



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Петрушин Денис Евгеньевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ
ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ
МЕЖСИСТЕМНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

2.4.3. Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель

Попов Максим Георгиевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Илюшин Павел Владимирович,
доктор технических наук, руководитель Центра
интеллектуальных электроэнергетических систем и
распределенной энергетики ФГБУН Институт энергетических
исследований Российской академии наук

Синянский Иван Владимирович,
кандидат технических наук, начальник отдела релейной
защиты и автоматизированных систем управления
АО «Научно-технический центр Единой энергетической
системы»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический
университет»

Защита состоится 21 сентября 2023 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета У.2.4.3.47 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» <https://www.spbstu.ru/science/defences.html>

Автореферат разослан «___»_____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.2.4.3.47
канд. техн. наук, доцент

О.А. Васильева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

В современных условиях ограничения ввода новых сетевых энергообъектов осложнилась проблема обеспечения балансовой надежности в объединенных энергосистемах России. Как известно, устойчивая работа энергосистем обуславливается пропускной способностью межсистемных связей, продолжительностью и тяжестью возмущений в электросети, а также наличием других факторов, определяющих технологические ограничения по передаче большей мощности. Повышения пропускной способности и обеспечение устойчивости энергосистем в целом достигается внедрением управляемого силового электрооборудования (FACTS), системных стабилизаторов в современных АРВ, а также повышением чувствительности, быстродействия и селективности микропроцессорных систем релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Увеличение использования линий электропередачи обеспечивается при снижении погрешности и времени расчёта величин предельной обменной активной мощности как на этапе планирования, так и при оперативном управлении режимом электропередачи. Исторически эти научные задачи активно исследовались А.А. Горевым, П.С. Ждановым, С.А. Лебедевым, М.П. Костенко, Л.Р. Нейманом, Ю.Г. Шакаряном и научными школами Сибирского энергетического института СО АН СССР (ныне Институт систем энергетики Сибирского отделения Российской академии наук, Л.А. Мелентьев, Ю.Н. Руденко, Н.И. Воропай, А.З. Гамм, Н.Н. Новицкий и др.), Института энергетических исследований Российской академии науки (А.А. Макаров, П.В. Илюшин и др.), Новочеркасского политехнического института (ныне ЮРГПУ (НПИ), В.В. Михайлов, И.И. Левченко, Е.И. Сацук, А.С. Засыпкин и др.), Ленинградского политехнического института (ныне СПбПУ, О.В. Щербачев, И.А. Груздев, А.А. Рагозин, С.В. Смоловик и др.), Горьковского политехнического института (ныне НГТУ, А.Б. Лоскутов и др.), Уральского политехнического института (ныне УрФУ, П.И. Бартоломей, С.Н. Шелюг и др.), Ивановского государственного энергетического университета (Ю.Б. Бородулин, В.П. Голов и др.) Новосибирского государственного технического университета (А.Г. Фишов, И.С. Мурашкина, С.А. Харитонов, В.М. Левин) и другими.

Развитие теории и практики научных направлений по совершенствованию и проектированию противоаварийного управления традиционно осуществляется научно-исследовательскими коллективами АО «Научно-технический центр Единой энергетической системы» (Л.А. Кощеев, В.Г. Неуймин и др.), Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (В.Н. Тульский, И.И. Карташев, Н.Ш. Чемборисова,

А.С. Ванин, Р.Р. Насыров и др.), Новосибирского государственного технического университета (А.В. Сидорова, А.Г. Русина и др.), Института систем энергетики Сибирского отделения Российской академии наук (В.В. Труфанов, И.Ю. Усов и др.), АО «Научно-технический центр Россети ФСК ЕЭС» (Ю.Г. Шакарян, В.Э. Воротницкий и др.), Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (В.К. Ванин, М.Г. Попов, Ю.Б. Гук, А.К. Черновец) и другими учёными и научно-исследовательскими школами.

Несмотря на значительное развитие этих научных направлений в практике эксплуатации энергосистем, имеются случаи необоснованных ограничений пропускной способности, недостаточной надёжности электроснабжения, а также неправильной работы устройств РЗА, которые, как правило, обусловлены некорректной программной реализацией функциональных алгоритмов и неверной настройкой устройств противоаварийной автоматики ввиду отсутствия строгих методических рекомендаций по их расчету. Кроме этого, возникшая в последнее время тенденция интеграции систем защиты и противоаварийной автоматики с автоматизированными системами управления технологическими процессами энергообъектов при росте сложности и многозадачности их функциональных алгоритмов характеризуется снижением их надёжности и повышением вероятности алгоритмических ошибок. Усиление требований к микропроцессорным устройствам защиты и противоаварийной автоматики, их насыщение второстепенными информационными функциями порождает необходимость в дополнительных автоматизированных системах экспертной оценки достоверности их срабатываний.

С учётом указанных выявляемых недостатков разработка новых функциональных алгоритмов, методов расчета и проектирования устройств защиты и противоаварийной автоматики является актуальной, востребованной научной проблемой, решению которой посвящено настоящее диссертационное исследование.

Цели и задачи исследования

Целью научной работы является разработка и обоснование усовершенствованных функциональных алгоритмов устройств противоаварийной автоматики энергосистем, совершенствование и разработка методик расчёта и выбора параметров срабатывания устройств противоаварийной и режимной автоматики межсистемных транзитных линий электропередачи, а также разработка комплекса противоаварийных мероприятий по повышению устойчивости функционирования объединённых энергосистем.

Для достижения целей были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Критический анализ проблемы недостаточной пропускной способности межсистемных транзитных ЛЭП 110 кВ, 220 кВ и 330 кВ и обобщённая формулировка способов её решения.

2. Анализ статистических данных о срабатываниях устройств противоаварийной автоматики (АОПЧ, АПНУ и др.) в объединённых энергосистемах и выявление возможных причин их неправильной работы и способов их устранения.

3. Разработка и исследование мероприятий по повышению пропускной способности межсистемных транзитных ЛЭП с учётом действия противоаварийной автоматики.

4. Проведение численных экспериментов по исследованию нестационарных режимов для выявления особенностей динамических свойств средств измерения частоты в устройствах автоматики.

5. Разработка и исследование высокоточных измерительных органов устройств АОПЧ и быстродействующих селективных функциональных алгоритмов устройств комплекса АПНУ.

6. Разработка методик выбора параметров срабатывания устройств комплекса АПНУ и АОПЧ, учитывающих их усовершенствованные характеристики по чувствительности и селективности.

7. Подтверждение достоверности полученных результатов исследований при сопоставлении с результатами расчётов Системы мониторинга запасов устойчивости АО «СО ЕЭС», а также с результатами натурных испытаний на действующих энергообъектах.

