УДК 621.311:004.9+005.521
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-4-72-78

РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ И ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИЙ 220 кВ

Д.Д. Шкилько, А.Н. Козлов

Аннотация. Рассматривается применение компьютерных моделей подстанций 220 кВ как инструмента повышения надёжности и перехода к обслуживанию оборудования по фактическому состоянию. Использование волоконно-оптических каналов для передачи данных и организация архитектуры системы связи по иерархическому трехуровневому принципу в соответствии со стандартом МЭК IEC 61850 обеспечивает совместимость, синхронизацию и высокое быстродействие при обмене сигналами. Постепенная интеграция цифровых двойников подстанций 220 кВ в общие платформы управления энергосистемой обеспечивает непрерывный обмен данными между объектами, автоматизацию процессов обслуживания и повышение общей надёжности электрических сетей. Показано, как цифровые модели и интеллектуальные алгоритмы позволяют выявлять отклонения, прогнозировать возможные отказы и оптимизировать выполнение ремонтных работ, повышая эффективность эксплуатации электрооборудования в регионах с особыми климатическими условиями, включая Амурскую область.

Ключевые слова: цифровая подстанция; виртуальная копия объекта; протокол IEC 61850; прогнозирование возможных неисправностей.

220 кВ КӨМӨКЧОРДОНДОРДУН ЖАБДУУЛАРЫНЫН ИШЕНИМДҮҮЛҮГҮН ЖАНА ПРЕДИКТИВДҮҮ ТЕЙЛӨӨНҮ КАМСЫЗДООДО САНАРИПТИК ТҮГӨЙЛӨШТӨРДҮН РОЛУ

Д.Д. Шкилько, А.Н. Козлов

Аннотация. Макалада ишенимдүүлүктү жогорулатуунун жана жабдууларды иш жүзүндөгү абалына жараша тейлөөгө өтүүнүн куралы катары 220 кВ көмөкчордондордун компьютердик моделдерин колдонуу каралды. Маалыматтарды берүү үчүн була-оптикалык каналдарды колдонуу жана байланыш тутумунун архитектурасын МЭК IEC 61850 стандартына ылайык иерархиялык үч деңгээлдүү принцип боюнча уюштуруу сигналдарды алмашууда шайкештикти, синхрондоштурууну жана жогорку тездикти камсыз кылат. 220 кВ көмөкчордондордун санариптик эгиздерин энергия тутумун башкаруунун жалпы платформаларына акырындап интеграциялоо объекттер ортосунда тынымсыз маалымат алмашууну, тейлөө процесстерин автоматташтырууну жана электр тармактарынын жалпы ишенимдүүлүгүн жогорулатууну камсыздайт. Санариптик моделдер жана интеллектуалдык алгоритмдер четтөөлөрдү аныктоого, мүмкүн болгон бузулууларды алдын ала айтууга жана оңдоо иштерин аткарууну оптималдаштырууга кандайча мүмкүндүк берери көрсөтүлгөн, бул өзгөчө климаттык шарттары бар аймактарда, анын ичинде Амур облусунда электр жабдууларын иштетүүнүн натыйжалуулугун жогорулатат.

Түйүндүү сөздөр: санариптик көмөкчордон; объекттин виртуалдык көчүрмөсү; IEC 61850 протоколу; мүмкүн болгон бузулууларды болжолдоо.

THE ROLE OF DIGITAL TWINS IN ENSURING RELIABILITY AND PREDICTIVE MAINTENANCE OF 220 kV SUBSTATION EQUIPMENT

D.D. Shkilko, A.N. Kozlov

Abstract. This paper examines the use of computer models of 220 kV substations as a tool for improving reliability and transitioning to condition-based maintenance. The use of fiber-optic data channels and the organization of the

communication system architecture according to a hierarchical three-level principle in accordance with the IEC 61850 standard ensure compatibility, synchronization, and high-speed signal exchange. The gradual integration of digital twins of 220 kV substations into common power system management platforms ensures continuous data exchange between facilities, automation of maintenance processes, and an increase in the overall reliability of electrical networks. It is shown how digital models and intelligent algorithms can identify deviations, predict potential failures, and optimize repairs, increasing the efficiency of electrical equipment operation in regions with special climatic conditions, including the Amur Region.

