На правах рукописи

Воронин Владимир Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫМИ И АВАРИЙНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ В РАЙОНАХ МЕГАПОЛИСОВ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново - 2014

Работа выполнена в Открытом Акционерном Обществе «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» (ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ»), г. Москва

Научный руководитель	**Любарский Дмитрий Романович**, доктор технических наук
Официальные оппоненты:	**Куликов Александр Леонидович**, доктор технических наук, ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»
	Лачугин Владимир Федорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», заведующий лабораторией информационно-измерительных и управляющих систем в электроэнергетике
Ведущая организация:	**ОАО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы»** (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»), г. Москва

Защита состоится 26 сентября 2014 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01, созданного при ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ.
Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61 факс: (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ.
Диссертация размещена http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Voronin_VA_0.pdf
Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан «___»_____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент  Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обеспечение надежности и устойчивости работы ЕЭС России в целом, объединенных и отдельных энергосистем, и в том числе, энергосистем мегаполисов в определяющей мере связано с эффективностью управления ими в нормальных и аварийных режимах.

Особенности современного развития энергосистем мегаполисов характеризуются на примере Московской энергосистемы большой концентрацией генерирующих мощностей и электрической нагрузки на сравнительно небольшой территории; недостаточной пропускной способностью системообразующих и распределительных сетей, ограниченной условиями токовой загрузки связей; необходимостью компактного исполнения объектов электрических сетей вследствие высокой стоимости земли; эксплуатацией оборудования практически на каждой из подстанций Московского региона, выработавшего нормативный ресурс. Эти особенности Московской энергосистемы и определяют основные проблемы функционирования («узкие места»), которые в перспективе с ростом электропотребления и нагрузки в Московской энергосистеме, вводом новых генерирующих мощностей на электростанциях как в г. Москве, так и в Московской области, увеличением плотности застройки будут существенно усугубляться.

К таким проблемам относятся: повышенная загрузка автотрансформаторов 500/220, 500/110 кВ Московского кольца; повышенная загрузка ряда кабельных и воздушных линий электропередачи и трансформаторов сети 220-110 кВ; высокий уровень токов короткого замыкания (ТКЗ); возникновение перегрузок в сетях всех напряжений при отключении элементов сети 500 кВ; потребность в координации управления напряжением и реактивной мощностью.

Как показали исследования и расчеты режимов на перспективу до 2020г. в Московской энергосистеме имеется значительное число подстанций, у которых ТКЗ на шинах превышают номинальные токи отключения выключателей или будут превышать их в ближайшем будущем. Поэтому в настоящее время проблема принудительного ограничения растущих ТКЗ в крупных энергосистемах мегаполисов из-за значительного роста энергопотребления и развития сетей 110/220_кВ является одной из наиболее актуальных.

В последние годы проблемы компенсации реактивной мощности, связанные с обеспечением ограничения недопустимых уровней напряжения на линиях электропередачи сверхвысокого напряжения (СВН) 500 кВ и выше и в прилегающих к ним сетях, существенно обострились. Практические решения этой проблемы привели к целесообразности установки в сетях СВН дополнительных шунтирующих реакторов (ШР) в качестве средств поперечной компенсации избыточной реактивной мощности воздушных линий (ВЛ) электропередачи СВН. Вместе с тем при установке ШР линии электропередачи переходят из режима недокомпенсации практически в режим 100%-ной компенсации зарядной мощности линии, что связано с возникновением резонансных перенапряжений при неполнофазных режимах работы (например, в цикле однофазного автоматического повторного включения - ОАПВ). Кроме того, в неполнофазных режимах из-за ёмкостной и электромагнитной связи отключённой фазы ВЛ с её неповреждёнными фазами, оставшимися под рабочими напряжением и током, в дуговом канале отключённой фазы возникает ток подпитки, который препятствует быстрой деионизации дугового канала. Время горения дуги подпитки возрастает с увеличением амплитуды тока подпитки и скорости восстановления напряжения. Для устранения резонансных перенапряжений, а также для исключения влияния тока подпитки дуги в подобных режимах могут быть приняты различные меры, одной из которых является установка так называемых четырёхлучевых реакторов, состоящих из ШР и компенсационного реактора (КР), включаемого в общую нейтраль группы из трёх однофазных ШР.

Вместе с тем использование ШР для компенсации реактивной мощности определило возникновение проблемы обеспечения функционирования линейных элегазовых выключателей. В последние годы в электрических сетях ОАО «ФСК ЕЭС» зафиксирован ряд серьёзных аварийных разрушений элегазовых выключателей автокомпрессионного типа на подстанциях (ПС) напряжением 500 – 750 кВ при инициализации отключения этих выключателей. В связи с выявленными повреждениями элегазовых выключателей в сетях ЕНЭС (Единой национальной электрической сети) 500 – 750 кВ необходимой частью всех проектных проработок для такого класса напряжений стали исследования и предложения для исключения влияния апериодической составляющей в токе выключателя. Необходимость и обязательность выполнения такого рода проектных обоснований привела к разработке в 2012г. ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» стандарта организации ОАО «ФСК ЕЭС» «Методики расчета и выбора средств, обеспечивающих отключение элегазовых выключателей при коммутациях линий электропередачи и сборных шин, оснащенных шунтирующими реакторами».

К наиболее актуальным технологическим проблемам в области проектирования противоаварийной автоматики (ПА), в особенности для распределительной сети 110 кВ Московской энергосистемы относится проблема возникновения перегрузок линий электропередачи. Эта проблема одна из наиболее характерных и тяжёлых проблем развития энергосистем мегаполисов и связана с возникновением перегрузок в сетях всех напряжений, чаще всего в ремонтных схемах и при аварийных отключениях элементов сети 500 кВ, когда электрическая нагрузка потребителей ложится на оставшееся в работе оборудование. При этом в результате перераспределения перетоков мощности значение токов в ряде линий может превысить длительно допустимое значение тока в 2,5 – 3 раза. Если отключать в таких случаях перегруженную линию, её нагрузка ляжет на другие связи и обусловит возможность возникновения их перегрузок и последующего отключения, что может привести в дальнейшем к каскадному развитию аварии.

Решение указанных проблем связано с необходимостью разработки комплекса системных решений для организации энергоснабжения, связанных, в том числе, с совершенствованием систем управления в нормальных и аварийных режимах. Возможность совершенствования систем управления определяется в большой мере достижениями последних десятилетий в области силовой электроники и преобразовательной техники, компьютерных и коммуникационных технологий.

Целью работы является исследование и разработка методов и средств повышения эффективности управления нормальными и аварийными электрическими режимами в районах мегаполисов.

Основные задачи, решаемые в работе. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Исследование возможности быстрого определения амплитуды переходного тока КЗ, в том числе, при наличии помех и влиянии насыщения трансформаторов тока.
2. Исследование, разработка и реализация системы ограничения ТКЗ и переходных восстанавливающих напряжений с использованием вакуумных управляемых разрядников.
3. Анализ методов и средств уменьшения влияния токов подпитки дуги и восстанавливающихся напряжений на отключенной фазе ВЛ после погасания дуги.
4. Анализ опытных данных успешного ОАПВ на ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – ПС Белозерская (Череповецкая).
5. Исследования электромагнитных переходных процессов при КЗ и коммутациях выключателей в схеме электропередачи 750 кВ Калининская АЭС – ПС Грибово.
6. Совершенствование алгоритмов автоматики ограничения перегрузки линии электропередачи.

Основные методы научных исследований. Для решения поставленных задач использовались методы теории электротехники, электромагнитных переходных процессов в

электроэнергетических системах (ЭЭС), математического, физического и физико-математического моделирования с применением программно-аппаратного комплекса для исследования и наладки устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА) типа DRTS 66.

Научную новизну работы представляют:

1. Алгоритм и методика быстродействующего определения амплитуды принужденной периодической составляющей переходного ТКЗ, обеспечивающие повышение точности расчетов в условиях влияния помех и насыщения трансформаторов тока.

2. Способ ограничения ТКЗ и переходных восстанавливающих напряжений (ПВН), основанный на использовании вакуумных управляемых разрядников.

3. Результаты исследований электромагнитных переходных процессов при коротких замыканиях и коммутациях выключателей в схемах электропередачи 750 кВ Калининская АЭС – ПС Грибово, Калининская АЭС – ПС Белозерская.

4. Усовершенствованный алгоритм автоматики ограничения перегрузки линии электропередачи с косвенным расчетным методом определения температуры провода ВЛ.

Достоверность и обоснованность полученных результатов определяются корректностью принятых допущений, использованием методов классической теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах, сходимостью результатов, полученных аналитическими методами с данными исследований на физических и математических моделях, а также натурных испытаний, в том числе, с результатами исследований других авторов, опубликованными в литературных источниках.

Соответствие паспорту специальности.

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» (технические науки): в диссертационной работе объектом исследований являются магистральные электрические сети высокого и сверхвысокого напряжения, предметом исследований - особенности нормальных и аварийных электрических режимов в районах мегаполисов, электромагнитных переходных процессов при коротких замыканиях в электрических сетях высокого и сверхвысокого напряжения, методы и средства повышения эффективности управления нормальными и аварийными электрическими режимами в районах мегаполисов.

