимов устройства динамического восстановления напряжения // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2008. № 2. С. 25-30.

54. Шпиганович А.Н., Скоморохов П.И. Управление потоками мощности как подход к повышению эффективности электроснабжения // Сборник материалов 54-ой всероссийской научной интернет-конференции МФТИ «Проблемы функциональных

и прикладных естественных и технических наук в современном и инновационном обществе». 2011. Москва. С. 84-85.

55. Шпиганович А.Н., Скоморохов П.И. Анализ векторного регулирования напряжения на металлургических предприятиях с непрерывным технологическим циклом // Материалы Международной научно-исследовательской конференции для молодых ученых, аспирантов, студентов и старшеклассников. 2014. Самара-Оренбург. С. 385-387.

56. Зацепина В.И., Скоморохов П.И. Проблемы оптимизации качества электроэнергии в распределительных электрических сетях // Сборник статей XVIII международной научно-практической конференции *Advances in science and technology*. Часть I. 2019. Москва. С.102-103.

57. Зацепина В.И., Скоморохов П.И. Features of compensation of the amplitude-phase voltage distortion in electric networks // Молодежь и XXI век - 2019: материалы IX Международной молодежной научной конференции, в 5-х томах. Том 4. 2019. Курск. С. 190-192.

58. Шилов И.Г., Зацепина В.И. Имитационная модель устройства динамической компенсации перенапряжений // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1. С. 379-383.

59. Dar'Enkov A.B., Guzev S.A., Fedorov O.V. Autonomous power plant with variable speed based on multi-windings generator // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings 2017. pp. 8076250.

60. 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.

61. Кальдон Р., Фаура М., Феллин Л. Анализ влияния сетевых возмущений на установки промышленных потребителей // Промышленная энергетика. 1994. № 2. С. 47-53.

62. Григораш О.В., Божко С.В., Безуглый С.М. Модульные системы гарантированного электроснабжения: монография. Краснодар: КВВАУЛ. 2006. 306 с.

63. Gracheva E.I., Fedorov O.V. Forecasting reliability electrotechnical complexes of in-plant electric power supply taking into account low-voltage electrical apparatuses // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi. Russia. 2019. pp. 1-5.

64. Скопинцев В.А. Качество электроэнергетических систем: надежность, безопасность, экономичность, живучесть. М.: Энергоатомиздат. 2009. 332 с.

65. Чаплыгин Е.Е., Ковырзина О.С. Компенсация неактивных составляющих полной мощности дуговых сталеплавильных печей // Электричество. 2009. № 11. С. 30-38.

66. Шпиганович А.А., Степанов В.М., Скоморохов П.И. Влияние возмущений резкопеременного характера на функционирование систем электроснабжения предприятий с повторно-кратковременным режимом работы // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2015. № 2. С. 3-8.

67. Шпиганович А.Н., Скоморохов П.И. Параметрическое исследование системы электроснабжения дуговой сталеплавильной печи // Материалы III-й международной научно-практической конференции «Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства». 2014. Орел. С. 496-498.

68. Суднова В.В. Качество электрической энергии. М.: ЗАО «Энергосервис». 2000. 80 с.

69. Gracheva E.I., Naumov O.V. Research of processes on contact surfaces of low-voltage switching devices // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg. 2017. pp. 1-4.

70. Шпиганович А.Н., Скоморохов П.И. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения потребителей с резкопеременной и ударной нагрузкой // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2014. № 3. С. 18-20.

71. Захаров К.Д. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения кислородно-конвертерных производств: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.03. Липецк. 2001. 143 с.

72. Зацепина В.И., Зацепин Е.П., Скоморохов П.И. Анализ воздействия негативных сетевых возмущений резкопеременного характера на эффективность функционирования систем электроснабжения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2019. Том 25. № 4. С. 559-565.

73. Скоморохов П.И. Моделирование однофазной системы динамического подавления амплитудно-фазных искажений напряжения при резкопеременных нагрузках // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах: международная конференция с элементами научной школы. 2014. Тамбов. С. 137-139.

