ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES

2.4.3. Электроэнергетика
Научная статья
621.311.1
https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.1

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ, НАЛАДКИ И КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Дмитрий Александрович Давыдов[1], Антон Анатольевич Бубенчиков[2], Виталий Игоревич Беляев[3]*

[1, 2, 3] Омский государственный технический университет (д. 11, пр-т Мира, Омск, 644050, Российская Федерация)
[1] 7shaq7@gmail.com
[2] privetomsk@mail.ru
[3] belyaevrestore@gmail.com
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. ***Введение.*** Современная мировая энергетическая инфраструктура устарела, что ставит под угрозу надёжность и качество электроснабжения. Деградация инфраструктуры и эксплуатация на пределе возможностей подчеркивают необходимость модернизации через внедрение современного оборудования для повышения эффективности и надёжности энергоснабжения. Внедрение цифровых подстанций с использованием стандарта МЭК 61850 представляется перспективным решением, способным улучшить эффективность и надёжность энергоснабжения. ***Цель.*** Исследование предложений по развитию цифровых подстанций на базе протокола МЭК 61850 и выявление направлений совершенствования данной области с особым вниманием на защиту от кибератак. ***Материалы и методы***. Применяются методы анализа текущих стандартов и передовых технологий, таких как МЭК 61850, для всестороннего изучения цифровых подстанций. Выполняется анализ роли стандарта в гарантии совместимости устройств автоматики и релейной защиты. Исследование опирается на анализ работ отечественных и международных экспертов в области энергетики и кибербезопасности. ***Результаты и обсуждение.*** Рассмотрены возможности и проблемы, связанные с интеграцией распределённых энергоресурсов и сетей малой генерации, а также вопросы кибербезопасности. Цифровизация подстанций способствует снижению затрат на монтаж и эксплуатацию, повышает качество и надежность энергоснабжения. Важную роль играет разработка комплексных систем защиты от кибератак для обеспечения безопасности сетей. ***Заключение.*** По итогам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что переход к цифровизации подстанций на основе МЭК 61850 позволяет существенно снизить затраты на эксплуатацию, строительно-монтажные и пуско-наладочные работы, улучшить качество и надёжность энергоснабжения. Исследование подтверждает необходимость дальнейшего развития и адаптации цифровых подстанций, учитывая растущую зависимость от цифровых технологий в энергетике. Однако важно обеспечить кибербезопасность и разработать комплексные системы защиты, способные противостоять кибератакам и обеспечивать безопасность сетей малой генерации.

Ключевые слова*:* цифровая подстанция, МЭК 61850, цифровой двойник энергосистемы, децентрализованная релейная защита, кибербезопасность

Для цитирования*:* Давыдов Д. А., Бубенчиков А. А., Беляев В. И. Проблемы реализации, наладки и кибербезопасности цифровых подстанций // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 4 (103). С. 7–16. https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.1

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.05.2024;
одобрена после рецензирования 30.05.2024;
принята к публикации 10.06.2024.

Research article

PROBLEMS OF IMPLEMENTATION, SETUP AND CYBERSECURITY OF DIGITAL SUBSTATIONS

Dmitry A. Davydov[1], Anton A. Bubenchikov[2] , Vitaly I. Belyaev[3]*

[1, 2, 3] Omsk State Technical University (11, Mira ave., Omsk, 644050, Russian Federation)
[1] 7shaq7@gmail.com
[2] privetomsk@mail.ru
[3] belyaevrestore@gmail.com
* Corresponding author

Abstract. ***Introduction.*** The modern energy infrastructure is outdated, which threatens the reliability and quality of electricity supply. Aging infrastructure and operation at the limit of capabilities emphasize the need for modernization through the introduction

of advanced equipment to improve the efficiency and reliability of energy supply. The introduction of digital substations using the IEC 61850 standard seems to be a promising solution that can improve the efficiency and reliability of energy supply. ***Goal***. Research of proposals for the development of digital substations based on the IEC 61850 protocol and identification of areas for improvement in this area, with special attention to protection against cyber-attacks. ***Materials and methods***. Methods of analyzing current standards and advanced technologies, such as IEC 61850, are used for a comprehensive study of digital substations. The role of the standard in ensuring the compatibility of automation and relay protection devices is analyzed. The study is based on an analysis of the work of domestic and international experts in the field of energy and cybersecurity. ***Results and discussion.*** The possibilities and problems associated with the integration of distributed energy resources and small-scale generation networks, as well as cybersecurity issues, are analyzed. Digitalization of substations helps to reduce installation and operation costs, improves the quality and reliability of energy supply. The development of comprehensive cyberattack protection systems to ensure network security plays an important role. ***Conclusion.*** Based on the results of the study, it can be concluded that the transition to digitalization of substations based on IEC 61850 can significantly reduce installation and operation costs, improve the quality and reliability of energy supply. The study highlights the need for further development and adaptation of digital substations, given the growing dependence on digital technologies in the energy sector. However, it is important to ensure cybersecurity and develop comprehensive protection systems that can withstand cyber-attacks and ensure the security of small-scale networks.