Объектом исследования являются объединённые энергосистемы с межсистемными транзитными линиями электропередачи 110 кВ, 220 кВ и 330 кВ, оснащённые устройствами противоаварийной автоматики.

Предметом исследования являются нестационарные режимы межсистемных транзитных линий электропередачи, а также динамические свойства разрабатываемых измерительных, пусковых органов и функциональных алгоритмов противоаварийной автоматики.

Научная новизна работы

1. Новые высокочувствительные измерительные органы и методика выбора параметров срабатывания автоматики ограничения повышения частоты, позволяющие исключить избыточность противоаварийных управляющих воздействий.

2. Новый метод определения фиксированных «опасных» контролируемых сечений для межсистемных транзитных ЛЭП с жесткими обходными связями и изменением направления потоков мощности, который позволяет исключить необоснованные ограничения по величине обменной мощности в этих объединённых энергосистемах.

3. Новые функциональные алгоритмы и методика выбора параметров срабатывания устройств комплекса АПНУ (автоматик разгрузки при отключении сетевого и генерирующего оборудования), исключающие избыточность противоаварийных управляющих воздействий.

Теоретическая значимость работы

1. Развита теория устойчивости – поиск «опасных» и определение фиксированных контролируемых сечений межсистемных транзитов, определение ограничений по передаваемой мощности транзитных ЛЭП с жесткими обходными связями и изменением направления мощности.

2. Развита теория противоаварийного управления – разработаны методики выбора параметров срабатывания противоаварийной автоматики, обладающих улучшенными показателями по чувствительности, селективности и быстродействию.

Практическая значимость работы

1. Полностью автоматизированная, не требующая оперативно-диспетчерского контроля, разработанная структура автоматики ограничения повышения частоты в объединённых энергосистемах, которая обладает абсолютной селективностью срабатывания.

2. Повышение величины передаваемой мощности при обосновании замыкания ранее существующих точек деления электросети, а также снижение эксплуатационных затрат для автотрансформаторов транзитных подстанций.

3. Повышение надёжности функционирования и селективности устройств противоаварийной автоматики (АПНУ, АОПЧ и др.) в результате внедрения предложенных изменений в действующую нормативную документацию, а также за счёт устранения выявленных недостатков функциональных алгоритмов и характерных ошибок при их настройке.

Внедрение результатов

Результаты диссертационной работы были использованы и внедрены в филиалах АО «СО ЕЭС» (ОДУ Северо-Запада, Карельское РДУ, Кольское РДУ, Ленинградское РДУ, Иркутское РДУ, Московское РДУ), ДЗО ПАО «Россети» (Филиала ПАО «Россети» Карельское ПМЭС, Карельского филиала ПАО «Россети Северо-Запад»), Филиала «Карельский» ПАО «ТГК-1» и других (Приложение А – Акты внедрения результатов диссертационной работы).

Программное обеспечение, учебные пособия и презентационные материалы, разработанные на основе результатов диссертации, применяются в научной и образовательной деятельности кафедры энергообеспечения предприятий и энергосбережения Физико-технического института ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» в курсах «Введение в профессиональную деятельность» и «Проектирование электрических сетей».

Методология и методы диссертационного исследования

Численные исследования проводились с использованием методов теории анализа и синтеза электрических цепей, методов теории переходных процессов и устойчивости энергосистем. Цифровая обработка, просмотр и анализ осциллограмм аварийных режимов осуществлялись с использованием прикладных программ Transcor (ООО «Парма»), Waves (ООО «НПП ЭКРА»).

При проведении численных экспериментов использовалось математическое моделирование установившихся режимов, статической и динамической устойчивости. Для расчётов применялись программные комплексы «RastrWin3», «RUSTab», «Eurostag», «Matlab Simulink». В работе также использовались результаты расчётов ПАК «Система мониторинга запасов устойчивости», ПАК «Централизованная система противоаварийной автоматики».

Физические эксперименты проводились на действующих энергообъектах по разработанным и согласованным программам натурных испытаний функций автоматического ограничения перетока мощности в контролируемых сечениях и автоматического ограничения токовой перегрузки оборудования в АРЧМ ОЭС Северо-Запада уровня Карельского РДУ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Предлагаемые высокочувствительные измерительные органы устройств АОПЧ с максимальной погрешностью измерения частоты в нестационарных режимах не более 0,2 % позволяют увеличить дискретизацию ступеней, исключая при этом существующую избыточность противоаварийных управляющих воздействий.

2. Новый метод, основанный на условии минимального изменения значений предельного по статической апериодической устойчивости энергосистемы перетока мощности, позволяет достоверно определить фиксированные «опасные» контролируемые сечения для межсистемных транзитных ЛЭП с разнонаправленностью потоков мощности и наличием при этом достаточно жестких обходных связей.

3. Функционально-логические схемы, алгоритмы автоматик разгрузки при отключении сетевого и генерирующего оборудования (АПНУ) с расширенными функциональными возможностями комбинаторной логики, учитывающей изменение режима и структуры электросети, которые позволяют исключить существующую избыточность противоаварийных управляющих воздействий.

4. Методики выбора параметров срабатывания устройств АОПЧ и устройств комплекса АПНУ с улучшенными показателями по чувствительности, быстродействию и селективности, которые обеспечивают правильную настройку пусковых органов автоматики и достаточность необходимых противоаварийных управляющих воздействий.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается совпадением результатов расчётных экспериментов, полученных с использованием аккредитованных в филиалах АО «СО ЕЭС» программных комплексов, с результатами натурных испытаний и физических экспериментов. Теоретические результаты получены при корректном использовании методов математического анализа и математического описания электрофизических явлений и процессов.

Результаты определения характерного состава генерирующего оборудования и объёмов противоаварийных управляющих воздействий устройств противоаварийной автоматики, а также выбранные «опасные» сечения с применением предложенного метода подтверждаются результатами расчётов Системы мониторинга запасов устойчивости, используемой в АО «Системный оператор Единой энергетической системы».

Публикации и апробация результатов

По теме диссертационной работы опубликовано 30 работ, в том числе 5 статей в изданиях, входящих в список рекомендуемых из перечня ВАК РФ. В наукометрических индексируемых базах SCOPUS (WoS) размещены 11 публикаций, РИНЦ – 30. Наиболее значимые (по мнению автора) публикации приведены в списке литературы.

Результаты диссертационной работы регулярно (с 2013 года) докладывались и обсуждались на семинарах и международных научно-практических конференциях: «Электроэнергетика глазами молодёжи» (2017–2022 гг.); заседаниях в рамках Молодёжного дня Российской энергетической недели (2017–2021 гг.), Конференции. «IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineers (ELConRus)» (2019–2022 гг.), Финале Всероссийского инженерного конкурса среди аспирантов (2021 г.), конференции «Пром-Инжиниринг» International Conference on Industrial Engineering (ICIE) (2021, 2022 гг.).