Соответствие диссертации области исследования специальности: отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.02, а именно:

- п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 соответствуют методика расчетов токов подпитки дуги и восстанавливающихся напряжений на отключенной фазе ВЛ после погасания дуги, определения времени бестоковой паузы ОАПВ, исследования электромагнитных переходных процессов при коммутации выключателей в схеме электропередачи 750 кВ Калининская АЭС – ПС Грибово, выполненных с применением разработанных моделей и методик.

- п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют алгоритм и методика быстрого определения амплитуды принужденной периодической составляющей переходного ТКЗ, сспособ ограничения ТКЗ и ПВН с использованием вакуумных управляемых разрядников, результаты исследований электромагнитных переходных процессов при коммутации выключателей в схеме электропередачи 750 кВ Калининская АЭС – ПС Грибово, усовершенствованный алгоритм автоматики ограничения перегрузки линии электропередачи, обеспечивающие повышение эффективности управления нормальными и аварийными электрическими режимам в районах мегаполисов.

Практическую ценность работы представляют:

1. Разработанная система ограничения ТКЗ и ПВН на базе вакуумных управляемых разрядников (СОТ-РВУ), экспериментальный образец которой подготовлен для установки в опытную эксплуатацию на пилотном объекте Магистральных электрических сетей (МЭС) Центра.

2. Методика расчетов токов подпитки дуги и восстанавливающихся напряжений на отключенной фазе ВЛ после погасания дуги, определения времени бестоковой паузы ОАПВ, которая в настоящее время используется и в дальнейшем может быть использована как в практике проектирования, так и при научных исследованиях объектов высокого и сверхвысокого напряжения.

3. Результаты исследований электромагнитных переходных процессов при коротких замыканиях и коммутациях выключателей в схемах электропередачи 750 кВ Калининская АЭС – ПС Грибово, Калининская АЭС – ПС Белозерская, позволяющие уточнить методику проектирования схем выдачи мощности энергообъектов и состава их первичного электрооборудования.

4. Алгоритм функционирования автоматики ограничения перегрузки линии электропередачи, обеспечивающий повышение эффективности противоаварийного управления электрическими режимам в районах мегаполисов, который может быть использован при совершенствовании проектных решений и разработке программно-технических средств противоаварийного управления.

Внедрение результатов исследований. Результаты выполненных исследований и разработок использованы в составе проектных и научно-исследовательских работ ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ», а именно:

1. Методика расчетов токов подпитки дуги и восстанавливающихся напряжений на отключенной фазе ВЛ после погасания дуги, определения времени бестоковой паузы ОАПВ; результаты исследований электромагнитных переходных процессов при коротких замыканиях и коммутациях выключателей в схемах линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения; усовершенствованный алгоритм автоматики ограничения перегрузки линии электропередачи использованы с 2009г. при проектировании объектов высокого и сверхвысокого напряжения, в том числе, «ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – ПС Грибово».

2. Разработка системы ограничения ТКЗ и ПВН на базе вакуумных управляемых разрядников 110-220 кВ (СОТ-РВУ) выполнена совместно с ФГУП ВЭИ в рамках выполнения программы НИОКР ОАО «ФСК ЕЭС» на 2010-2013г.г.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм и методика быстродействующего определения амплитуды принужденной периодической составляющей переходного ТКЗ, обеспечивающие повышение точности расчетов в условиях влияния помех и насыщения трансформаторов тока.

2. Результаты анализа методов и средств уменьшения влияния токов подпитки дуги и восстанавливающихся напряжений на отключенной фазе ВЛ после погасания дуги.

3. Результаты исследований электромагнитных переходных процессов при коротких замыканиях и коммутациях выключателей в схемах линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения (ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – ПС Грибово, Калининская АЭС – ПС Белозерская).

4. Усовершенствованный алгоритм функционирования автоматики ограничения перегрузки линии электропередачи.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и конкретных задач исследования, разработке структуры и алгоритмов реализации СОТ-РВУ 110-220 кВ и ее элементов, разработке методики расчетов параметров компенсационных реакторов, токов подпитки дуги и восстанавливающихся напряжений на отключенной фазе ВЛ после погасания дуги с определением времени бестоковой паузы ОАПВ, разработке математических моделей для исследования электромагнитных переходных процессов при коротких замыканиях и коммутациях выключателей в схемах линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, разработке усовершенствованного алгоритма функционирования устройства АОПЛ.

Апробация результатов исследований. Материалы исследований докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях, в том числе, на: международном специализированном семинаре «Электрические сети России 2008», ВВЦ (Москва, 2008г.); юбилейной конференции к 45-летию ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬП-

РОЕКТ» (Москва, 2008г.); VI международной научно-технической конференции «Энергосбережение в электроэнергетике и промышленности» (Москва, 2010г.); юбилейной конференции к 50-летию ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» (Москва, 2012г.); 1-ой конференции ОАО «Российские сети» и Российской академии наук - «Энергия единой сети» (Санкт-Петербург, 2013г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 30 работ, в том числе 7 научных статьей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 84 наименований и 3 приложений. Основной текст включает 148 стр., 39 илл.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дается общая характеристика работы.

В первой главе выполнена оценка проблемы ограничения ТКЗ и ПВН в районах мегаполисов, приведены характеристики разрядников вакуумных управляемых (РВУ), рассмотрены принципы действия и структуры СОТ-РВУ и ее элементов.

В качестве одной из распространенных мер для координации ТКЗ используются токоограничивающие устройства (ТОУ). Вместе с тем известные ТОУ имеют большие габариты и массу, «привязаны» к топологии сети, что при ее изменении требует корректировки их расстановки, а также имеют значительное потребление мощности в нормальном режиме и могут оказывать влияние на неблагоприятное увеличение скорости переходного восстанавливающего напряжения (ПВН) при отключении выключателя. Кроме того в условиях плотной застройки мегаполисов, как правило существует острый дефицит в свободной земельной площади.

Новое направление по применению управляемых токоограничивающих устройств (ТОУ), связано со значительным прогрессом в развитии импульсных технологий и появлением мощных коммутационных аппаратов на базе разрядников вакуумных управляемых (РВУ). Основу РВУ составляет безнакальная трехэлектродная герметизированная система с давлением остаточных газов (не более 10^{-4} Па), содержащая два основных и один управляющий электроды. Включение РВУ осуществляется подачей пускового импульса напряжения на управляющий электрод.

Перспективы использования РВУ обусловлены такими их преимуществами по сравнению с другими типами коммутирующих устройств, как способности практически не оказывать влияние на нормальные режимы объекта; быстро снижать ТКЗ и ПВН; работать в широком диапазоне напряжений и токов; иметь сравнительно низкую стоимость по сравнению газоразрядными и полупроводниковыми приборами, а также небольшие габариты по сравнению с известными ТОУ.

В качестве одного из вариантов ТОУ ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» совместно с ФГУП «ВЭИ» в рамках инновационной программы ОАО «ФСК ЕЭС» под руководством и при участии автора выполнил разработку «Системы ограничения токов КЗ и переходных восстанавливающихся напряжений в сетях 110-220 кВ на основе вакуумных управляемых разрядников» (СОТ-РВУ).

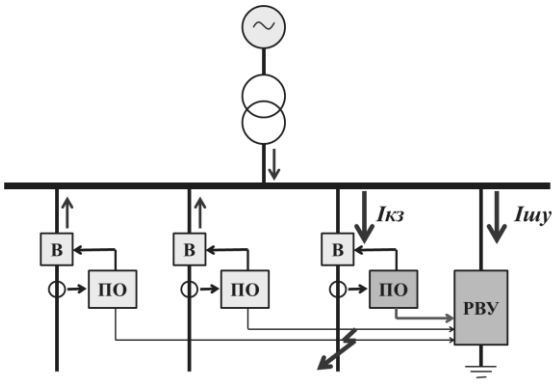


Рис. 1. Распределение ТКЗ при включенном состоянии ВБК

В такой системе необходимый набор РВУ подключается к шинам, у присоединений которых требуется ограничение ТКЗ (рис.1). Сущность функционирования СОТ-РВУ заключается в том, что если при КЗ на присоединении зафиксирован «опасный» ток, пусковое устройство осуществляет быстрое включение (единицы мкс) РВУ, в результате чего происходит перераспределение ТКЗ между местом КЗ и местом включения РВУ и снижение уровня ПВН на выключателе, т.е. обеспечиваются условия для отключения тока выключателем. После отключения выключателей присоединения разрядники должны отключаться и таким образом осуществляется полный цикл отключение КЗ.

Благодаря тому, что время поджига разрядников (время пробоя разрядника и время срабатывания блока поджига) не превышает 1 мс, появляется возможность по ограничению динамического воздействия ударного ТКЗ на оборудование присоединения. Для этого токовый пусковой орган (ТПО) должен выявить амплитуду I_{1m} принужденной периодической составляющей первичного опасного ТКЗ и сформировать команду на управление разрядниками (поджиг РВУ) за время не более, чем за 2-3мс.