Keywords: digital substation, IEC 61850, digital twin of the power system, decentralized relay protection, cybersecurity

For citation: Davydov DA, Bubenchikov AA, Belyaev VI. Problems of implementation, setup and cybersecurity of digital substations Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;4(103):7-16. (In Russ.). https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.1

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 08.05.2024;
approved after reviewing 30.05.2024;
accepted for publication 10.06.2024.

Введение / Introduction. В современных условиях обеспечение эффективного и высококачественного электроснабжения представляет собой одну из основных задач, которые стоят перед энергетическим сектором. Современное состояние большинства энергетических систем характеризуется значительным износом и эксплуатацией на пределе их технических возможностей, что неизменно ведет к ухудшению качества и надежности предоставляемых услуг, а также ограничивает возможности для расширения электрогенерации. Существует неотложная потребность в модернизации более чем 50 % энергетической инфраструктуры путем интеграции современного оборудования с более долгим сроком эксплуатации. Внедрение передовой технологии – критически важный шаг к значительному улучшению эффективности и надежности систем энергоснабжения [1].

В данном контексте использование передовых информационных технологий и инновационных методов в электроэнергетической отрасли привело к разработке цифровых подстанций. В соответствии с обновленными стандартами технологического проектирования подстанций на 35–750 кВ и политикой ПАО «ФСК ЕЭС», цифровые подстанции отличаются высоким уровнем автоматизации и выполнением всех операций по обмену информацией и управлению в цифровом формате. Развитие микропроцессорных устройств защиты в секторе электроэнергетики способствовало интеграции данных из этих устройств в автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), увеличивая присутствие устройств с цифровыми интерфейсами. Внедрение новых технологий и стандартов, основанных на МЭК 61850, обеспечило создание унифицированных систем управления и автоматизации, объединяющих все вторичные цепи в единую цифровую сеть для передачи данных. Это ускоряет обмен информацией между устройствами и сокращает количество кабельных соединений и устройств, что делает подстанцию более компактной. Одна из основных идей цифровых подстанций заключается в мониторинге процессов непосредственно у источников информации, передаче данных по волоконно-оптическим линиям и виртуализации многих функций подстанции, что превращает измерительные устройства в источники информации, а интеллектуальные электронные устройства – в её потребителей [2].

Автоматизированные устройства трансформируются в вычислительные системы, оснащенные специализированным программным обеспечением, тогда как системы защиты и управления эволюционируют в комплексы программных модулей с разнообразными функциями и повышенными стандартами защиты. Цифровые подстанции (ЦПС) подвергаются виртуализации на серверных платформах, интегрируясь из модулей релейной защиты и автоматики (РЗА), про-

тивоаварийной автоматики и автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (ПА и АСКУЭ). Проектирование переходит в область технологий компьютерного моделирования, заменяя традиционные аналоговые системы на единые серверы с профильным программным обеспечением.

Цель интеграции распределенных энергоресурсов (РЭР) с основной сетью заключается в оптимизации функционирования энергосистемы, снижении выбросов парниковых газов и повышении надежности и качества электроэнергии. Сети малой генерации добавляют сложности в защитные схемы из-за их динамичности, быстрых изменений эксплуатационных условий, влияния погодных условий и режимных условий производства электрической энергии. Новые эксплуатационные условия требуют разработки новых защитных схем, поскольку традиционные методы оказываются недостаточными для адаптации к быстро меняющимся обстоятельствам. Разработка стандартов для безопасной передачи данных, ключевые аспекты которых описаны в международном стандарте МЭК 61850, является важным шагом в решении этих вопросов, обеспечивая надежную связь для алгоритмов защиты [3]. Адаптивная защита сетей малой генерации критична как при их интеграции с основной сетью, так и в автономном режиме. Это в значительной мере зависит от обмена данными между устройствами посредством связи, что делает защиту от кибератак жизненно важной для обеспечения безопасности. Разнообразные виды кибератак и полная потеря связи могут серьезно нарушить работу защитных систем. В случае сбоев связи системы малой генерации могут использоваться для обеспечения необходимой мощности для активации отключающих реле даже в условиях сильных импульсных нагрузок и отказов в системе.