74. Зацепин Е.П., Скоморохов П.И. Modeling of system of dynamic suppression amplitude and phase distortions of tension at the abruptly variable loadings // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2014. № 2. С. 3-6.

75. Зацепина В.И., Скоморохов П.И. Анализ функционирования систем электроснабжения с резкопеременным характером нагрузок // Энергетика. Проблемы и перспективы развития: материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции. 2019. Тамбов. С. 148-149.

76. Шпиганович А.А., Скоморохов П.И. Исследование негативных сетевых возмущений в системах электроснабжения листопрокатных производств // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2014. № 4. С. 61-65.

77. Шпиганович А.Н. Математическое описание систем и технологических комплексов случайными потоками: Монография. Липецк, ЛГТУ. 2007. 240 с.

78. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука. 1969. 576 с.

79. Кудрин Б.И. Введение в технетику. 2-е изд. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та. 1993. 552 с.

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

81. Зацепина В.И., Зацепин Е.П., Шачнев О.Я. Повышение эффективности электротехнических комплексов посредством анализа электрических характеристик // Во-

просы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2017. № 4. Тамбов: Из-во ТГТУ. С. 207-213.

82. Бакшаева Н.С. Исследование влияния электроприемников с резкопеременным характером нагрузки на параметры качества электроэнергии // Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции «Современные исследования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности», ФГБОУ ВПО Юго-Западный государственный университет. Курск. С.55-59.

83. Пушница К.А. Снижение уровней коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения кислородно-конвертерных производств посредством схемы защиты: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.03. Липецк. 2012. 165 с.

84. Шпиганович А.Н, Захаров К.Д. Внутризаводское электроснабжение и режимы: учебник. Липецк: ЛГТУ. 2007. 742 с.

85. 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.

86. Шилов И.Г. Повышение эффективности электроснабжения листопрокатных производств посредством минимизации провалов напряжения: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.03. Липецк. 2008. 195 с.

87. Шпиганович А.Н., Шилов И.Г. Комплекс динамического подавления провалов и восстановления напряжения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 2. С. 300-304.

88. Gracheva E.I., Naumov O.V. Identification of probability characteristics of the laws of distribution low-voltage devices shop networks // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk. 2016. pp. 1-4.

89. Fedorov O.V. Assessment of influence parameters of electric equipment at a size of losses the electric power in intra factory networks of low voltage // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Proceedings 2. 2016. pp. 7911463.

90. Zatsepina V.I., Zatsepin E.P., Shachnev O.Y. Analysis of load indicators power grid complex when feeding differentiated consumer // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, Russia. 2019. pp. 1-5.

91. Зимин Е.Н., Кацевич В.Л., Козырев С.К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоиздат. 1981. 192 с.

92. Грунтович Н.В., Грунтович Н.В., Ефремов Л.Г., Федоров О.В. Совершенствование систем управления энергетической эффективностью и экономической безопасностью промышленных предприятий // Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 40-48.

93. Зацепин, Е.П. К вопросу об эффективности функционирования дуговых сталеплавильных печей переменного тока // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2012. № 2. С. 23-30.

94. Зацепин Е.П., Зацепина В.И. Качество электрической энергии по напряжению в системах электроснабжения металлургических предприятий // Вести вузов Черноземья. 2013. № 1. С. 21-25.

95. Жилин Б.В. Модели формирования структуры ценозов // Математическое описание ценозов и закономерности технетики. Материалы Первой Междунар. конф., Новомосковск, 24-26 января 1996 г. Ценологические исследования. Вып.1. М.: Центр системных исследований. 1996. С. 142-156.

96. Шпиганович А.А. Функционирование систем электроснабжения: монография. Липецк: Изд-во ЛГТУ. 2015. 212 с.

97. Шпиганович А.А., Скоморохов П.И. Возмущения резкопеременного характера в системах электроснабжения предприятий с продолжительным режимом работы // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. № 1. 2015. С. 179-182.