Первичный ТКЗ принимается состоящим из принужденной синусоидальной составляющей с начальной фазой β и свободной апериодической (экспоненциальной) составляющей, затухающей с постоянной времени τ_a:

$$i_1(t) = I_{1m} \cdot \left[\sin(\omega \cdot t - \beta) + \sin(\beta) \cdot e^{-t/\tau_a}\right]. \qquad (1)$$

На вход ТПО подключен вторичный ток трансформатора тока (ТТ) защищаемого присоединения, который при отсутствии насыщения ТТ пропорционален первичному току $i_2(t) = i_1(t)/n_т$ ($n_т$ – коэффициент трансформации ТТ).

Для обеспечения требуемого быстродействия при определении I_{1m} необходима частота замеров мгновенного тока КЗ порядка 80÷100 точек на период $T=1/f$ = 20 мс , т.е. $f_д = 4 \div 5\ кГц$ (при этом шаг дискретизации времени составляет $\Delta t = 0{,}2 \div 0{,}25\ мс$).

Требование к селективности ТПО определяется по существу требованием к точности определения амплитуды принужденной составляющей переходного тока КЗ. Допустимая относительная погрешность определения значения I_{1m} принимается равной ±10% при первичном токе, равном току срабатывания ПО на интервалах времени процесса, где отсутствует насыщение ТТ. Это требование означает запрет срабатывания ТПО при измеренных значениях амплитуды I_{1m}, равных или менее 90% уставки.

Для заданных быстродействии и точности определения амплитуды периодической принужденной составляющей переходного ТКЗ - I_{1m} предлагается методика, основанная на обработке выборок мгновенных значений вторичного тока поврежденного присоединения на скользящем интервале наблюдения ограниченной длительности (порядка 1 мс при шаге дискретизации $\Delta t = 0{,}2 \div 0{,}25\ мс$), и на распознавании интервалов времени с насыщением ТТ, на которых рассчитанные значения амплитуды I_{1m} признаются недостоверными.

Для исключения влияния апериодической составляющей используется переход от значений полного тока КЗ $i_k = i(t_k)$, k = 0, 1, 2, к первым разностям тока Δi_k на шаге дискретизации Δt. При малом шаге Δt значения апериодической составляющей тока КЗ в смежных отсчетах близки друг к другу и в приращении тока Δi_k их разность близка к нулю, а зависимости $\Delta i(t_k)$ близки к синусоидальным.

Если обозначить мгновенное значение первой разности ТКЗ в момент времени t_k

$$v_k = v(t_k) = \Delta i_k = i_k - i_{k-1} = i(t_k) - i(t_k - \Delta t), \qquad (2)$$

а ее амплитуду $max\ (v_k) = V_m$, то расчетное выражение для определения амплитуды первой разности ТКЗ

$$V_m = \sqrt{\left(\frac{v_{k-1} + v_{k+1}}{2 \cdot \cos \Delta x}\right)^2 + \left(\frac{v_{k+1} - v_{k-1}}{2 \cdot \sin \Delta x}\right)^2}\ , \quad (3) \qquad I_m = \frac{V_m}{\Delta x} = \frac{V_m}{\omega \cdot \Delta t} \quad (4).$$

Для применения формул (3-4) необходимо иметь 5 отсчетов мгновенных значений ТКЗ. С учетом затрат времени на их обработку можно считать, что первое от начала КЗ значение амплитуды принужденной составляющей ТКЗ - I_m может быть получено через 5 шагов дискретизации времени, что при Δt = 0,25 мс составляет 1,25 мс. Еще 2 замера потребуют $2\Delta t$=0,5мс (для достоверизации), что определяет минимальное время срабатывания пускового органа, равное 7 Δt = 1,75мс. При частоте дискретизации $f_\partial = 100 f_{ном}$ = 5 кГц имеем Δt = 0,2 мс и минимальное время срабатывания ПО составляет 7 Δt = 1,4 мс. При реальных измерениях дополнительное время потребуется для фильтрации сигнала от помех и минимальное время срабатывания пускового органа может быть около 2-3мс.

При известном, хотя бы приближенно, значении постоянной времени τ апериодической составляющей переходного тока КЗ можно уменьшить погрешности определения амплитуды принужденной составляющей тока КЗ I_m, используя два корректирующих множителя *К* и *К1*. Множитель К>1 учитывает затухание апериодической составляющей тока на интервале шага дискретизации Δt, вычисляется по формуле

$$K = exp\ (\Delta t/\tau) \qquad (5)$$

и используется для компенсации этого затухания в текущем *k*-ом замере тока как множитель при i_k в формуле (2) определения первых разностей тока:

$$\Delta i_k = K i_k - i_{k-1}. \qquad (6)$$

Однако при этом в получаемых значениях Δi_k увеличивается и переменная составляющая тока. Для компенсации этого изменения полученные значения $I_{m\ расч}$ должны быть умножены на второй коэффициент *К1*<1, который одновременно учитывает фазный сдвиг $\Delta x = \omega \Delta t$ между соседними отсчетами тока. Значение *К1* определяется по формуле:

$$K1 = \left| \frac{\exp\ (j\omega \cdot \Delta t) - 1}{\exp\left(\frac{\Delta t}{\tau} + j\omega \cdot \Delta t\right) - 1} \right| \quad . \qquad (7)$$

Таблица 1

Погрешности определения амплитуды принужденной периодической составляющей ТКЗ по 5 отсчетам тока при шаге 0,25 мс с поправками в зависимости от постоянной времени затухания апериодической составляющей тока

τ	β	max(F)	min(F)	*K*	*K1*
с	°	%	%	1	1
0.010	0	0	-0.026	1.02469	0.943411
	45	0.111	-0.396		
	90	0.21	-0.434		
0.020	0	0	-0.026	1.01242	0.981785
	45	0.046	-0.144		
	90	0.064	-0.173		
0.045	0	0	-0.026	1.00554	0.994782
	45	0	-0.052		
	90	0.002	-0.06		
0.100	0	0	-0.026	1.0025	0.998251
	45	0	-0.031		
	90	0	-0.033		
0.200	0	0	-0.026	1.00125	0.99925
	45	0	-0.027		
	90	0	-0.028		
0.300	0	0	-0.026	1.00083	0.999528
	45	0	-0.026		
	90	0	-0.027		

В таблице 1 приведены погрешности *F* определения I_m (в процентах I_m) с использованием поправочных множителей *К* и *К1* при ряде значений τ и начальной фазы β тока КЗ. При точных значениях тока КЗ значение постоянной времени τ может быть определено на скользящем интервале наблюдения, включающем 6 сделанных подряд замеров тока.

Для отработки настоящей методики при наличии помех и насыщении трансформаторов тока были использованы экспериментальные данные опыта неуспешного однофазного АПВ с цифровой регистрацией тока тремя трансформаторами тока. На рис.2 приведена начальная часть цифровой осциллограммы

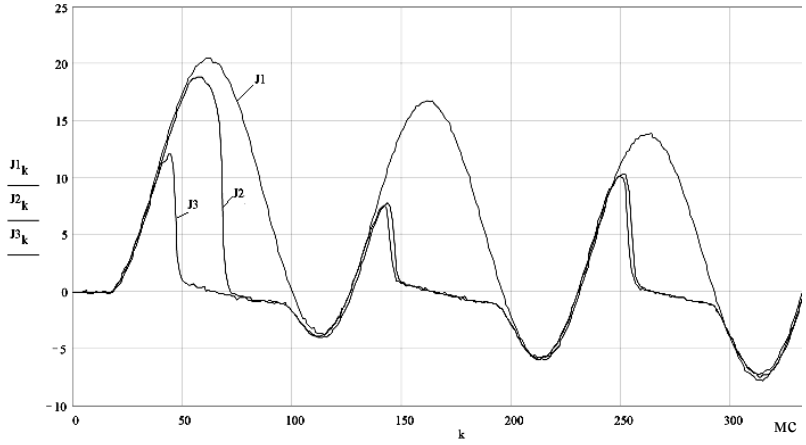


Рис. 2. Экспериментальная осциллограмма приведенного первичного тока КЗ (J1) и двух вторичных токов (J2, J3) трансформаторов тока при неуспешном ОАПВ

вторичных токов при включении на КЗ, где $J1_k$ – вторичный ток образцового ТТ; *J2* – вторичный ток ТТ-1 класса точности 5Р, имеющего малый немагнитный зазор для ограни-чения остаточного намагничивания магнитопровода из стали марки М5; *J3* - вторичный ток ТТ-2 класса точности 5Р с магнитопроводом из стали марки М5, с такими же размерами и тем же числом витков вторичной обмотки как у ТТ-1, но со сплошным магнитопроводом.

Осциллограмма периодической составляющей тока с частотой $f=f_{ном}$=50 Гц была снята при частоте дискретизации $f_д$=5 кГц, что соответствует 100 шагам дискретизации Δt=0,2 мс на период T=20 мс. Коэффициент трансформации каждого из трех ТТ. При этом амплитуда принужденной составляющей первичного тока КЗ составляет около 22 кА, действующее значение около 15,6 кА. В токе КЗ имеется значительная апериодическая составляющая с начальным значением около 83 % от амплитуды принужденной составляющей тока КЗ и постоянной времени $\tau \sim 47$ мс.