Данная работа направлена на изучение существующих предложений по развитию цифровых подстанций с использованием протокола МЭК 61850 и определение направлений для их совершенствования. Особое внимание уделяется вопросу защиты от кибератак, что является актуальной задачей в контексте увеличивающейся зависимости от цифровых технологий в энергетике. Необходимость этих исследований обоснована тем, что они предоставляют убедительные доказательства о критической роли обеспечения надёжности и безопасности энергетических систем в современных условиях, что делает данный вопрос весьма актуальным для научного сообщества и отрасли в целом.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. В статье использованы методы, направленные на всесторонний анализ текущего состояния и перспектив развития цифровых подстанций с акцентом на кибербезопасность. В работе применяется комплексный подход, включающий анализ существующих стандартов и технологий, таких как международный стандарт МЭК 61850, который играет ключевую роль в обеспечении совместимости устройств автоматики и релейной защиты. Методологическую основу исследования составляют труды отечественных и зарубежных экспертов в области энергетики и кибербезопасности, что позволяет сделать выводы, основанные на современных научных знаниях и практиках.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Стандарт МЭК 61850 сегодня является одним из наиболее распространенных стандартов автоматизации энергосистем. Его основная задача – гарантировать совместимость устройств автоматики и релейной защиты от разных производителей. Для достижения этой цели стандарт: 1) предлагает абстрактную модель, описывающую информацию, которой можно обмениваться между различными устройствами; 2) предоставляет набор услуг, таких как действия, которые можно выполнить на основе этих данных; 3) предлагает некоторые протоколы для реализации обмена информацией [4].

В контексте распределительных энергетических сетей была разработана и успешно испытана прогрессивная децентрализованная система защиты для сетей среднего напряжения, которая обладает способностью к адаптации в ответ на изменения в энергосистеме. Этот метод тесно связан с использованием международного стандарта IEC 61850. Значительным нововведением данной системы является интеграция параметров функций защиты и иерархии управления за-

щитными устройствами в модель данных устройств IEC 61850. При этом параметры могут быть динамически модифицированы в реальном времени через протокол MMS (Manufacturing Message Specification), который является одним из протоколов, рекомендованных IEC 61850 для целей мониторинга и управления. Это позволяет реализовать полностью децентрализованный подход к решению задач по локализации неисправностей, их изоляции и восстановлению обслуживания Fault Location, Isolation and Service Restoration (FLISR), что способствует сокращению времени простоя и адаптации настроек различных интеллектуальных электронных устройств (IED) к специфическим потребностям распределительных сетей [4].

Локальные сети на электрических подстанциях интегрируют интеллектуальные управляющие приложения, которые зависят от данных, полученных из различных частей энергосистемы. Современная инфраструктура передачи данных обеспечивает своевременную доставку этих критически важных измерений. Важным аспектом является реализация мер кибербезопасности для обеспечения безопасной передачи данных через глобальные вычислительные сети (WAN) энергосистем, что помогает минимизировать риски кибератак или манипуляций с данными. Дополнительно улучшение качества информации от источников данных является ключевой задачей.

На современных цифровых подстанциях токи и напряжения измеряются с помощью измерительных трансформаторов, выходы которых подключены к устройствам сопряжения (MU). Эти блоки конвертируют аналоговые сигналы в цифровые и кодируют измерения в пакеты данных, используемые управляющими приложениями. Причинами плохого качества измерения данных от измерительных трансформаторов могут быть их насыщение, ошибки в проводке, ослабление соединений и отказы оборудования.

Использование инновационных измерительных трансформаторов, таких как оптические трансформаторы тока и катушки Роговского, на подстанциях обусловлено преимуществами этих устройств в отношении точности, устойчивости к насыщению, безопасностью, долговечностью по сравнению с традиционными трансформаторами. Тем не менее как традиционные, так и нетрадиционные измерительные трансформаторы требуют более точного выбора характеристик на этапе проектирования систем, неправильное выполнение которой может привести к некорректным данным. Кроме того, неполадки в работе объединяющих блоков и цифровые штормы в коммуникационных сетях могут вызвать ошибки в данных или их отсутствие, что негативно сказывается на управляющих приложениях. Неверные данные могут привести к неправильному функционированию устройств релейной защиты, угрожая тем самым надежности энергосистемы.