Keywords: digital substation; virtual copy of the facility; IEC 61850 protocol; failure prediction.

Введение. Современная электроэнергетика развивается в направлении цифровизации, автоматизации и перехода к интеллектуальным системам управления. На смену традиционным подстанциям приходят цифровые подстанции (ЦПС), основанные на стандартах МЭК 61850, 62439-3, 62351, обеспечивающих сквозную передачу данных оборудования. Одним из наиболее значимых инструментов этой трансформации стали цифровые двойники, виртуальные копии реальных объектов, синхронизированные с ними по потокам данных. Они позволяют анализировать параметры работы оборудования в реальном времени, оценивать надёжность и прогнозировать возможные отказы ещё до их возникновения [1, 2]. Цифровой двойник выступает связующим звеном между физическим и информационным слоями подстанции. С его помощью персонал может наблюдать внутренние процессы без отключения оборудования, моделировать аварийные сценарии и корректировать уставки релейной защиты. Это обеспечивает переход от обслуживания по регламенту к предиктивному управлению жизненным циклом оборудования. Для Амурской области, где климатические условия отличаются резкой контрастностью и повышенной влажностью, вопрос надёжности оборудования подстанций 220 кВ стоит особенно остро. На подстанции «Благовещенская» 220 кВ применяются отдельные элементы цифровой архитектуры, что отражает общую тенденцию цифровизации подстанций Амурской энергосистемы. Такие решения постепенно внедряются в региональной энергосистеме и создают основу для перехода к предиктивному управлению и цифровым моделям подстанций.

Архитектура цифровой подстанции. На рисунке 1 представлено сопоставление традиционной и цифровой архитектуры подстанции. В верхней части показана классическая схема, где сигналы от трансформаторов тока и напряжения поступают по медным проводам к терминалам релейной защиты и автоматики. Такая система характеризуется большой протяжённостью вторичных цепей, что повышает вероятность электромагнитных помех и погрешностей измерения. В нижней части рисунка 1 изображена цифровая архитектура подстанции, где аналоговые сигналы преобразуются в цифровую форму непосредственно в устройствах сопряжения – MU (Merging Units, устройства объединения измерений) [2].

Передача данных осуществляется по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) в потоках Sampled Values (дискретные значения измеренных параметров), содержащих информацию о токах и напряжениях. Управляющие команды формируются с использованием протокола GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event – универсальное сообщение подстанционных событий). Для синхронизации времени применяется PTP (Precision Time Protocol, IEEE 1588), обеспечивающий точность до микросекунд и согласованность работы всех устройств. Применение цифровой архитектуры на подстанциях 220 кВ позволяет уменьшить объём вторичных цепей, снизить влияние помех и повысить быстродействие релейных защит. Передача данных выполняется через оптические каналы связи, а контроль и анализ осуществляются дистанционно в среде SCADA-системы [3].

Архитектура системы связи цифровой подстанции. На рисунке 2 представлена архитектура обмена данными цифровой подстанции, построенная по трёхуровневому принципу – уровень процесса, уровень присоединений и станционный уровень. Передача информации между элементами системы организована в соответствии со стандартом IEC 61850, обеспечивающим совместимость, синхронизацию и высокое быстродействие при обмене сигналами. Обмен сигналами функций защиты между