В результате выполненных исследований было определено, что для получения приемлемой точности и времени срабатывания ПО может быть достаточной трехступенчатая фильтрация токов, включающая: линейное сглаживание по трем точкам первичных замеров тока на скользящем интервале наблюдения; вычисление первых разностей тока Δi_k по результатам первой ступени фильтрации и линейное сглаживание Δi_k по трем точкам; фильтрация результатов второго сглаживания с помощью цифрового экспоненциального фильтра нижних частот (ФНЧ), имеющего постоянную времени T_f = 2 мс.

Вторая глава посвящена проблемам уменьшения влияния токов подпитки дуги и ПВН в неполнофазных режимах ВЛ СВН, в том числе, выбору компенсационных реакторов, методике расчета токов подпитки дуги, ПВН, времени бестоковой паузы ОАПВ, анализу опытных данных успешного ОАПВ.

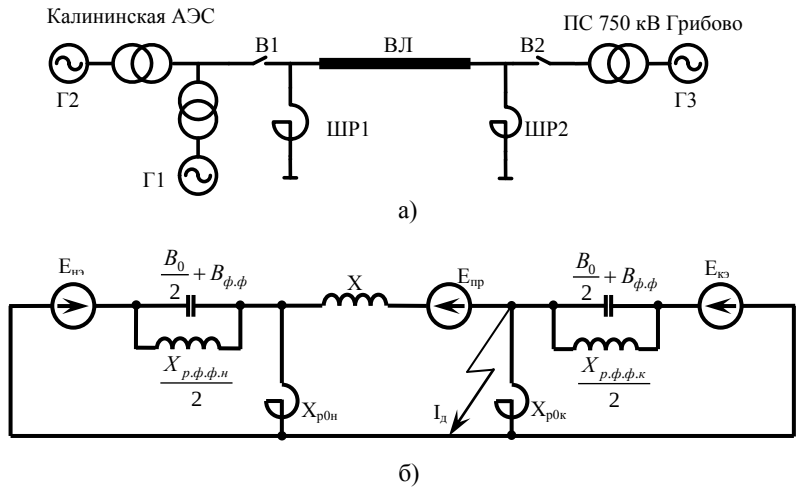


Рис.3. Схема замещения электропередачи (а) и расчетная схема замещения (б)

Наиболее эффективной мерой обеспечения возможности применения ОАПВ на длинных линиях СВН (за счет устранения резонансных перенапряжений и ограничения влияния тока подпитки дуги) является установка специального нулевого (компенсационного) реактора (КР) в цепь заземления нейтрали трёхфазной группы шунтирующих реакторов (ШР). Такая группа реакторов, образуемая так называемый четырёхлучевой реактор, приводит к снижению тока подпитки благодаря компенсации междуфазных

емкостей ВЛ, которые вносят основной вклад в создание тока подпитки.

С целью реализации такого рода мер, например, при проектировании ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово, возникла необходимость разработки ориентированных на проектные решения инженерной методики выбора КР для ВЛ СВН, расчетов тока подпитки дуги и восстанавливающегося напряжения на отключенной фазе ВЛ после погасания дуги, а также определения времени бестоковой паузы ОАПВ.

Методика базируется на анализе напряжений (токов) в расчетной схеме электропередачи, в которую входит воздушная линия электропередачи СВН и включенные на концевых подстанциях ШР, предназначенные для компенсации генерируемой линией реактивной мощности (рис.3).

При включении компенсационного (нулевого) реактора с индуктивным сопротивлением x_N в цепь заземления нейтрали трёхфазной группы шунтирующих реакторов, соединённых по схеме «звезда», имеющих фазное сопротивление x_P, группа реакторов эквивалентна трём индуктивным сопротивлениям $x_{P.0}$, включенным между фазами и землёй, и трём индуктивным междуфазным сопротивлениям $x_{P.Ф.Ф}$, соединенным в треугольник, причем $x_{P.0} = x_P + 3x_N$, $x_{P.Ф.Ф} = x_P\,(3 + x_P/x_N)$.

При установке двух четырёхлучевых групп реакторов на линии их индуктивные сопротивления $x_{P.0}$ компенсируют приходящиеся на них половины емкостных проводимостей линии на землю $B_0/2$, а индуктивные сопротивления $x_{P.Ф.Ф}$ – половины междуфазных емкостных проводимостей $B_m/2$.

Условием компенсации междуфазных емкостных ВЛ является равенство: $Y_{Ф.Ф} = 1/x_{P.Ф.Ф} = x_P\,(3 + x_P/x_N) = 0{,}5B_m$, из которого следует расчетное выражение для определения необходимого индуктивного сопротивления нулевого реактора x_N.

Методика определения тока подпитки дуги и восстанавливающегося напряжения основана на соотношениях, полученных из расчетной схемы электропередачи, а также на рекомендованной зависимости времени гашения дуги подпитки и бестоковой паузы ОАПВ от амплитуды установившегося тока подпитки $t_{гаш}\ (I_д)$ (рис. 4). В качестве исходных данных по ВЛ 750 кВ приняты справочные пара-метры, уточнённые расчетами, учитывающими конкретные геометрические характеристики линии с запроектированными для неё опорами, проводами и тросами.

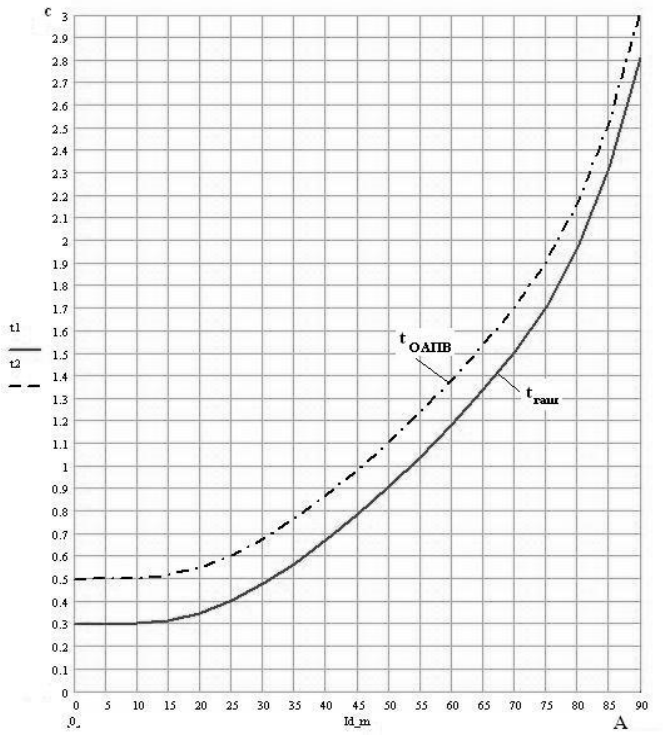


Рис. 4. Зависимость времени гашения дуги подпитки (с вероятностью 90%) и бестоковой паузы ОАПВ от амплитуды установившегося тока подпитки для ВЛ СВН

Максимальное значение угла δ между векторами напряжений в начале и конце линии, используемое при расчетах тока подпитки и восстанавливающегося напряжения, принято равным $2\lambda 1$ ($\lambda 1$ – волновая длина линии для прямой последовательности фаз).

Расчетные выражения для токов подпитки ($I_д$) и восстанавливающихся напряжений ($U_в$):

При КЗ в начале линии

$$\underline{I}_{д.н} = -j\underline{E}_{Ан} e^{-j\frac{\delta}{2}} \left\{ \left(B_m - \frac{k_н}{x_{р.н}} - \frac{k_к}{x_{р.к}} \right) \cdot cos\frac{\delta}{2} - j\left[\frac{k_н}{x_{р.н}} - \frac{k_к}{x_{р.к}} - 2N\left(\frac{B_0}{2} + B_m - \frac{1-k_к}{x_{р.к}} \right) \right] \cdot sin\frac{\delta}{2} \right\}, \quad (8)$$

$$\underline{U}_{д.н} = j\frac{\underline{I}_{д.н}}{B_{вх}}, \quad (9) \quad B_{вх} = B_0 + 2B_m - \frac{1-k_н}{x_{р.н}} - \frac{1-k_н}{x_{р.н}} - \frac{1-k_к}{x_{р.к}}. \quad (10)$$

При КЗ в конце линии

$$\underline{I}_{д.к} = -j\underline{E}_{Ан} e^{-j\frac{\delta}{2}} \left\{ \left(B_m - \frac{k_н}{x_{р.н}} - \frac{k_к}{x_{р.к}} \right) \cdot \cos\frac{\delta}{2} + j\left[\frac{k_к}{x_{р.к}} - \frac{k_н}{x_{р.н}} - 2N\left(\frac{B_0}{2} + B_m - \frac{1-k_н}{x_{р.н}} \right) \right] \cdot \sin\frac{\delta}{2} \right., \quad (11) \quad \underline{U}_{д.к} = j\frac{\underline{I}_{д.к}}{B_{вх}}. \quad (12)$$

Здесь

$$k_н = \frac{x_{Nн}}{x_{р.н} + 3x_{Nн}} = \frac{\xi_н}{1+3\xi_н}, \quad k_к = \frac{x_{Nк}}{x_{р.к} + 3x_{Nк}}, \quad \xi_н = x_{Nн} / x_{р.н}, \quad \xi_к = x_{Nк} / x_{р.к}$$

$x_{Nн}$ и $x_{Nк}$ – индуктивные сопротивления нейтрального и шунтирующего реакторов в начале линии, $x_{р.н}$ и $x_{р.к}$ – то же, в конце линии.