Для выявления ошибочных измерений применяется метод линейных взвешенных наименьших квадратов (Weighted Least Squares – WLS), который основывается на идентификации данных методом исключения. Алгоритм использует топологию подстанции, которая обновляется в реальном времени с помощью данных, полученных от технологической шины. При активации данных о состояниях высоковольтных выключателей и разъединителей матрица инцидентности автоматически обновляется. В данном алгоритме реализован процесс проверки качества данных, направленный на первоочередное исключение неверных данных на основе атрибутов качества данных.

Используя оценку состояния по методу WLS, недостоверные данные от трансформаторов тока идентифицируются с помощью метода наибольшего нормализованного остатка. Измеренные данные, которые расцениваются как недостоверные, сначала заменяются данными с резервного выхода трансформатора тока, а затем удаляются напрямую, что способствует улучшению способности алгоритма к обнаружению недостоверных данных. Предложенный алгоритм обнаружения неверных данных на уровне подстанции может быть использован для повышения качества данных на этом уровне. В случаях, когда алгоритм не способен идентифицировать источники плохих данных, он может уведомить пользователя о присутствии неверных измерений на уровне подстанции [5].

В контексте непрерывного увеличения потребления электроэнергии актуальной задачей является повышение надежности работы существующих распределительных электроподстанций,

а также строительство новых объектов. В условиях естественного износа оборудования, роста нагрузок и ограничений на массовое обновление всех компонентов, возникает необходимость разработки новых подходов, методов и средств для оценки состояния и диагностики элементов подстанции. В области строительства новых электроподстанций перспективным направлением считается внедрение современных систем управления и цифровых технологий, включая измерительные устройства и технологии обработки информации. Однако данные технологии являются относительно новыми и не всегда соответствуют требованиям надежности и эффективности работы, что также касается и методов диагностики состояния цифровых подстанций как сложных технических систем и их компонентов.

Исследование, в работе [6] выявило проблемы комплексной оценки состояния электроподстанций. В качестве решения может быть применен метод натурно-модельного эксперимента, который позволяет использовать экспериментальные данные для создания адекватной модели объекта. Этот подход способствует эффективной диагностике сложных технических систем, выявлению мест и видов неисправностей, а также развивающихся дефектов. Системный подход, включающий теоретические исследования, экспериментальные работы и математическое моделирование, обеспечивает высокую достоверность результатов.

В исследовании [7] анализируются усовершенствованные методы моделирования цифрового защитного комплекса цифровых подстанций на примере реально используемых устройств. В настоящее время активно ведется замена компонентов этих комплексов на изделия отечественных и китайских производителей в рамках политики импортозамещения. В связи с этим выбор наиболее подходящей конфигурации цифровых подстанций из ассортимента, предложенного различными производителями, представляет собой важную задачу.

Для решения задач многокритериального выбора широко используются методы, основанные на принципах нечетких множеств, векторной стратификации, теории полезности и других подходах. Критерии для сравнительной оценки альтернатив включают технические, эксплуатационные и экономические показатели. Интеграция этих показателей в единую систему для выбора наиболее эффективного технического решения представляет собой сложную и слабо формализованную задачу. В этом контексте активно применяются методы экспертных оценок, которые объединяют опыт, знания и интуицию принимающего решения лица, и современные технологии автоматизированной поддержки принятия решений. Одним из наиболее эффективных методов экспертных оценок является метод анализа иерархий (МАИ) [8].

Основные этапы МАИ:

– структуризация задачи в виде иерархии с несколькими уровнями: обобщающие критерии (требуемые показатели, характеристики, свойства); детализирующие критерии или параметры (может быть несколько уровней); сравниваемые альтернативы;

– попарное сравнение экспертами элементов каждого уровня на основе использования 9-балльной шкалы;

– вычисление коэффициентов веса (значимости) элементов каждого уровня;

– расчет результирующих показателей значимости (веса) каждой из альтернатив и их ранжирование по этим показателям.