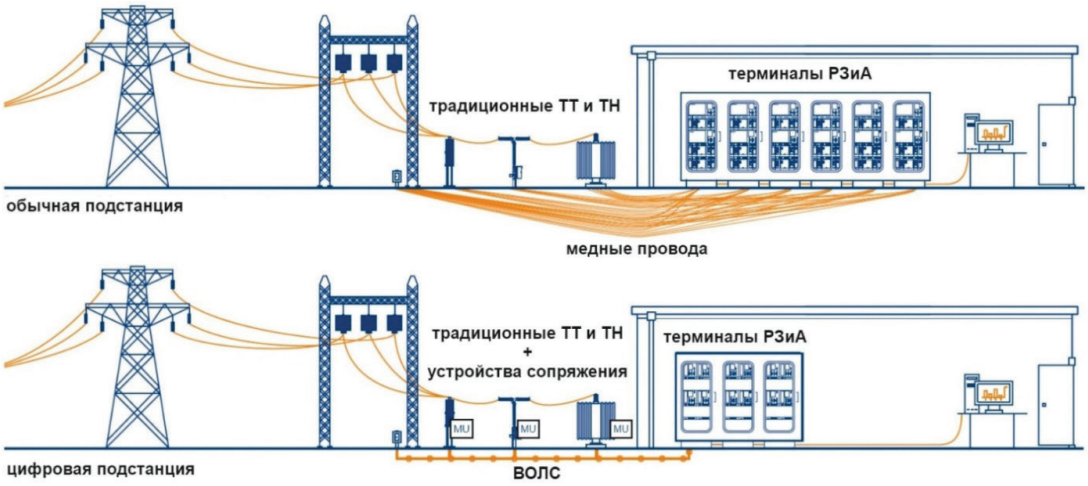

Рисунок 1 – Архитектура цифровой подстанции (ЦПС) [2]

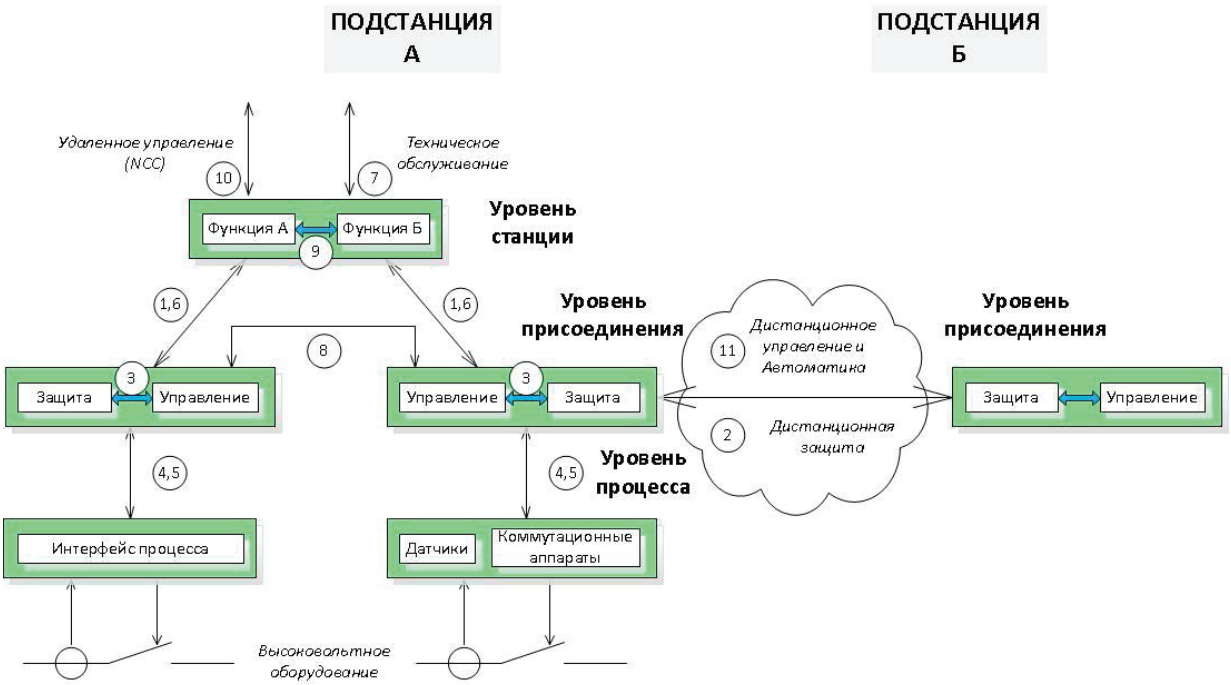

Рисунок 2 – Архитектура системы связи цифровой подстанции [4]

уровнями присоединения и станции (1) позволяет координировать действия устройств релейной защиты при возникновении аварийных ситуаций [4].