98. Степанов В.М., Шпиганович А.А. Формирование управляющих воздействий при управлении иерархическими многоуровневыми системами электроснабжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. №12-2. С.30-37.

99. Шпиганович А.А. Обеспечение надежности систем электроснабжения на базе информационно-аналитического анализа их функционирования: Автореф... дис. д-р. наук. Липецк: 2015. 40 с.

100. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов // М.: Центр системных исследований. 2005. 383 с.

101. Скоморохов П.И. Электроценологический анализ провалов напряжения в системах электроснабжения предприятий с устойчивым технологическим процессом // Теоретические и прикладные аспекты современной науки: сборник научных трудов по материалам VII Международной научно-практической конференции. Часть III. 2015. Белгород. С. 129-131.

102. Приложение А (справочное). Характеристики провалов, прерываний напряжения и перенапряжений в электрических сетях. Режим доступа URL: <http://www.sonel.ru/ru/biblio/standards/R54149-2010/appendix-a/>. (дата обращения: 19.05.2017).

103. Приложение Г (справочное). Характеристики провалов напряжения в электрических сетях напряжением 6–10 кВ. Режим доступа URL: <http://www.sonel.ru/ru/biblio/standards/gost-13109-97/appendix-g/>. (дата обращения: 26.05.2017).

104. Импульс напряжения и временное перенапряжение. Режим доступа URL: <http://www.sonel.ru/ru/biblio/article/quality-voltage/impulse-voltage/>. (дата обращения: 30.05.2017).

105. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6-35 кВ. Режим доступа URL: <http://www.news.el-teh.ru/arh/2002/17/05.php>. (дата обращения: 03.06.2017).

106. Классификация и характеристика внутренних перенапряжений сетей 6-35 кВ. Режим доступа URL: http://www.websor.ru/klassifikaciya_perenap-ryajenii.html. (дата обращения: 03.06.2017).

107. Ананичева С.С., Алексеев А.А., Мызин А.Л. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах (3-е изд., испр): учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ. 2012. 93 с.

108. Скоморохов П.И. Оценка безотказности систем электроснабжения с продолжительным режимом работы // Молодежь и XXI век: материалы V Международной молодежной научной конференции, в 3-х томах. Том 3. 2015. Курск. С. 237-240.

109. Зацепина В.И., Зацепин Е.П., Скоморохов П.И., Телегин В.В. Повышение безотказности систем электроснабжения при воздействии сетевых возмущений // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2019. № 2. Из-во ЛГТУ. С.67-75.

110. П. м. 168544 Российская Федерация, МПК H02J 3/00 (2006/01). Устройство комбинированного регулирования напряжения сети. Шпиганович А.Н., Зацепин Е.П., Скоморохов П.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет». – №2016107854; заяв. 03.03.2016; опубл. 08.02.2017. Бюл. № 4.

111. Пат. 2453021 Российская Федерация, МПК⁷ H 02 J 3/00. Устройство регулирования отклонений напряжения и реактивной мощности электрической сети. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Шклярский А.Я., Устинов Д.А.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет). – 201118261/07; заявл. 05.05.2011; опубл. 10.06.2012.

112. Пат. 2393611 Российская Федерация, МПК⁷ H 02 J 9/06, H 02 H3/06. Устройство динамического восстановления провалов напряжения. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Захаров К.Д., Зацепина В.И., Зацепин Е.П., Шилов И.Г.; заявитель и патентообладатель Липецкий государственный технический университет. – 2009116972/09; заявл. 04.05.2009; опубл. 27.06.2010.

113. Пат. 2290731 Российская Федерация, МПК⁷ H 02 J 9/06. Устройство защиты потребителей электроэнергии от кратковременных нарушений электроснабжения. Шпиганович А.Н., 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; опубл. 27.12.2006.

114. Пат. 2531389 Российская Федерация, МПК⁷ H 02 J 3/00, H 02 J 3/12. Устройство регулирования напряжения сети. Порфирьев Ю.В., Захаров С.Ф.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Чебоксарский электромеханический завод». – 2013152828/07; заявл. 27.11.2013; опубл. 20.10.2014.

115. Зацепина В.И., Шилов И.Г., Мамонтов А.Н. Система динамического подавления амплитудно-фазных искажений напряжения // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2010. № 1. С. 14-17.

116. Зацепина В.И., Зацепин Е.П., Скоморохов П.И. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения посредством комбинированного воздействия на искажения напряжения // Известия Высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. № 5. С. 15-23.

117. Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов. М.: ДМК Пресс. 2009. 384 с.

118. Скоморохов П.И. О перспективах использования кодоимпульсной модуляции в устройствах нормализации качества электроэнергии при резкопеременных искажениях // Современные тенденции в науке, технике, образовании: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 3-х частях. Часть 1. 2016. Смоленск. С. 110-111.

119. Zatsepina V.I., Zatsepin E.P., Skomorokhov P.I. Application of discrete modulation of sinusoidal signal in regulation of voltage in distributive electrical networks // 2019 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM). 2019. Sochi. Russia. pp. 1-5.

120. Свинцовые аккумуляторные батареи, устройство, эксплуатация, заряд. Режим доступа URL: <https://pue8.ru/elektricheskie-seti/588-svintsovyie-akkumulyatornye-batarei.html>. (дата обращения: 22.03.2018).

121. Супер конденсаторы. Режим доступа URL: <http://www.electrosad.ru/Electronics/SuperCon.htm>. (дата обращения: 23.04.2018).

122. Кузнецов В., Панькина О., Мачковская Н. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство // Компоненты и технологии. 2005. № 50. С. 12-16.

123. Зацепина В.И., Скоморохов П.И. Обеспечение автономной работы устройств динамической компенсации искажений напряжения посредством ионисторно-аккумуляторной схемы // Вестник Чувашского университета. 2019. № 1. С. 146-153.

124. Кашкаров А. Ионистор в автономной электрической цепи // Современная электроника. 2014. № 1. С. 38-40.

125. Шпиганович А.Н., Зацепин Е.П. Оценка отказоустойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 12 С. 29-35.

126. Шпиганович А.Н. Оценка надежности неразветвленных систем // Горный журнал. Известия ВУЗов. 1983. № 5. С. 52-64.

127. Шпиганович А. Н. Математическое моделирование систем и технических комплексов случайными потоками: монография. Липецк: ЛГТУ. 2007. 240 с.

128. Шпиганович А.А. Анализ влияния вероятностных параметров электрооборудования на эффективность функционирования систем электроснабжения // Вести вузов Черноземья, 2013. №2. С. 25-32.

129. Зацепина В.И., Скоморохов П.И. Особенности работы устройств динамической компенсации при изменении электрического режима // VI Международная научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах». 2019. Тамбов. С. 237-238.

130. Кузьмичев В. А., Захаренко Ф. Ю., Балугев А. В. Ретроспективный анализ работы устройств РЗА в ЕНЭС (ОАО «Фирма ОРГРЭС», Москва) // Релейная защита и автоматизация. 2015. № 1. С. 32 - 37.

131. Соловьев С.В. Разработка методики расчета общего случая несимметрии в системах электроснабжения и обеспечение надежной работы электроустановок при нарушениях качества электрической энергии: Автореф... дис. кан. наук. Москва. 2011. 20 с.

132. Черных И.А. Обеспечение эффективности функционирования систем электроснабжения металлургических производств посредством безотказности электроизоляционных элементов распределительных сетей: Автореф... дис. кан. наук. Липецк: 2007. 18 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 «Суточный график значений нагрузок системы
электроснабжения Липецкой ТЭЦ-2»

Таблица П1.1. Суточные показатели нагрузки

Время, час	P, Мвт	Q, мВАр	S,мВА
00 ⁰⁰	225,69	81,16	243,05
01 ⁰⁰	217,13	76,22	230,12
02 ⁰⁰	204,89	70,08	217,02
03 ⁰⁰	201,59	64,75	214,46
04 ⁰⁰	200,47	62,81	210,07
05 ⁰⁰	211,17	63,88	211,06
06 ⁰⁰	202,12	70,36	216,34
07 ⁰⁰	238,56	83,6	252,78
08 ⁰⁰	271,38	98,06	288,55
09 ⁰⁰	300,01	113,14	321,32
10 ⁰⁰	308,72	119,07	330,88
11 ⁰⁰	301,82	117,69	323,95
12 ⁰⁰	298,61	118,54	322,22
13 ⁰⁰	302,48	115,91	323,92
14 ⁰⁰	301,27	122,08	325,06
15 ⁰⁰	301,13	137,62	332,15
16 ⁰⁰	302,85	129,86	329,51
17 ⁰⁰	302,17	120,73	325,39
18 ⁰⁰	303,34	120,12	328,75
19 ⁰⁰	300,25	117,25	322,26
20 ⁰⁰	296,54	114,73	317,96
21 ⁰⁰	270,37	112,11	292,69
22 ⁰⁰	269,14	111,38	291,27
23 ⁰⁰	261,53	110,17	288,98
24 ⁰⁰	246,12	89,51	261,89

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 «Акты внедрения»

«М торинвест»

399672, Липецкая область, Краснинский район, д. Гребенкино, д.71
ОГРН 1114811000370, ИНН/КПП 4810004427/481001001



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Скоморохова Павла Игоревича
на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме
«Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения с
резкопеременным характером негативных сетевых возмущений»

Совместная комиссия в составе: главного энергетика ООО «Моторинвест» Ханина А.А., канд. техн. наук, доцента ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» Зацепина Е.П., канд. техн. наук, доцента ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» Шачнева О.Я., ведущего специалиста Филиала АО «СО ЕЭС» Липецкое РДУ Скоморохова П.И. составила настоящий акт о нижеследующем:

1. Разработанное устройство комбинированного регулирования напряжения сети внедрено в ООО «Моторинвест» в качестве защиты энергопринимающих устройств сварочных линий от воздействия амплитудно-фазных искажений напряжения.

2. Использование предложенных в работе Скоморохова П.И. методик позволяет повысить эффективность функционирования систем электроснабжения потребителей, имеющих резкопеременный характер нагрузки, а также снизить воздействие амплитудно-фазных искажений напряжения до допустимого ГОСТ 32144-2013 уровня.

3. Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанного устройства комбинированного регулирования напряжения сети составляет 880 тыс. руб. в год, кроме этого значительно повышается безопасность персонала при выполнении им должностных обязанностей.

Председатель комиссии

Члены комиссии

Ханин А.А.

Зацепин Е.П.

Шачнев О.Я.

Скоморохов П.И.

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора -
директор филиала
ООО «Таврида Электрик Центр»
Е.А. Еремеева
« 18 » июля 2019 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Скоморохова Павла Игоревича
на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме
«Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения
с резкопеременным характером негативных сетевых возмущений»

Совместная комиссия в составе: заместителя директора – директора филиала ООО «Таврида Электрик Центр» Еремеевой Е.А., инженера 1 категории проектного отдела ООО «Таврида Электрик Центр» Чаукина М.С., инженера 2 категории проектного отдела ООО «Таврида Электрик Центр» Агеева Д.В., канд. техн. наук, доцента ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» Зацепина Е.П., канд. техн. наук, доцента ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» Шачнева О.Я., ведущего специалиста Филиала АО «СО ЕЭС» Липецкое РДУ Скоморохова П.И., составила настоящий акт о нижеследующем:

1. Результаты научных исследований Скоморохова Павла Игоревича, а именно: способ оптимизации и повышения надежности функционирования устройства комбинированного регулирования напряжения сети за счет обеспечения автономности его работы посредством ионисторно-аккумуляторной схемы; алгоритм реализации процедуры параметрического нормирования амплитудно-фазных параметров напряжения и процесса компенсации провалов, перенапряжения и высших гармоник внедрены в ООО «Таврида Электрик Центр».