Одним из ключевых преимуществ технологий централизованной релейной защиты (ЦРЗА) является возможность расширения функционала системы релейной защиты и автоматики (РЗА) без необходимости увеличения количества оборудования при наличии необходимых данных на процессорной шине. Для улучшения надежности работы РЗА без значительного увеличения затрат применяется инновационная архитектура ЦПС, включающая комплекс резервной централизованной цифровой защиты. Терминал централизованной цифровой защиты выполняет функции резервирования защиты и автоматики как при нормальной работе базовых терминалов РЗА первого уровня, так и при их сбое [9]. Это преимущество позволяет сократить затраты и на все этапы проектирования и наладки ЦРЗА, и на анализ иерархии.

Применение стандартов МЭК 61850 с их последующей адаптацией принесло множество преимуществ, однако новые технологии также ввели новые уязвимости в систему, которые могут привести к нарушениям безопасности и стать привлекательными целями для кибератак, например, через несанкционированный удаленный доступ к подстанциям посредством неправильно настроенных сетевых защит (например, межсетевые экраны). Некорректные действия и скрытые отказы в устройствах защиты могут вызвать отключение линии, что, в свою очередь, может привести к каскадным сбоям и несостоятельности системы. Например, неправильная настройка зоны 1 дистанционного реле защиты может привести к множественным отключениям линий. Успешные кибератаки на подстанции могут вызвать срабатывание нескольких высоковольтных выключателей и каскадные последствия с серьезным воздействием на энергосистему. В худшем случае это может привести к ненормальным режимам работы с последующим отключением энергосистемы с серьезными экономическими последствиями. Угрозы кибербезопасности к критически важным объектам инфраструктуры возросли за последнее десятилетие. Усилия по смягчению киберугроз привели к разработке множества стандартов и руководств по кибербезопасности, а также к созданию множества контрмер, основанных на информационных технологиях на электроподстанциях. Предложенные методы смягчения последствий могут быть применены, даже если ИТ-решения (например, межсетевой экран и системы обнаружения вторжений) скомпрометированы. Предложенный испытательный стенд [10] может моделировать кибератаки и проверять эффективность методов смягчения с помощью системы аппаратного обеспечения в реальном времени.

На современном этапе развития системы защиты, основанные на стандарте МЭК 61850, предпочтительно используют оптоволоконные высокоскоростные локальные сети (Local Area Network – LAN) Ethernet благодаря их высокой пропускной способности и помехоустойчивости. Тем не менее высокая стоимость оптоволоконных Ethernet-сетей может делать их использование экономически неоправданным в условиях распределительных сетей среднего и низкого напряжения (СН / НН).

В качестве альтернативы может быть рассмотрено применение технологии беспроводной локальной сети (Wireless Local Area Network – WLAN) для обеспечения функционирования приложений распределительных подстанций [11]. Несмотря на высокую скорость передачи данных, которую предоставляет волоконная оптика, ее использование ограничено в системах защиты, работающих по принципу бегущих волн, из-за требований к высокой частоте дискретизации для детального захвата переходных процессов, особенно при совместной работе нескольких модулей объединения на одной шине процесса. Современные цифровые устройства релейной защиты способствуют дистанционному доступу к данным о состоянии системы для координации защитных мероприятий, данные могут храниться у удаленных клиентов. Взаимодействие между релейными защитами значительно улучшает функциональность этих устройств. Время реакции защиты составляет приблизительно 4 мс для систем с частотой 50 Гц, что соответствует стандарту МЭК 61850-5. В течение этого интервала устройства должны осуществлять кодирование, передачу, прием и декодирование сигналов. Защитные функции, такие как обнаружение и предотвращение сбоев, могут осуществляться с использованием IEEE 802.11n WLAN или Ethernet в соответствии с МЭК 61850. Системы защиты на основе бегущих волн стали широко распространены из-за их высокой устойчивости к таким факторам, как насыщение трансформаторов тока, колебания в системе, переходное сопротивление и режимы работы нейтральной точки. Технологии упаковки и сжатия сигналов повышают пропускную способность, в то время как методы извлечения данных улучшают характеристики защиты и понижают необходимую частоту дискретизации до уровня, сопоставимого с традиционными методами. Этот подход демонстрирует превосходство над традиционными методами по точности и быстродействию [11, 12].

