

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО «Нижегородский  
государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева»,  
д-р физ.-мат. наук, профессор

\_\_\_\_\_ Куркин А.А.

«11» января 2022 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» на диссертационную работу Иванова Николая Геннадьевича **«Интеллектуальное автоматическое повторное включение линий электропередачи сверхвысокого напряжения с шунтирующими реакторами»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)»

#### Актуальность темы диссертации

Автоматическое повторное включения (АПВ) линий электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН) сопровождается опасными для изоляции коммутационными перенапряжениями. Технология управляемой коммутации направлена на снижение интенсивности электромагнитного переходного процесса, порождающего перенапряжения, путем высокоточного управления моментом включения высоковольтного выключателя линии.

Как показывает опыт эксплуатации зарубежных устройств управляемой коммутации, использование современных методов цифровой обработки сигналов позволяет реализовать высокоэффективные системы управляемой коммутации, связанные с интеллектуальным АПВ. К сожалению, в России АПВ ЛЭП осуществляется все еще по старым технологиям, и многие теоретические и практические вопросы разработки интеллектуальных устройств совершенно не исследованы. Поэтому тема диссертации Иванова Н.Г., целью которой является исследование и разработка устройства интеллектуального АПВ ЛЭП СВН с ШР, является актуальной.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (92 наименования) и приложений (5 страниц). Общий объем работы составляет 148 страниц, в том числе 131 страница основного текста, 49 рисунков и 12 таблиц.

## **Анализ содержания диссертации**

Во введении обосновывается актуальность и формулируются цель и задачи исследования. Отмечается научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе исследуются особенности электромагнитных переходных процессов в электрической сети на разных стадиях цикла АПВ линий электропередачи сверхвысокого напряжения с шунтирующими реакторами. Предлагается универсальная модель ЛЭП СВН с шунтирующими реакторами, на основе которой дается сравнение эффективности различных стратегий интеллектуального АПВ. Обосновывается оптимальная, с точки зрения снижения перенапряжений, стратегия интеллектуального АПВ.

Вторая глава посвящена разработке новых способов интеллектуального однофазного и трехфазного АПВ. Показывается, что в цикле однофазного АПВ наиболее эффективной стратегией является повторное включение линии электропередачи вблизи минимума огибающей напряжения на контактах отключенного полюса выключателя в момент перехода через нуль кривой этого напряжения. При трехфазном АПВ необходимо обеспечить оптимальные условия включения для каждой фазы и согласование моментов включения фаз между собой. Предлагаются новые способы однофазного и трехфазного АПВ, превосходящие по эффективности смягчения перенапряжений известные способы, реализованные в устройствах интеллектуального АПВ зарубежных фирм. Наряду с этим в главе рассматриваются принципы учета электромеханических характеристик высоковольтного выключателя ЛЭП в алгоритмах интеллектуального АПВ при выборе оптимального момента повторного включения.

В третьей главе разрабатываются адаптивные алгоритмы прецизионного предсказания многокомпонентных сигналов напряжения на контактах выключателя в паузе цикла АПВ для выбора оптимального момента повторного включения ЛЭП. Показывается, что наиболее перспективным инструментом предсказания сигнала является адаптивный структурный анализ, основанный на распознавании сигнала при помощи адаптивных структурных моделей сигнала. Главной сложностью в распознавании сигналов переходного режима является шум в сигнале и подбор характеристик фильтров эффективного ядра, а также близость частот свободных слагаемых напряжения линии. Отмечается, что для повышения разрешающей способности алгоритмов необходимо наращивать ресурсы фильтра шума и применять устойчивые к шуму методы настройки структурной модели, основанные на решении общей задачи метода наименьших квадратов

с минимальной нормой. Автором впервые разрабатываются теоретические основы способов совместной обработки многокомпонентных сигналов переходного режима многофазной электрической сети, развивающих методы адаптивного структурного анализа. Первый способ использует свойства единства процессов в электрической сети и идентичности структуры сигналов и обеспечивает лучшую разрешающую способность по сравнению с известными способами за счет расширения окна наблюдения без увеличения времени наблюдения. Второй способ учитывает особенности протекания электромагнитных переходных процессов в схемах замещения безнулевых и нулевой последовательности и обеспечивает разделение слагаемых сигнала с близкими частотами. Совместное применение новых способов повышает разрешающую способность алгоритма распознавания сигнала, содержащего слагаемые с близкими частотами, более чем в 200 раз и обеспечивает распознавание сигналов напряжения с любой степенью близости частот слагаемых.

Четвертая глава посвящена разработке устройства интеллектуального АПВ на базе микропроцессорного терминала релейной защиты и автоматики. Для обеспечения высокой точности управления высоковольтным выключателем в устройстве учитываются время горения дуги в межконтактном промежутке полюса выключателя, влияние температуры окружающей среды, давления рабочей жидкости или газа, напряжения оперативного питания, время операционного простоя и износ контактной и механической системы выключателя на время выполнения операции включения. В главе приводятся структурная схема, основные технические характеристики и результаты испытаний устройства интеллектуального АПВ на программно-техническом комплексе RTDS Simulator. Результаты подтверждают, что разработанное устройство обеспечивает формирование команд управления с точностью не хуже 0,1 мс и имеет высокую надежность функционирования.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приведены исходные данные для моделирования ЛЭП СВН, акт об использовании результатов диссертации в ООО НПП «ЭКРА» и справка о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова».

### **Значимость полученных автором диссертации результатов**

Теоретическая значимость результатов работы заключается в следующем:

1. Теоретически обоснована эффективность стратегии автоматического повторного включения ЛЭП СВН с шунтирующими реакторами, предусматривающей соблюдение двух ключевых условий: повторное включение должно осуществляться в момент перехода кривой напряжения на контактах выключателя через нуль, и выбранный момент включения должен располагаться в окрестности минимума огибающей. Доказано, что

такая стратегия АПВ является оптимальной, с точки зрения смягчения перенапряжений, в электрической сети.

2. Разработаны теоретические основы метода совместной обработки многокомпонентных сигналов переходного режима многофазной электрической системы, развивающего методы адаптивного структурного анализа сигналов.

3. Теоретически обоснована возможность повышения разрешающей способности адаптивного структурного анализа при распознавании сигналов электромагнитного переходного процесса в электрической сети за счет учета особенностей их протекания в схемах безнулевых и нулевой последовательности.

#### Практическая значимость результатов работы заключается в следующем:

1. Новый алгоритм совместной цифровой обработки сигналов переходного режима электрической сети может применяться в различных устройствах релейной защиты и автоматики, обеспечивая точность и быстродействие распознавания сигнала.

2. Предложенная универсальная модель ЛЭП СВН с шунтирующими реакторами может быть использована в программных средах для вычислительных экспериментов при исследовании факторов, определяющих уровень коммутационных перенапряжений при АПВ.

3. Разработанные отдельные положения теории переходных процессов в ЛЭП СВН в цикле АПВ, а также интерактивная среда адаптивного структурного анализа используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

#### **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке устройств релейной защиты и автоматики для линий электропередачи сверхвысокого и ультравысокого напряжения с шунтирующими реакторами, работающих в условиях интенсивных электромагнитных переходных процессов. Новый алгоритм многофазной цифровой обработки сигналов может применяться в различных устройствах релейной защиты и автоматики, обеспечивая точность и высокое быстродействие в переходных режимах.

#### **На обсуждение выносятся следующие вопросы и замечания**

1. Интеллектуальное АПВ автором обоснованно связывается с технологией управляемой коммутации, направленной на снижение интенсивности электромагнитного переходного процесса (перенапряжений), за счет управления моментом включения высоковольтного переключателя ЛЭП.

Однако в технической литературе в функции интеллектуального АПВ также включают: контроль погасания дуги для выбора адаптивной паузы АПВ; выявление факта устранения короткого замыкания для отмены подачи напряжения на поврежденную ЛЭП; особенности исполнения АПВ кабельно-воздушных высоковольтных ЛЭП; применение методов искусственного интеллекта и машинного обучения при реализации алгоритмов АПВ и др.

По нашему мнению, необходимо было расширить понятие интеллектуального АПВ, проанализировать соответствующие технические решения, а результаты анализа включить в главу 1 диссертационной работы.

2. На параметры переходного процесса на ЛЭП СВН при АПВ оказывают влияние множество факторов, например, природного характера (осадки, гололед и др.), изменения состояния грунта, неточность задания параметров шунтирующих реакторов, неполная компенсация несимметрии самой ЛЭП и др.

Каким образом эти факторы учитываются в предлагаемых методах управляемой коммутации?

3. Автором предложены и исследованы в главе 3 новые способы повышения разрешающей способности алгоритмов распознавания сигналов с близкими частотами.

Считаем, что целесообразным было бы проведение исследований для сравнения результатов цифровой обработки сигналов с помощью разработанных способов адаптивного структурного анализа, а также с применением известных алгоритмов повышения частотного разрешения при спектральном анализе (например, методов MUSIC, ESPRIT, Кейпона и др.).

В чем заключается преимущество применения адаптивного структурного анализа по сравнению с методами спектрального сверхразрешения?

4. Каким образом влияет количество и расположение реакторов по концам ЛЭП на эффективность (точность) управляемой коммутации при реализации интеллектуального АПВ?

5. В четвертой главе автором обосновано, что для обеспечения высокой точности управления высоковольтным выключателем в устройстве интеллектуального АПВ учитываются: время горения дуги в межконтактном промежутке полюса выключателя; температура окружающей среды; давление рабочей жидкости или газа; напряжение оперативного питания; время безоперационного простоя и износ контактной и механической системы выключателя.

Однако, на высоковольтных выключателях проводятся эксплуатационные работы. Каким образом автором предполагается учет настроек выключателя в ходе эксплуатационных работ, а также полученные при этом характеристики его функционирования (например, скоростные характеристики выключателя)? Может быть их следует включить в состав дополнительных уставок интеллектуального АПВ?

6. Замечания редакционного характера, связанные с повторами текста (например, в п.4.1 и п.2.4 диссертации), наличием опечаток, неоднозначностью используемых терминов (например, стр. 90 диссертации – теорема Котельникова, стр. 91 – соответствующая этой теореме – частота Найквиста) и другие.

Следует отметить, что указанные замечания не снижают научную ценность и не изменяют положительную оценку диссертационной работы.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842**

В соответствии с п. 9 диссертационная работа является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические разработки, имеющие существенное значение для развития электроэнергетики страны.

В соответствии с п. 10 диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. Диссертация содержит сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов. Предложенные автором диссертации решения аргументированы, в диссертации содержатся сравнительные оценки этих решений с другими известными решениями.

В соответствии с п.п. 11 и 13 основные научные результаты исследований опубликованы в 27 научных публикациях, в том числе 5 публикациях, индексируемых в международных базах данных и системах цитирования (SCOPUS и др.), 3 статьях в изданиях из Перечня научных рецензируемых изданий ВАК и 1 патенте на изобретение, их количество соответствует требованиям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В соответствии с п. 14 диссертационная работа содержит ссылки на источники заимствования материалов и на работы других авторов.

**Заключение**

Диссертационная работа Иванова Николая Геннадьевича «Интеллектуальное автоматическое повторное включение линий электропередачи сверхвысокого напряжения с шунтирующими реакторами», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые научно-обоснованные технические решения в области автоматизации электроэнергетических систем, имеющие существенное значение для развития страны.

Диссертационная работа по своему теоретическому уровню и практическому значению соответствует предъявляемым требованиям п.п. 9–14 «Положения о

присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г., № 842, а ее автор Иванов Николай Геннадьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки).

Отзыв на диссертацию Иванова Николая Геннадьевича «Интеллектуальное автоматическое повторное включение линий электропередачи сверхвысокого напряжения с шунтирующими реакторами» обсужден и одобрен на заседании кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», протокол №5 от «11» января 2022 года.

Профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

д-р. техн. наук, профессор

Куликов Александр Леонидович

Заведующий кафедрой «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

канд. техн. наук, доцент

Севостьянов Александр Александрович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Телефон: +7 (831) 436-23-25; факс: +7 (831) 436-94-75; e-mail: nntu@nntu.ru

web-сайт: <https://www.nntu.ru/>

*Севостьянов Александр Александрович, Севостьянов А.А. заверяю.*  
*С.А. Севостьянов*  
*11.01.2022г.*