Диссертационные исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90123 по теме «Фундаментальные свойства аналитических сигналов и основы теории их применения для анализа нестационарных режимов энергосистем».

Личный вклад автора в получении результатов диссертационной работы

Личный вклад заключался в постановке основных задач, разработке и создании математических моделей, совершенствовании методик, проведении исследований и анализе полученных результатов. Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Некоторый объём результатов получен совместно с учениками, у которых автор являлся руководителем выпускных квалификационных работ.

Автор выражает благодарность сотрудникам ВШВЭ ИЭ СПбПУ, ФТИ ПетрГУ, АО «СО ЕЭС», УралЭНИН УрФУ, ИГЭУ и в особенности научному руководителю, профессору М.Г. Попову за ценные и полезные замечания.

Структура диссертационной работы

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 117 наименований. Основной текст диссертации общим объёмом 125 страниц изложен на 93 страницах, содержит 50 рисунков и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы, показана актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, определяемые необходимостью разработки новых функциональных алгоритмов, методов расчета и проектирования устройств защиты и противоаварийной автоматики.

В первой главе описаны особенности электроэнергетических систем России, определяемые широким использованием устройств противоаварийной автоматики для повышения пропускной способности электросети. Основной особенностью ЕЭС России является достаточно широкое распространение магистральных электрических сетей 110 кВ, 220 кВ, характеризующихся высокой вариативностью режимов работы при их относительно небольшой пропускной способности. Всеми указанными особенностями, в том числе слабой пропускной способностью, характеризуется исследуемый в работе межсистемный транзит. Низкая пропускная способность сетей 110 кВ, 220 кВ в значительной степени обусловлена необоснованными ограничениями, которые не учитывают реальный режим работы и структуру электрической сети, а также неверной настройкой, ложными срабатываниями устройств противоаварийной автоматики и некорректной программной реализацией их функциональных алгоритмов.

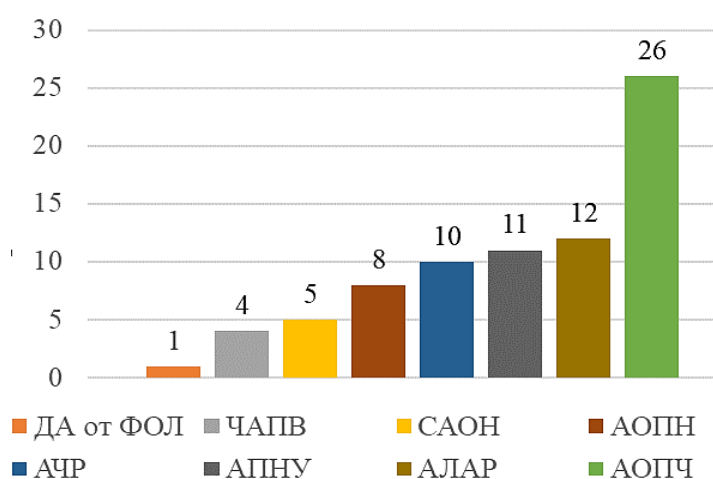


Рисунок 1 – Количество срабатываний ПА в операционных зонах Кольского и Карельского РДУ

Для выявления возможных причин неправильной работы противоаварийной автоматики и обоснования способов повышения пропускной способности в диссертации был проведён анализ статистических данных об эффективности системных средств противоаварийного управления в энергосистемах Мурманской области и Республики Карелия. За

период с 2016 по 2021 гг. в операционных зонах Кольского и Карельского РДУ было зафиксировано 77 фактов работы устройств ПА (рисунок 1). В результате анализа

статистических данных о срабатываниях устройств противоаварийной автоматики установлено, что наибольшее количество (26) срабатываний приходится на устройства автоматики ограничения повышения частоты (АОПЧ, рисунок 1). Из них около 20 % срабатываний являются избыточными. Этот факт свидетельствует о значительной погрешности измерительных органов, а также неоптимальной структуре АОПЧ, характеризующейся недостаточной селективностью. С учетом выявленных проблем в диссертации для контроля частоты трёхфазной электромеханической системы был предложен и исследован рекурсивный нелинейный фильтр обобщённых аналитических сигналов напряжения. Итерационный процесс цифровой фильтрации описывался выражениями:

$$\frac{\partial E_{rms}}{\partial \omega_u} \cdot \Delta \omega_u = -E_{rms}, \text{ при } E_{rms} \leq E_{set}; \quad \frac{\partial E_{rms}}{\partial \omega_u} = \frac{\frac{1}{N} \int_{t_k-N}^{t_k} (\omega_{u(k)} - \omega_{u(k-1)}) dt}{\sqrt{\frac{1}{N} \int_{t_k-N}^{t_k} (\omega_{u(k)} - \omega_{u(k-1)})^2 dt}} \quad (1)$$

где E_{rms} – среднеквадратичное значение мгновенной ошибки (погрешности); E_{set} – значение заданной погрешности; $\omega_u, \omega_{u(k)}, \omega_{u(k-1)}$ – мгновенная угловая частота напряжения [рад/с], вычисляемая на k -ой и $(k-1)$ -ой рекурсии, соответственно; $\Delta \omega_u$ – изменение мгновенной частоты напряжения; N – количество отсчетов АЦП на интервале усреднения, принимаемого равным 5–20 мс; t_k – текущий момент времени, с.

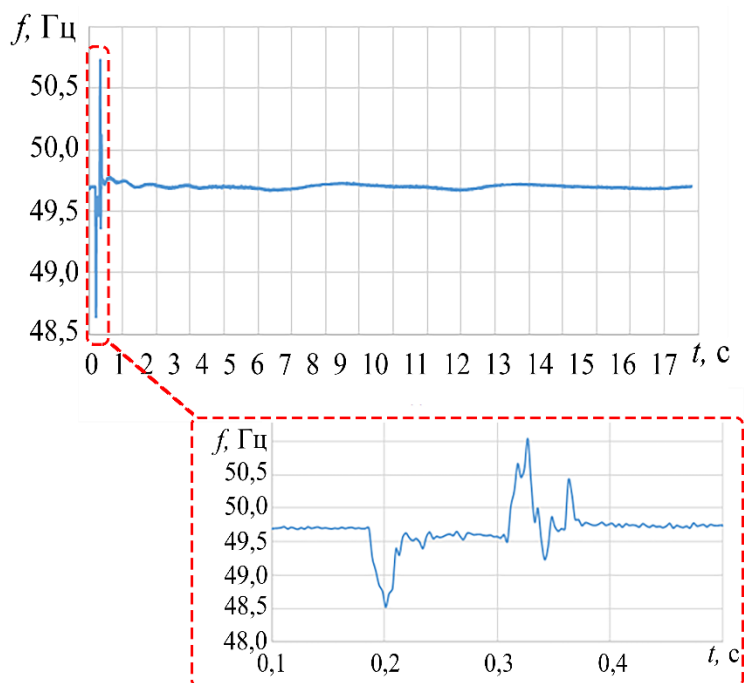


Рисунок 2 – Характеристика изменения мгновенной частоты

изменения частоты в нестационарном режиме и погрешность ее измерения с применением предложенного цифрового нелинейного фильтра.