Взаимодействие между уровнем присоединения одного объекта и уровнем присоединения смежного объекта (2) обеспечивает согласованную работу защит на соседних подстанциях. Внутри уровня присоединений осуществляется передача данных между терминалами защиты и автоматики (3), что необходимо для реализации локальных функций управления. От измерительных преобразователей уровня процесса устройства уровня присоединений получают мгновенные значения тока и напряжения (4), которые передаются по цифровым каналам связи в формате Sampled Values**.** Обратный обмен сигналами между оборудованием уровня процесса и уровнем присоединений (5) связан с управлением коммутационными аппаратами – выключателями, разъединителями и приводами. Между уровнем присоединений и станционным уровнем выполняется передача управляющих сигналов (6), что обеспечивает централизованное управление и визуализацию данных.

Обмен данными между станционным уровнем и удалённым рабочим местом инженера (7) используется для анализа, диагностики и конфигурирования устройств. Также возможен прямой обмен данными между присоединениями одной подстанции (8), который применяется для быстродействующих функций, например оперативной блокировки. Внутри станционного уровня (9) осуществляется взаимодействие между серверами, автоматизированными рабочими местами операторов и подсистемами АСУ ТП.

На следующем этапе данные передаются между станционным уровнем и удалённым диспетчерским центром (10), где выполняется мониторинг и управление режимами работы оборудования. Кроме того, реализован обмен сигналами управления между уровнями присоединений различных объектов (11), что позволяет осуществлять совместные функции защиты и автоматики, такие как взаимная блокировка или резервирование.

Подобная организация информационных потоков обеспечивает высокую надёжность и скорость обмена данными внутри подстанции и между объектами энергосистемы.

Структурная схема цифрового двойника. Цифровой двойник представляет собой совокупность виртуальных моделей аналитических алгоритмов и физических данных, поступающих от подстанций и сетевого оборудования [5, 6]. Его состав включает несколько основных блоков: сбор информации, обработка, моделирование, прогнозирование и управление. В основе цифрового двойника лежит база данных наблюдений и слой интерфейсов обеспечивающих интеграцию данных из различных источников, таких как интеллектуальные электронные устройства (IED), счётчики, регистраторы систем релейной защиты и автоматики, АСУ ТП и геоинформационные системы. Результаты анализа поступают в подсистемы планирования ремонтов и оптимизации режимов работы оборудования (рисунок 3).

Цифровые двойники в электроэнергетике можно условно разделить на три типа. *Первый* представляет собой проектную модель**,** применяемую при разработке и пуске оборудования. *Второй* – операционный двойник**,** который отслеживает реальные параметры работы и позволяет анализировать состояние узлов в процессе эксплуатации. *Третий*, интеллектуальный двойник, использует накопленные данные для обучения и уточнения прогнозов технического состояния. Благодаря такому развитию концепции цифровой двойник становится эффективным инструментом, помогающим инженерам принимать более обоснованные решения.

Цикл предиктивного обслуживания. Предиктивное обслуживание основано на непрерывном мониторинге и анализе данных. Система отслеживает отклонения параметров и вычисляет вероятность отказа каждого узла. Если модель прогнозирует превышение допустимого уровня вибрации или нагрева, формируется задание на ремонт либо настройку. В Амурской области такой подход может быть особенно эффективен из-за переменных климатических условий. Двойник учитывает температуру, влажность, нагрузку и старение изоляции, позволяя своевременно принимать меры. Такой подход позволяет существенно снизить риск аварийных ситуаций и ускорить диагностику неисправностей.