В настоящее время рекомендуется использовать быстродействующие защиты для линий электропередачи сверхвысокого напряжения (110 кВ и выше). Исследования показывают, что каждая миллисекунда, сэкономленная на времени устранения неисправности, способствует увели-

чению предела устойчивости системы передачи на 15 МВт [13]. Применяются различные методики фильтрации данных. Дискретное преобразование Фурье с полным циклом (Full-Cycle Discrete Fourier Transform – FCDFT) требует одного полного цикла выборок для исключения предварительных выборок и получения точного основного вектора. В качестве ускоренной альтернативы применяется полупериодное ДПФ (Half-Cycle Discrete Fourier Transform – HCDFT), которое использует только полупериодные выборки для оценки векторов, тем самым ускоряя сходимость по сравнению с FCDFT, но страдает от потери способности отклонять четные гармоники и имеет трудности с удалением затухающего смещения постоянного тока. Метод квадрата наименьшей ошибки полупериода (Half-Cycle Least Error Square – HCLES) использует разложение в ряд Тейлора для моделирования затухающей составляющей постоянного тока и гармоник, хотя его эффективность зависит от точности оценок параметров затухающего постоянного тока, особенно при быстрых скоростях затухания. Преобразование Фурье на основе метода Кларка также используется для минимизации ошибок измерения при отклонениях от номинальной частоты. Альтернативно метод фильтрации Калмана предлагает стабильные оценки в условиях наличия шума и гармоник, требуя при этом значительных вычислительных ресурсов для анализа переменных состояния в каждом временном шаге. В цифровых дистанционных защитах используются методы вейвлет-преобразования (Wavelet Transform – WT) с анализом множественного разрешения (Multiresolution Analysis – MRA), позволяющие извлекать основной вектор быстрее метода FCDFT, хотя производительность также подвержена влиянию затухающей составляющей постоянного тока. В ответ на неисправности система данных может сбрасывать окно данных после обнаружения нарушения для стабилизации отклика, несмотря на временную задержку, вызванную предварительным удалением составляющей постоянного тока. Используются также алгоритмы обнаружения неисправностей на основе искусственного интеллекта, включая улучшенный метод ретрансляции расстояния на основе фазлета, реализованный на программируемых пользовательских вентильных матрицах (ППВМ), которые обеспечивают быструю обработку данных благодаря мощным параллельным процессорам. Протоколы на основе МЭК 61850, протоколы выборочного значения и общие объектно ориентированные протоколы событий на подстанциях реализованы на ППВМ, что доказывает работоспособность предлагаемого реле в цифровых подстанционных средах. Экспериментальная проверка подтвердила, что предложенная система защиты на ППВМ может принимать решение о безопасном отключении в течение 0.6–0.8 циклов, даже при ошибках и неисправностях, связанных с длительными переходными процессами на наиболее удаленной линии шины.

В современных системах электроснабжения применяется множество различных стандартов, включая МЭК 61850, Common Information Model (CIM), Modbus, Distributed Network Protocol (DNP) и Open Cross-Platform Unified Architecture (OPC-UA). Эти стандарты различаются по своим целям и структурам, что создает проблемы с обеспечением функциональной совместимости между ними. Система электроснабжения, интегрирующая информационные модели на основе МЭК 61850 и CIM, способна адаптироваться к использованию других информационных моделей. МЭК 61850 является наиболее прогрессивным стандартом связи, позволяющим интегрировать все функции подстанции, такие как защита, управление, измерение и мониторинг, и находит широкое применение в промышленности, расширяя свое влияние в энергосистемах.

Централизованные методы управления такими системами сталкиваются с проблемами в случае обработки больших объемов данных, генерируемых развертыванием большого числа интеллектуальных устройств. Один из подходов к решению этих проблем заключается в использовании мультиагентного анализа трафика данных.

Цифровизация объектов энергетики предоставляет следующие эксплуатационные преимущества:

1) усиленная защита от вторжений, повышенная точность в системах релейной защиты и автоматики (РЗА);

2) автоматизированная система контроля и учета энергопотребления (АСКУЭ) за счет выявления недостоверных показаний;

3) снижение человеческих ошибок за счет блокирования системой неверных команд оператора;

4) внедрение теории организации технологических процессов в диспетчерских центрах как перспективного подхода к разработке математических моделей электроподстанций для диагностики и проектирования подстанций.

