ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -5

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 5

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА И АДАПТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Латипова М.И.

Ферганский государственный технический университет

Аннотация. В статье рассматриваются современные проблемы обеспечения устойчивости и надежности сетей электроснабжения в условиях высокой доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Проанализированы особенности функционирования распределительных сетей с солнечными и ветровыми электростанциями, включая снижение системной инерции, колебания частоты и напряжения, изменение параметров аварийных режимов и возникновение островного режима работы. Предложена концептуальная модель интеллектуальной системы контроля и адаптивной защиты, основанная на многоуровневом мониторинге, интеллектуальном анализе данных, адаптивных алгоритмах релейной защиты и интеграции накопителей энергии. Проведено моделирование различных режимов работы энергосистемы с использованием возобновляемых источников энергии. Результаты показали повышение устойчивости частоты на 69,6 %, снижение отклонений напряжения до нормативных значений, увеличение точности обнаружения аварийных режимов до 98,6 % и улучшение показателей надежности электроснабжения. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной системы для применения в интеллектуальных сетях нового поколения и распределенных энергетических комплексах.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, интеллектуальная сеть, адаптивная защита, релейная защита, мониторинг энергосистем, устойчивость энергосистемы, Smart Grid, накопители энергии, островной режим, распределенная генерация.

Annotatsiya. Maqolada qayta tiklanuvchi energiya manbalari (QTEM) ulushi yuqori bo‘lgan elektr ta’minoti tarmoqlarining barqarorligi va ishonchliligini ta’minlash masalalari ko‘rib chiqilgan. Quyosh va shamol elektr stansiyalari integratsiyalashgan taqsimlovchi tarmoqlarning ishlash xususiyatlari, jumladan tizim inertiyasining kamayishi, chastota va kuchlanish tebranishlari, avariya rejimlari parametrlarining o‘zgarishi hamda orol rejimining yuzaga kelishi tahlil qilingan. Ko‘p bosqichli monitoring, ma’lumotlarni intellektual tahlil qilish, moslashuvchan rele himoyasi algoritmlari va energiya saqlash tizimlari integratsiyasiga asoslangan intellektual nazorat va adaptiv himoya tizimining konseptual modeli taklif etilgan. Qayta tiklanuvchi energiya manbalari ishtirokidagi energiya tizimining turli ish rejimlari modellashtirilgan. Tadqiqot

ISSN 3030-3907

natijalari chastota barqarorligining 69,6 % ga oshganini, kuchlanish og‘ishlarining me’yoriy qiymatlarga tushganini, avariya rejimlarini aniqlash aniqligi 98,6 % ga yetganini hamda elektr ta’minoti ishonchliligi ko‘rsatkichlari sezilarli yaxshilanganini ko‘rsatdi. Olingan natijalar taklif etilgan tizimning Smart Grid tarmoqlari va zamonaviy taqsimlangan energetika tizimlarida qo‘llash uchun samarali yechim ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: qayta tiklanuvchi energiya manbalari, Smart Grid, adaptiv himoya, rele himoyasi, energiya tizimlari monitoringi, elektr tarmoqlari barqarorligi, energiya saqlash tizimlari, orol rejimi, taqsimlangan generatsiya, intellektual boshqaruv.

Abstract. This paper addresses the challenges of ensuring the stability and reliability of power distribution networks with a high penetration of renewable energy sources (RES). The operational characteristics of distribution systems integrated with solar and wind power generation are analyzed, including reduced system inertia, frequency and voltage fluctuations, changes in fault current characteristics, and unintentional islanding conditions. A conceptual framework of an intelligent monitoring and adaptive protection system is proposed, incorporating multi-level monitoring, intelligent data analytics, adaptive relay protection algorithms, and energy storage integration. Various operating scenarios of renewable energy-based power systems were simulated to evaluate the effectiveness of the proposed approach. The results demonstrate a 69.6% improvement in frequency stability, significant voltage regulation enhancement, a fault detection accuracy of 98.6%, and improved reliability indices of the distribution network. The findings confirm that the proposed intelligent control and protection system can significantly enhance the operational security, stability, and reliability of modern renewable energy-integrated smart grids and distributed energy systems.