Апробация применения разработанного рекурсивного фильтра в измерительных органах АОПЧ производилась с использованием верифицированной динамической модели ОЭС Северо-Запада в программном комплексе RUSTab. Особенности математического описания переходных процессов силового электрооборудования (генераторов, трансформаторов, ЛЭП, эквивалентной нагрузки) изложены в диссертации. На рисунке 2 показаны характеристики

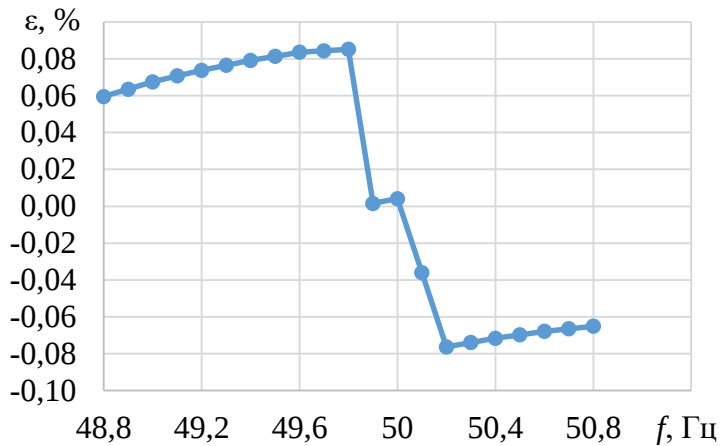


Рисунок 3 –Погрешность измерения мгновенной частоты

В результате анализа качества цифровой фильтрации в нестационарных режимах установлено, что максимальная погрешность измерения частоты в нестационарных режимах составляет не более 0,2 % (рисунок 3), что позволяет увеличить дискретизацию ступеней АОПЧ и исключить существующую избыточность противоаварийных управляющих воздействий этой автоматики.

Во второй главе исследуются с помощью специализированных программных комплексов способы повышения пропускной способности межсистемных транзитов и в результате обоснована их эффективность. В работе предложен и обоснован новый метод выбора фиксированного «опасного» контролируемого сечения. Определены расчётные функциональные зависимости взаимного влияния смежных контролируемых сечений и их обходных связей, соответствующие различным конфигурациям и структуре схемы электрической сети. Определен и обоснован технологический эффект от замыкания ранее разомкнутых связей.

В соответствии с известными методиками наиболее «опасными» принято считать контролируемые сечения, для которых в предельных по статической апериодической устойчивости режимах возникают наибольшие значения увеличения угла электропередачи и снижения модуля напряжения в ее прилегающих узлах. Такие традиционные критерии при значительной радиальности системообразующей сети и наличии при этом достаточно жестких обходных связей не позволяют однозначно определить «слабые» линии электропередачи, входящие в контролируемое сечение (таблица 1).

Для достоверного определения слабых линий электропередачи, входящих в контролируемое сечение, в дополнение к традиционной методике был предложен и обоснован критерий (условие выбора) – минимальное изменение значений предельного по статической апериодической устойчивости энергосистемы перетока мощности во всем многообразии схемно-режимных исследуемых расчетных условий. Для актуализации значений максимально допустимого перетока (МДП) активной мощности были исследованы электрические режимы энергосистемы Республики Карелия при различных начальных условиях и траекториях утяжеления.

Таблица 1 – Уровни напряжения в сети 330 и 110 кВ исследуемого транзита в предельных режимах при направлении перетока в ЭС Санкт-Петербурга и Ленинградской области

Сеч. Кола – Карелия , $P_{пред}$, МВт	Княж., $U_{ш}$, кВ	Лоухи, $U_{ш}$, кВ	Борей, $U_{ш}$, кВ	Кам. Бор, $U_{ш}$, кВ	Конд., $U_{ш}$, кВ	Петр., $U_{ш}$, кВ	Княж. ГЭС, $U_{ш}$, кВ	Лоухи- тяг., $U_{ш}$, кВ	Кемь, $U_{ш}$, кВ	Белом орск, $U_{ш}$, кВ
1210	$324 \cdot e^{j79}$	$301 \cdot e^{j67}$	$287 \cdot e^{j48}$	$291 \cdot e^{j35}$	$309 \cdot e^{j18}$	$318 \cdot e^{j14}$	$114 \cdot e^{j75}$	$98 \cdot e^{j64}$	$101 \cdot e^{j44}$	$106 \cdot e^{j39}$
1198	$324 \cdot e^{j82}$	$301 \cdot e^{j71}$	$287 \cdot e^{j52}$	$288 \cdot e^{j39}$	$306 \cdot e^{j20}$	$314 \cdot e^{j16}$	$113 \cdot e^{j82}$	$96 \cdot e^{j72}$	$99 \cdot e^{j51}$	$104 \cdot e^{j46}$
1171	$326 \cdot e^{j84}$	$304 \cdot e^{j73}$	$289 \cdot e^{j55}$	$289 \cdot e^{j42}$	$304 \cdot e^{j22}$	$313 \cdot e^{j18}$	$114 \cdot e^{j78}$	$100 \cdot e^{j68}$	$111 \cdot e^{j47}$	$106 \cdot e^{j51}$
1129	$328 \cdot e^{j85}$	$310 \cdot e^{j75}$	$299 \cdot e^{j58}$	$296 \cdot e^{j45}$	$305 \cdot e^{j26}$	$313 \cdot e^{j22}$	$114 \cdot e^{j81}$	$103 \cdot e^{j72}$	$109 \cdot e^{j56}$	$113 \cdot e^{j51}$
1076	$328 \cdot e^{j86}$	$311 \cdot e^{j76}$	$299 \cdot e^{j59}$	$294 \cdot e^{j47}$	$302 \cdot e^{j27}$	$311 \cdot e^{j23}$	$114 \cdot e^{j81}$	$103 \cdot e^{j73}$	$115 \cdot e^{j54}$	$110 \cdot e^{j57}$
1023	$332 \cdot e^{j86}$	$317 \cdot e^{j77}$	$306 \cdot e^{j62}$	$299 \cdot e^{j49}$	$303 \cdot e^{j29}$	$311 \cdot e^{j25}$	$115 \cdot e^{j82}$	$105 \cdot e^{j75}$	$111 \cdot e^{j62}$	$115 \cdot e^{j59}$
1009	$334 \cdot e^{j87}$	$320 \cdot e^{j78}$	$309 \cdot e^{j63}$	$300 \cdot e^{j51}$	$303 \cdot e^{j30}$	$311 \cdot e^{j26}$	$115 \cdot e^{j82}$	$106 \cdot e^{j75}$	$113 \cdot e^{j63}$	$116 \cdot e^{j60}$