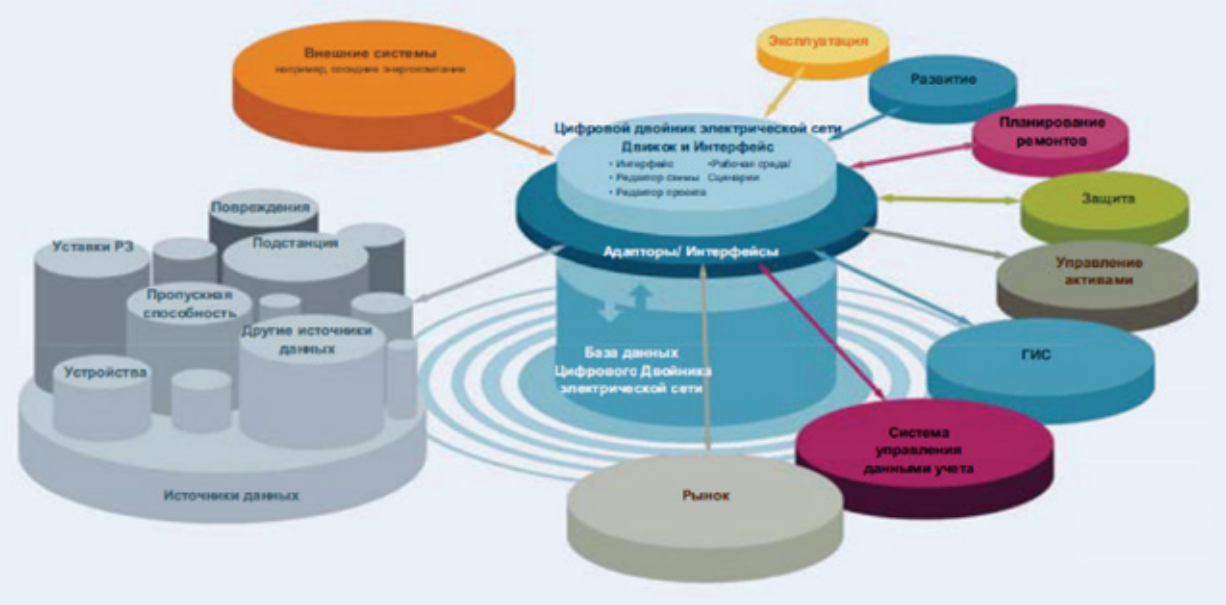

Рисунок 3 – Структурная схема цифрового двойника электрической сети [6]

Таблица 1 – Практический эффект внедрения цифровых двойников

Показатель	До внедрения	После внедрения	Эффект
Среднее число отказов	9–10	4–5	Уменьшение ≈ 45 %
Среднее время диагностики	12 часов	6 часов	В 2 раза быстрее
Внеплановые ремонты	38 %	19 %	Сокращение в 2 раза
Эксплуатационные затраты	100 %	84 %	Экономия ≈ 16 %

Практический эффект внедрения. Анализ отечественных пилотных проектов показывает, что использование цифровых двойников подстанций 220 кВ позволяет повысить коэффициент готовности оборудования, сократить количество внеплановых ремонтов и снизить время диагностики неисправностей почти в два раза [7, 8]. Эксплуатационные затраты при этом уменьшаются в среднем на 15–20 %, что подтверждает эффективность перехода от традиционных методов обслуживания к интеллектуальным системам предиктивного управления техническим состоянием оборудования (таблица 1).

Интеграция и перспективы развития. Цифровые двойники подстанций 220 кВ постепенно интегрируются в общие платформы управления энергосистемой, формируя единое цифровое пространство Smart Grid. Такая интеграция обеспечивает непрерывный обмен данными между объектами, автоматизацию процессов обслуживания и повышение общей надёжности электросетей. В перспективе развитие технологий направлено на объединение локальных цифровых моделей в региональные экосистемы, где предиктивные алгоритмы смогут анализировать состояние оборудования, оптимизировать режимы работы и повышать эффективность управления энергосистемой в целом. Подобные решения уже апробируются в ряде региональных энергосистем России, включая объекты Дальнего Востока, что подтверждает практическую реализуемость концепции Smart Grid в отечественных условиях эксплуатации

Типология и функциональные возможности цифровых двойников в электроэнергетике. Современные цифровые двойники в электроэнергетике классифицируются по назначению и степени их взаимодействия с физическим объектом. Наиболее важными для обеспечения надёжности подстанционного оборудования считаются информационно-диагностические и предиктивные модели, поскольку именно они влияют на эффективность технического обслуживания и устойчивость работы электроустановок.