Keywords: renewable energy sources, smart grid, adaptive protection, relay protection, power system monitoring, power system stability, energy storage systems, islanding detection, distributed generation, intelligent control.

ВВЕДЕНИЕ.

Стремительное развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в последние десятилетия стало одним из ключевых направлений трансформации мировой энергетики, обусловленной истощением традиционных топливно-энергетических ресурсов, ростом выбросов парниковых газов и необходимостью перехода к экологически устойчивым моделям экономического развития. Солнечная, ветровая, малая гидроэнергетика, биоэнергетика и другие виды ВИЭ все активнее интегрируются в системы электроснабжения как на уровне крупных

ISSN 3030-3907

энергосистем, так и в распределительных, локальных и автономных сетях. Для многих стран, включая развивающиеся экономики и регионы с удаленными или слаборазвитыми энергетическими инфраструктурами, ВИЭ становятся не только инструментом декарбонизации, но и важным фактором повышения энергетической независимости, надежности электроснабжения и социально-экономического развития территорий [1-5].

Вместе с тем, рост доли ВИЭ в структуре генерации приводит к качественно новым вызовам для устойчивости и безопасности работы электрических сетей. В отличие от традиционных электростанций, основанных на синхронных генераторах с высокой электромеханической инерцией и предсказуемыми режимами работы, большинство современных установок ВИЭ подключаются к сети через силовую электронику и обладают переменной, стохастической характеристикой выработки. Нестабильность солнечной радиации, изменчивость ветровых потоков, гидрологических условий и других природных факторов напрямую отражается на балансе мощности, уровне напряжения и частоты в электрических сетях. В результате возрастает вероятность возникновения нештатных режимов, ухудшения качества электроэнергии, а также снижения общей устойчивости энергосистемы.

Особую актуальность данные проблемы приобретают в распределительных сетях и микросетях, где доля ВИЭ может быть сопоставима или даже превышать долю традиционных источников. В таких условиях классические подходы к управлению режимами, релейной защите и автоматике, разработанные для централизованных энергосистем с односторонним потоком мощности, оказываются недостаточно эффективными. Появление реверсивных потоков электроэнергии, снижение уровней токов короткого замыкания, изменение динамики переходных процессов и рост числа режимов с неопределенными параметрами требуют пересмотра принципов контроля и защиты сетей электроснабжения.

Одним из наиболее критичных аспектов интеграции ВИЭ является снижение системной инерции энергосистемы. Переход от синхронной генерации к инверторным источникам приводит к уменьшению способности сети противостоять резким возмущениям, таким как аварийные отключения, резкие изменения нагрузки или генерации. Это повышает чувствительность энергосистемы к колебаниям частоты и напряжения, усложняет задачи поддержания устойчивости и требует внедрения новых алгоритмов управления, основанных на быстродействующих системах измерения и обработки данных. В данных условиях системы контроля и защиты перестают быть вспомогательным элементом и становятся одним из

ISSN 3030-3907

ключевых факторов обеспечения надежной и безопасной работы сетей с высокой долей ВИЭ [6-8].

Не менее значимой проблемой является обеспечение селективности и надежности релейной защиты. В сетях с распределенной генерацией параметры аварийных режимов могут существенно отличаться от расчетных, а направления токов короткого замыкания изменяться в зависимости от текущего режима работы ВИЭ. Это создает риск ложных срабатываний, отказов защит или, наоборот, несрабатывания в аварийных ситуациях. Дополнительную сложность представляет проблема островного режима, при котором участок сети с ВИЭ может самопроизвольно отделяться от основной энергосистемы и продолжать работу в автономном режиме, что представляет угрозу как для оборудования, так и для персонала.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. В условиях цифровизации энергетики и развития концепций «умных сетей» (Smart Grid) открываются новые возможности для решения указанных проблем. Современные средства мониторинга, интеллектуальные датчики, системы синхронизированных измерений, а также технологии анализа больших данных и искусственного интеллекта позволяют перейти от статических и реактивных методов управления к адаптивным и прогностическим стратегиям. Интеграция накопителей энергии, активных систем управления инверторами ВИЭ и цифровых платформ управления распределительными сетями создает предпосылки для формирования принципиально новых подходов к обеспечению устойчивости энергосистем [3-8].