В таблице 2 приведены результаты определения величины обменной мощности в контролируемых сечениях межсистемного транзита в предельных режимах при утяжелении в сечении «Кола – Карелия». Анализ полученных результатов показал, что при различных исходных балансовых условиях и наиболее характерной траектории утяжеления – загрузки и разгрузки Кольской АЭС (сечение 1, Кола – Карелия, таблица 2) величина обменной

мощности в сечении 2 (Борей – Онда, таблица 2) изменялась в меньшей степени по сравнению с другими контролируемыми сечениями. Выявленные особенности позволили сформулировать новый дополнительный критерий, позволяющий достоверно определить наиболее «опасное» контролируемое сечение по условию минимального изменения значений предельного по статической апериодической устойчивости энергосистемы перетока мощности во всем многообразии схемно-режимных исследуемых расчетных условий.

Используемая ранее граница области допустимых перетоков активной мощности, учитывающая равное влияние величины фактического перетока активной мощности в одном из связанных контролируемых сечений на величину МДП в другом контролируемом сечении (пунктирная линия с $k_{п} = -1$, на рисунке 4) вносит необоснованное ограничение на пропускную способность исследуемых межсистемных транзитов 220–330 кВ. Объем недоиспользованной мощности, передаваемой по межсистемному транзиту, определяется заштрихованной областью (рисунок 4). Для корректного учёта взаимного влияния определены и предложены к использованию коэффициенты пропорциональности, соответствующие конфигурации и структуре схемы электрической сети. В нормальной схеме сети необоснованное занижение величины МДП составляет до 28 % (130 МВт).

Таблица 2 – Обменная мощность в контролируемых сечениях межсистемного транзита в предельных режимах при утяжелении в сечении Кола – Карелия

Сечение 1 Кола – Карелия, $P_{пред}$, МВт	Сечение 2 Борей – Онда, $P_{обм}$, МВт	Сечение 3 Онда – Конд., $P_{обм}$, МВт	Сечение 4 Конд. – Петр., $P_{обм}$, МВт
1210	914	897	678
1198	927	943	718
1171	926	991	762
1129	971	992	745
1076	942	1013	763
1023	973	1059	804
1009	987	1085	827

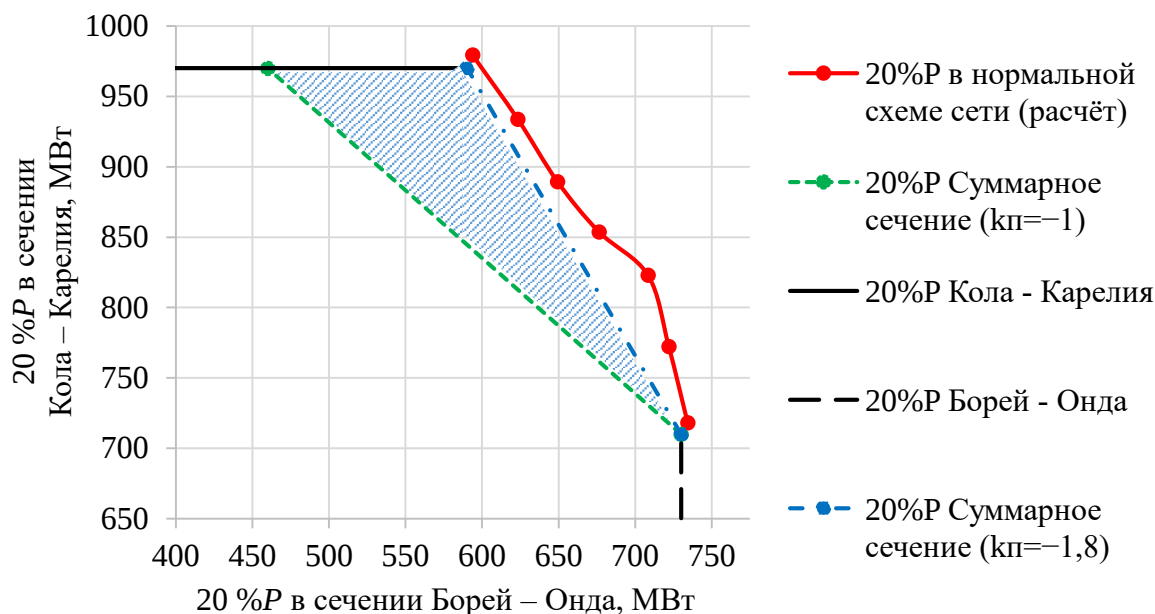


Рисунок 4 – Область допустимых режимов работы энергосистемы с учётом использования различных коэффициентов пропорциональности

Дополнительно в работе были выполнены численные эксперименты по исследованию и оценке эффективности замыкания линий электропередачи 110 кВ исследуемого межсистемного транзита Карельской, Ленинградской энергосистем. Эти воздушные линии электропередачи 110 кВ являлись изначально разомкнутыми для исключения возникновения их перегрузки или асинхронного режима. Анализ результатов расчетов предельных установившихся электроэнергетических режимов и динамической устойчивости при замыкании связей Олонекского транзита выявил эффективность замыкания межсистемного транзита Ведлозеро – Олонец – Лодейнопольская. В результате замыкания межсистемного транзита в нормальной схеме его пропускная способность увеличилась на 18 % (27 МВт). При этом токовая загрузка Олонекского транзита и расчётные значения токов КЗ в этом случае остаются в допустимых пределах.

В третьей главе проведён анализ и сформулированы предложения по совершенствованию структуры АОПЧ в энергосистемах. Предложенный новый подход к организации структуры и выбору параметров срабатывания АОПЧ позволяет исключить необходимость контроля объёмов управляющих воздействий за счёт дискретизации уставок по частоте и выдержкам времени.