Результаты выполненных на примере ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово (δ=2·λ1=31°, индуктивное сопротивление компенсационного реактора 180 Ом) расчетов представлены в таблице 2 и свидетельствуют об эффективности применения компенсационных (нулевых) реакторов для снижения тока подпитки дуги, восстанавливающегося напряжения и времени паузы при ОАПВ.

Таблица 2

Результаты расчетов тока подпитки дуги, восстанавливающегося напряжения и требуемого времени паузы ОАПВ

№ п/п	Состояние КР	Место КЗ на ВЛ	Действующие значения тока подпитки, А			Восстан. напряжение, действующее значение, кВ	Время паузы ОАПВ, с
			полный ток	составляющие			
				эл. статич.	эл. магн.		
1.	Зашунтированы в начале и конце ВЛ 750 кВ (т.е. без КР)	начало конец	35 35	34,8 34,8	3,7 3,7	270 270	1,1 1,1
2.	Включены в начале и конце ВЛ	начало конец	1,43 1,43	- -	- -	28,3 28,3	0,5 0,5
3.	Включены только в конце ВЛ (в Грибово)	начало конец	17,8 19,4	18,1 18,1	1,43 3,7	197 215	0,61 0,64
4.	Включены только в начале ВЛ (на КАЭС)	начало конец	19,4 17,8	18,1 18,1	3,7 1,43	215 197	0,64 0,61

Наглядное представление о возможных процессах на ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – ПС Грибово дают обработанные опытные данные процессов (натурная осциллограмма) при успешном ОАПВ на весьма близкой по параметрам и условиям работы ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – ПС Белозерская. Осциллограмма зафиксирована терминалом защиты ВЛ (7SA522, Siemens) на ПС Белозерская 13.07.2007г. в 20ч40м48с при однофазном КЗ фазы А, вызванным падением дерева на ВЛ. Можно ожидать, что похожие уровни восстанавливающегося напряжения будут иметь место и на ВЛ 750 кВ Грибово – Калининская АЭС, имеющей немного меньшую длину, аналогичную конструкцию и одинаковые четырёхлучевые реакторы по концам электропередачи.

В третьей главе выполнена оценка эффективности мероприятий по исключению влияния апериодической составляющей в токе на коммутационную способность выключателей на основе рекомендуемых методик формирования расчетных моделей и выполненных расчетов электромагнитных переходных процессов в схеме электропередачи 750 кВ Калининская АЭС – ПС Грибово.

Как показал анализ произошедших аварий, а также выполненные в 2009г. под руководством и при участии автора исследования электромагнитных переходных процессов в рам-

ках обоснования проектных решений ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово, причиной всех зафиксированных аварийных повреждений выключателей является недопустимо длительное горение дуги в их межконтактных промежутках из-за наличия в отключаемом токе значительной апериодической составляющей, препятствующей переходу отключаемого тока через нулевое значение в течение достаточно длительного времени. Поэтому в практике проектирования для обеспечения надежной эксплуатации ВЛ, оснащенных ШР и элегазовыми выключателями с интенсивной системой дугогашения, принято необходимым проводить расчеты, связанные с анализом коммутационной способности таких выключателей при отключении и включении. Такого рода исследования электромагнитных переходных процессов при проектировании в 2009г. ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово в большой мере позволили:

- определить критерии обязательного проведения расчётов переходных режимов для присоединений подстанций высокого напряжения с целью выявления опасных значений апериодической составляющей токов в выключателях при их коммутациях;
- наметить методические подходы по формированию расчетных моделей, составлению расчетных схем и выбору расчетных коммутаций;
- рассмотреть возможные мероприятия по устранению длительной апериодической составляющей в токе неповрежденных фаз.

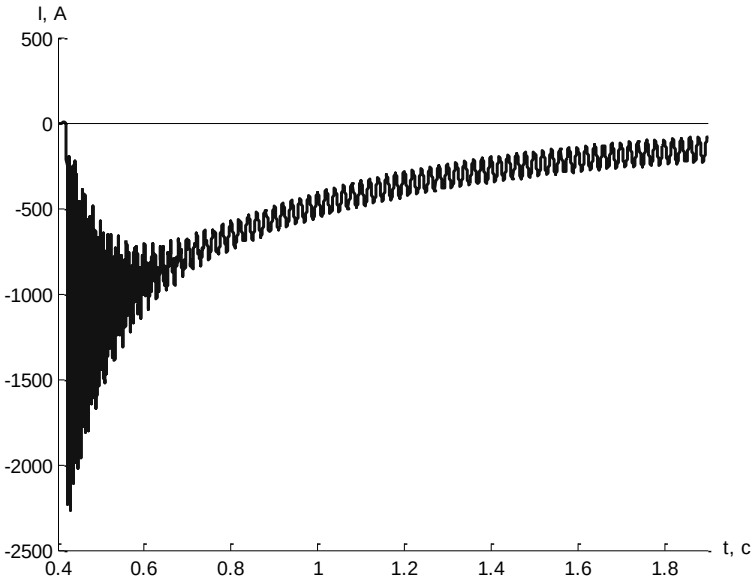


Рис. 5. Ток через выключатель в неповрежденной фазе при одностороннем включении ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово в цикле ТАПВ при К(1,1) вблизи шин Калининской АЭС

Исследования электромагнитных переходных процессов в цикле ТАПВ для ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово позволили определить возможности возникновения длительной апериодической составляющей в токе неповрежденных фаз линии при несимметричных КЗ и оценить эффективность ряда мероприятий по ее устранению.

Анализ электромагнитных переходных процессов на ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово выполнен на основе расчетной модели (рис.3,а), реализованной с использованием ПК MATLAB *Simulink*.

На рис.5 приведен график тока в выключателе неповрежденной фазы при одностороннем включении ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово в цикле ТАПВ со стороны ПС Грибово в случае К(1,1) у шин Калининской АЭС, а в таблице 3 – время перехода тока выключателя в неповрежденных фазах через нуль при различных несимметричных коротких замыканиях. Рассматриваются КЗ как вблизи шин Калининской АЭС, так и вблизи шин ПС Грибово. Расчеты выполнены в схеме с двумя ШР по концам ВЛ Калининская АЭС – Грибово.

Время от начала коммутации до перехода через нулевое значение тока в выключателе после затухания колебательной переходной составляющей определяется по выражениям:

Таблица 3

Время перехода (с) тока выключателя в неповрежденной фазе через нуль при одностороннем включении ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово при различных видах КЗ

Вид КЗ	2 ШР по концам ВЛ	
	КЗ у шин КАЭС	КЗ у шин ПС Грибово
К(1)	2,622	3,082
К(1,1)	2,480	2,860
К(2)	4,020	4,000
Без КЗ	3,960	3,960

- для схем с реакторами в начале ВЛ

$$t_{0н} = \frac{\ln I_{ап.в} - \ln I_{выкл}}{\delta_{р1}}, \qquad (13)$$

- для схем с реакторами в конце ВЛ

$$t_{0к} = \frac{\ln I_{ап.в} - \ln I_{выкл}}{\delta_{р2}}, \qquad (14)$$

- для схем с реакторами, установленными по концам ВЛ, необходимо построить огибающую кривую

$$i_{ог}(t) = i_{ап.в}(t) - I_{выкл} \quad , \qquad (15)$$

и определить время её перехода через нулевое значение.

Таким образом, для ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово при работе с двумя ШР характерно наличие длительной апериодической составляющей в токе неповрежденных фаз при одностороннем включении ВЛ. Начальное значение и скорость затухания апериодической составляющей в токе таковы, что ток выключателя в неповрежденной фазе не переходит через нуль в течение 2,5 – 4 с в зависимости от вида и места КЗ. Таким образом, при плановом включении или включении ВЛ в цикле ТАПВ в случае наличия на ВЛ несимметричного КЗ отключение неповрежденных фаз может быть существенно затруднено.

В работе рассмотрены различные меры по устранению длительной апериодической составляющей в токе неповрежденных фаз ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово: управление моментом включения выключателя; отключение ШР в цикле АПВ; предвключение резисторов; совместное применение отключения ШР в паузу АПВ и предвключения резисторов; управление моментом отключения неповрежденных фаз. В качестве оценки эффективности мероприятий по ликвидации длительной апериодической составляющей было принято требование перехода тока в выключателе неповрежденной фазы через нуль в течение не более 40 мс после замыкания контактов выключателя.