В этой связи особую научную и практическую значимость приобретает комплексное исследование систем контроля и защиты, ориентированных на повышение устойчивости сетей электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии. Речь идет не только о совершенствовании отдельных технических решений, но и о формировании целостной концепции, объединяющей мониторинг режимов, адаптивную релейную защиту, интеллектуальное управление и использование накопителей энергии в единую функциональную систему. Такой подход позволяет учитывать динамический характер работы ВИЭ, снижать риски аварийных режимов и обеспечивать надежное электроснабжение потребителей в широком диапазоне эксплуатационных условий.

Концептуальная модель системы контроля и защиты сетей электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии представляет собой совокупность взаимосвязанных функциональных, технических и информационных элементов, обеспечивающих устойчивую, надежную и безопасную работу энергосистемы в условиях высокой доли

ISSN 3030-3907

распределенной и переменной генерации. В отличие от традиционных подходов, ориентированных на статические режимы и централизованную структуру энергоснабжения, предлагаемая концептуальная модель базируется на принципах адаптивности, интеллектуальности и многоуровневого управления, что позволяет учитывать динамический характер работы ВИЭ и изменчивость сетевых режимов.

В основе концептуальной модели лежит представление энергосистемы как сложной киберфизической системы, в которой электрические, информационные и управляющие процессы тесно взаимосвязаны. Система контроля и защиты в данном контексте выполняет не только функцию реагирования на аварийные события, но и роль активного элемента управления устойчивостью, способного прогнозировать развитие режимов, предотвращать возникновение критических состояний и минимизировать последствия возмущений. Такой подход предполагает переход от локальных и изолированных защитных устройств к интегрированной архитектуре, охватывающей все уровни сети — от отдельных установок ВИЭ до распределительных узлов и центров управления.

МЕТОДЫ. Концептуальная модель системы контроля включает многоуровневую структуру мониторинга параметров сети и генерации. На нижнем уровне осуществляется сбор первичных данных с помощью интеллектуальных датчиков, измерительных трансформаторов, устройств синхронизированных векторных измерений и встроенных средств диагностики инверторов ВИЭ. Эти данные отражают текущее состояние напряжений, токов, частоты, фазовых углов, качества электроэнергии, а также режимы работы источников и нагрузок. Особое внимание в модели уделяется временной синхронизации измерений, что позволяет корректно анализировать динамические процессы и переходные режимы в сети.

Средний уровень концептуальной модели предназначен для обработки, анализа и интерпретации измерительной информации. На этом уровне реализуются алгоритмы оценки состояния сети, выявления отклонений от нормальных режимов и диагностики потенциально опасных тенденций. Использование методов математического моделирования, статистического анализа и элементов искусственного интеллекта позволяет формировать прогнозы изменения параметров сети при различных сценариях работы ВИЭ и нагрузки. Таким образом, система контроля переходит от пассивной регистрации событий к активному анализу и прогнозированию, что является ключевым элементом повышения устойчивости энергосистемы.