Процесс выбора параметров срабатывания устройств АОПЧ характеризуется значительной вариативностью расчётов и осложняется отсутствием утверждённых методик. Уровень увеличения частоты в результате отделения избыточных энергосистем и энергорайонов на изолированную от ЕЭС России работу зависит от состава генерирующего оборудования, наличия резервов по регулированию активной мощности на различных типах электростанций и др. Основной величиной, характеризующей существенный рост («заброс») активной мощности в первый момент времени, который обуславливает работу

быстродействующих ступеней АОПЧ, является величина избыточной активной мощности при выделении на изолированную работу энергосистем и энергорайонов. Вследствие этого существующая структура этой противоаварийной автоматики имеет существенный недостаток – необходимость постоянного оперативно-диспетчерского контроля объёмов управляющих воздействий из-за большой вариативности режимов и конфигураций электросети. В противном случае при несвоевременной корректировке параметров срабатывания очередей АОПЧ возникает риск возникновения бóльших небалансов мощности при отключении генераторов электростанций при резком увеличении частоты и последующей работе устройств АЧР. С учетом этого в работе был предложен и расчетными исследованиями обоснован принципиально новый подход к организации и функционированию системы АОПЧ. На первом этапе был проведен тщательный анализ режимно-балансовых условий функционирования исследуемых энергосистем, в результате которого были определены наиболее характерные балансовые условия (рисунок 5).

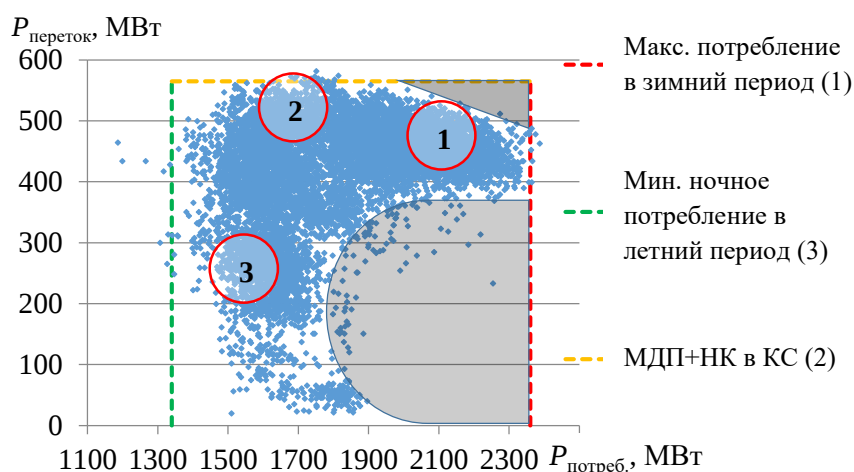


Рисунок 5 – Область рассматриваемых балансовых условий для сечения «Онда – Кондопога»

Незаполненность правой нижней части графика на рисунке 5 связана с отсутствием плановых ремонтов сети 330–220 кВ в зимний период, а также востребованностью мощности энергосистем в смежных энергосистемах. Незаполненность правой верхней части графика

связана с наличием ограничений в смежных сечениях. Режимы, отмеченные первой областью, характеризуется максимальной величиной потребления, соответствующей отопительному периоду (ОП). Режимы ОП не являются определяющими для АОПЧ, так как характеризуются большей инерционностью энергосистемы, обусловленной в целом темпом тепломеханического переходного процесса. Вторая область соответствует паводковым режимам с максимальной обменной мощностью в транзитной сети, которые определяют величину необходимого объёма противоаварийных управляющих воздействий от АОПЧ и уровень заброса частоты (рисунок 6, при отсутствии АОПЧ). Третьей областью отмечены режимы со сниженным перетоком активной мощности в транзитной сети в условиях прохождения летних минимальных нагрузок. Эти режимы определяют максимальную дискретизацию противоаварийных управляющих воздействий АОПЧ и требуемую при этом селективность и чувствительность.

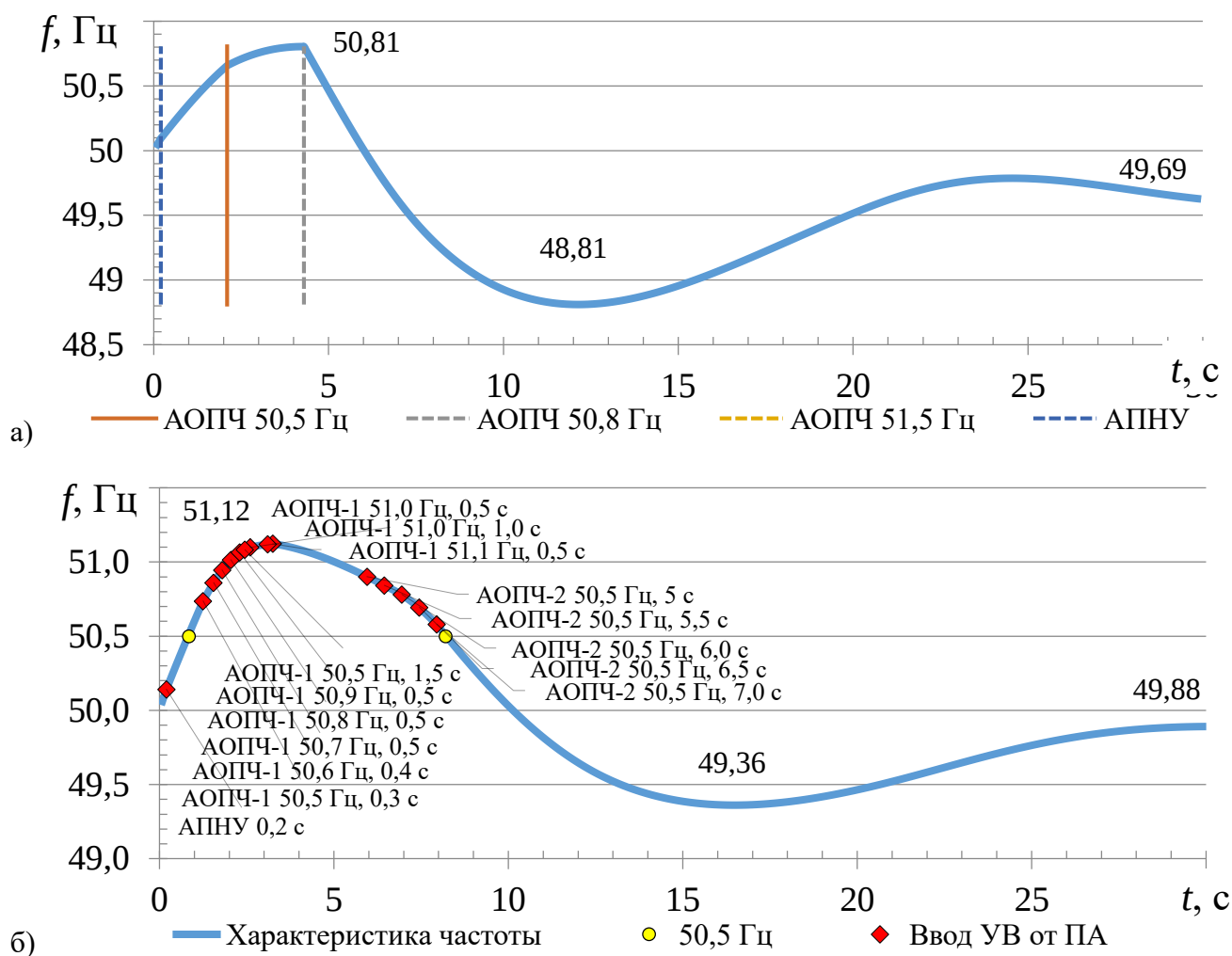


Рисунок 6 – Математическое моделирование характера действия АОПЧ при существующем походе к выбору уставок и контролю объёмов УВ на ОГ (а), а также в случае применения нового подхода (б)

