

На правах рукописи

ПСАРЕВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКИХ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ РАЗРАБОТКИ ПУНКТОВ
СЕКЦИОНИРОВАНИЯ С ФУНКЦИЕЙ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 0,4 КВ**

Специальность: 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и
энергоснабжение агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина»

Научный руководитель: **Виноградова Алина Васильевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева

Официальные оппоненты: **Грачёва Елена Ивановна**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Калинин Вячеслав Фёдорович, доктор технических наук, профессор, советник при ректорате, профессор кафедры «Электроэнергетика» ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»

Защита состоится 10.12.2026 в 12.30 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Радиальное, в большинстве, исполнение сельских линий электропередачи (ЛЭП) 0,4 кВ, наряду с завышенной их длиной (в среднем 0,9-1,2 км) приводит к необоснованным перерывам в электроснабжении сельских потребителей, которые могут составлять более 72-х часов в год. Средние удельные значения ущербов для сельских потребителей при отключениях в сети 0,4 кВ составляют более 250 руб./ч. Затраты на устранение отключений составляют более 1900 руб./ч. При отсутствии средств секционирования возникает опасность поражения людей и животных электрическим током из-за недостаточной чувствительности защитных коммутационных аппаратов к удалённым однофазным коротким замыканиям. Любое повреждение в ЛЭП приводит к отключению всех потребителей, а предлагаемые средства секционирования, предохранители и автоматические выключатели, секционирующие пункты (СП), выполненные на базе электромеханических реле, не позволяют организовать дистанционное управление этими устройствами, интегрировать их в системы диспетчерского управления, в интеллектуальные электрические сети. Мультиконтактные коммутационные системы, как средство секционирования и резервирования в некоторых случаях не применимы. Электросетевые организации отмечают необходимость в разработке пунктов секционирования, оснащённых функциями автоматического ввода резерва (СПАВР). Отсутствуют методики выбора количества и мест установки СП и пунктов автоматического включения резерва (АВР), а также СПАВР в сельские электрические сети 0,4 кВ, учитывающие критерии обеспечения чувствительности защиты ЛЭП, надёжности электроснабжения и технико-экономические критерии. Не проработаны решения по автоматическому возврату схем электрических сетей, содержащих СП и АВР, СПАВР в исходное состояние для восстановления нормального режима работы данных сетей, решения по автоматическому согласованию работы СП и АВР. Поэтому разработка пунктов секционирования и резервирования линий электропередачи 0,4 кВ, позволяющих повысить надёжность электроснабжения сельских потребителей, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Учёными Спеваковым П.И., Верховским Я. Л., Ершовым А.М., Сидоровым А.И., Валеевым Р.Г. предложены способы секционирования ЛЭП 0,4 кВ предохранителями и автоматическими выключателями. Вопросам автоматического секционирования и резервирования электрических сетей посвящены работы Васильева В.Г., Лещинской Т.Б., Виноградова А.В., Виноградовой А.В., Андриевского Е.Н. и других учёных. Проблемам надёжности и эффективности систем электроснабжения посвящены труды Будзко И.А., Грачевой Е.И., Попова Н.М., Папкова Б.В., Шпигановича А.Н., Зацепиной В.И., Виноградова А.В. Интеллектуальным электрическим сетям посвящены работы Калинина В.Ф., Wei Q., Hongbin S., Goulden M., Bedwell B., Rennick-Egglestone S., Rodden T, Spence A. и других зарубежных исследователей. Однако в этих работах не достаточно рассматриваются вопросы создания пунктов секционирования, оснащаемых функциями АВР и методик выбора мест их установки.

Объект исследования: ЛЭП 0,4 кВ в системах электроснабжения сельских потребителей и средства их секционирования и резервирования.

Предмет исследования: параметры и режимы работы воздушных линий электропередачи 0,4 кВ, методики выбора количества и мест установки пунктов секционирования и резервирования, а также алгоритмы согласования их работы и технические средства реализации.

Цель работы: повышение надёжности электроснабжения сельских потребителей и защищённости сельских линий электропередачи посредством разработки пунктов секционирования с функцией автоматического резервирования 0,4 кВ.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ параметров конфигурации сельских электрических сетей 0,4 кВ, анализ надёжности электроснабжения сельских потребителей на примере Орловского района электрических сетей и обосновать необходимость применения СПАВР;

2. Разработать методику выбора количества и мест установки пунктов секционирования с функцией резервирования в сельских электрических сетях

0,4 кВ, учитывающую критерии обеспечения чувствительности защиты ЛЭП, надёжности электроснабжения и технико-экономические критерии;

3. Выполнить анализ существующих и разработать новые способы автоматизации электрических сетей 0,4 кВ, содержащих пункты секционирования с функцией резервирования 0,4 кВ;

4. Разработать экспериментальный образец пункта секционирования с функцией резервирования электрических сетей 0,4 кВ и провести его лабораторные испытания;

5. Определить экономическую эффективность применения разработанного пункта секционирования с функцией резервирования в сельских линиях электрической сети 0,4 кВ.

Научная новизна работы заключается в:

- разработанной методике выбора количества и мест установки пунктов секционирования и резервирования линий электропередачи 0,4 кВ, учитывающую критерии обеспечения чувствительности защиты ЛЭП, надёжности электроснабжения и технико-экономические критерии;

- разработанных новых способах согласования работы пунктов секционирования и резервирования линий электропередачи 0,4 кВ, алгоритмах их реализации, обеспечивающих запрет АВР на короткое замыкание и возврат схемы в исходное состояние после успешной работы АВР;

- разработанном пункте секционирования и резервирования электрической сети 0,4 кВ с микроконтроллерным блоком управления, оснащённым средствами интеграции в интеллектуальные электрические сети.

Теоретическая и практическая значимость. Заключается в разработке методик определения количества и мест установки пунктов секционирования и резервирования сельских линий электропередачи 0,4 кВ, позволяющих выбрать количество и места установки СП и АВР, СПАВР с учётом критериев чувствительности защитных аппаратов, надёжности электроснабжения потребителей и технико-экономических показателей. Также теоретическая ценность работы заключается в разработанных способах согласования работы пунктов секционирования и резервирования ЛЭП 0,4 кВ, позволяющих

осуществлять отключение пункта АВР при восстановлении нормального режима работы сети и осуществлять запрет автоматического включения резерва на короткое замыкание на резервируемом участке линии электропередачи. Применение разработанных пунктов секционирования и резервирования СПАВР позволяет совместить в одном устройстве функции секционирования и резервирования линий электропередачи 0,4 кВ, что сокращает номенклатуру устройств автоматизации электрических сетей 0,4 кВ, упрощает проектные решения в части автоматизации. Внедрение СПАВР повышает надёжность электроснабжения сельских потребителей, позволяет сократить недоотпуск электроэнергии, снизить ущербы от недовыпуска, порчи продукции. Также разработанные способы и технические средства позволяют выявлять участки, на которых произошло повреждение и за счёт этого сокращать время поиска повреждений на ЛЭП 0,4 кВ. Разработанные методики выбора количества и мест установки пунктов секционирования и резервирования позволяют упростить процесс проектирования электрических сетей 0,4 кВ, содержащих пункты секционирования и резервирования.

Методология и методы исследования. В работе использован комплексный подход исследования, включающий методы математической статистики, теорию вероятностей, методы математического моделирования и инженерного эксперимента, методы теории надёжности, методы определения технико-экономической эффективности.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанная методика выбора рациональных количества и мест установки пунктов секционирования и резервирования линий электропередачи 0,4 кВ учитывает обоснованные критерии обеспечения чувствительности защитных аппаратов, критерии, характеризующие надёжность электроснабжения сельских потребителей и технико-экономические критерии;
- разработанные способы согласования работы пунктов секционирования и резервирования позволяют осуществлять отключение пункта АВР при восстановлении нормального режима работы сети и осуществлять запрет АВР на короткое замыкание на резервируемом участке линии

электропередачи, а разработанные алгоритмы и устройства их реализации дают возможность применять данные способы на практике;

- разработанный пункт секционирования и резервирования ЛЭП 0,4 кВ с микроконтроллерным блоком управления позволяет совместить в одном устройстве функции секционирующего пункта и пункта АВР и реализовывать разработанные способы автоматизации сельских электрических сетей 0,4 кВ.

Степень достоверности. Результаты исследований, их достоверность, подтверждается представительной выборкой статистических данных; формулировкой задач исследования, сделанной исходя из анализа нормативных документов и литературных источников; сопоставимостью результатов теоретических исследований с экспериментальными данными; использованием традиционных методических принципов современной науки и известных методов анализа и синтеза; непротиворечивостью математических выкладок и преобразований.

Реализация работы. Разработанный пункт секционирования и резервирования с микроконтроллерным блоком управления внедрен в учебный процесс ФГБОУ ВО Орловского ГАУ, изготовленные пункты секционирования внедрены и испытаны в Орловском районе электрических сетей Филиала ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго», что подтверждено соответствующими актами.

За период с 2015 года по 2026 год внедрение в учебный процесс принесло экономический эффект порядка 300 тысяч рублей за счет экономии средств на закупку лабораторного оборудования и за счет использования указанного оборудования при проведении курсов повышения квалификации сотрудников Филиала ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго» и других организаций. Методика, а также компьютерная программа по определению места установки СПАВР внедрены в ООО «ЭнерГарант», Ливенские районные электрические сети Филиала ПАО «Россети Центр» - «Орелэнерго» и в учебный процесс ФГБОУ ВО Орловского ГАУ что подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации доложены, обсуждены и получили положительную оценку на международных научно-практических конференциях ФГБОУ ВО Орловского ГАУ в 2015-2024

годах, ФГБОУ ВО Дальневосточного ГАУ в 2018, 2019 годах, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2019-2024 годах, ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева 2025-2026 годах, на научных семинарах и круглых столах в Филиале ПАО «Россети Центр» - «Орёлэнерго» в 2015-2025 годах, так же получена серебряная медаль в конкурсе «За производство высокоэффективной сельскохозяйственной техники», проводимой в рамках 22-ой Российской агропромышленной выставки «Золотая осень-2020», «За разработку микроконтроллерного блока управления секционирующими пунктами и устройствами сетевого АВР».

Публикации. Результаты исследований отражены в 20 печатных работах, в том числе 4 из них опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ по специальности, 4 индексируются в базе данных Scopus и Web of Science. По материалам работы получены 3 патента на изобретение и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 250 страницах, в том числе 173 страниц основного текста, состоит из введения, пяти глав основной части, содержащей 52 рисунка, 29 таблиц, заключения, списка литературы, включающего 123 наименования, в том числе 16 на иностранных языках и шести приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведен анализ статистических характеристик электрических сетей 0,4 кВ системы электроснабжения сельских потребителей на примере Орловского района электрических сетей, показавший, что средняя протяженность ЛЭП 0,4 кВ составляет $0,965 \pm 0,07$ км, количество линий, подключенных к одной секции шин трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ составляет 3 ± 1 линия; более 95% линий ВЛ/ВЛИ 0,4 кВ имеют радиальное исполнение; преимущественно магистральные участки линий 0,4 кВ выполнены сечением провода 25-35 мм², реже 50 мм². Для значительного количества линий не выполняются требования чувствительности защитных аппаратов к удалённым

однофазным коротким замыканиям. Это приводит к снижению электробезопасности эксплуатации электрических сетей, имеются несчастные случаи по данной причине. Доля применения самонесущих изолированных проводов составляет порядка 50%.

Анализ количества и причин отключения электрических сетей 0,4 кВ показал, что поток отказов по ЛЭП 0,4 кВ составляет 23-38 год⁻¹/100 км для разных лет. Основными причинами отключений являются недостатки технического обслуживания – 12,27 %, воздействие стихийных и погодных явлений – 21,28 %, воздействие животных и птиц - 0,66 %, воздействие посторонних лиц, организаций – 2,2 %, повреждение у потребителя – 9,47 % а также прочие (неизвестные) причины – 53,12 % которые привели к отключению коммутационных аппаратов ЛЭП. Высокие значения потока отказов связаны с радиальным исполнением ЛЭП, заниженными сечениями провода и отсутствием в ЛЭП средств секционирования и резервирования. Более 40% случаев ручного повторного включения линий 0,4 кВ являются успешными, что обосновывает необходимость автоматизации пунктов секционирования и оснащение их функциями АПВ. Средние удельные значения ущербов для сельских потребителей при отключениях в сети 0,4 кВ составляют более 250 руб./ч. Затраты на устранение отключений составляют более 1900 руб./ч.

Анализ существующих способов секционирования и резервирования ЛЭП 0,4 кВ позволил выявить ряд их недостатков, заключающихся в отсутствии решений по возврату схем сетевого резервирования 0,4 кВ в исходное состояние, отсутствии решений по осуществлению запрета АВР на основании контроля параметров и информации по каналам связи между устройствами секционирования и резервирования в сети.

Обзор современных средств секционирования и резервирования электрических сетей 0,4 кВ показал, что не разработаны пункты секционирования с функцией АВР, отсутствуют методики выбора их количества и мест установки. Сформулированные требования к функциональным возможностям СПАВР, кроме основных функций секционирования и резервирования включают требования к обеспечению дистанционного контроля

и управления устройством. Анализ перспектив использования СПАВР в структуре интеллектуальных электрических сетей показал, что данные устройства позволяют повысить надёжность работы таких сетей. Сформулированы основные задачи научного исследования.

Во второй главе разработана методика выбора количества и мест установки пунктов секционирования и резервирования в сельских электрических сетях 0,4 кВ.

Методика предполагает первым действием выполнение расчета максимального расстояния, на котором можно устанавливать СП и СПАВР по критериям чувствительности защитных аппаратов. Согласно методике, это максимальное расстояние, $L_{\max.\text{чув}}$, км, определяется по выражению (1), учитывающему характеристики сети 0,4 кВ в которой устанавливается СП или СПАВР:

$$L_{\max.\text{чув}} = \frac{\frac{U_{\phi}}{I_{\text{усл.чув}}} - \frac{Z_T}{3}}{\sqrt{R_{0\phi}^2 + 2 \cdot R_{0\phi} \cdot R_{0N} + R_{0N}^2 + 4 \cdot X_{0\phi N}^2}}, \quad (1)$$

где U_{ϕ} - фазное напряжение сети, В; $R_{0\phi}$ - удельное активное сопротивление фазного провода, Ом/км; R_{0N} - удельное активное сопротивление нулевого провода, Ом/км; $X_{0\phi N}$ - удельное индуктивное сопротивление петли фаза-ноль, Ом/км; Z_T - полное сопротивление трансформатора, Ом; $I_{\text{усл.чув}}$ - ток по условию чувствительности, А.

В случае использования в сети нескольких устройств СПАВР методика позволяет получить возможные зоны установки каждого устройства по условиям чувствительности защитных аппаратов (рисунок 1). При этом должны выполняться следующие условия, например, для СПАВР 1:

$$L_{\text{СПАВР1отТП1}} \leq L_{\max.\text{чув}}; \quad L_{\text{СПАВР1отТП1}} \leq L_{\max.\text{чувСПАВР1учЛЛЭП1}}; \quad (2)$$

где $L_{\text{СПАВР1отТП1}}$ - расстояние от первой ТП до первого СПАВР, м;

$L_{\max.\text{чувСПАВР1учЛЛЭП1}}$ - максимальное расстояние от первого СПАВР в сторону первого участка первой ЛЭП по условиям чувствительности защиты, м.

$$L_{СПАВР1отСПАВР2} \leq L_{\max.чувСПАВР2уч2.ЛЭП1}; \quad L_{СПАВР1отСПАВР2} \leq L_{\max.чувСПАВР1уч2.ЛЭП1}; \quad (3)$$

где $L_{СПАВР1отСПАВР2}$ - расстояние от первого СПАВР до второго СПАВР, м;

$L_{\max.чувСПАВР2уч2.ЛЭП1}$ - максимальное расстояние от второго СПАВР в сторону второго участка первой ЛЭП по условиям чувствительности защиты, м;

$L_{\max.чувСПАВР1уч2.ЛЭП1}$ - максимальное расстояние от первого СПАВР в сторону второго участка первой ЛЭП по условиям чувствительности защиты, м.

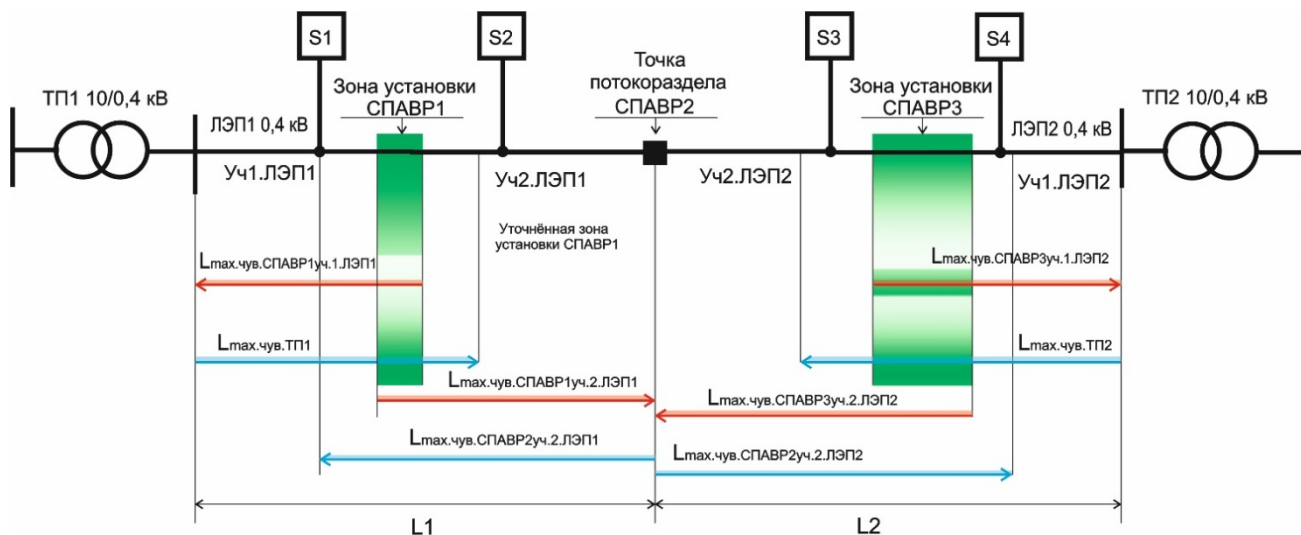


Рисунок 1 - Пояснения к выбору места установки СПАВР в электрической сети по условиям чувствительности защитных аппаратов

Разработана компьютерная программа «Место установки СПАВР», реализующая предложенную методику. Программа позволяет определять максимально допустимое расстояние до СП или СПАВР по критерию чувствительности защитных аппаратов, установленных в ЛЭП и на ТП при заданных параметрах ЛЭП и силовых трансформаторов.

Следующим действием методики является выбор количества и мест установки СПАВР по критерию надёжности электроснабжения. При этом учитывается эффект от секционирования и резервирования, заключающийся в сокращении недоотпуска электроэнергии потребителям при установке СПАВР в предполагаемых точках электрической сети 0,4 кВ. Для этого определяются показатели надёжности рассматриваемой электрической сети 0,4 кВ. В частности, определяется количество часов перерывов от аварий на каждом

участке сети ($T_{учЛЭП}$, ч/год). Для участков без секционирования, $T_{учЛЭП}$, ч/год определяется:

$$T_{учЛЭП} = \frac{l \cdot T_{ВучЛЭП} \cdot \omega_{0учЛЭП}}{100}, \quad (4)$$

где l – длина участка ЛЭП 0,4 кВ с учётом отпаяк, км; $T_{ВучЛЭП}$ – среднее время восстановления ЛЭП, ч; $\omega_{0учЛЭП}$ – параметр потока отказов ЛЭП на участке 1, год⁻¹/100 км.

Для участков с секционированием, с учётом показателей надёжности СПАВР, $T_{учЛЭП}$, ч/год:

$$T_{учЛЭП} = \frac{T_{ВучзаСПЛЭП} \cdot \omega_{0учзаСПЛЭП} \cdot l_{заСП}}{100} + \frac{T_{ВСП} \cdot \omega_{0СП}}{100}, \quad (5)$$

где $T_{ВСП}$ – время восстановления секционирующего пункта, ч; $T_{ВучзаСПЛЭП}$ – время восстановления ЛЭП на участке за СП ЛЭП, ч; $\omega_{0учзаСПЛЭП}$ – параметр потока отказов на участке за СП ЛЭП, год⁻¹/100 км; $\omega_{0СП}$ – параметр потока отказов секционирующего пункта, год⁻¹/100 шт.; $l_{заСП}$ – длина участка ЛЭП 0,4 кВ (за точкой секционирования с учётом отпаяк).

Определены показатели надёжности СПАВР, так, вероятность безотказной работы СПАВР составляет 0,999986, поток отказов год⁻¹/100 шт, а время восстановления 1 час.

Далее определяется ущерб от аварийных перерывов за год для всей рассматриваемой ЛЭП и для тех участков, которые расположены за местом установки СП (СПАВР). Например, для всей ЛЭП, $У_{слЭП}$, руб./год:

$$У_{слЭП} = y_0 \cdot \Delta W_{лЭП} = y_0 \cdot \frac{P_{млЭП} \cdot T_{млЭП} \cdot T_{влЭП}}{8760}, \quad (6)$$

где y_0 – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии руб./кВт·ч; $\Delta W_{лЭП}$ – недоотпуск электроэнергии по всей линии, кВт·ч/год; $T_{влЭП}$ – время восстановления электроснабжения по всей линии, ч; $P_{млЭП}$ – максимальная мощность потребителей, подключенных ко всей линии, кВт; $T_{млЭП}$ – время использования максимальной мощности для потребителей, подключенных ко всей линии, ч.

Следующим шагом определяются рациональные точки секционирования по условию минимизации ущерба от аварийных отключений. Для этого находится эффект секционирования, $\mathcal{E}_c$, руб./год, для каждой намеченной точки установки СП (СПАВР) по формуле:

$$\mathcal{E}_c = \frac{Y_{\text{СучзаСПЛЭП}} \cdot T_{\text{учзаСПЛЭП}}}{T_{\text{ЛЭП}}}, \quad (7)$$

где $Y_{\text{СучзаСПЛЭП}}$ - ущерб от аварийных перерывов за год для участка за СП, руб./год; $T_{\text{учзаСПЛЭП}}$ - количество часов перерывов от аварий на участке ЛЭП за СП, ч/год; $T_{\text{ЛЭП}}$ - количество часов перерывов от аварий на всей ЛЭП, ч/год.

Также определяют эффект от секционирования за счёт сокращения времени перерывов от недоотпуска электроэнергии вследствие плановых ремонтов на ЛЭП, $\mathcal{E}_{\text{спл}}$, руб./год:

$$\mathcal{E}_{\text{спл}} = \frac{Y_{\text{СучзаСПЛЭПрем}} \cdot T_{\text{пл.учзаСПЛЭП}}}{T_{\text{пл.ЛЭП}}}, \quad (8)$$

где $Y_{\text{СучзаСПЛЭПрем}}$ - ущерб от плановых перерывов за год для участка за СП, руб./год; $T_{\text{пл.учзаСПЛЭП}}$ - количество часов перерывов от плановых перерывов на участке ЛЭП за СП, ч/год; $T_{\text{пл.ЛЭП}}$ - количество часов плановых перерывов на всей ЛЭП, ч/год.

Определяют суммарный эффект от секционирования, $\mathcal{E}_{\text{сум}}$, руб./год:

$$\mathcal{E}_{\text{сум}} = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_{\text{спл}} \quad (9)$$

Годовой экономический эффект, $\Gamma_{\mathcal{E},C}$, руб./год от установки устройств секционирования определяется:

$$\Gamma_{\mathcal{E},C} = \mathcal{E}_{\text{сум}} - (C + p_n \cdot K) \cdot N_c, \quad (10)$$

где C – годовые издержки (эксплуатационные расходы) на секционирующий пункт, руб./год; p_n – нормативный коэффициент эффективности (p_n принимается в диапазоне 0,1 ... 0,3; K – капитальные затраты на секционирующий пункт, руб.; N_c – количество секционирующих пунктов (при нескольких СП в ЛЭП), ед.

Для определения рациональных точек секционирования при использовании нескольких устройств расчёт выполняют для разных вариантов количества и размещения СПАВР. Вариант с максимальным экономическим эффектом будет рациональным.

Следующим действием методики сравнение варианта реконструкции, или строительства ЛЭП с установкой СПАВР с вариантами замены, или применения большего сечения провода, установки дополнительной ТП для разукрупнения ЛЭП. Наилучший вариант реконструкции определяется с учётом показателей энергоэффективности, таких как потери напряжения, потери электроэнергии по общим приведённым затратам. Вариант с наименьшими общими приведёнными затратами принимается к реализации.

В третьей главе проведен анализ недостатков существующих способов и технических средств секционирования и резервирования, а также разработаны новые способы совершенствования секционирования и резервирования ЛЭП 0,4 кВ. Существующие способы секционирования и резервирования ЛЭП 0,4 кВ с применением предохранителей и автоматических выключателей, СП, выполненных на базе электромеханических реле, не позволяют эффективно организовать дистанционное управление этими устройствами, интегрировать их в системы диспетчерского управления, в интеллектуальные электрические сети. Не проработаны решения по автоматическому возврату схем электрических сетей, содержащих СП и АВР, СПАВР в исходное состояние для восстановления нормального режима работы данных сетей, решения по автоматическому согласованию работы средств секционирования и резервирования.

Предложен способ отключения АВР при восстановлении нормального режима работы сети, основанный на контроле направления потока мощности, протекающего через пункт АВР (СПАВР). С учётом изменений направления потока мощности делается вывод о том, произошло ли включение секционирующего пункта, установленного на резервируемой линии и необходимо ли отключать АВР для восстановления нормальной схемы электроснабжения. Предложена структурная схема реализации способа.

Разработаны способ и устройство запрета автоматического включения резерва на короткое замыкание на резервируемом участке линии электропередачи. В способе, за счет контроля тока и напряжения на резервируемом участке в точке установки СП и положения коммутационного аппарата СП, фиксируется факт появления тока КЗ в одной, двух, или трех

фазах, фиксируется отключение коммутационного аппарата СП и исчезновение всех трех фазных напряжений на резервируемом участке и в случае, если зафиксировано сочетание данных фактов, подаётся, с помощью канала связи, сигнал запрета включения выключателя АВР.

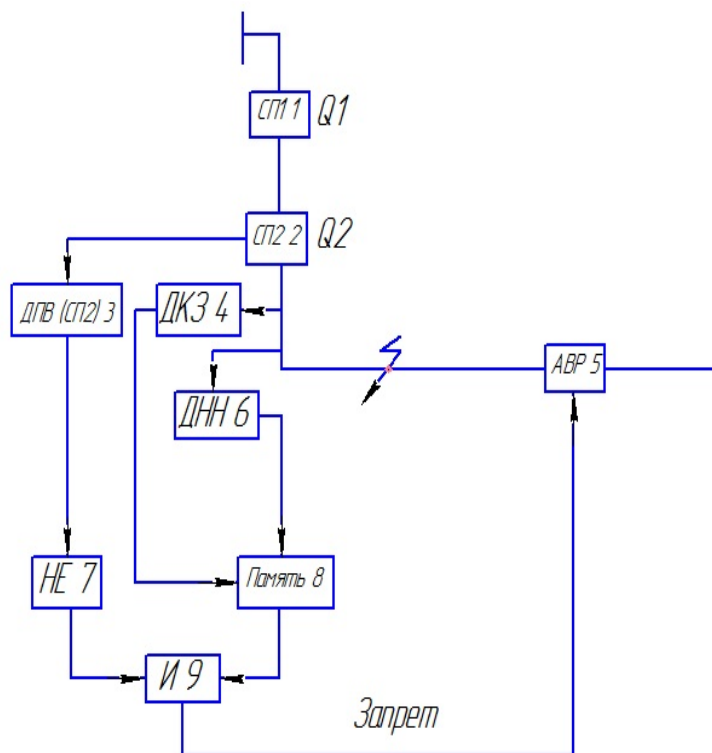


Рисунок 2 - Структурная схема устройства запрета АВР при КЗ между секционирующим пунктом и АВР

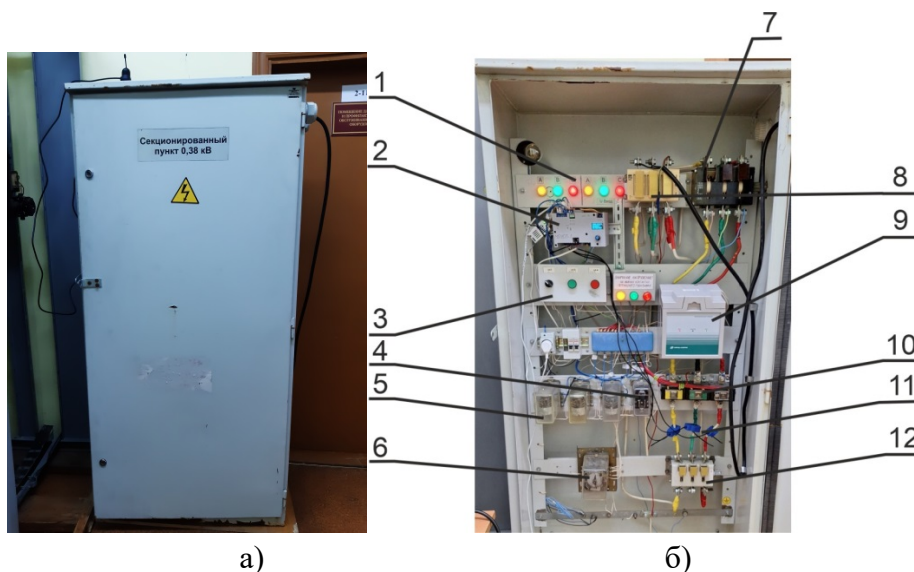
элемент Память (Память) 8, элемент И (И) 9.

В четвертой главе разработаны структурные, электрические принципиальные схемы СПАВР и его микроконтроллерного блока управления, алгоритмы управления устройством. Изготовлен экспериментальный образец СПАВР с микроконтроллерным блоком управления рисунок 3, проведены его испытания. Получена времятоковая характеристика срабатывания токовых защит (рисунок 4), позволяющая выполнять настройку уставок срабатывания устройства.

Микропроцессорный блок управления (МБУСП-1) 2 позволяет реализовать алгоритмы секционирования сети, АВР, АПВ, запрета АПВ при КЗ на резервируемом участке ЛЭП 0,4 кВ, отключение АВР при восстановлении

На рисунке 2 представлена структурная схема устройства запрета АВР при КЗ между секционирующим пунктом и АВР. Схема содержит: секционирующий пункт (СП1) 1, контролируемый секционирующий пункт (СП2) 2, датчик положения коммутационного аппарата СП 2 (ДПВ(СП2)) 3, датчик тока короткого замыкания (ДКЗ) 4, выключатель автоматического включения резерва (АВР) 5, датчик наличия напряжения (ДНН) 6, элемент НЕ (НЕ) 7,

нормального режима работы сети. Осуществляет сбор и передачу информации контролируемых параметров.



1- сигнальные лампы наличия напряжения на вводах СПАВР; 2- МБУСП-1; 3- панель переключения режимов управления коммутационным аппаратом; 4- промежуточное реле; 5- реле тока; 6- реле времени; 7,12- рубильник; 8- перекидной рубильник; 9- коммутационный аппарат LSM/TEL; 10 – трансформаторы тока; 11- датчики тока МБУСП-1.

Рисунок 3 – Внешний вид (а) и вид с открытой дверцей (б) экспериментального образца СПАВР с микроконтроллерным блоком управления устройством (МБУСП-1)

В качестве коммутационного аппарата, применен вакуумный контактор (LSM/TEL) 9 производства компании Таврида Электрик, что позволяет СПАВР коммутировать токи КЗ. В целях сравнения реализации СПАВР с микроконтроллерным блоком управления и на электромеханических реле, ряд функций устройства дублируется с помощью реле 4-6. Комбинацией переключений рубильниками 7,8 и 12 можно выводить СПАВР из работы для обслуживания не прерывая электроснабжение потребителей.

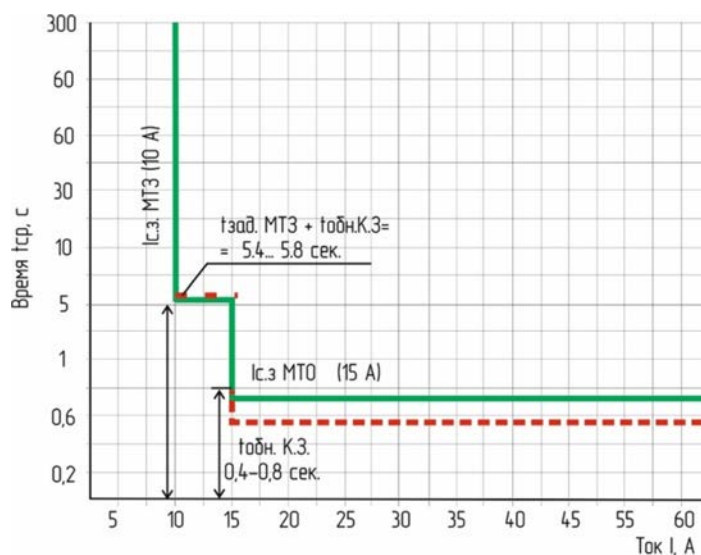


Рисунок 4 – Времятоковая характеристика работы токовых защит СПАВР 0,4 кВ

В ходе испытаний проверялась правильность работы СПАВР в режимах секционирования и резервирования, отключение при коротком замыкании в

ЛЭП, отрабатывалось дистанционное управление, выполнение разработанных способов запрета АВР и возврата сети к нормальной схеме. В ходе эксперимента была подтверждена работоспособность устройства.

Устройство своевременно реагирует на ток КЗ и обеспечивает срабатывание в соответствии с заданными уставками токовых защит. Построена временная диаграмма работы АВР полученная на основе сигналов полученных от МБУСП-1 (рисунок 5), подтверждающая правильность реализации устройством разработанных способов.

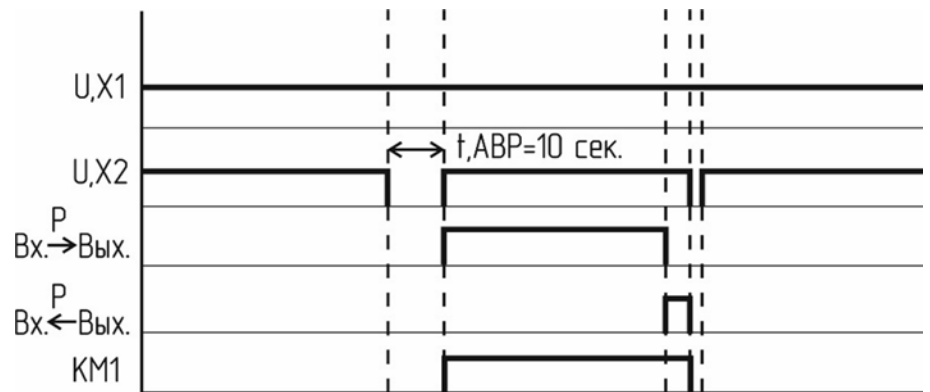


Рисунок 5 – Временная диаграмма работы АВР

Из диаграммы видно, что при исчезновении напряжения на резервируемом участке сети МБУСП-1 фиксирует исчезновение напряжения и с выдержкой времени подает сигнал на включение коммутационного аппарата. При восстановлении напряжения на резервируемом участке сети МБУСП-1 фиксирует изменение направления протекания мощности (что свидетельствует о появлении питания со стороны основного ввода) и формирует команду на отключение коммутационного аппарата. Это исключает параллельную работу источников и обеспечивает возврат к нормальной схеме.

В ходе лабораторных тестов устройства была выявлена погрешность измерений, проводимых МБУСП-1 не более $\pm 1\%$, что соответствует классу точности 1.0 измерительных приборов. По итогам испытаний сделан вывод, что СПАВР с разработанным блоком управления МБУСП-1, позволяет в полной мере реализовывать существующие и усовершенствованные способы секционирования и резервирования ЛЭП 0,4 кВ. Также обеспечивается дистанционный контроль за параметрами сети, дистанционное управление устройством, которое позволяет существенно снизить время, затрачиваемое на обслуживание средств секционирования и резервирования.

В пятой главе выполнено технико-экономическое обоснование разработанного секционирующего пункта с функцией АВР и с микроконтроллерным блоком управления. Определены капитальные вложения на внедрение в существующие электрические сети 0,4 кВ разработанного СПАВР. Определены эксплуатационные издержки и экономический эффект от его применения за счёт ликвидации недоотпуска электроэнергии и ущерба для потребителей от перерывов в электроснабжении. Выполнен расчёт экономической эффективности на примере электроснабжения сельскохозяйственных объектов с. Путимец Орловского района. Получена зависимость срока окупаемости СПАВР от величины ликвидируемого ущерба недоотпуска электроэнергии потребителям при капитальных вложениях в размере 100228,7 руб. и эксплуатационных издержках стоимостью 6194 руб. Срок окупаемости в 7 лет достигается при ликвидируемом ущербе более 20512 руб./год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной задачи разработки пунктов секционирования и резервирования сельских линий электропередачи 0,4 кВ. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований сводятся к следующему:

1. Выполнен анализ параметров конфигурации сельских электрических сетей 0,4 кВ, анализ надёжности электроснабжения сельских потребителей на примере Орловского района электрических сетей, показавший, что более 95% ЛЭП радиальные с отпайками, средняя протяженность ЛЭП 0,4 кВ составляет $0,965 \pm 0,07$ км, количество линий, подключенных к одной секции шин трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ 3 ± 1 , преимущественно линий 0,4 кВ выполнены сечением провода 25-35 мм². Поток отказов ЛЭП 0,4 кВ за анализируемый период достигает 23-38 год⁻¹/100 км.

2. Разработана методика выбора количества и мест установки пунктов секционирования и резервирования. Методика позволяет вычислять максимальное расстояние до места установки СПАВР в ЛЭП 0,4 кВ по критерию чувствительности защитных аппаратов, рационализировать выбор места по

критериям надёжности электроснабжения и обосновывать его по технико-экономическим критериям. Разработан компьютерный программный продукт, позволяющий автоматизировать процесс вычислений. Расчёты показали, что при использовании пунктов секционирования и резервирования возможно сокращение перерывов в электроснабжении и времени плановых отключений на 15-50%, в количественном выражении сокращение перерывов в электроснабжении составит 0,4-1,07 ч/год, времени плановых отключений составит 0,21-0,73 ч/год.

3. Анализ показал необходимость разработки новых способов совершенствования секционирования и резервирования сельских ЛЭП 0,4 кВ. Разработаны оригинальные способы и алгоритмы, позволяющие осуществлять отключение пункта АВР (СПАВР в режиме АВР) при восстановлении нормального режима работы сети и осуществлять запрет включения на короткое замыкание на резервируемом участке линии электропередачи. Способы основаны на контроле параметров сети в точке установки устройств секционирования, в том числе направления потока мощности через СПАВР. На способы и устройства получены патенты на изобретения.

4. Разработан экспериментальный образец пункта секционирования и резервирования сельских линий электропередачи 0,4 кВ. Экспериментальный образец оснащён разработанным микроконтроллерным блоком управления секционирующим пунктом (МБУСП-1). Данное устройство позволяет наладить двухстороннюю связь с обслуживающим персоналом, может быть интегрировано в систему телемеханики электрических сетей, ведёт постоянный контроль основных параметров режимов работы ЛЭП 0,4 кВ и самого устройства. Лабораторные испытания показали работоспособность экспериментального образца устройства и применимость разработанных способов секционирования и резервирования ЛЭП 0,4 кВ.

5. Выполнено технико-экономическое обоснование внедрения в электрические сети СПАВР. Получена зависимость срока окупаемости СПАВР от величины ликвидируемого ущерба недоотпуска электроэнергии потребителям при капитальных вложениях в размере 100228,7 руб. и эксплуатационных

издержках стоимостью 6194 руб. Срок окупаемости в 7 лет достигается при ликвидируемом ущербе более 20512 руб./год.

Рекомендации и предложения производству. Полученные в ходе исследования результаты рекомендуется применять при реконструкции и новом строительстве воздушных ЛЭП 0,4 кВ.

Перспективы дальнейших исследований. Перспективой дальнейших исследований является усовершенствование конструкции и алгоритмов работы секционирующих пунктов с функцией автоматического ввода резерва 0,4 кВ, исследование эксплуатационных характеристик и повышении надежности работы секционирующих пунктов с функцией автоматического ввода резерва 0,4 кВ, разработка новых и дальнейшее совершенствование предложенных методов управления секционирующих пунктов с функцией автоматического ввода резерва 0,4 кВ.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Публикации в издании, входящем в наукометрические базы Web of Sciens и Scopus:

1. Vinogradov, A. V. Choice of commutation device and development of the scheme of a universal sectionalizing point with automatic load transfer function for the 0.38 kV electric network / A. V. Vinogradov, A. V. Vinogradova, M. O. Ward, A. N. Kharkhardin, **A. I. Psaryov**, T. I. Afanasyeva // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2019. — Vol. 124. — P. 02011.
2. Vinogradov, A. V. Sectionalizing and Redundancy of the 0.38 kV Ring Electrical Network: Mathematical Modeling Schematic Solutions / A. V. Vinogradov, A. V. Vinogradova, V. E. Bolshev, **A. I. Psarev** // International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO). — 2019. — Vol. 8, № 4. — P. 15–38.
3. Vinogradova, A. V. Restoring normal network operation mode by automatically disabling network ATS / A. V. Vinogradova, **A. I. Psarev**, A. V. Vinogradov, V. E. Bolshev, M. Jasinsk, R. R. Gibadullin // E3S Web of Conferences. — 2020. — P. 01072.
4. Vinogradov, A. V. Place selection of sectionalizing units in 0.38 kV power networks: a methodology for protection against short circuits / A. V. Vinogradova, A. V. Vinogradov, A. N. Vasiliev, A. S. Dorokhov, V. E. Bolshev, **A. I. Psarev** // International Journal of Energy Optimization and Engineering. — 2021. — Vol. 10, № 4. — P. 35–52.

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

5. Виноградова, А. В. Запрет автоматического включения резерва на короткое замыкание на резервируемом участке линии электропередачи 0,4 кВ / А. В. Виноградова, **А. И. Псарев** // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 4(107). – С. 44-54. – EDN IPKPCZ.

6. Повышение надёжности электроснабжения потребителей посредством применения мультиконтактных коммутационных систем в линиях электропередачи 0,4 кВ с отпайками / А. В. Виноградов, А. В. Виноградова, **А. И. Псарев** [и др.] // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 11(114). – С. 48-64. – DOI 10.24411/2227-9407-2020-10105. – EDN TDRRLY.

7. Методика выбора мест установки устройств деления электрической сети 0,4 кВ на участки / А.В. Виноградов, А.В. Виноградова, А.В. Букреев, **А.И. Псарёв**, А.А. Панфилов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2023. – Т. 70, № 2(51). – С. 42-50. – DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-2-42-50. – EDN TEJHNS.

8. Повышение эффективности защиты линий электропередачи 0,4 кВ с отпайками от однофазных коротких замыканий за счёт применения мультиконтактной коммутационной системы МКС-2-3В / А. В. Виноградов, А. В. Виноградова, **А. И. Псарев** [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 15, № 3(59). – С. 58-63. – DOI 10.12737/2073-0462-2020-58-63. – EDN FDKUEE.

Патенты:

9. Патент № 2687052 Российская Федерация, МПК H02J 9/00, H02J 13/00. Способ и устройство запрета автоматического включения резерва на короткое замыкание на резервируемом участке линии электропередачи / В. Е. Большев, А. В. Виноградов, А. В. Виноградова, **А. И. Псарёв** ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (RU). — № 2018129144 ; заявл. 09.08.2018 ; опубл. 07.05.2019, Бюл. № 13.

10. Патент № 2687053 Российская Федерация, МПК H02J 9/06. Способ и устройство отключения АВР при восстановлении нормального режима работы сети / В. Е. Большев, А. В. Виноградов, А. В. Виноградова, **А. И. Псарёв** ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (RU). — № 2018129145 ; заявл. 09.08.2018 ; опубл. 07.05.2019, Бюл. № 13.

11. Патент № 2731874 Российская Федерация, МПК H02B 7/06. Пункт секционирования до 1 кВ, совмещённый с пунктом учёта электроэнергии и контроля качества электроэнергии, контроля количества и времени отключения напряжения / А. В. Виноградов, А. В. Виноградова, **А. И. Псарёв**, В. Е. Большев, А. Н. Хархардин ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. — № 2020105407 ; заявл. 05.02.2020 ; опубл. 08.09.2020, Бюл. № 25.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613654 Российская Федерация. Место установки СПАВР : заявл. 03.02.2025 : опубл. 13.02.2025 / А. В. Виноградова, **А. И. Псарев**, А. В. Виноградов, Д. В. Беспалов ; заявитель ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». — EDN DPLGOS.

Другие публикации:

13. **Псарев, А. И.** Пункт секционирования с функцией АВР для электрических сетей 0,4 кВ: схемы и варианты установки / А. И. Псарев, А. В. Виноградова // Агротехника и энергообеспечение. — 2024. — № 3 (44). — С. 33–42. — EDN LHCUAC.

14. **Псарев, А. И.** Техничко-экономическое обоснование применения секционирующих пунктов в сельских электрических сетях 0,4 кВ / А. И. Псарев, А. В. Виноградова // Агротехника и энергообеспечение. — 2024. — № 3 (44). — С. 65–74. — EDN QJADJW.

15. Виноградова, А. В. Микроконтроллерный блок управления секционирующим пунктом 0,38 кВ / А. В. Виноградова, А. А. Панфилов, А. В. Виноградов, Ю. И. Лукьянов, **А. И. Псарёв** // Вести высших учебных заведений Черноземья. — 2019. — № 2. — С. 3–6.

16. Виноградова, А. В. Методика выбора мест установки и количества универсальных секционирующих пунктов с функцией АВР в электрической сети 0,38 кВ по критерию обеспечения чувствительности защитных аппаратов / А. В. Виноградова, А. В. Виноградов, **А. И. Псарев**, Р. П. Беликов // Вести высших учебных заведений Черноземья. — 2019. — № 3 (57). — С. 38–49. — EDN OBSRFR.

17. Виноградов, А. В. Обоснование применения секционирующих пунктов в сети 0,4 кВ с учётом показателей энергоэффективности / А. В. Виноградов, А. В. Виноградова, **А. И. Псарев**, А. Н. Хархардин // Вести высших учебных заведений Черноземья. — 2019. — № 4 (58). — С. 12–23. — EDN XUWJN.

18. Виноградов, А. В. Применение мультиконтактных коммутационных систем в схемах электроснабжения потребителей и кодирование возникающих при этом ситуаций / А. В. Виноградов, А. А. Лансберг, **А. И. Псарев** // Современная молодежь — исследователи XXI века : материалы IV Междунар. студ. науч.-практ. конф. (21 марта 2019 г., пос. Стрелецкий). — Орёл : Бюджетное учреждение Орловской области дополнительного профессионального образования «Институт развития образования», 2019. — С. 281–282.

19. Виноградова, А. В. Выбор количества и места установки секционирующих пунктов по критерию надёжности электроснабжения / А. В. Виноградова, А. В. Виноградов, **А. И. Псарёв**, А. Н. Хархардин, А. А. Лансберг // Агротехника и энергообеспечение. — Орел : Изд-во ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2019. — № 3 (24). — С. 28–38.

20. Виноградова, А. В. Признаки необходимости секционирования и резервирования линий электропередачи 0,4 кВ / А. В. Виноградова, **А. И. Псарёв** // Физика и современные технологии в АПК: материалы XI Всерос. молодежной конф. молодых ученых, студентов и школьников с междунар. участием. — Орел, 2020. — С. 553–558.