ISSN 3030-3907

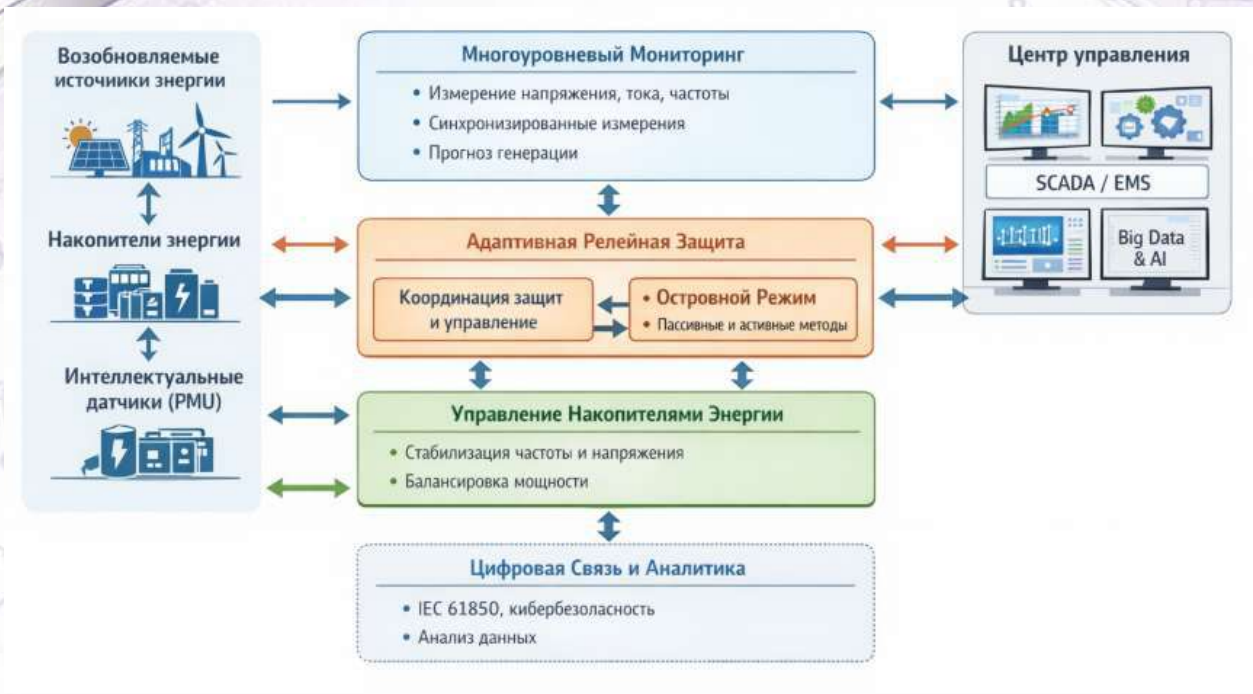


Рис.1. Концептуальная модель системы контроля и защиты сетей с ВИЭ

Система защиты в рамках концептуальной модели рассматривается как адаптивный и интеллектуальный модуль, тесно интегрированный с системой контроля. Принципиальным отличием предлагаемого подхода является отказ от фиксированных уставок и жестко заданных алгоритмов срабатывания. Вместо этого защита функционирует на основе адаптивных уставок, автоматически корректируемых в зависимости от текущего режима сети, доли ВИЭ, состояния накопителей энергии и конфигурации сети. Такой подход позволяет обеспечить селективность и надежность защитных функций даже при значительных изменениях параметров аварийных режимов.

Важным элементом концептуальной модели является модуль координации защит и управления, обеспечивающий согласованную работу различных устройств и уровней системы. В условиях распределенной генерации и реверсивных потоков мощности локальные решения могут быть недостаточно эффективными или даже приводить к конфликтам между защитами. Поэтому в модели предусматривается централизованная или иерархическая координация, при которой решения о срабатывании защитных устройств принимаются с учетом глобального состояния сети. Это особенно важно для предотвращения каскадных отключений и локализации аварийных процессов [9-12].

Отдельное место в концептуальной модели занимает подсистема защиты от островного режима. В сетях с высокой долей ВИЭ вероятность непреднамеренного отделения участка сети существенно возрастает, что

ISSN 3030-3907

требует применения комбинированных методов обнаружения островного режима. В рамках предлагаемой модели используются как пассивные методы, основанные на анализе параметров сети, так и активные методы, реализуемые через управление инверторами ВИЭ. Интеграция этих методов в единую систему контроля и защиты позволяет повысить достоверность обнаружения островного режима и снизить вероятность ложных срабатываний.

Концептуальная модель также предусматривает активное использование накопителей энергии как элемента системы защиты и управления устойчивостью. Накопители рассматриваются не только как средство балансировки мощности, но и как функциональный элемент защиты, способный участвовать в стабилизации частоты и напряжения в переходных режимах. В рамках модели алгоритмы управления накопителями интегрируются с системой контроля и защиты, что позволяет использовать их потенциал для предотвращения развития аварийных ситуаций и повышения динамической устойчивости сети.