Заключение / Conclusion. Переход на цифровые унифицированные интерфейсы сбора и обмена информацией обеспечивают следующие преимущества ЦПС:

1) сокращение объёма вторичных присоединений в результате замены электрических кабелей на волоконно-оптические линии связи;

2) повышение качества измерения в результате перехода на цифровой формат, передача данных осуществляется без дополнительных погрешностей, упрощается вопрос электромагнитной совместимости, что вызывает сокращение погрешностей измерения тока и напряжения;

3) отсутствие электромагнитных помех, которые с первичного оборудования не передаются во вторичные цепи;

4) единая информационная платформа обеспечивается тем, что построение цифровой подстанции основано на стандартах МЭК 61850, в которых сделан большой акцент на унификацию всех устройств.

Перечисленные преимущества обусловливают предпосылки создания цифровых подстанций, а именно:

– в результате замены электрических кабелей на оптические снижаются капитальные затраты по его монтажу;

– устраняется монополия поставщиков оборудования за счет стандартизации и унификации благодаря протоколу МЭК 61850;

– снижение эксплуатационных расходов за счет того, что осуществляется дистанционный контроль состояния оборудования, а также повышается надежность работы подстанции благодаря средствам самодиагностики.

Крайне важно улучшить кибербезопасность подстанций и комплексно проанализировать кибер- и физическую безопасность системы, чтобы повысить отказоустойчивость и надежность энергосистем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка математических моделей цифровых подстанций на базе анализа автоматизированных технологических систем преобразования электроэнергии / В. И. Дубров, Р. Г. Оганян, Д. В. Шайхутдинов, Е. В. Кириевский, Н. И. Горбатенко, Н. Д. Наракидзе // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 9. С. 36–40.
2. Safety related functions with IEC 61850 GOOSE messaging / M. Caserza, P. Pinceti, L. Rocca, G. Rossi // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. No. 104(1). P. 515–523. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.033
3. Habib H., Lashway C., Mohammed O. A Review of Communication Failure Impacts on Adaptive Microgrid Protection Schemes and the Use of Energy Storage as a Contingency. IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. No. 54(2). P. 1194–1207. https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2776858
4. IEC 61850-based adaptive protection system for the MV distribution smart grid / A. Alvarez, D. Della, G. Massa, A. Dede, F. Ramos, A. Barbato // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2018. No. 15(1). P. 26–33. https://doi.org/10.1016/j.segan.2017.09.003
5. Bad Data Detection Using Linear WLS and Sampled Values in Digital Substations / Y. Wu, Y. Xiao, F. Hohn, L. Nordström, J. Wang, W. Zhao // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. No. 33(1). P. 150–157. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2669110
6. Методы и подходы определения технического состояния цифровых электроподстанций / В. И. Дубров, Р. Г. Оганян, Д. В. Шайхутдинов, Е. В. Кириевский, Т. Н. Круглова, Н. Д. Наракидзе // Фундаментальные исследования. 2016. № 9. С. 16–20.

7. Симаков А. В., Харламов В. В., Скороходов В. И. Разработка метода проверки комплексов цифровой релейной защиты электроэнергетических установок // Омский Научный Вестник. 2019. № 5. С. 58–63. https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-167-58-63
8. Гнатюк А. Б., Вотякова Е.М., Староверов Б. А. Решение задачи многокритериального выбора технической компоновки цифровой подстанции с помощью прямого метода анализа иерархии // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 2. С. 54–60.
9. Булычев А. В., Васильев Д. С., Силанов Д. Н. Двухуровневая цифровая система управления и релейной защиты для объектов распределительного сетевого комплекса 110/35/10 кВ // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 36–45.
10. Cyber Attack Resilient Distance Protection and Circuit Breaker Control for Digital Substations / J. Hong, R. Nuqui, A. Kondabathini, D. Ishchenko, A. Martin // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. No. 15(7). P. 4332–4341. https://doi.org/10.1109/TII.2018.2884728
11. Ali N., Eissa M. Accelerating the protection schemes through IEC 61850 protocols // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. No. 102(1). P. 189–200. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.04.035
12. Ali N., Eissa M. Performance of communication networks for Integrity protection systems based on travelling wave with IEC 61850 // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. No. 95(1). P. 664–675. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.024
13. High Speed Digital Distance Relaying Scheme Using FPGA and IEC 61850 / X. Jin, R. Gokaraju, R. Wierckx, O. Nayak // IEEE Transactions on Smart Grid. 2018. No. 9(5). P. 4383–4393. https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2655499