Проведенные исследования выявили, что все рассмотренные мероприятия, направленные на уменьшение амплитуды и длительности апериодической составляющей в токе неповрежденных фаз, не обеспечивают в полной мере решение проблемы и/или являются достаточно дорогостоящими.

Имеющийся опыт исследований и проектирования показывает, что требуется дальнейшая углубленная проработка и исследования мер по исключению влияния апериодической составляющей в токе выключателя при коммутации неповрежденных фаз, в том числе, создание специальной автоматики исключения влияния апериодической составляющей.

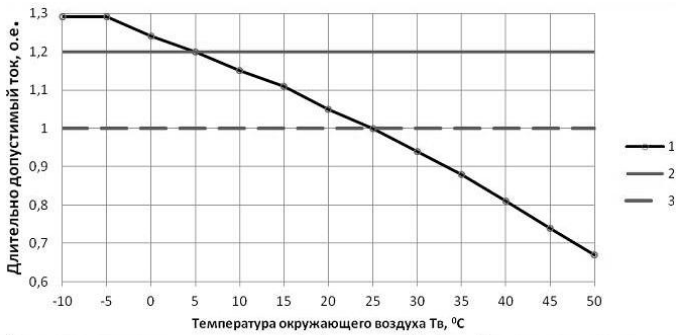
Четвертая глава посвящена проблемам обеспечения автоматического ограничения перегрузки оборудования (АОПО), а именно: автоматического ограничения перегрузки линии (АОПЛ) и автоматического ограничения перегрузки трансформатора (АОПТ). Рассмотрены особенности технологических алгоритмов и принципов реализации управляющих воздействий.

Проблема возникновения термических перегрузок оборудования является одной из наиболее характерных и тяжелых проблем развития энергосистем мегаполисов и связана с возникновением перегрузок в сетях всех напряжений чаще всего в ремонтных схемах и при аварийных отключениях элементов сети 500 кВ, когда электрическая нагрузка потребителей ложится на оставшееся в работе оборудование. При этом в результате перераспределения перетоков мощности значение токов в ряде линий может превысить длительно допустимое значение тока в 2,5 – 3 раза. Если отключать в таких случаях перегруженную линию, её нагрузка ляжет на другие связи и обусловит возможность возникновения их перегрузок и последующего отключения, что может привести в дальнейшем к каскадному развитию аварии. С учетом возможностей современных программно-технических средств такие противоаварийные мероприятия могут быть более совершенными по сравнению с

традиционными решениями, а также позволяют уточнить и в конечном счёте уменьшить объём реализации управляющих воздействий.

Назначением АОПЛ является ограничение кратковременной аварийной перегрузки линий электропередачи, которая может привести к повреждению оборудования и для воздушных линий (ВЛ) к увеличению стрелы провеса проводов с последующим перекрытием промежутка от провода до земли или до других объектов, находящихся под линией.

Основным параметром, ограничивающим перегрузку линии по условиям механической прочности провода, является температура провода. В традиционно проектируемых в электрических сетях устройствах АОПЛ отсутствует непосредственное измерение температуры провода, поэтому косвенная фиксация этой температуры ней и соответствующие противоаварийные управления осуществляются на основе контроля значения протекающего по проводу тока.



1 – нормируемая зависимость $I_{Тв}/I_{Тв\,=\,25} = f(T_в)$, 2 и 3 – сезонные уставки АОПЛ по току (зима/лето)

Рис. 6. Зависимость длительного допустимого тока линии (для $T_{пр}$=70°С) от температуры окружающего воздуха

Длительно допустимый ток линии определяют на основании нормированной его зависимости от температуры окружающего воздуха (при нормированной температуре провода $T_{пр}$ и принятых сезонных уставках АОПЛ по току (зима/лето). На (рис.6) приведена зависимость длительно допустимого тока линии при нормированной температуре провода $T_{пр}$=70^{0}С и принятых сезонных уставках АОПЛ по току (в о.е.) – 1,2 о.е. (зима), 1,0 о.е. (лето). Сезонные уставки срабатывания АОПЛ выбираются дискретно оперативным заданием («зима» или «лето»), что не всегда позволяет достоверно учитывать реальные условия нагрева и зачастую может привести к неэффективной (избыточной) реализации управляющих воздействий.

Таким образом, для более полного использования нагрузочной способности линий электропередачи необходимо решение следующих задач:

- достоверный контроль температуры провода;
- определение допустимой температуры провода с учетом гололедно-ветровых нагрузок;
- осуществление управления (управляющих воздействий) в энергосистеме с целью предотвращения аварийной перегрузки линий.

Для исключения недостатков традиционного решения под руководством и при участии автора был разработан и внедрен алгоритм АОПЛ с косвенным расчетным методом определения температуры провода ВЛ на основе использования тепловой модели линии с учетом температуры окружающего воздуха (на основании уравнения теплового баланса проводника). Линия моделируется инерционным звеном первого порядка, характеризуемым постоянной времени нагрева, что позволяет учесть постепенность изменения температуры и рассматривать динамику её изменения. В качестве параметров, которые определяют нагрев провода, используются две величины, измерение которых на практике осуществляется достаточно легко: ток линии на наиболее загруженном участке, температура окружающего воздуха.

В качестве уставки для моделирования линии в устройстве АОПЛ используется постоянная времени нагрева проводника, которая, например, для кабеля (кабельного участка), например, проложенного в воздухе, рассчитывается по формуле:

$$T = \left(S_1 + S_3\right)\cdot\left(c_{ж} + 0{,}5\left(c_{из} + c_{св}\right)\right) \quad (ч), \qquad (16)$$

где S_1 – тепловое сопротивление изоляции кабеля, (ºС·см)/Вт; S_3 – тепловое сопротивление оболочки кабеля, (ºС·см)/Вт; $c_{ж}$ – удельная теплоёмкость жилы кабеля, (Вт·ч)/(см^3·ºС); $c_{из}$ – удельная теплоёмкость изоляции жил, (Вт·ч)/(см^3·ºС); $c_{св}$ – удельная теплоёмкость свинца, (Вт·ч)/(см^3·ºС). Удельные теплоёмкости материалов являются справочными данными; тепловые сопротивления определяются условиями прокладки кабеля и определяются расчётным путём.

При известной постоянной времени нагрева T можно определить текущую температуру проводника по следующему выражению:

$$\theta_t = \theta_{нач} + \left(\theta_{уст} - \theta_{нач}\right)\cdot\left(1 - e^{-t/T}\right) \ (^{\circ}C), \qquad (17)$$

где $\theta_{нач}$ – начальная температура провода, ºС; $\theta_{уст}$ – установившаяся температура провода, ºС; t – время с начала переходного процесса (или с начала небольшого интервала времени, принятого в устройстве за расчётный), с.

Кроме температуры проводника, в устройстве АОПЛ определяется значение тока, длительно допустимого для линии при текущих погодных условиях. Длительно допустимый ток $I_Д$ – такое значение тока, при протекании которого установившаяся температура проводника равна длительно допустимой, и определяется на основании уравнения теплового баланса провода в установившемся режиме по формуле (для ВЛ):

$$I_Д = \sqrt{\frac{(\alpha_к + \alpha_л)\cdot(\theta_д - \theta_в) - P_р}{R_п}}, \qquad (18)$$

где $\theta_д$ – длительно допустимая температура провода, ºС; $\theta_в$ – температура воздуха, ºС; $P_р$ – мощность солнечной радиации, Вт/м; $R_п$ – сопротивление одного метра провода при длительно допустимой температуре, Ом/м.

В качестве уставки срабатывания устройства АОПЛ предлагается использовать значение длительно допустимого тока, рассчитанное по вышеприведённой формуле и постоянно обновляемое в цикле расчёта устройства. Путём сравнения текущего тока линии с данным значением формируется сигнал перегрузки, который должен быть передан персоналу подстанции или диспетчеру.

Хотя возникновение перегрузки линии фиксируется и сигнализируется как по её температуре, так и по её току, однако выбор управляющих воздействий (УВ) в зависимости от степени токовой перегрузки не производится, так как увеличение тока сверх допустимого не всегда сопровождается перегревом проводника.

Для автоматического выбора необходимого УВ в устройстве АОПЛ потребовался бы слишком большой объём информации, включая топологию прилегающей сети, и слишком сложная логика. В связи с этим выбор наиболее эффективных УВ осуществляется на основе предварительного моделирования энергосистемы и расчетов её режимов.