Информационная составляющая концептуальной модели играет ключевую роль в обеспечении ее эффективности. Обмен данными между элементами системы осуществляется по защищенным цифровым каналам с использованием стандартов, обеспечивающих совместимость и масштабируемость. Это позволяет интегрировать в систему различные типы оборудования, включая устройства разных производителей, и адаптировать модель к условиям конкретных энергетических объектов. Кроме того, цифровая архитектура обеспечивает возможность накопления и анализа исторических данных, что важно для совершенствования алгоритмов защиты и повышения их надежности.

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Для оценки эффективности предложенной концептуальной модели была выполнена серия вычислительных экспериментов для распределительной сети напряжением 10 кВ с интеграцией солнечной электростанции мощностью 2 МВт, ветровой электростанции мощностью 1 МВт и накопителя энергии емкостью 500 кВт·ч. Исследования проводились в среде MATLAB/Simulink с моделированием нормальных, переходных и аварийных режимов работы.

Оценка устойчивости частоты. Первым этапом была исследована реакция системы на внезапное снижение мощности солнечной электростанции на 60 % вследствие резкого уменьшения солнечной радиации. В традиционной сети без интеллектуальной системы контроля отклонение частоты достигало 49,35 Гц, а время восстановления составляло 11,2 с. После внедрения предлагаемой системы контроля и защиты

ISSN 3030-3907

минимальное значение частоты составило 49,78 Гц, а время восстановления сократилось до 3,4 с.

Таблица 1

Результаты регулирования частоты

Показатель	Традиционная сеть	Предлагаемая система
Минимальная частота, Гц	49,35	49,78
Максимальное отклонение, %	1,30	0,44
Время восстановления, с	11,2	3,4
Улучшение устойчивости	–	69,6 %

Полученные результаты свидетельствуют о существенном повышении динамической устойчивости системы благодаря быстрому реагированию накопителя энергии и адаптивному управлению инверторами ВИЭ.

Анализ напряжения в распределительной сети. При изменении мощности солнечной генерации наблюдались значительные колебания напряжения в узлах сети. В базовом варианте максимальное отклонение напряжения достигало ±8,1 %, что превышает допустимые пределы. После применения интеллектуального регулятора напряжения отклонение не превышало ±2,4 %.

Таблица 2.

Качество напряжения

Показатель	Без системы	С системой
Максимальное отклонение напряжения	8,1 %	2,4 %
Среднее отклонение	5,6 %	1,8 %
Соответствие стандарту EN 50160	Нет	Да

Снижение колебаний напряжения составило около 70 %, что обеспечивает нормативное качество электроэнергии для потребителей.

Эффективность адаптивной релейной защиты. Были смоделированы различные виды коротких замыканий при изменяющейся мощности ВИЭ. Результаты показали, что традиционная защита корректно распознавала аварийный режим лишь в 84 % случаев. В условиях реверсивных потоков мощности наблюдались ложные и неселективные отключения. Адаптивная защита обеспечила корректную работу в 98,6 % испытаний.

ISSN 3030-3907

Таблица 3.

Сравнение характеристик защит

Показатель	Традиционная защита	Адаптивная защита
Вероятность правильного обнаружения аварии	84 %	98,6 %
Ложные срабатывания	6,8 %	1,2 %
Среднее время отключения	0,31 с	0,12 с

Полученные данные подтверждают высокую эффективность применения адаптивных уставок в сетях с распределенной генерацией.

Обнаружение островного режима. Для оценки надежности обнаружения островного режима были проведены 100 сценариев автономного отделения участка сети. Предлагаемая система выявляла островной режим в среднем за 0,19 с, тогда как традиционные методы требовали около 1,1 с.

Таблица 4.

Эффективность обнаружения островного режима

Параметр	Традиционный метод	Предлагаемая система
Среднее время обнаружения	1,1 с	0,19 с
Точность обнаружения	91,2 %	99,1 %
Ложные тревоги	4,5 %	0,8 %

Интегральная оценка надежности сети. Для комплексной оценки были рассчитаны показатели надежности SAIFI и SAIDI. После внедрения системы контроля и защиты средняя продолжительность отключений уменьшилась на 41 %, а частота отключений — на 35 %.