REFERENCES

1. Dubrov VI, Oganjan RG, Shajhutdinov DV, Kirievskij EV, Gorbatenko NI, Narakidze ND. Development of mathematical models of digital substations based on the analysis of automated technological power conversion systems. Modern high-tech technologies. 2016;9(1):36-40. (In Russ.)
2. Caserza MM, Pinceti P, Rocca L, Rossi G. Safety related functions with IEC 61850 GOOSE messaging. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019;104(1):515-523. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.033
3. Habib HF, Lashway CR, Mohammed OA. A Review of Communication Failure Impacts on Adaptive Microgrid Protection Schemes and the Use of Energy Storage as a Contingency. IEEE Transactions on Industry Applications. 2018;54(2):1194-1207. https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2776858
4. Alvarez AA, Della DG, Massa G, Dede A, Ramos F, Barbato A. IEC 61850-based adaptive protection system for the MV distribution smart grid. Sustainable Energy, Grids and Networks. 2018;15(1):26-33. https://doi.org/10.1016/j.segan.2017.09.003
5. Wu Y, Xiao Y, Hohn F, Nordström L, Wang J, Zhao W. Bad Data Detection Using Linear WLS and Sampled Values in Digital Substations. IEEE Transactions on Power Delivery. 2018;33(1):150-157. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2669110
6. Dubrov VI, Oganjan RG, Shajhutdinov DV, Kirievskij EV, Kruglova TN, Narakidze ND. Methods and approaches for determining the technical condition of digital power substations. Basic research. 2016;9(1):16-20. (In Russ.)
7. Simakov AV, Harlamov VV, Skorohodov VI. Development of a method for testing digital relay protection systems for electric power plants. Omsk Scietntific Bulletin. 2019;5(1):58-63. (In Russ.) https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-167-58-63
8. Gnatjuk AB, Votjakova EM, Staroverov BA. Solving the problem of multi-criteria selection of the technical layout of a digital substation using a direct hierarchy analysis method. Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University. 2016;2(2):54-60. (In Russ.)
9. Bulychev AV, Vasil'ev DS, Silanov DN. Two-level digital control and relay protection system for 110/35/10 kV distribution grid facilities. Bulletin of the Chuvash University. 2019;3(1):36-45.
10. Hong J, Nuqui RF, Kondabathini A, Ishchenko D, Martin A. Cyber Attack Resilient Distance Protection and Circuit Breaker Control for Digital Substations. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019;15(7):4332-4341. https://doi.org/10.1109/TII.2018.2884728
11. Ali NH, Eissa MM. Accelerating the protection schemes through IEC 61850 protocols. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018;102(1):189-200. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.04.035
12. Ali NH, Eissa MM. Performance of communication networks for Integrity protection systems based on travelling wave with IEC 61850. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018;95(1):664-675. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.024

13. Jin X, Gokaraju R, Wierckx R, Nayak O. High Speed Digital Distance Relaying Scheme Using FPGA and IEC 61850. IEEE Transactions on Smart Grid. 2018;9(5):4383-4393. https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2655499

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Александрович Давыдов – магистр, аспирант Омского государственного технического университета, ResearcherID: KHW-0197-2024.

Антон Анатольевич Бубенчиков – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Омского государственного технического университета, Scopus ID: 57188871772, ResearcherID: D-7850-2014.

Виталий Игоревич Беляев – магистр, аспирант Омского государственного технического университета, Researcher ID: KHD-7723-2024.

ВКЛАД АВТОРОВ

Дмитрий Александрович Давыдов. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Антон Анатольевич Бубенчиков. Разработка исходной идеи исследования, определение целей и задач, а также планирование методологии. Предоставление критической обратной связи на все аспекты статьи, включая научное содержание, структуру, ясность изложения и логику аргументации.

Виталий Игоревич Беляев. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. Davydov – Master's degree, Postgraduate Student, Omsk State Technical University, ResearcherID: KHW-0197-2024.

Anton A. Bubenchikov – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Omsk State Technical University, Scopus ID: 57188871772, ResearcherID: D-7850-2014.

Vitaly I. Belyaev – Master's degree, Postgraduate Student, Omsk State Technical University, Researcher ID: KHD-7723-2024.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Dmitry A. Davydov. Conducting a study is the collection, interpretation and analysis of the data obtained. The approval of the final version is the acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Anton A. Bubenchikov. Developing the initial idea of the study, defining goals and objectives, as well as planning the methodology. Providing critical feedback on all aspects of the article, including scientific content, structure, clarity of presentation and logic of argumentation.

Vitaly I. Belyaev. Preparation and editing of the text – drafting of the manuscript and the formation of its final version, participation in scientific design.