2. Данные разработки применяются ООО «Таврида Электрик Центр» в качестве рекомендательных мероприятий в разработке проектной документации при технологическом присоединении и строительстве (реконструкции, модернизации) объектов электроэнергетики с целью повышения надежности электроснабжения.

Председатель комиссии

Еремеева Е.А.

Члены комиссии

Агеев Д.В.

Чаукин М.С.

Зацепин Е.П.

Шачнев О.Я.

Скоморохов П.И.



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО

«Липецкий государственный
технический университет»

Кащенко А.П.

«20» сентября 2019 г.

СПРАВКА

об использовании в учебном процессе материалов,
содержащихся в кандидатской диссертации соискателя кафедры
электрооборудования Скоморохова Павла Игоревича «Повышение эффективности
функционирования систем электроснабжения с резкопеременным характером
негативных сетевых возмущений»

Настоящей справкой удостоверяется, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» используются в учебном процессе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет» в рамках образовательной программы по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а именно алгоритм построения графических ранговых распределений для выявления наиболее негативных спектров возмущений и способ компенсации провалов, перенапряжения и высших гармоник при выполнении исследовательской работы по дисциплинам «Научно-исследовательская работа», «Электроснабжение и режимы». Использование результатов диссертационной работы обсуждено на заседании кафедры электрооборудования от «20» сентября 2019 г. протокол № 4

Начальник отдела по науке

П.А. Кровопусков

Декан факультета /директор института
канд. техн. наук, доцент

А.В. Галкин

Заведующий кафедрой
д-р техн. наук, доцент

В.И. Зацепина

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 «Патент РФ на полезную модель»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 168544

**УСТРОЙСТВО КОМБИНИРОВАННОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
общеобразовательное учреждение высшего
профессионального образования Липецкий государственный
технический университет (ЛГТУ) (RU)*

Авторы: *Шпиганович Александр Николаевич (RU), Зацепин
Евгений Петрович (RU), Скоморохов Павел Игоревич (RU)*

Заявка № 2016107854

Приоритет полезной модели 03 марта 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 08 февраля 2017 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 03 марта 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2016107854, 03.03.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
03.03.2016

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 03.03.2016

(45) Опубликовано: 08.02.2017 Бюл. № 4

Адрес для переписки:

398600, г. Липецк, ул. Московская, 30, НИИ
ЛГТУ

(72) Автор(ы):

Шпиганович Александр Николаевич (RU),
Зацепин Евгений Петрович (RU),
Скоморохов Павел Игоревич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
общеобразовательное учреждение высшего
профессионального образования Липецкий
государственный технический университет
(ЛГТУ) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2453021 C1, 10.06.2012., RU
2393611 C1, 27.06.2010. EP 2816703 A1,
24.12.2014.

(54) **УСТРОЙСТВО КОМБИНИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ**

(57) Формула полезной модели

Устройство комбинированного регулирования напряжения трехфазной электрической сети, включающее трансформатор с первичной и вторичной обмотками, тиристорный управляемый преобразователь напряжения, входной фильтр с датчиком направления тока, синхронизированную и сфазированную с сетью систему регулирования фазы выходного напряжения основного инвертора относительно напряжения сети, выпрямитель, синхронизированную с частотой сети и сфазированную с напряжением нагрузки систему управления выпрямителя, ведомый сетью инвертор, синхронизированную с частотой сети и сфазированную с напряжением сети систему управления ведомого сетью инвертора, узел раздельного управления выпрямителем и ведомым сетью инвертором, датчик отклонения напряжения нагрузки, датчик реактивной мощности сети, блок автоматического управления тиристорным преобразователем напряжения, включенного во вторичную обмотку трансформатора, синхронизированную и сфазированную с нагрузкой систему регулирования фазы выходного напряжения основного инвертора относительно напряжения нагрузки, датчик отклонения напряжения сети, блок синхронизации, отличающееся тем, что дополнительно содержит демпфирующий контур постоянного тока, подключенный между выпрямителем и ведомым сетью инвертором, состоящий из параллельно включенного конденсатора и последовательно включенной катушки индуктивности, тиристорный управляемый преобразователь напряжения, логический блок, измеритель провалов напряжения и перенапряжений, анализатор высших гармоник, элемент

суммирования сигналов с измерителя провалов напряжения и перенапряжений и анализатора высших гармоник, элемент умножения сигнала на отрицательную единицу, элемент преобразования сигнала в двоичный код, при этом трансформатор с первичной и вторичной обмотками выполнен в виде вольтодобавочного трансформатора, причем к вторичной обмотке вольтодобавочного трансформатора подключен выход тиристорного управляемого преобразователя напряжения, параллельно которому включен входной фильтр с датчиком направления тока, к входам которого подключены выходы выпрямителя и входы ведомого сетью инвертора, к сети подключаются: первичная обмотка вольтодобавочного трансформатора, датчик реактивной мощности сети, ведомый сетью инвертор, синхронизированная и сфазированная с сетью система регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения сети, датчик отклонения напряжения сети, измеритель провалов напряжения и перенапряжения, анализатор высших гармоник, к нагрузке подключаются: датчик отклонения напряжения нагрузки, выпрямитель, синхронизированная с частотой сети и сфазированная с напряжением нагрузки система управления выпрямителя, синхронизированная и сфазированная с нагрузкой система регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения нагрузки, выход датчика реактивной мощности соединен с входом синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением сети системы управления ведомого сетью инвертора, входом блока автоматического управления тиристорным преобразователем напряжения, включенного во вторичную обмотку вольтодобавочного трансформатора, входы синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением нагрузки системы управления выпрямителем, параллельно выходам выпрямителя и входам ведомого сетью инвертора подключен демпфирующий контур постоянного тока, выходы блока раздельного управления выпрямителя и ведомого сетью инвертора соединены с входами синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением нагрузки системы управления выпрямителя и синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением сети системы управления ведомого сетью инвертора, выход входного фильтра с датчиком направления тока соединен с входом блока раздельного управления, выходы синхронизированной и сфазированной с сетью системы регулирования фазы выходного напряжения основного тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения сети и синхронизированной и сфазированной нагрузкой системой регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения нагрузки подключены к входам блока синхронизации, выход блока синхронизации соединен с входом тиристорного управляемого преобразователя напряжения, входы блока автоматического управления тиристорным управляемым преобразователем напряжения, включенного во вторичную обмотку вольтодобавочного трансформатора, соединены с выходами синхронизированной и сфазированной с сетью системы регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения сети, датчика отклонения напряжения сети, синхронизированной и сфазированной с нагрузкой системой регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения нагрузки, датчика отклонения напряжения нагрузки, датчик реактивной мощности сети, выход блока автоматического управления тиристорным управляемым преобразователем напряжения соединен с входом тиристорного управляемого преобразователя напряжения, выход синхронизированной с частотой сети и сфазированной с напряжением нагрузки системы управления выпрямителя соединен с входом выпрямителя, выход синхронизированной с частотой сети и

сфазированной с напряжением сети системой управления ведомого сетью инвертора соединен с входом ведомого сетью инвертора, выход датчика отклонения напряжения сети подключен к входу синхронизированной и сфазированной с нагрузкой системой регулирования фазы выходного напряжения тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения нагрузки, выход датчика отклонения напряжения нагрузки подключен к входу синхронизированной и сфазированной с сетью системы регулирования фазы выходного напряжения основного тиристорного управляемого преобразователя напряжения относительно напряжения сети, выходы измерителя провалов напряжения и перенапряжений и анализатора высших гармоник подключены к входу элемента суммирования сигналов, расположенного на входе логического блока, в состав которого также входят элемент умножения сигнала на отрицательную единицу и элемент преобразования сигнала в двоичный код, выход элемента суммирования сигналов подключен к входу элемента умножения на отрицательную единицу, выход элемента умножения на отрицательную единицу подключен к входу элемента преобразования сигнала в двоичный код, выход элемента преобразования сигнала в двоичный код подключен к входу тиристорного управляемого преобразователя напряжения.

RU 1 6 8 5 4 4 U 1