Информационно-диагностический цифровой двойник выполняет функции постоянного наблюдения за состоянием оборудования. Он объединяет данные телеметрии, архивных измерений и сигналов релейной защиты, формируя цифровую копию текущего состояния объекта. На основе этой модели анализируются параметры тока, напряжения, температуры и вибрации, выявляются отклонения и ранние признаки износа элементов. Такой двойник выступает как «виртуальная система мониторинга», позволяющая своевременно обнаруживать нештатные режимы и формировать рекомендации для технического персонала.

Предиктивный цифровой двойник является логическим продолжением диагностического подхода. Его основная функция заключается в прогнозировании состояния оборудования и оценке вероятности отказов на определённом временном интервале. В процессе работы применяются статистические зависимости, данные о предыдущих ремонтах, модели старения материалов и алгоритмы машинного обучения. На основании анализа цифровой модели система способна рассчитать оптимальные сроки профилактических мероприятий и предупредить о вероятных неисправностях отдельных узлов. Совместное использование диагностических и предиктивных моделей обеспечивает переход от регламентного обслуживания к концепции обслуживания по фактическому состоянию. Это способствует сокращению внеплановых простоев, снижению эксплуатационных затрат, а также повышает коэффициент готовности оборудования.

Выводы. Использование виртуальных моделей оборудования обеспечивает переход от регламентного обслуживания к управлению по фактическому состоянию, основанному на анализе данных и прогнозировании технических параметров.

Такой подход позволяет повысить прозрачность эксплуатации и снижает риск отказов за счёт раннего выявления отклонений. Цифровые двойники создают условия для оптимизации ремонтов, повышения точности диагностики и рационального распределения эксплуатационных ресурсов. Они формируют новую культуру обслуживания, где решения принимаются на основе объективных показателей, а не только периодичности регламентов.

Поступила: 11.02.2026; рецензирована: 26.02.2026; принята: 02.03.2026.

Литература

1. Цифровой переход в электроэнергетике России / под общ. ред. В.Н. Княгинина и Д.В. Холкина // Экспертно-аналитический доклад. URL: https://www.csr.ru/uploads/2017/09/Doklad_energetika-Web.pdf (дата обращения: 22.01.2026).
2. Как создать двойник электроэнергетического объекта. Часть 1. Sampled Values. URL: https://habr.com/ru/companies/etmc_exponenta/articles/663066/ (дата обращения: 22.01.2026).
3. *Дорофеев И.Н.* Сравнительный анализ надежности архитектурных решений систем релейной защиты с цифровыми вторичными цепями / И.Н. Дорофеев // Пятая Междунар. науч.-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (Сочи, 1–5 июня 2015 г.). С. 1.3-1. URL: http://cigre.ru/activity/conference/relayprotect5/materials/S.1.3.pdf (дата обращения: 22.01.2026).
4. Цифровая подстанция. Структура стандарта МЭК 63850. URL: https://digitalsubstation.com/blog/2012/10/18/struktura-standarta-me-k-61850/ (дата обращения: 22.01.2026).
5. *Курганова Н.В.* Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства / Н.В. Курганова, М.А. Филин [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Vol. 7, No. 5, P. 105–114. ISSN:2307-8162. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/

vnedrenie-tsifrovyh-dvoynikov-kak-odno-iz-klyuchevyh-napravleniy-tsifrovizatsii-proizvodstva/viewer (дата обращения: 22.01.2026).
6. *Моравель В.И.* Возможности использования цифровых двойников в задачах электроэнергетики / В.И. Моравель, В.А. Борисов // Современные научные исследования и инновации. 2022. № 6. URL: https://web.snauka.ru/issues/2022/06/98404 (дата обращения: 21.01.2026).
7. *Романова Е.Е.* Оценка внедрения цифрового двойника в производственный процесс / Е.Е. Романова, Е.В. Гатауллина, И.С. Пелымская. URL:https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/125451/1/978-5-91256-595-3_127.pdf (дата обращения: 21.01.2026).
8. Цифровые двойники – технология, которая меняет производство прямо сейчас. URL: https://techforward.ru/news/cifrovye-dvoyniki (дата обращения: 21.01.2026).