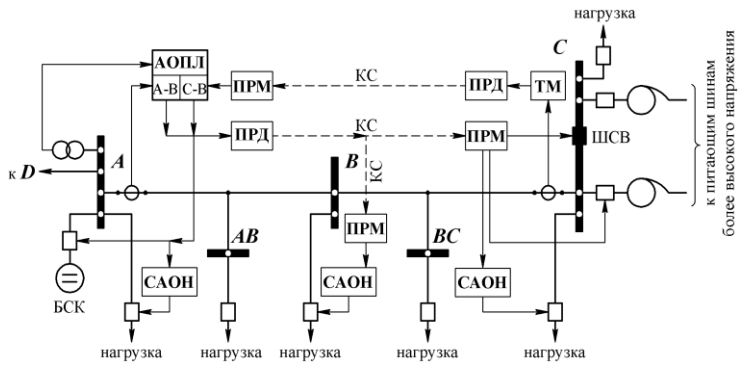


Рис. 7. Пример организации системы АОПЛ на участке сети

В приведенном примере организации системы АОПЛ на участке сети (рис.7) Защищаемый транзит состоит из двух линий А-В и В-С с промежуточными отборами мощности, имеющий двустороннее питание. В разных послеаварийных режимах имеет место реверс перетоков мощности.

При направлении мощности А→В→С перегружаются обе линии, но у шин подстанции А наиболее сильно (головной участок). Значит, ток необходимо контролировать в этом месте. В качестве противоаварийного управления (ПАУ) предлагается:

- первая ступень – включение шиносоединительного выключателя на подстанции С

(увеличение подпитки с нагрузочной стороны),

- вторая ступень – отключение нагрузки на подстанциях С, В (уменьшение потребления на нагрузочной стороне).

При направлении мощности С→В→А также перегружаются обе линии, но у шин подстанции С наиболее сильно, и ток контролируется в этом месте. Для ликвидации перегрузки предлагается:

- первая ступень – одностороннее отключение питающего автотрансформатора на подстанции С (ограничение мощности, поступающей с питающей стороны), а также включение БСК на подстанции А (уменьшение потребления на нагрузочной стороне),

вторая ступень – отключение нагрузки на подстанциях А, В (уменьшение потребления на нагрузочной стороне).

Назначением АОПТ является ограничение кратковременной аварийной перегрузки трансформаторов средней мощности с охлаждением типа Д и ДЦ (естественная циркуляция масла с дутьём, принудительная циркуляция масла с дутьём) понизительных подстанций напряжением 110–220 кВ, которая может привести к повреждению этих трансформаторов вследствие их перегрева или образования условий, опасных пробоем изоляции.

Существует два основных способа определения перегрузки трансформатора:

- по алгоритму МЭК рассчитывается температура наиболее нагретой точки (ННТ) через измеренное значение температуры верхних слоёв масла;

- по алгоритму ПТЭ рассчитывается допустимая длительность перегрузки через измеренное значение тока трансформатора.

Превышение температуры ННТ над температурой верхних слоёв масла $\Delta\theta_h$ представляется в виде разности двух составляющих: $\Delta\theta_h = \Delta\theta_{h1} - \Delta\theta_{h2}$,
которые определяются решением дифференциальных уравнений:

$$k_{21}\cdot K^y\cdot\Delta\theta_{hr} = k_{22}\cdot\tau_w\cdot\frac{d\Delta\theta_{h1}}{dt} + \Delta\theta_{h1},$$
$$(k_{21}-1)\cdot K^y\cdot\Delta\theta_{hr} = (\tau_o / k_{22})\cdot\frac{d\Delta\theta_{h2}}{dt} + \Delta\theta_{h2}\ , \qquad (19)$$

где k_{21}, k_{22}, y – параметры расчётной модели, определяемые конструкцией трансформатора; K – коэффициент нагрузки трансформатора; $\Delta\theta_{hr}$ – расчётное превышение температуры ННТ над температурой верхних слоёв масла в номинальном режиме; τ_w, τ_o – тепловые постоянные времени для обмотки и верхнего масла соответственно.

Далее температура ННТ θ_h определяется как сумма температуры верхних слоёв масла θ_o и вычисленного превышения: $\theta_h = \theta_o + \Delta\theta_h$.

Кратковременная перегрузка в аварийных режимах масляных трансформаторов (по отношению к номинальному току) при всех системах охлаждения независимо от длительности и значения предшествующей нагрузки и температуры охлаждающей среды допускается (соответствии с п. 5.3.15 ПТЭ) в следующих пределах (табл.4)

Возможности по перегрузке масляных трансформаторов Таблица 4

Перегрузка по току, %	30	45	60	75	100
Длительность перегрузки, мин	120	80	45	20	10

Длительность перегрузки менее 5% неограниченна.

Для ограничения перегрузки трансформаторов в принципе могут быть использованы те же управляющие воздействия, что и для ограничения перегрузки линий, кроме ввода резервных мощностей. Однако отключение нагрузки с запретом АПВ производится только на той подстанции, где перегружаются трансформаторы. Отключение нагрузки (ОН) является основным видом УВ, используемым в АОПТ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Эффективность ограничения ТКЗ в большой мере определяется быстродействием определения амплитуды периодической составляющей переходного ТКЗ. Предложенная методика быстродействующего определения амплитуды переходного ТКЗ, основанная на обработке выборок первых разностей мгновенных значений вторичного тока поврежденного присоединения на скользящем интервале наблюдения ограниченной длительности, обеспечивает повышение точности расчетов в условиях влияния помех и насыщения трансформаторов тока.

2. Предложены и разработаны новый способ и система ограничения ТКЗ и переходных восстанавливающих напряжений, основанный на использовании вакуумных управляемых разрядников. В условиях сложившихся энергосистем разработанная СОТ-РВУ представляет собой на сегодня комплексное решение, обеспечивающее (в том числе, при многократных циклах АПВ): ограничение ударного тока в защищаемых присоединениях за счет высокого быстродействия; ограничение ТКЗ, протекающего через выключатель поврежденного присоединения; снижение переходных восстанавливающихся напряжений при отключении выключателем ТКЗ; интеграцию в систему управления энергообъектом.

3. Для устранения резонансных перенапряжений, а также для исключения влияния токов подпитки дуги на линиях электропередачи сверхвысокого напряжения с высоким уровнем компенсации реактивной зарядной мощности линии предложены ориентированные на проектные решения инженерные методики: выбора КР для ВЛ СВН, расчетов тока подпитки дуги и восстанавливающегося напряжения на отключенной фазе ВЛ после погасания дуги, а также определения времени бестоковой паузы ОАПВ.

4. Результаты исследований (на примере ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово) свидетельствуют об эффективности применения компенсационных (нулевых) реакторов для снижения тока подпитки дуги, восстанавливающегося напряжения и времени паузы при ОАПВ.

5. Условия гашения дуги подпитки при трехфазном отключении ВЛ с шунтирующими реакторами существенно легче, чем при ее однофазном отключении, вследствие чего можно ожидать ее гашения за много меньшее время. Поэтому в случаях, когда до установки на ВЛ компенсационных реакторов не удается обеспечить гашение дуги за приемлемую для эксплуатации бестоковую паузу ОАПВ, возможно применить, как временную меру, трехфазное отключение ВЛ при однофазных КЗ.

6. Исследования и расчеты при одностороннем включении ВЛ СВН (Калининская АЭС – Грибово) показали наличие в токе линии длительной апериодической составляющей, значительно затрудняющей отключение неповрежденных фаз при плановом включении или включении ВЛ в цикле ТАПВ в случае наличия на ВЛ несимметричного КЗ.

7. Выполненные в работе исследования различных мероприятий по устранению длительной апериодической составляющей в токе неповрежденных фаз ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Грибово (управление моментом коммутации выключателя; применение предвключаемых резисторов, отключение или перекоммутация линейных ШР на шины ПС, и т.п.) показали, что все рассмотренные мероприятия не обеспечивают в полной мере решение проблемы и/или являются достаточно дорогостоящими.

8. Имеющийся опыт исследований и проектирования показывает, что требуется дальнейшая углубленная проработка и исследования мер по исключению влияния апериодической составляющей в токе выключателя при коммутации неповрежденных фаз, в том числе, создание специальной автоматики исключения влияния апериодической составляющей.

9. Недостатки существующей системы ПА, с одной стороны, и, с другой стороны, современные возможности в области телекоммуникаций и программно-технических средств определяют необходимость дальнейшего развития методов и аппаратного оснащения ПА, которое, как и для систем релейной защиты (РЗ), направлено на полный переход на микропроцессорную технику и связанное с этим кардинальное изменение принципов взаимодействия и номенклатуры программно-технических средств ПА.

10. К наиболее значимым технологическим проблемам в области проектирования ПА, непременно требующим научно-исследовательских проработок, относится, в том числе, разработка структуры противоаварийного управления в мегаполисах, где возникают в первую очередь аварийные понижения напряжения и термические перегрузки оборудования.

11. Реализация предложенных принципов автоматики термической перегрузки оборудования (линий электропередачи) - АОПЛ с косвенным расчетным методом определения температуры провода ВЛ на основе использования тепловой модели линии с учетом температуры окружающего воздуха позволяет в автоматическом режиме ликвидировать термическую перегрузку защищаемой линии, её последующее отключение и возможное каскадное развитие аварии. Однако в большинстве случаев для обеспечения ликвидации перегрузки линии помимо устройства АОПЛ требуется использование и других устройств ПА, организация связи со смежными объектами, обеспечение взаимодействия системы автоматики с диспетчером.