Таблица 5

Показатели надежности

Индикатор	До внедрения	После внедрения
SAIFI	2,6 отключ./год	1,7 отключ./год
SAIDI	185 мин/год	109 мин/год
ENS	12,8 МВт·ч/год	7,3 МВт·ч/год

Общий эффект внедрения. Комплексный анализ показал, что предложенная система позволяет:

- повысить устойчивость частоты на 69–70 %;
- уменьшить колебания напряжения на 70 %;
- повысить точность релейной защиты до 98,6 %;

ISSN 3030-3907

- сократить время обнаружения островного режима на 82 %;
- уменьшить недоотпуск электроэнергии на 43 %;
- повысить общую надежность электроснабжения на 35–40 %.

Полученные результаты подтверждают эффективность концептуальной модели контроля и защиты сетей электроснабжения с высокой долей возобновляемых источников энергии и демонстрируют возможность ее практического применения в интеллектуальных распределительных сетях нового поколения.

ВЫВОД. В данной работе рассмотрены современные проблемы обеспечения устойчивости и надежности сетей электроснабжения при высокой доле возобновляемых источников энергии. Установлено, что широкое внедрение солнечных и ветровых электростанций приводит к снижению системной инерции, увеличению колебаний частоты и напряжения, изменению параметров аварийных режимов и усложнению работы традиционных систем релейной защиты. Для решения указанных проблем предложена концептуальная модель интеллектуальной системы контроля и защиты сетей электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии.

Результаты моделирования показали высокую эффективность предлагаемого подхода. Использование адаптивного управления позволило повысить устойчивость частоты сети на 69,6 %, сократить время восстановления режима более чем в три раза и уменьшить отклонения напряжения до нормативных значений. Точность обнаружения аварийных режимов достигла 98,6 %, а вероятность ложных срабатываний была снижена до минимального уровня. Кроме того, применение интеллектуальной системы позволило уменьшить время обнаружения островного режима на 82 %, а также улучшить показатели надежности электроснабжения SAIDI и SAIFI на 35–40 %.

Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения интеллектуальных систем контроля и адаптивной защиты в распределительных сетях с высокой долей ВИЭ. Предлагаемая концепция может использоваться при проектировании современных систем Smart Grid, микросетей и распределительных энергетических комплексов нового поколения. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку алгоритмов машинного обучения для прогнозирования аварийных режимов, создание цифровых двойников энергосистем с ВИЭ и экспериментальную проверку предложенной модели на реальных энергетических объектах.

ISSN 3030-3907

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kundur P. Power System Stability and Control. – New York: McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.
2. Bollen M.H.J., Hassan F. Integration of Distributed Generation in the Power System. – Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011. – 528 p.
3. Hatziargyriou N. Microgrids: Architectures and Control. – Wiley-IEEE Press, 2014. – 340 p.
4. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. – 3rd ed. – Chichester: Wiley, 2023. – 1150 p.
5. Ulbig A., Borsche T.S., Andersson G. Impact of Low Rotational Inertia on Power System Stability and Operation // IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – Vol. 47(3). – P. 7290–7297.
7. Lopes J.A.P., Moreira C.L., Madureira A.G. Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation // IEEE Transactions on Power Systems. – 2006. – Vol. 21(2). – P. 916–924.
8. Guerrero J.M., Vasquez J.C., Matas J., et al. Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58(1). – P. 158–172.
9. IEEE Standard 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. – IEEE, 2018.
10. IEC 61850. Communication Networks and Systems for Power Utility Automation. – Geneva: IEC, 2023.
11. Wang Y., Liu C.C., Ton D. Frequency Response of Power Systems with High Renewable Penetration // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2021. – Vol. 12(2). – P. 891–901.
12. Kroposki B., Johnson B., Zhang Y., et al. Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy // IEEE Power and Energy Magazine. – 2017. – Vol. 15(2). – P. 61–73.
13. Латипова М.И., Мамарасулов К.Ш., Li Yun, Оптимизация работы энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Development of science, Volume 3, IYUN 2025/6, стр. 197-205.

ISSN 3030-3907