Существующий подход не удовлетворяет требованиям по селективности противоаварийных управляющих воздействий (рисунок 6а) в результате чего при отделении энергосистемы в период прохождения периода летних минимальных нагрузок при малом перетоке активной мощности по разделяемому сечению (область 3 на рисунке 5) при отсутствии должного оперативно-диспетчерского контроля за используемыми объёмами отключения генерации существовали риски избыточного противоаварийного управления вплоть до динамического снижения частоты ниже уставок спецочереди АЧР (49,2 Гц). Предложенная новая структура АОПЧ позволяет исключить риски избыточного противоаварийного управления за счёт дискретизации уставок по частоте и выдержкам времени (рисунок 6б) и, в то же время обеспечивает приведение частоты в допустимую область при отделении энергосистемы в период паводка при наибольшей нагрузке по разделяемому сечению (область 2 на рисунке 5).

Внедрение новой структуры АОПЧ становится возможным благодаря применению высокоточных измерительных органов частоты, исследованных ранее в главе 1.

В четвёртой главе проведён анализ характерных ошибок при настройке АПНУ, предложены и обоснованы новые функционально-логические схемы и алгоритмы устройств АПНУ, исключающие существующую избыточность противоаварийных управляющих воздействий. Разработана методика выбора параметров и функциональные алгоритмы автоматик разгрузки при отключении сетевого и генерирующего оборудования, обладающие улучшенными показателями по чувствительности и селективности.

Дискретизация ступеней контроля предшествующего режима (КПР) выбирается исходя из характерных минимальных значений доступных на объекте УВ, а также коэффициента эффективности (влияния) реализации этого вида УВ на величину перетока в полном сечении. В диссертации выполнен статистический анализ доступных к реализации УВ на ОГ и ОН для выявления характерных объёмов в целях использования этой информации при дальнейшем параметрировании устройств (рисунок 7).

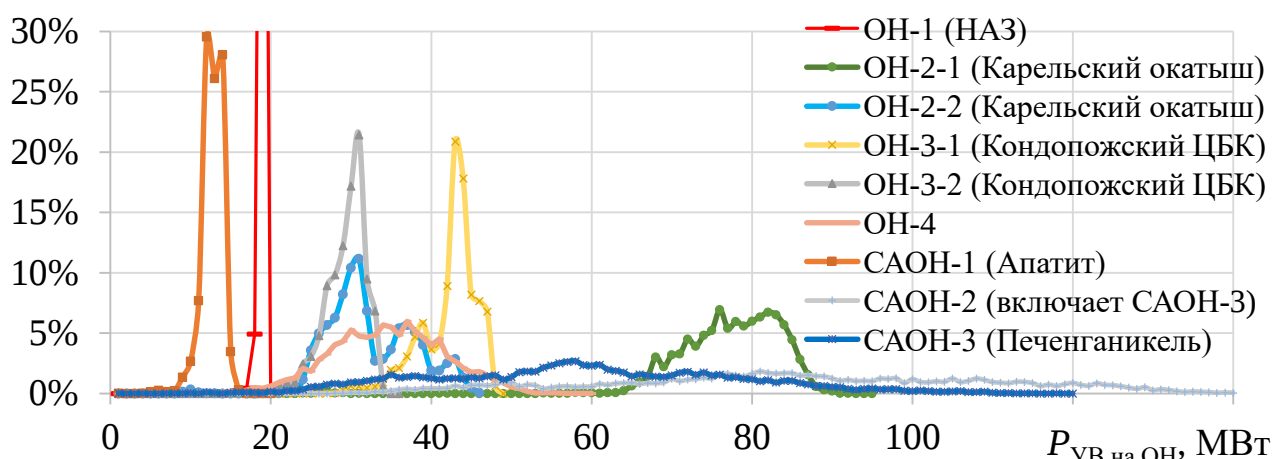


Рисунок 7 – Долевое распределение величины объёма управляющих воздействий на отключение нагрузки в ЭС Мурманской области и ЭС Республики Карелия

При параметрировании ступеней АПНУ распространёнными ошибками являются использование средних объёмов УВ от ПА и отсутствие дополнительной коррекции ступеней КПР. Для минимизации рисков недостаточного действия ПА, а также числа случаев, требующих оперативного задания настраиваемых ступеней целесообразно использовать характерные минимальные объёмы УВ с обеспеченностью 90–95 %. В работе предложен и обоснован в результате исследований способ повышения дискретизации УВ (уменьшения объёма ступени), который заключается в применении алгоритма с возвратом ступени, что позволяет реализовывать существующие дискретные УВ в минимально достаточном объёме.

Значение уставки второй (и последующей) ступени КПР:

$$P_{ст (i+1) ст. КПР} = P_{уст i ст. КПР} + P_{УВ i ст. КПР} \times k_{эф} \times k_{КПР} \quad (2)$$

где $P_{уст i ст. КПР}$, $P_{УВ i ст. КПР}$ – значение уставки и объёма управляющих воздействий i -той ступени КПР; $k_{эф}$ – коэффициент эффективности УВ для разгрузки защищаемого контролируемого сечения; $k_{КПР}$ – долевой коэффициент объёма УВ.

Требуемая дискретность объёмов УВ:

$$0,92 \cdot P_{предПАР} - 0,8 \cdot P_{предПАР} = 0,12 \cdot P_{предПАР} \quad (3)$$

где $P_{пред ПАР}$ – величина предельного по статической аperiodической устойчивости перетока активной мощности для послеаварийного режима, МВт

Уставка ступени противоаварийного воздействия:

$$P_{селект} = \max (P_{УВ1}, P_{УВ2}, \dots, P_{УВN}) - \sum P_{УВ} \quad (4)$$

где $P_{селект}$ – новая величина дискретности реализации УВ, МВт; $P_{УВ}$ – объём управляющих воздействий, МВт; $\sum P_{УВ}$ – сумма любых, кроме максимального объёма УВ, которая не превышает величину максимального объёма УВ.

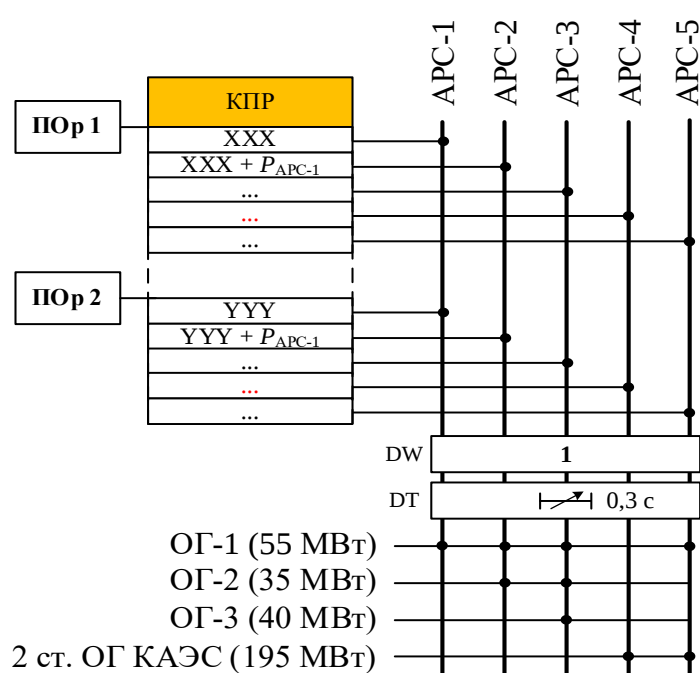


Рисунок 8 – Блок-схема реализации УВ на отключение генераторов

Исключить избыточное формирование УВ при использовании алгоритма с возвратом ступени позволяет использование автоматики отключения генераторов (ОГ) с использованием дополнительного логического звена реализации УВ (рисунок 8). Главной задачей разработанного дополнительного логического звена является создание условий блокировки ступеней с меньшим порядковым номером при срабатывании ступеней с большим порядковым номером.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Выполненные исследования направлены на совершенствование методик и функциональных алгоритмов противоаварийного управления межсистемных транзитных ЛЭП. Основными результатами диссертационной работы, имеющими особую теоретическую и практическую значимость, являются:

1. Предложена усовершенствованная методика определения наиболее «опасных» фиксированных контролируемых сечений межсистемных транзитов, а также обоснована эффективность замыкания ранее существующих точек деления электросети, что увеличило величину МДП на 60 МВт (около 10 %) при соблюдении нормативных коэффициентов запаса устойчивости во всём многообразии исследуемых схем и режимно-балансовых условий функционирования энергосистем.

2. Разработана автоматизированная, не требующая оперативно-диспетчерского контроля структура автоматики ограничения повышения частоты с высокочувствительными измерительными органами, позволяющая устранить существующий избыточный объём противоаварийных управляющих воздействий. Величина снижения объёма управляющих воздействий в исследуемых энергосистемах составляет до 400 МВт (до 60 %).

3. Предложены и обоснованы функциональные алгоритмы и логические схемы автоматики предотвращения нарушения устойчивости, которые позволили минимизировать избыточный объём противоаварийных управляющих воздействий. Устраненный объём избыточных управляющих воздействий составил 240 МВт (до 55 %).

4. Разработаны и апробированы методики выбора параметров срабатывания устройств АОПЧ и устройств комплекса АПНУ с усовершенствованными показателями по чувствительности, быстродействию и селективности, которые обеспечивают достаточность противоаварийных управляющих воздействий.

Результаты диссертационных исследований имеют практическую значимость для управления электроэнергетическим режимом работы энергосистемы и были внедрены в филиалах АО «СО ЕЭС» операционной зоны ОДУ Северо-Запада.

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях, входящих в *Перечень ведущих рецензируемых научных журналов (из перечня ВАК)*:

1. Петрушин Д.Е., Определение нерегулярных отклонений мощности и динамической погрешности регулирования баланса активной мощности в небольших изолированных электроэнергетических системах / И.А. Бончук, А.П. Шапошников, М.А. Созинов [и др.] // Журнал «Промышленная энергетика». – 2021. – № 2. – С. 2–11. DOI: 10.34831/EP.2021.51.38.001

2. Петрушин Д.Е., Снижение эксплуатационных затрат в системах охлаждения автотрансформаторов для повышения их энергоэффективности / М.Г. Попов, Д.Е. Петрушин, Е.Е. Фомин, К.С. Климов // Энергетик. – 2023. – № 5 – С. 19–21. DOI: 10.34831/EP.2023.55.89.003

3. Петрушин Д.Е., Повышение энергоэффективности силовых автотрансформаторов / М.Г. Попов, Д.Е. Петрушин, О.А. Васильева // Вестник Чувашиского университета. – 2023. – № 2 – С. 23–36.

4. Петрушин Д.Е., Повышение пропускной способности межсистемных транзитных ЛЭП объединенных энергосистем / М.Г. Попов, Д.Е. Петрушин, О.А. Васильева // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 5 – С. 60–67.

5. Петрушин Д.Е., Способы увеличения передаваемой мощности в транзитных энергосистемах на примере электропередачи Кола – Карелия / И.Г. Выборных, Д.Е. Петрушин, М.Г. Попов // Известия НТИЦ Единой электроэнергетической системы. – 2023. – № 1 (88). – С. 90–100.

Научные статьи в изданиях, входящих в *международные реферативные базы данных и системы цитирования (SCOPUS, WoS)*:

6. Popov M., Petrushin D., Efimov N. Increasing the Emergency Control Systems Efficiency in Kola's and Karelia's Power Systems // Proceedings of the 2019 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering. – 2019. – P. 1040–1043. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657093

7. Popov M., Pavlov N., Petrushin D. Modern Automatics for Elimination of Asynchronous Operation // Proceedings – 2019 international Ural conference on electrical power engineering. – 2019. – P. 75–80. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877682

8. Popov M., Petrushin D. Analytical Signals Using for the Power Systems Non-Stationary Modes Analysis // Proceedings of the 2020 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering. – 2020. – P. 830–834. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038953

9. Kondrashov M., Popov M., Bukharov D., Petrushin D. Development of a cluster analysis method for solving the problem of identifying static voltage load characteristics // J. Phys.: Conf. Ser. 1546 012085. – 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012085

10. Egorov A., Kulikova V., Petrushin D., Sadokhina M. The Research of Mini-Hydro Power Plants Quantity and Installed Capacity in Russia // Proceedings of the 2021 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering. – 2021. – P. 1405–1408. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396342

11. Egorov A., Kulikova V., Petrushin D., Sadokhina M. Research of the Composition and Structure of the Russian Power System Power Plants // Proceedings of the 2021 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering. – 2021. – P. 1399–1404. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396417

12. Petrushin D., Chumakov N., Kalinin D. Development of Dispatch Control Facilities: A Technique for Identifying the Current Limitation Factor of Transmitted Active Power // Proceedings – 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022 – 2022. – P. 97–101. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787210