12. Решение задач повышения надёжности электроснабжения, и, в том числе, за счет ликвидации перегрузки линий, не должно возлагаться только на противоаварийную автоматику. Первоочередными мерами должны оставаться совершенствование проектирования и реконструкции электрических сетей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. ***Воронин В.А.*** Проблемы проектирования энергоснабжения районов мегаполисов// Электрические станции, 2014. № 2, - с. 43-50.

2. ***Воронин В.А.*** Уменьшение влияния токов подпитки дуги и переходных восстанавливающихся напряжений в неполнофазных режимах ВЛ СВН// Электротехника, 2014. № 5, - с. 9-15.

3. ***Воронин В.А., Дмитриев К.С., Иванов И.А., Косолапов А.М., Любарский Д.Р.*** Ограничение токов КЗ и переходных восстанавливающихся напряжений в сетях 110-220 кВ// Электрические станции, 2012. № 5, - с. 50-54.

4. ***Брухис Г.Л., Бутина Л.Г., Воронин В.А., Жмурко В.Е.*** Опыт проектирования современной системы противоаварийной автоматики при реконструкции энергоузла Калининской АЭС// Электрические станции, 2012. № 5, - с. 31-38.

5. ***Брухис Г.Л., Воронин В.А., Илюшин П.В., Горшкова Н.А.*** Разработка и внедрение устройств автоматического ограничения перегрузки линий// Электрические станции, 2012. № 6, - с. 36-42.

6. ***Воронин В.А., Любарский Д.Р., Макаровский С.Н., Подъячев В.Н.*** О возможном пути развития ЕЭС России на базе широкого использования накопителей энергии // Электрические станции, 2012. № 5, - с. 14-19.

7. ***Ситников В.Ф., Воронин В.А., Новиков Н.Л. и др.*** Несинхронная связь ОЭС Сибири и Востока на основе Забайкальского преобразовательного комплекса на подстанции Могоча // Электрические станции, 2007. № 5, - с. 46-51.

Публикации в других изданиях

8. ***Патент РФ на полезную модель №132267.*** Регулятор передаваемой мощности с функцией активного фильтра/ Воронин В.А., Подьячев В.Н., Сазонов И.Ю. Опубл. 20.03.2014, Бюл. №8.

9. ***Воронин В.А.*** Системные проблемы проектирования энергоснабжения сетей СВН и районов мегаполисов// Энергия единой сети, декабрь 2013 – январь 2014. № 6(11), - с. 6-13.

10. ***Акинин А.А., Воронин В.А., Иванов И.А., Косолапов А.М., Любарский Д.Р, Марусов Н.Л..*** Ограничение токов короткого замыкания в электрических сетях 110-220 кВ на базе вакуумных управляемых разрядников// Энергия единой сети, декабрь 2013 – январь 2014. № 6(11), - с. 64-69.

11. ***Акинин А.А., Воронин В.А., Иванов И.А., Косолапов А.М., Любарский Д.Р, Марусов Н.Л.*** Ограничение токов короткого замыкания в электрических сетях 110-220 кВ //Энергоэксперт, 2013. № 1 (36), - с. 34-37.

12. ***Патент РФ на полезную модель №131248.*** Устройство ограничений токов короткого замыкания в электроустановках высокого напряжения/ Воронин В.А., Коновалов О.А., Подъячев В.Н., Рубцов А.А. Опубл. 10.08.2013, Бюл. №8.

13. ***Патент РФ на полезную модель №126193.*** Подстанция переменного тока/ Воронин В.А., Нейкирх С.В., Подъячев В.Н. Опубл. 20.03.2013, Бюл. №8.

14. ***Патент РФ на полезную модель №132267.*** Устройство ограничения токов короткого замыкания и переходных восстанавливающихся напряжений в электрических сетях высокого напряжения/ Воронин В.А., Иванов И.А., Косолапов С.В., Любарский Д.Р. Опубл. 20.03.2013, Бюл. №8.

15. ***Брухис Г.Л., Бутина Л.Г., Воронин В.А., Жмурко В.Е.*** Реконструкция комплекса противоаварийной автоматики энергоузла Калининской АЭС. Опыт проектирования современной системы противоаварийной автоматики// Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы: сб. науч. тр./ под ред. Д.Р. Любарского, В.А. Шуина/ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ». – Иваново: ПресСто, 2012, с. 118-131.

16. ***Брухис Г.Л., Воронин В.А., Илюшин П.В., Селезнева Н.А.*** Опыт разработки технологических алгоритмов и внедрения устройств автоматического ограничения перегрузки линий// Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы: сб. науч. тр./ под ред. Д.Р. Любарского, В.А. Шуина/ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ». – Иваново: ПресСто, 2012, с. 131-144.

17. ***Воронин В.А., Любарский Д.Р., Макаровский С.Н., Подъячев В.Н.*** Возможное направление развития ЕЭС России на базе широкого использования накопителей энергии// Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы: сб. науч. тр./ под ред. Д.Р. Любарского, В.А. Шуина/ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ». – Иваново: ПресСто, 2012, с. 339-350.

18. ***Дмитриев К.С., Иванов И.А., Воронин В.А., Косолапов А.М., Любарский Д.Р.*** Система ограничения токов КЗ и переходных восстанавливающих напряжений в сетях 110-220 кВ// Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы: сб. науч. тр./ под ред. Д.Р. Любарского, В.А. Шуина/ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ». – Иваново: ПресСто, 2012, с. 350-359.

19. ***Патент РФ на полезную модель №111363.*** Электроэнергетическая система/ Воронин В.А., Подъячев В.Н., Родионов В.А., Сазонов И.Ю. Опубл. 10.12.2011, Бюл. №34.

20. ***Патент РФ на полезную модель №105087.*** Распределительное устройство высокого напряжения для сетей с высоким уровнем токов короткого замыкания/ Воронин В.А., Гриценко Н.С., Любарский Д.Р., Подъячев В.Н. Опубл. 27.05.2011, Бюл. №15.

21. ***Воронин В.А., Подъячев В.Н., Сазонов И.Ю.*** Преобразовательная техника – неотъемлемая составная часть современных энергетических систем и электрических сетей // Энергосбережение в электроэнергетике и промышленности: VI междунар. науч.-техн. конф. − Москва, 2010.

22. ***Патент РФ на изобретение №2399136.*** Способ отключения короткого замыкания в электрической сети переменного тока высокого напряжения/ Подъячев В.Н., Сазонов И.Ю., Воронин В.А., Байбаков Ю.В., Любарский Д.Р., Дмитриев К.С. Опубл. 10.09.2010, Бюл. №25.

23. ***Патент РФ на изобретение №2394327.*** Способ управления мощностью вставки постоянного тока/ Подъячев В.Н., Макаровский С.Н., Воронин В.А. Опубл. 10.07.2010, Бюл. №19.

24. ***Шакарян Ю.Г., Лабунец И.А., Пинчук Н.Д, Кади-Оглы И.А., Шульгинов Н.Г., Дьячков В.А., Тузлукова Е.В., Воронин В.А., Зинаков В.Е., Аршунин С.А.*** Опыт создания и внедрения в электроэнергетику асинхронизированных турбогенераторов// Энергоэксперт, 2009. №3, с. 46-51.

25. ***Патент РФ на изобретение №2366055.*** Способ защиты высоковольтного оборудования от токов короткого замыкания/ Воронин В.А., Любарский Д.Р., Подъячев В.Н. Опубл. 27.08.2009, Бюл. №24.

26. ***Патент РФ на полезную модель №85762.*** Высоковольтное распределительное устройство/ Воронин В.А., Подъячев В.Н., Коновалов О.А., Гриценко Н.С. Опубл. 10.08.2009, Бюл. №22.

27. ***Бутина Л.Г., Воронин В.А., Гаплевский Д.А., Кандауров Л.Н., Хозяинов Н.В.*** Противоаварийная автоматика Кольского транзита 330 кВ// Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы: Сб. науч. Тр./ Под ред. М.Ш. Мисриханова, Д.Р. Любарского, В.А. Шуина. М.: Энергоатомиздат, 2008, с.226-234.

28. ***Патент РФ на изобретение №2333583.*** Способ контроля отказа выключателя/ Воронин В.А., Подъячев В.Н. Опубл. 10.09.2008, Бюл. №25.

29. ***Зильберман С.М., Шакарян Ю.Г., Воронин В.А. и др.*** Перспективы применения управляемой продольной компенсации на ВЛ Саяно-Шушенская – Новокузнецкая//Материалы международного специализированного семинара 02-05 декабря 2008г. «Электрические сети России 2008», ВВЦ, Москва - 2008.

30. ***Патент РФ на полезную модель №56078.*** Открытое распределительное устройство/ Евтушенко В.А., Подъячев В.Н., Воронин В.А., Афанасьевский В.Е., Козловский Н.Н., Назаров А.А. Опубл. 27.08.2006, Бюл. №24.

ВОРОНИН Владимир Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫМИ И АВАРИЙНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ В РАЙОНАХ МЕГАПОЛИСОВ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16 Тираж 100 экз. Заказ №214

ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» 105318, Москва, Ткацкая ул., 1

Отпечатано в ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ»