

*На правах рукописи*

*Голиков*

ГОЛИКОВ ИГОРЬ ОЛЕГОВИЧ

**АДАПТИВНОЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ  
НАПРЯЖЕНИЯ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,38 кВ**

**Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование  
в сельском хозяйстве**

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный аграрный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

**Виноградов Александр Владимирович**

Официальные оппоненты: **Лещинская Тамара Борисовна**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, профессор кафедры «Электроснабжение»

**Антонов Юрий Михайлович**, кандидат технических наук, ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства, Заведующий лабораторией систем электроснабжения сельских потребителей

Ведущая организация ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»

Защита состоится «14» июня 2016 г. в 13-00 часов на заседании Диссертационного совета Д 006.037.01 в Государственном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» по адресу: 109456, г. Москва, 1-ый Вешняковский проезд, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» и на сайте <http://viesh.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Некрасов Алексей Иосифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Несоответствие уровня напряжения нормативным документам в сельских электрических сетях приводит к снижению энергоэффективности электрических сетей, нарушениям технологического процесса у потребителей электроэнергии, сокращению ресурса, как сетевого электрооборудования, так и оборудования на объектах потребителей. В масштабах страны это вызывает большой ежегодный материальный ущерб. Регулирование напряжения в сельских электрических сетях производится чаще всего с помощью устройств переключения без возбуждения (ПВВ) и является нерегулярным, недостаточно точным и, кроме того, вызывает ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям, связанный с необходимостью отключения силового трансформатора на время выполнения переключений ПВВ.

Данную проблему можно решить, используя автоматические устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) в ТП 10/0,4 кВ или с помощью вольтодобавочных трансформаторов (бустеров) в линиях электропередачи (ЛЭП), а так же других средств автоматического регулирования напряжения. Но существующие способы такого регулирования используют в качестве входных сигналов, значения напряжения в точке установки соответствующих устройств и значения тока нагрузки, подключенной к ТП (или к ЛЭП), что далеко не всегда позволяет выполнять регулирование с достаточной точностью. С учетом того, что сельские ЛЭП имеют часто завышенную, по сравнению с рекомендованной, длину, реальные значения напряжения на вводах потребителей, подключенных к данным ЛЭП, даже при условии автоматического регулирования напряжения, могут выходить за регламентируемые нормативными документами значения.

Поэтому разработка систем адаптивного автоматического регулирования напряжения, учитывающих значения напряжения на вводах потребителей является актуальной задачей.

**Целью работы** является разработка системы адаптивного автоматического регулирования напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ, позволяющей учитывать значение фактического напряжения на вводах потребителей.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- выполнить анализ существующих способов автоматического регулирования напряжения и провести анализ статистических данных значений напряжения на вводах сельских потребителей;

- разработать новые способы, схемные и технические решения, позволяющие осуществлять адаптивное автоматическое регулирование напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ с учетом фактических значений напряжения на вводах потребителей;

- разработать математическую модель, позволяющую рассчитывать коэффициент регулирования напряжения в зависимости от напряжения в



различных точках ЛЭП 0,38 кВ, отличающуюся тем, что она позволяет учесть значения напряжения на вводах подключенных к ЛЭП 0,38 кВ потребителей при автоматическом регулировании напряжения;

- произвести оценку основных экономических показателей использования системы адаптивного автоматического регулирования напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ.

**Объектом исследования** являются ЛЭП 0,38 кВ в системах электроснабжения сельских потребителей и качество электроэнергии в них.

**Предмет исследования** – способы и средства автоматического регулирования напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ.

**Методы исследования.** Для решения указанных задач использовались методы математического моделирования электрической сети 10...0,38 кВ в фазных координатах, законы и приемы алгебры матриц применительно к электрическим сетям, методы физического моделирования и инженерного эксперимента, методы математической статистики, методы компьютерного моделирования.

**Научная новизна** заключается в том, что:

1. Создана новая математическая модель, позволяющая рассчитывать коэффициент регулирования напряжения в зависимости от напряжения в различных точках электрической сети 0,38 кВ, отличающаяся тем, что она позволяет учесть значения напряжения на вводах подключенных к электрической сети 0,38 кВ потребителей при автоматическом регулировании напряжения.
2. Разработаны новые способы адаптивного автоматического регулирования напряжения в электрических сетях 0,38 кВ, позволяющие осуществлять регулирование с учетом фактического напряжения на вводах потребителей. Получен патент на способ.
3. Сформулированы требования к функциональным возможностям системы адаптивного автоматического регулирования напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ.
4. Разработаны технические решения по реализации системы адаптивного автоматического регулирования напряжения (СААРН), позволяющие осуществлять сбор и обработку информации о фактическом напряжении на вводах потребителей и автоматически определять коэффициент регулирования напряжения, проведены успешные испытания экспериментального образца СААРН.

**Теоретическая ценность.**

Проведенные статистические исследования напряжения на вводах потребителей позволяют более эффективно выполнить оценку состояния электрических сетей и выбрать мероприятия по их совершенствованию.

Предлагаемая математическая модель позволяет рассчитывать коэффициент регулирования напряжения в зависимости от напряжения в различных точках электрической сети 0,38 кВ и позволяет учесть значения напряжения на вводах подключенных к электрической сети 0,38 кВ потребителей при автоматическом регулировании напряжения, в том числе и при использовании дополнительных средств регулирования напряжения. Тем самым расширяется область применения метода фазных координат при расчете электрических сетей 0,38кВ.

Разработанные способы адаптивного автоматического регулирования напряжения позволяют повысить уровень автоматизации электрических сетей 0,38 кВ и могут использоваться при создании активно-адаптивных («умных») электрических сетей.

#### **Практическая ценность.**

Применение системы адаптивного автоматического регулирования напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ увеличит степень автоматизации трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ и ЛЭП 0,38 кВ, повысит точность регулирования напряжения. Так же это даст возможность уменьшить ущербы, связанные с недоотпуском электрической энергии потребителям, повысить энергетическую эффективность распределительных электрических сетей за счет снижения нерационального расхода и потерь электроэнергии и путем увеличения ресурса электрооборудования, как сетей, так и потребителей. Перспективность использования предлагаемых решений по адаптивному автоматическому регулированию напряжения в сельских распределительных сетях подтверждена на совместном совещании специалистов Филиала ПАО «МРСК Центра» - «Орелэнерго» и кафедры «Электроснабжение» Орловского ГАУ по рассмотрению перспективных направлений НИОКР.

Разработанные способы автоматического регулирования напряжения могут быть распространены и на регулирование напряжения с помощью стабилизаторов напряжения, вольтодобавочных трансформаторов, пунктов автоматического регулирования напряжения, что повысит эффективность работы данных устройств.

Разработанная математическая модель и лабораторная установка «Система адаптивного автоматического регулирования напряжения» используются в учебном процессе на кафедре «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловского ГАУ. Данная методика и оборудование используется для проведения комплекса учебно-практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Релейная защита и автоматика», «Электрооборудование электрических станций и подстанций» и «Электрические сети и системы», а так же при проведении курсов повышения квалификации для работников электросетевых предприятий и инженеров-электриков сельхозпроизводства. Разработанная на основе математической модели компьютерная программа внедрена в проектной организации ООО «ЭнерГарант».

**Основные положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся:

1. Математическая модель, позволяющая рассчитывать коэффициент регулирования напряжения в зависимости от напряжения в различных точках электрической сети 0,38 кВ, отличающаяся тем, что она позволяет учесть значения напряжения на вводах подключенных к электрической сети 0,38 кВ потребителей при автоматическом регулировании напряжения, в том числе и при использовании дополнительных средств регулирования напряжения.

2. Разработанные способы и алгоритмы адаптивного автоматического регулирования напряжения в электрических сетях 0,38 кВ, позволяющие осуществлять регулирование с учетом фактического напряжения на вводах потребителей.

3. Разработанные технические решения по реализации системы адаптивного автоматического регулирования напряжения, позволяющие осуществлять сбор и обработку информации о фактическом напряжении на вводах потребителей и автоматически определять коэффициент регулирования напряжения.

**Достоверность исследований** подтверждается: совпадением результатов, полученных теоретическим путем и в результате экспериментальных исследований, представленной выборкой статистических данных об отклонениях напряжения на вводах сельских потребителей электроэнергии, сравнением результатов расчета, полученных с применением разработанных и традиционных методик, а также полученными результатами лабораторных испытаний разработанной системы адаптивного автоматического регулирования напряжения в ЛЭП 0,38 кВ, полученным патентом на способ автоматического регулирования напряжения.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации обсуждались и получили положительную оценку на международной научно-практической конференции «Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства» ФГБОУ ВПО «Орел ГАУ» 04 - 05 апреля 2013 г. (2013г.); на 2-й Международной научно - практической конференции "Современные материалы, техника и технология" в Юго-Западном государственном университете города Курска, 25 декабря 2012г.; в ходе телемоста на базе Дальневосточного государственного университета в рамках Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы в энергетике и агропромышленном комплексе» (2015г.); на конкурсе инновационных проектов «Молодежь и наука 21 века», аккредитованном Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-практической сфере по программе «УМНИК», г. Орел (2015г.); на конкурсе «Энергопрорыв» Фонд «Сколково» (2015г.); на совместном совещании специалистов Филиала ПАО «МРСК Центра» - «Орелэнерго» и кафедры «Электроснабжение» Орловского ГАУ по рассмотрению перспективных направлений НИОКР (2014г.); на



Всероссийском конкурсе среди студентов, аспирантов и молодых ученых на лучшую научно-исследовательскую работу «Инновации молодых ученых – в агропромышленный комплекс» «Лучшая научно-исследовательская работа среди аспирантов» Министерства сельского хозяйства Российской Федерации в номинации «Технические науки» (города Орел, Воронеж, Ставрополь (2013-2015гг.)) в апреле 2015 года в Воронежском ГАУ награжден дипломом победителя второго этапа, в 2015 году в Ставропольском ГАУ награжден дипломом победителя третьего этапа; за активную работу над данной тематикой в 2015 году автор удостоен стипендии губернатора Орловской области.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 статей, в том числе 3 статьи в изданиях, включенных в перечень рекомендованных ВАК и 1 патент на изобретение.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем диссертации 200 страниц машинописного текста, в том числе 164 основного текста, работа содержит 46 рисунков, 21 таблицу, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 106 наименований и 13 приложений на 36 страницах.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и ее задачи, определен объект и предмет исследования, подобраны методы исследования, раскрыта научная новизна, практическая и теоретическая ценность, перечислены основные положения, выносимые на защиту, результаты апробации работы.

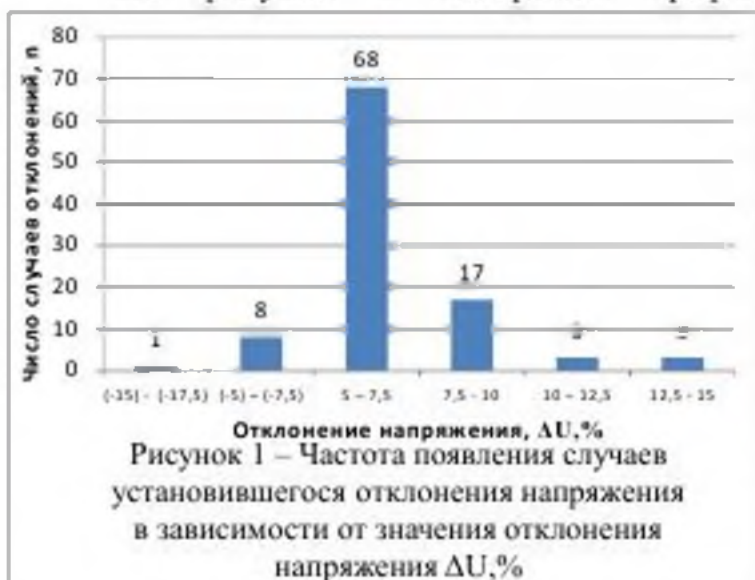
В первой главе произведен анализ влияния уровня напряжения на энергоэффективность электрических сетей 0,38кВ. Проведенный анализ выявил, что отклонение напряжения негативно сказывается на работе оборудования потребителей, снижая полезный срок его службы, увеличивая потери и необоснованный расход электрической энергии.

Рассмотрены основные проблемы регулирования напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ.

Проблемам повышения качества электроэнергии и регулированию напряжения в электрических сетях посвящены работы Баркан Я.Д., Мельникова Н.А., Будзко И.А, Лещинской Т.Б., Попова Н.М., Солдаткиной Л.А., Шидловского А.К., Жежеленко И.В. и многих других ученых. В то же время, многие предлагаемые решения, как по повышению надежности электроснабжения, так и по применению различных видов автоматики и защиты ЛЭП не учитывают реальных статистических характеристик электрических сетей и применимы в «стандартных условиях», то есть при длине ЛЭП в пределах рекомендуемой и при нормальном ее техническом состоянии.

Проведен анализ статистических данных по быстрым и медленным изменениям напряжения у потребителей, подключенных к электрическим сетям 0,38 кВ на примере Орловской области. Анализировались случаи выхода показателей качества (ПКЭ) электроэнергии за пределы нормативных значений у разных категорий потребителей электроэнергии.

На рисунке 1 изображен график частоты появления случаев



установившегося отклонения напряжения.

Всего проанализировано 100 измерений с отклонением напряжений свыше 5%. Чаще всего установившееся отклонение напряжения зафиксировано в диапазоне +5...+7,5% (68 случаев). На диапазон +7,5...+10% приходится 17 случаев отклонений. Отклонение +5...+7,5% попадает в допустимый диапазон

отклонений напряжения согласно ГОСТ 32144-2013, но исследованиями таких ученых как Попов Н.М., Перовой М.Б. и ряда других доказано, что отклонение напряжения более чем на 5 % приводит к перерасходу электрической энергии, а также влечет в масштабах страны к большому ежегодному материальному ущербу. Регулирование же с точностью, обеспечивающей отклонение напряжения менее ±5% затруднительно в электрических сетях вследствие их значительной протяженности, непрерывного изменения режима работы и других причин. Поэтому рациональным решением является осуществление автоматического регулирования напряжения при его отклонении более 5% в ту или иную сторону.

Проведенный анализ способов и технических средств автоматического регулирования напряжения в электрических сетях и выполненный в ходе исследования патентный поиск позволили выявить наиболее удачные решения, но показали, что на данный момент отсутствуют способы автоматического регулирования напряжения, учитывающие фактическое напряжение на вводах потребителей электроэнергии в качестве возмущающего сигнала для регулирования. Это не позволяет увеличивать точность регулирования напряжения в электрических сетях 0,38 кВ и не позволяет адаптировать системы автоматического регулирования напряжения к изменению фактических значений напряжения на вводах потребителей, подключенных к электрической сети. Был сделан вывод о необходимости разработки системы адаптированного



автоматического регулирования напряжения в электрических сетях 0,38 кВ. Сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе произведен анализ параметров, характеризующих изменение напряжения в электрической сети в различных режимах её работы. К главным параметрам, влияющим на изменение напряжения, относятся: естественное изменение нагрузок, а вместе с тем и изменение полной, активной и реактивной мощностей, изменение значения тока; сопротивление проводника; температура окружающей среды. Так же отмечено, что большая протяженность сельских электрических сетей зачастую усложняет поддержание напряжения на вводах потребителей на нормативном уровне.

Выполнен анализ признаков, используемых в качестве возмущающего воздействия в различных способах регулирования напряжения и сделано обоснование применения новых признаков. Установлено, что в большинстве известных способов регулирования напряжения используется, в качестве возмущающего воздействия, амплитудное значение напряжения, измеряемое в точке установки устройства. При централизованном регулировании напряжения для обеспечения необходимого уровня напряжения составляется график генерации реактивной мощности исходя их пиков потребления активной мощности. На подстанциях используют устройства автоматического регулирования напряжения, которые применяют в своей работе устройства токовой компенсации, позволяющие определять напряжение у потребителя по нагрузке электрической сети.

Анализ существующих способов регулирования напряжения показал, что для регулирования напряжения в электрической сети 0,38 кВ используются устройства ПБВ, устанавливаемые на трансформаторах 10/0,4кВ, а использование устройств РПН ограничено и применяются они только в особых случаях, например, на производстве с резко неравномерной нагрузкой в течение дня. Устройства ПБВ, применяются в основном для сезонного регулирования, то есть переключаются дважды в год вручную, значения напряжения на вводах потребителей никак не отслеживаются. Проблемы с качеством электроэнергии решаются чаще всего только при наличии обращения от потребителя. В связи с этим необходима разработка новых способов адаптивного автоматического регулирования напряжения в электрической сети 0,38 кВ, учитывающих опыт использования существующих устройств и устраняющих их недостатки.

Разработан способ автоматического регулирования напряжения на электрической подстанции, представленный на рисунке 2.

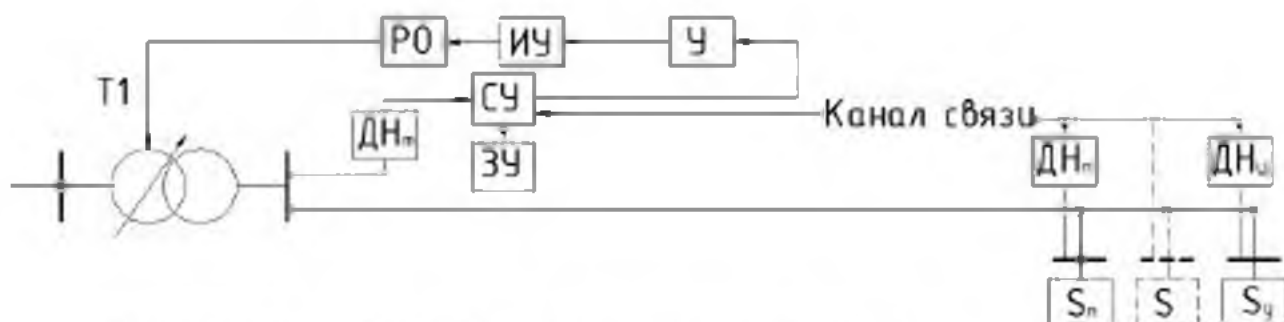
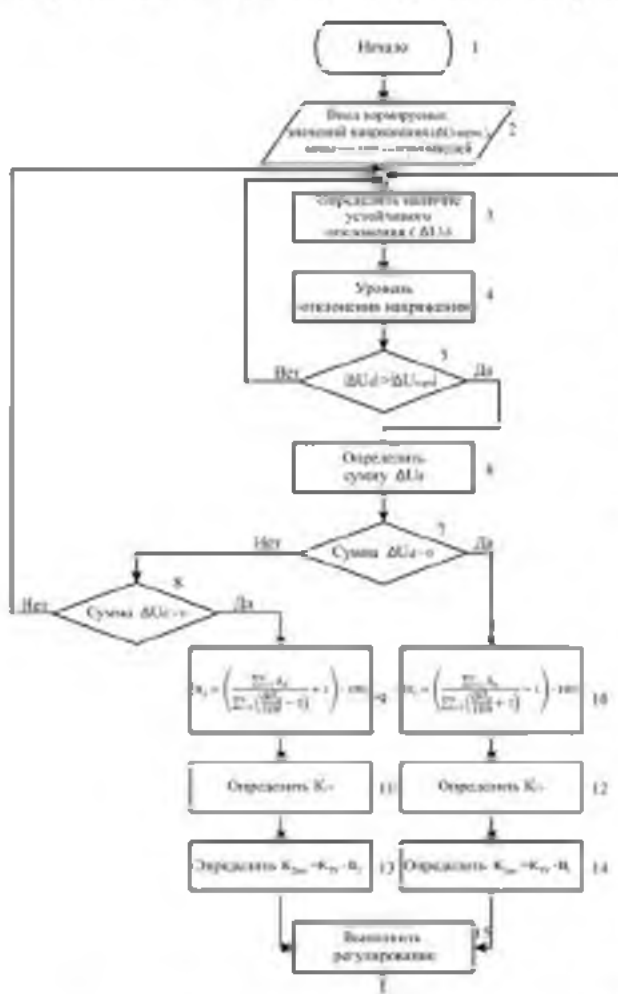


Рисунок 2 - Способ автоматического регулирования напряжения на электрической подстанции

Схема содержит: Т1- трансформатор с устройством РПН; устройства связи и передачи данных по соответствующему каналу; РО – рабочий орган; ИУ – исполняющее устройство; У – усилитель; СУ – система управления; ДН<sub>м</sub> – датчик напряжения на шинах трансформатора; ДН<sub>н</sub> – ДН<sub>у</sub> – датчики напряжения наиболее удаленного и приближенного потребителей (ими могут комплектоваться все потребители, подключенные к сети); ЗУ – задающее устройство.

Алгоритм работы способа автоматического регулирования напряжения на ТП представлен на рисунке 3. Начало алгоритма предусматривает ввод нормируемого значения отклонения напряжения  $\Delta U_{\text{норм}}$  и количество потребителей. Указанные данные сохраняются в блоке 2.



Блоком 3 производится определение наличия устойчивого установившегося отклонения напряжения  $\Delta U_d$  хотя бы у одного потребителя. Блок 4 определяет уровень, то есть значение отклонения напряжения. Блок 5 производит сравнение значения устойчивого установившегося отклонения напряжения с нормируемым значением, при котором следует производить регулирование напряжения. При отклонении напряжения больше нормируемого уровня, информация об этом поступает на блок 6, который определяет сумму отклонений напряжений у всех потребителей, подключенных к рассматриваемой сети. Блоки 7 и 8 выполняют функцию определения направления регулирования, то есть устанавливают

Рисунок 3 - Алгоритм регулирования напряжения в ТП с применением коэффициента регулирования

положительное или отрицательное значение имеет суммарное отклонение напряжения. Если суммарное отклонение имеет отрицательное значение, то сигнал поступает в начало блока 9, в этом случае расчет коэффициента регулирования (то есть значения, в %, на какое необходимо повысить напряжение с помощью устройства регулирования, например РПН) ведется с использованием формулы 2. Напряжение в этом случае надо будет снижать. Если суммарное отклонение имеет положительное значение, сигнал поступает на блок 10 и расчет коэффициента регулирования напряжения производится по формуле 1.

$$B_1 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n A_n}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta U_d}{100} + 1 \right)} - 1 \right) \cdot 100, \quad (1)$$

$$B_2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n A_n}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta U_d}{100} - 1 \right)} + 1 \right) \cdot 100, \quad (2)$$

где  $B_1$  – коэффициент, показывающий на какое значение необходимо повысить напряжение с помощью устройства регулирования, например РПН, %;  $A_n$  –  $n$ -ная точка балансового разграничения потребителя и электросетевой организации (ввод электропотребителя),  $n$  – количество анализируемых точек;  $\Delta U_d$  – значение отклонения напряжения на границе балансового разграничения потребителя и электросетевой организации, %.

Блоками 12 и 14 определяется коэффициент пропорциональности  $K_{\text{ты}}$  (зависит от типа регулирующего устройства) и коэффициент регулирования  $K_{\text{рег}}$ . Информация из блока 14 поступает на блок 15, который дает исполнительный сигнал на начало регулирования. Если условие блока 7 не выполняется, то сигнал поступает на блок 8. В этом случае схема работает аналогично с применением блоков 9,11,13. Если условия блоков 7, 8 не выполняются, тогда сигнал с блока 8 поступает на вход блока 3. Следует отметить, что контроль напряжения на вводах потребителей и регулирование осуществляется пофазно, что особенно актуально для сельских электрических сетей, имеющих несимметричную нагрузку.

Рассмотрен вопрос о необходимости ввода задержки на начало регулирования напряжения. Это вызвано необходимостью отстроиться от провалов напряжения и перенапряжений и в то же время не допустить длительного интервала времени, когда напряжение выходит за нормированное значение, так как длительное по времени отклонение напряжения от номинального значения чревато для электроприборов потребителя сокращением срока службы, перерасходом электроэнергии, а также выходом из строя.

Для того, чтобы определить необходимое время задержки были проанализированы статистические данные по времени отклонения напряжения. Было исследовано 186 случаев отклонения напряжения свыше 5%, общей



продолжительностью по времени 1008 часов. Результаты статистического исследования приведены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Время отклонения напряжения в точках балансового разграничения потребителя и электросетевой организации в зависимости от диапазона отклонения.

Анализ показал, что наиболее длительное отклонение напряжение по времени составляет 532 часа и находится в диапазоне напряжений +5...+7,5%. В этом диапазоне было 109 случаев отклонения напряжения. Опытным путем выявлено, что чаще всего (24 случая) время отклонения напряжения находится в диапазоне от 2-х до 3-х часов. Среднее время отклонения составляет 1 час 15 минут. Самое непродолжительное по времени отклонение напряжения составило 45 минут. Поскольку регулирование предполагается осуществлять одновременно для группы электропотребителей, то отсутствие выдержки времени может привести к худшим последствиям, нежели действие непосредственно провала напряжения или перенапряжения. Так, например, при работе сварочного аппарата возникает провал напряжения, на который реагирует устройство регулирования напряжения. Оно стремится поднять напряжение до уровня номинального, но в этот момент сварочный аппарат отключается, и добавленное регулирующим устройством напряжение суммируется с номинальным, что приводит к перенапряжению в сети и, как следствие, возможному выходу из строя ламп освещения и других электроприемников.

Сделан вывод, что наиболее приемлемой задержкой по времени является задержка равная одной минуте, как выдержка, позволяющая отстроиться от провалов напряжения вызванных резким перепадом напряжения от сварочных аппаратов, пуска электродвигателей и другого мощного оборудования. Это время соответствует времени отличия быстрых и медленных изменений напряжения согласно ГОСТ 32144-2013.

Разработан способ автоматического регулирования напряжения, учитывающий введение задержки по времени на регулирование напряжения представленный на рисунке 5.

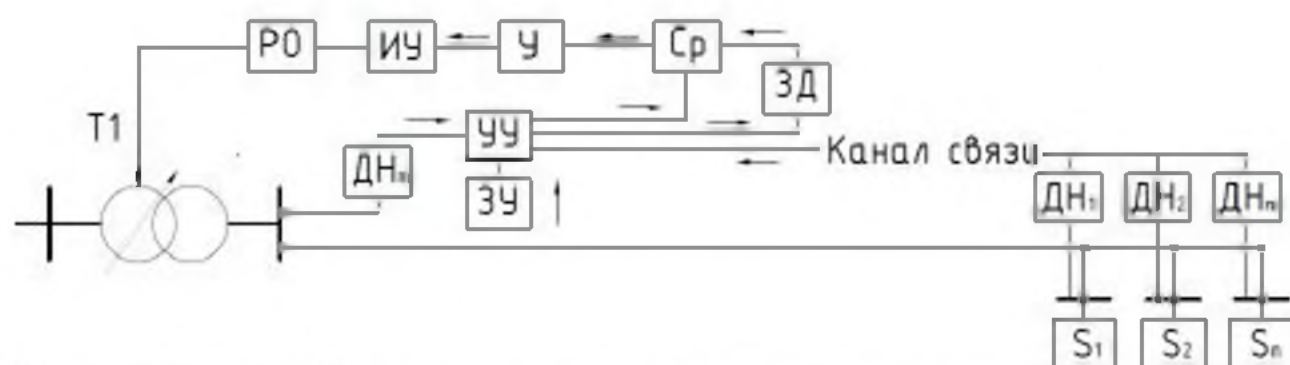


Рисунок 5 - Способ автоматического регулирования напряжения на электрической подстанции (или в точке группового регулирования напряжения) с учетом задержки времени на начало регулирования.

где Т1- трансформатор с устройством регулирования под нагрузкой (РПН) или устройство группового регулирования напряжения; Канал связи - устройства связи и передачи данных; РО – рабочий орган; ИУ – исполняющее устройство; У – усилитель; Ср – модуль принятия решения о регулировании напряжения; ЗД – задержка времени; УУ – устройство управления; ДН<sub>т</sub> – датчик напряжения трансформатора; ДН<sub>1</sub>...ДН<sub>п</sub> – датчики напряжения в точках передачи электроэнергии потребителям (или точки присоединения электроприемников, если регулирование осуществляется в собственных сетях потребителя); ЗУ – задающее устройство; S<sub>1</sub>-S<sub>п</sub> – потребители электрической энергии.

Предложен вариант с использованием дополнительных средств автоматического регулирования напряжения, таких как вольтодобавочные трансформаторы, стабилизаторы напряжения когда напряжение выходит за границы ±10% и его невозможно регулировать централизованно. В основном такой вариант возможен для ЛЭП, значительно превышающих рекомендованную длину и реконструкция которых по той или иной причине не планируется. В этом случае необходимо выбрать место установки дополнительного устройства регулирования напряжения.

Определение максимально возможного расстояния L от трансформаторной подстанции до места установки дополнительного средства регулирования напряжения (например, вольтодобавочного трансформатора) может выполняться по следующей формуле 3:

$$L = \frac{\Delta U_{yч} \cdot 0.38}{P \cdot R + Q \cdot X'} \quad (3)$$

где  $\Delta U_{yч}$  – заданное значение потерь напряжения на участке ЛЭП при котором требуется установка дополнительных средств регулирования напряжения, то есть при котором не возможно централизованно обеспечить отклонение напряжения менее заданного, В; R – активное сопротивление провода, Ом/км; X – реактивное сопротивление провода, Ом/км; P – активная мощность нагрузки ЛЭП, кВт; Q – реактивная мощность нагрузки ЛЭП, квар.



В третьей главе представлен обзор и анализ существующих методов расчета напряжения в различных точках электрической сети. К методам расчета электрической сети можно отнести такие наиболее известные методы, как метод симметричных составляющих, метод междуузлового напряжения (метод двух узлов), метод фазных координат.

В настоящее время развитие компьютерной техники дает возможность использовать метод фазных координат без ограничения, позволяя обрабатывать при расчетах большие объемы информации. Учитывая это, можно сказать, что метод фазных координат стал наиболее удобен при расчете несимметричных режимов в трехфазных цепях. Он позволяет рассчитывать и моделировать трехфазные системы и дает результаты, сопоставимые с результатами расчетов другими методами, и в частности методом симметричных составляющих, что подтверждено в работах Закарюкина В.П., Крюкова А.В., Попова Н.М.. Так, сравнение результатов расчета с применением метода фазных координат и метода симметричных составляющих показало расхождение всего лишь в 0,05%. При этом метод фазных координат позволяет получать все необходимые параметры одновременно по трем фазам. Учитывая вышеизложенное, расчет математической модели рационально вести с использованием метода фазных координат. Подробно использование данного метода для сетей 10 кВ и 0,38 кВ рассмотрено в работах Попова Н.М., Солдатова В.А., Олина Д.М., Клочкова А.Н. и других ученых, где приведены приемы по моделированию различных элементов электрической сети. Но метод не использовался при моделировании систем регулирования напряжения, в частности для определения коэффициента регулирования напряжения. В настоящей работе расширяется область применения метода фазных координат для определения коэффициента регулирования в системах адаптивного автоматического регулирования напряжения.

Выполнено моделирование электрической сети 0,38 кВ, содержащей средства регулирования напряжения методом фазных координат.

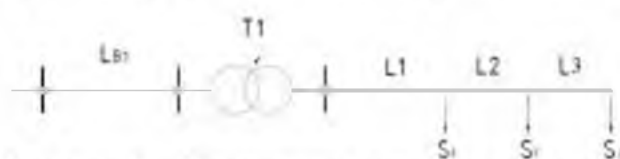


Рисунок 6 – Упрощенная расчетная схема электрической сети

Составлена упрощенная схема электрической сети, представленная на рисунке 6. В соответствии с методом фазных координат каждый элемент электрической сети представляется в виде 2К-полустника, изображенного на рисунке 7.

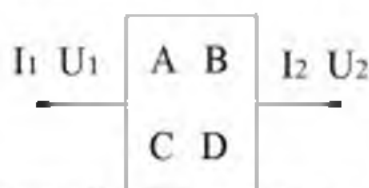


Рисунок 7 – 2К - полюсник

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_2 \\ I_2 \end{pmatrix}; \quad \begin{aligned} U_1 &= A \cdot U_2 + B \cdot I_2 \\ I_1 &= C \cdot U_2 + D \cdot I_2 \end{aligned}$$

(4)



где,  $I_1, U_1$  – ток и напряжение на входе в 2К-полюсник;  $A, B, C, D$  – коэффициенты передачи 2К-полюсника;  $I_2, U_2$  – ток и напряжение на выходе из 2К-полюсника.

В нашем случае главной задачей моделирования электрической сети 0,38кВ является нахождение коэффициента регулирования напряжения в электрической сети посредством изменения коэффициента трансформации силового трансформатора или с помощью дополнительных средств, позволяющих производить регулирование напряжения, какими являются вольтодобавочные трансформаторы, стабилизаторы напряжения. После замены каждого элемента электрической сети К- полюсниками расчетная схема сети имеет вид, изображенный на рисунке 8.

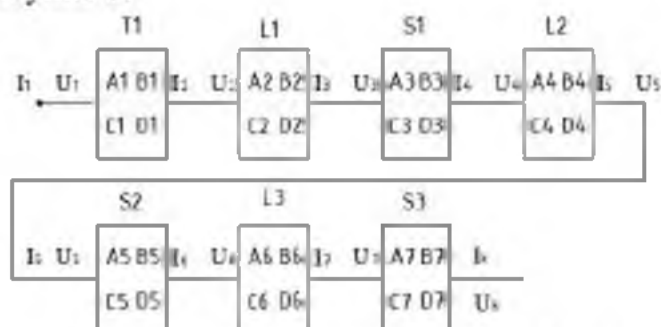


Рисунок 8 – Расчетная схема замещения электрической сети с изображением элементов сети в виде 2К - полюсников

Представленная математическая модель позволяет рассчитывать значения напряжений и токов в различных точках электрических сетей, при разном количестве и мощности нагрузок, подключенных к ним. Расчет токов и напряжений производим с конца ЛЭП при заданных значениях  $I_k$  и  $U_k$ . Задаем нагрузки  $S1, S2, S3$  и длины участков  $L1, L2, L3$ , а так же параметры сопротивления и проводимости используемых элементов сети, таких как силовой трансформатор и используемые на разных участках ЛЭП провода. Следует учитывать, что значение  $U_k$  не должно быть задано с отклонением от номинального более  $\pm 10\%$ , установленного ГОСТ или  $\pm 5\%$ , как предлагается в данной работе. Ток  $I_k$  задается равным нулю, так как это ток в конце линии, за последней нагрузкой  $S3$ .

Моделируем нагрузку потребителя  $S3$ . Для нахождения напряжения  $U7$  потребителя  $S3$  расчет будет вестись в матричной форме согласно формуле 5.

$$\begin{vmatrix} U_7 \\ I_7 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_7 & B_7 \\ C_7 & D_7 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U_k \\ I_k \end{vmatrix} \quad (5)$$

Уравнение 2К-полюсника для потребителя  $S3$ :

$$\begin{aligned} U_7 &= A_7 \cdot U_k + B_7 \cdot I_k \\ I_7 &= C_7 \cdot U_k + D_7 \cdot I_k \end{aligned} \quad (6)$$

Отсюда коэффициенты передачи будут равны:

$$A_7 = 1; B_7 = 0; C_7 = Y_{S3}; D_7 = 1.$$

Напряжения и ток на потребителе S3 будут равны:

$$U_7 = U_k ;$$

$$I_7 = Y_{S3} \cdot U_k + I_k .$$

Рассчитав аналогично все элементы электрической сети, выразим искомые величины через напряжения и токи в конце линии, получим окончательную формулу. Все указанные в формуле значения представляются в соответствующей матричной форме. Данное выражение с собранными в скобках эквивалентными сопротивлениями моделируемой ЛЭП, с подключенными к ней нагрузками для расчета напряжения на трансформаторе примет следующий вид:

$$U_1 = U_k \cdot k_{\text{эки}} + I_k \cdot Z_{\text{эки}} \quad (7)$$

$$I_1 = \frac{U_k \cdot Y_{\text{эки}} + I_k \cdot Z_{\text{эки}}}{K_{\text{эки}}} \quad (8)$$

где  $Z_{\text{эки}}$  – эквивалентное сопротивление ЛЭП с учетом подключенных к ней нагрузок;  $Y_{\text{эки}}$  – эквивалентная проводимость ЛЭП с учетом параметров подключенной к ней нагрузки, 1/Ом;  $K_{\text{эки}}$  – эквивалентный коэффициент трансформации ЛЭП по току, или эквивалентный коэффициент усиления тока вдоль ЛЭП. Произведем расчеты для остальных точек электрической сети. Результаты расчетов представим в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Сводная таблица для расчета напряжения на разных участках сети и у потребителей

$U_7 = U_k ;$	
$U_6 = U_k \cdot k_{\text{эки}6} + I_k \cdot Z_{\text{эки}6}$	$k_{\text{эки}6} = 1 + B_6 \cdot Y_{S3}$ $Z_{\text{эки}6} = B_7$
$U_5 = U_k \cdot k_{\text{эки}5} + I_k \cdot Z_{\text{эки}5}$	$k_{\text{эки}5} = 1 + B_6 \cdot Y_{S3}$ $Z_{\text{эки}5} = B_6$
$U_4 = U_k \cdot k_{\text{эки}4} + I_k \cdot Z_{\text{эки}4}$	$k_{\text{эки}4} = 1 + B_6 \cdot Y_{S3} + B_4 \cdot Y_{S2} +$ $+ B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_4 \cdot Y_{S3}$ $Z_{\text{эки}4} = B_6 + B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 + B_4$
$U_3 = U_k \cdot k_{\text{эки}3} + I_k \cdot Z_{\text{эки}3}$	$k_{\text{эки}3} = 1 + B_6 \cdot Y_{S3} + B_4 \cdot Y_{S2} +$ $+ B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} +$ $+ B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_4 \cdot Y_{S3}$ $Z_{\text{эки}3} = B_6 + B_4$
$U_2 = U_k \cdot k_{\text{эки}2} + I_k \cdot Z_{\text{эки}2}$	$k_{\text{эки}2} = 1 + B_6 \cdot Y_{S3} + B_4 \cdot Y_{S2} + B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_4 \cdot Y_{S3} +$ $+ B_2 \cdot Y_{S1} + B_2 \cdot Y_{S3} \cdot B_6 \cdot Y_{S2} + B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} +$ $B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S3} +$ $B_2 \cdot Y_{S2} + B_2 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_2 \cdot Y_{S1}$

	$Z_{\text{nod}U_1} = B_6 + B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 +$ $+ B_4 + B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 +$ $B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 +$ $+ B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 + B_2 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 + B_2$
$U_1 = U_k \cdot k_{\text{nod}U_1} + I_k \cdot Z_{\text{nod}U_1}$	$k_{\text{nod}U_1} = K_{m1} \cdot (1 + B_6 \cdot Y_{S3} + B_4 \cdot Y_{S2} +$ $B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_4 \cdot Y_{S3} + B_2 \cdot Y_{S1} +$ $B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} +$ $B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S3} +$ $B_2 \cdot Y_{S2} + B_2 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_2 \cdot Y_{S3}) +$ $B_1 \cdot Y_{S1} + B_1 \cdot Y_{S1} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_1 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} +$ $B_1 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_1 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S3} +$ $B_1 \cdot Y_{S2} + B_1 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + B_1 \cdot Y_{S3}$ $Z_{\text{nod}U_1} = K_{m1} \cdot B_6 + K_{m1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 + K_{m1} \cdot B_4 +$ $K_{m1} \cdot B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_6 + K_{m1} \cdot B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 +$ $K_{m1} \cdot B_2 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 + K_{m1} \cdot B_2 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 + K_{m1} \cdot B_2 +$ $B_1 \cdot Y_{S1} \cdot B_6 + B_1 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 + B_1 \cdot Y_{S1} \cdot B_4 +$ $B_1 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 + B_1$

Таблица 2 – Сводная таблица для расчета токов на разных участках сети и у потребителей

$I_7 = Y_{\text{nod}7} \cdot U_k + I_k$	$Y_{\text{nod}7} = Y_{S3}$
$I_6 = U_k \cdot Y_{\text{nod}6} + I_k \cdot Z_{\text{nod}6}$	$Y_{\text{nod}6} = Y_{S2} + Y_{S2} \cdot B_7 \cdot Y_{S3} + Y_{S3}$ $Z_{\text{nod}6} = Y_{S2} \cdot B_7 + 1$
$I_5 = U_k \cdot Y_{\text{nod}5} + I_k \cdot Z_{\text{nod}5}$	$Y_{\text{nod}5} = Y_{S2} + Y_{S2} \cdot B_7 \cdot Y_{S3} + Y_{S3}$ $Z_{\text{nod}5} = Y_{S2} \cdot B_7 + 1$
$I_4 = U_k \cdot Y_{\text{nod}4} + I_k \cdot Z_{\text{nod}4}$	$Y_{\text{nod}4} = Y_{S1} + Y_{S1} \cdot B_7 \cdot Y_{S3} + Y_{S1} \cdot B_5 \cdot Y_{S2} +$ $+ Y_{S1} \cdot B_5 \cdot Y_{S2} \cdot B_7 \cdot Y_{S3} + Y_{S1} \cdot B_5 \cdot Y_{S3} +$ $+ Y_{S2} + Y_{S2} \cdot B_7 \cdot Y_{S3} + Y_{S3}$ $Z_{\text{nod}4} = Y_{S1} \cdot B_7 + Y_{S1} \cdot B_5 \cdot Y_{S2} \cdot B_7 +$ $+ Y_{S1} \cdot B_5 + Y_{S2} \cdot B_7 + 1$
$I_3 = U_k \cdot Y_{\text{nod}3} + I_k \cdot Z_{\text{nod}3}$	$Y_{\text{nod}3} = Y_{S1} + Y_{S1} \cdot B_7 \cdot Y_{S3} + Y_{S1} \cdot B_5 \cdot Y_{S2} +$ $+ Y_{S1} \cdot B_5 \cdot Y_{S2} \cdot B_7 \cdot Y_{S3} + Y_{S1} \cdot B_5 \cdot Y_{S3} +$ $+ Y_{S2} + Y_{S2} \cdot B_7 \cdot Y_{S3} + Y_{S3}$ $Z_{\text{nod}3} = Y_{S1} \cdot B_7 + Y_{S1} \cdot B_5 \cdot Y_{S2} \cdot B_7 +$ $+ Y_{S1} \cdot B_5 + Y_{S2} \cdot B_7 + 1$
$I_2 = I_3$	
$I_1 = \frac{U_k \cdot Y_{\text{nod}1} + I_k \cdot Z_{\text{nod}1}}{K_{m1}}$	$Y_{\text{nod}1} = Y_{S1} + Y_{S1} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} + Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} +$ $Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S3} + Y_{S2} + Y_{S2} \cdot B_6 \cdot Y_{S3} + Y_{S3}$ $Z_{\text{nod}1} = Y_{S1} \cdot B_6 + Y_{S1} \cdot B_4 \cdot Y_{S2} \cdot B_6 + Y_{S1} \cdot B_4 + Y_{S2} \cdot B_6 + 1$



Предложенная математическая модель системы адаптивного автоматического регулирования напряжения позволяет произвести расчет напряжения и тока каждого элемента сети. С ее помощью возможно рассчитать напряжение у потребителей и на трансформаторной подстанции. Модель так же позволяет рассчитывать расстояние от пункта централизованного (группового) регулирования напряжения, например трансформаторной подстанции до точки, где с помощью централизованного регулирования напряжения нельзя добиться отклонения менее регламентированного ГОСТ, то есть точки установки дополнительных средств регулирования напряжения. Алгоритм определения места установки дополнительного средства регулирования в этом случае следующий. Необходимо определить и задать в модели значения, характеризующие все элементы сети, такие, как проводимости нагрузки, сопротивление проводов на участках ЛЭП, коэффициенты 2К-полюсников каждого элемента сети. Затем необходимо задать в начале ЛЭП максимальное значение отклонения напряжения, которое возможно получить с помощью средств централизованного (группового) регулирования, например РПН трансформатора 10/0,4 кВ и при этом которое не выходит за рамки ГОСТ (+10%) или за рамки заданного нормируемого показателя, предположим +5% (у первого потребителя). После этого выполнить расчет напряжения в конце ЛЭП, используя математическую модель. То есть напряжение в конце ЛЭП  $U_k$  можно выразить из формулы определения  $U_1$  (таблица 1):

$$U_k = \frac{U_1 - I_k \cdot Z_{\text{пол}U_1}}{k_{\text{пол}U_1}}, \text{ или, при } I_k=0: U_k = \frac{U_1}{k_{\text{пол}U_1}}.$$

После этого строится график распределения напряжения в зависимости от длины участков ЛЭП и нагрузки на участках. В точке ЛЭП, где напряжение отклоняется более нормированного значения (например -5% или -10%), устанавливается дополнительное средство регулирования напряжения, например ВДТ.

Сравнение результатов расчетов с применением формулы 3 и с применением математической модели показали, что модель дает результат с точностью на 2-5% выше, чем выражение 3. Это связано с тем, что модель учитывает изменение напряжения на каждом участке ЛЭП и влияние на него всех подключенных к ЛЭП нагрузок.

Для осуществления автоматического регулирования необходимо определять коэффициент регулирования напряжения, задающего необходимый уровень и направление регулирования. В соответствии с разработанным способом автоматического регулирования напряжения на электрической подстанции коэффициент, показывающий на какое значение необходимо изменить уровень отклонения действующего напряжения в ТП при его положительном отклонении

от нормативного значения, вычисляется по формуле 1 или 2. Пользуясь вышеприведенной математической моделью, выразим коэффициент  $B_1$  из формулы (1).

Так как в формуле (1) используется уровень отклонения напряжения на границе балансового разграничения потребителя и электросетевой организации, а математическая модель позволяет получить действующие значения напряжения в контрольных точках, то необходимо перевести действующие значения напряжения, полученные при моделировании в уровни отклонения напряжения  $\Delta U_d$ , используя формулу (9):

$$\Delta U_d = \frac{U_n - U_{ном}}{\frac{U_{ном}}{100}}, \quad (9)$$

где  $U_n$  – действующее напряжение в конкретной точке электрической сети (например, на вводе потребителя);  $U_{ном}$  – номинальное напряжение электрической сети;

Количество точек балансового разграничения потребителя и энергоснабжающей организации (может быть разное в каждом рассматриваемом случае), в нашем примере  $A=4$ . Подставив найденные значения напряжений  $U_8$ ,  $U_6$ ,  $U_4$ ,  $U_3$  в формулу (1) получим:

$$B_1 = \left( 4 \cdot \left[ \left( \frac{\Delta U_7}{100} + 1 \right) + \left( \frac{\Delta U_5}{100} + 1 \right) + \left( \frac{\Delta U_3}{100} + 1 \right) + \left( \frac{\Delta U_2}{100} + 1 \right) \right] - 1 \right) \cdot 100 \quad (10)$$

Или:

$$B_1 = \left( 4 \cdot \left[ \left( \frac{U_k - U_{ном}}{U_{ном}} + 1 \right) + \left( \frac{(U_k \cdot Y_{авт3} + I_k \cdot Z_{авт3}) - U_{ном}}{U_{ном}} + 1 \right) + \left( \frac{U_k \cdot Y_{авт5} + I_k \cdot Z_{авт5} - U_{ном}}{U_{ном}} + 1 \right) + \left( \frac{U_k \cdot Y_{авт6} + I_k \cdot Z_{авт6} - U_{ном}}{U_{ном}} + 1 \right) \right] - 1 \right) \cdot 100 \quad (11)$$

Далее определим коэффициент регулирования напряжения в соответствии с выражением:

$$K_{рег} = K_{тy} \cdot B_1, \quad (12)$$

где  $K_{тy}$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа применяемого устройства регулирования, принимается для РПН, вольтодобавочных трансформаторов и стабилизаторов напряжения равным  $w/\%$  ( $w$ -количество витков обмотки трансформатора, на которое надо переключить РПН (устройство в

ВДТ, стабилизаторе) для изменения выходного напряжения на 1%). Для батарей конденсаторов  $K_{ту}$  равен  $C/\%$ , где  $C$  – емкость батареи конденсаторов, на которую надо переключить устройство регулирования емкости для изменения выходного напряжения на 1%.

Таким образом, математическая модель с использованием метода фазных координат позволяет одновременно для трех фаз определить коэффициент регулирования напряжения.

В четвертой главе сформированы требования к системе адаптивного автоматического регулирования напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ. Разработана структурная схема системы адаптивного автоматического регулирования напряжения. Разобран пример использования дополнительных средств регулирования напряжения в адаптивной системе автоматического регулирования напряжения (рисунок 9).

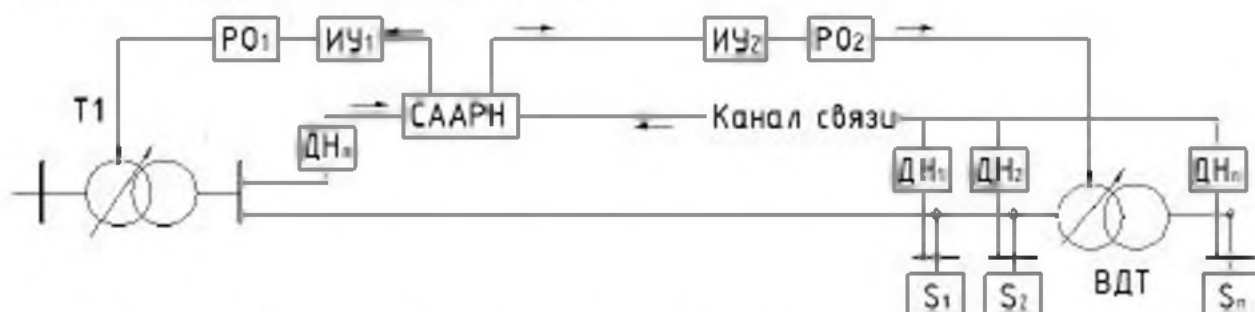


Рисунок 9 – Структурная схема адаптивной системы автоматического регулирования напряжения с использованием вольтодобавочного трансформатора в качестве дополнительного средства регулирования напряжения.

Разработана структурная схема СААРН представленная на рисунке 10.

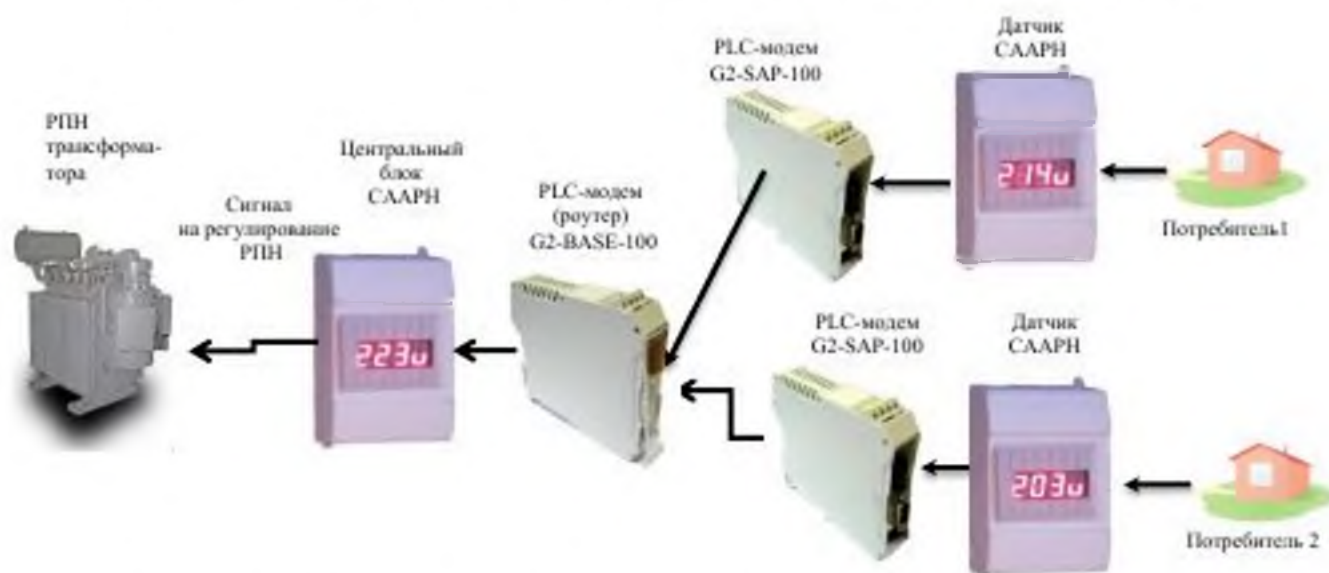


Рисунок 10 – Структурная схема СААРН при регулировании напряжения с помощью РПН.

Произведен выбор основных компонентов системы, и каналов связи между датчиками напряжения и блоком регулирования напряжения. Рассмотрены другие



варианты комплектации СААРН (при использовании ВДТ, стабилизаторов напряжения). В связи с тем, что для стабильной работы необходим устойчивый канал по обмену информацией о фактическом напряжении на вводах потребителей, были проанализированы существующие виды передачи данных на расстояние, изложены их особенности.



Рисунок 11 - Общий вид стенда для испытания экспериментального образца СААРН

Разработан и испытан экспериментальный образец СААРН. Он выполнен с использованием микроконтроллеров Atmel AVR. Внешний вид стенда для испытаний экспериментального образца СААРН представлен на рисунке 11. Проведенные испытания в полной мере показали работоспособность предложенного способа. Экспериментальный образец внедрен в учебный процесс на кафедре «Электроснабжение» Орловского ГАУ.

В пятой главе произведен расчет капитальных вложений в СААРН в сельских электрических сетях 0,38 кВ при использовании наиболее распространенных технологий связи, таких как Wi-Fi, GSM и PLC. Рассчитаны эксплуатационные издержки по каждому варианту и в качестве наиболее экономически выгодного и отвечающего техническим требованиям по использованию в сельских электрических сетях, принят способ передачи данных на базе узкополосных PLC модемов. Определен экономический эффект от использования СААРН в сельских электрических сетях 0,38 кВ. Экономический эффект получен за счет сокращения потерь активной мощности и за счет увеличения срока службы электрооборудования при снижении отклонения напряжения. Произведен расчёт экономической эффективности от использования СААРН при групповом регулировании напряжения с помощью стабилизатора напряжения (который можно установить на ТП, или в другой точке сети для группового регулирования напряжения) и узкополосных PLC модемов при снижении отклонения напряжения от +7,5% (середины диапазона +5...+10%) до 2,5% (середины диапазона 0...+5%) и от +12,5% до +2,5%. Построены графики зависимости экономии электроэнергии в денежном выражении, потребляемой электроприборами от их мощности при снижении отклонения напряжения от +7,5% до +2,5% и при снижении отклонения от +12,5% до +2,5%. График зависимости срока окупаемости системы СААРН от фактического времени нагрузки равной 40кВА представлен на рисунке 14.

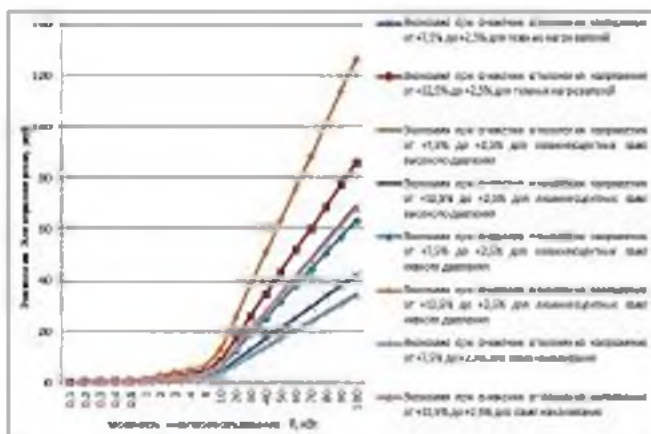


Рисунок 12 – График зависимости экономии электроэнергии в денежном выражении, потребляемой электроприборами от их мощности при снижении отклонения напряжения от +7,5% до +2,5% и при снижении от +12,5% до +2,5%.

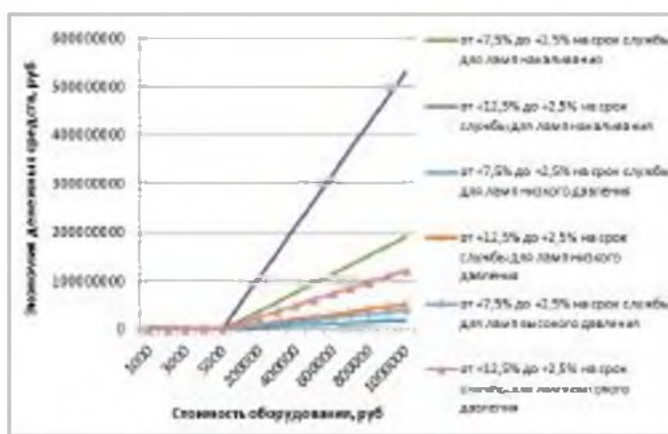


Рисунок 13 – График зависимости экономии от изменения срока службы электроприемников при снижении отклонения напряжения от +7,5% до +2,5% и при снижении от +12,5% до +2,5%.

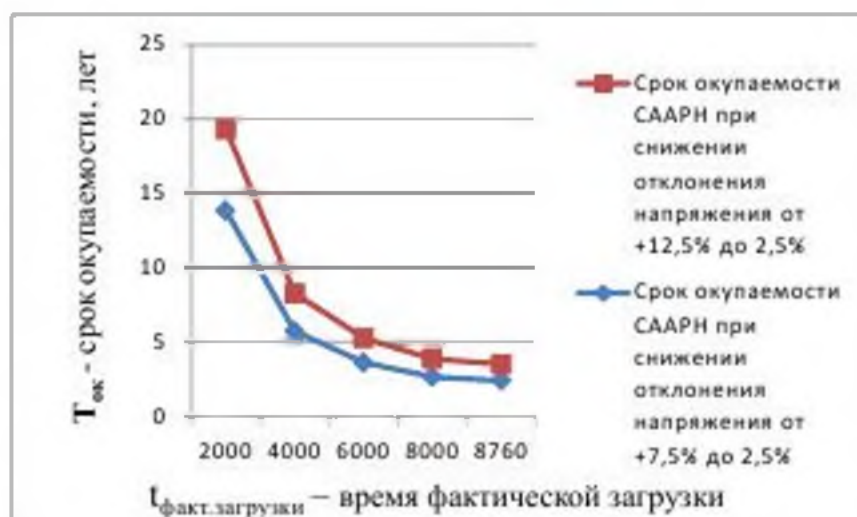


Рисунок 14 - Зависимость срока окупаемости СААРН на базе трёхфазного стабилизатора напряжения мощностью 40кВА и передачей данных с помощью узкополосных PLC модемов от времени использования максимальной нагрузки 40 кВА при снижении отклонения напряжения от +7,5% до 2,5% и от +12,5% до +2,5%.

Стоит отметить, что для получения наилучшего экономического эффекта необходимо, чтобы отклонение напряжения на вводах всех потребителей после регулирования не превышало  $\pm 5\%$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложены новые решения, позволяющие увеличить эффективность функционирования систем электроснабжения за счет использования системы адаптивного автоматического регулирования напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ. Основными результатами теоретических и практических экспериментальных исследований являются:



1. Произведен анализ способов и средств автоматического регулирования напряжения в электрических сетях 0,38кВ. Анализ показал, что известные устройства производят регулирование напряжения без учета фактического напряжения на вводах потребителей и ввиду большой протяженности линий электропередач 0,38кВ не всегда способны обеспечить требуемый уровень напряжения у потребителя электрической энергии.

2. Произведен анализ статистических данных по быстрым и медленным изменениям напряжения у потребителей, подключенных к сельским электрическим сетям 0,38 кВ на примере Орловской области. Отмечена важность ввода задержки по времени на регулирование, в связи с чем были проанализированы статистические данные по времени отклонения напряжения. Обосновано введение задержки на регулирование (при групповом регулировании напряжения) не менее 1 минуты.

3. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать коэффициент регулирования напряжения в зависимости от напряжения в различных точках электрической сети 0,38 кВ, отличающаяся тем, что она позволяет учесть значения напряжения на вводах подключенных к электрической сети 0,38 кВ потребителей при автоматическом регулировании напряжения. Предложен вариант с применением дополнительных средств регулирования напряжения в случае, когда отклонение напряжения выходит за рамки возможного регулирования с помощью РПН трансформатора. Разработана методика выбора места установки дополнительного средства регулирования напряжения. Разработанная математическая модель и выполненная на ее основе компьютерная программа внедрены в проектной организации ООО «ЭнерГарант» и за 2015 год дали экономический эффект в размере 40 тыс. руб. за счет автоматизации процесса расчетов параметров ЛЭП 0,38 кВ и соответствующего увеличения объема выполняемой работы проектировщиками.

4. На основе проведенных исследований разработаны новые способы и технические средства адаптивного автоматического регулирования напряжения, позволяющие производить регулирование напряжения с учетом фактических значений напряжений на вводах потребителей электрической энергии. Получен патент на изобретение.

5. Разработан и испытан экспериментальный образец системы адаптивного автоматического регулирования напряжения в электрической сети 0,38кВ. Испытания показали применимость предложенного способа регулирования напряжения и работоспособность экспериментального образца СААРН. Стенд по исследованию СААРН внедрен в учебный процесс ФГБОУ ВО Орловского ГАУ.

6. Выполнено технико-экономическое обоснование автоматического регулирования напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ. Произведен расчет экономического эффекта от использования системы и срока ее



окупаемости. Построен график зависимости срока окупаемости СААРН от времени использования на примере конкретной максимальной нагрузки при заданном снижении отклонения напряжения. Рассчитан пример срока окупаемости от сокращения перерасхода активной мощности при снижении отклонения напряжения от +7,5% до +2,5% для группового регулирования напряжения с применением системы СААРН на базе стабилизатора напряжения мощностью 40кВА с использованием узкополосных PLCмодемов при общей стоимости 270 400 рублей. Срок окупаемости при этих условиях составил 2 года и 5 месяцев.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

– в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Голиков И.О. Автоматическое регулирование напряжения на трансформаторной подстанции: способ, алгоритм и метод расчета / Виноградов А.В., Голиков И.О., Бородин М.В., Бородина Е.В. // Промышленная энергетика. – 2014. – № 11.

2. Голиков, И.О. Время отклонения напряжения как параметр его автоматического регулирования / И. О. Голиков, А. В. Виноградов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2015. - № 5. - С. 14-18.

3. Голиков И.О., Виноградов А.В. Математическое моделирование системы адаптивного автоматического регулирования напряжения в электрической сети 0,38 кВ /Голиков И.О., Виноградов А.В.// ВЕСТНИК НГИЭИ №2(57), 2016, с.30-38

4. Патент RU 2 527 479 C1, МПК H02J 3/12 (2006.01), Способ автоматического регулирования напряжения на электрической подстанции [Текст] / Виноградов А. В. , Голиков И. О. заявитель и патентообладатель (ФГБОУ ВПО Орел ГАУ) - №2013122161/07, 14.05.2013, Опубликовано: 10.09.2014 Бюл. № 25.

– в журналах, сборниках научных трудов:

5. Голиков И. О. Основные способы регулирования напряжения в энергосистемах. / Виноградов А.В., Голиков И. О. // Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства. Материалы Международной научно-практической конференции 4-5 апреля 2013.- Орел: Изд-во Орел ГАУ, 2012, с 333-336.

6. Голиков И. О. Современные стабилизаторы напряжения, их разновидности, достоинства и недостатки. / Виноградов А.В., Голиков И. О. // Научно-практический журнал, АГРОТЕХНИКА И ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ, № 1 (1), 2014г. II-я Международная научно-практическая конференция «Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства»

7. Голиков И. О. Проблемы в энергетике, препятствующие повышению качества электроэнергии / Голиков И. О. // Современные материалы, техника и технология [текст]: материалы 2-й Международной научно-практической

конференции (25 декабря 2012 года)/ редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2012. – С. 87-89.

8. Голиков И.О., Каналы передачи данных системы адаптивного автоматического регулирования напряжения в сельских электрических сетях. // «Инновационная наука», №1 ч.2, 2016. – М.: Аэтерна, 2016. – 271с., с.41-43.

9. Голиков И.О. Лабораторные испытания устройства автоматического регулирования напряжения в электрической сети, построенного на базе микроконтроллеров ATMEGA AVR. /Виноградов А.В., Голиков И.О.// Актуальные проблемы в энергетике и агропромышленном комплексе: матер. Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием (г. Благовещенск, 10 апреля 2015г.) – Благовещенск: ДальГАУ, 2015. – 250 с., с. 7-12