

УДК 621.316

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЛЭП 6-10 КВ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ ДЛЯ ОНЛАЙН-МОНИТОРИНГА

Ахметгареев А.Р., аспирант гр. ЭТа-251, 1 курс
Научный руководитель: Беляевский Р.В., к.т.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Введение

Повышение надежности систем электроснабжения потребителей 6–10 кВ остается одной из ключевых задач современной электроэнергетики, поскольку на этом уровне происходит непосредственная передача электроэнергии значительной части промышленных и технологических потребителей [1]. Для угольных разрезов эта задача приобретает особую значимость, так как воздушные линии 6–10 кВ обеспечивают питание технологического оборудования, отказ которого может приводить не только к перерывам электроснабжения, но и к снижению производственной эффективности всего предприятия.

Одной из характерных проблем распределительных сетей 6–10 кВ является ограниченная наблюдаемость их текущего состояния. На практике это проявляется в недостаточном объеме оперативной информации о состоянии удаленных участков линии, особенно при отсутствии развитой системы телеметрии и автоматизации. В таких условиях поиск повреждений и принятие эксплуатационных решений происходят достаточно медленно, а анализ предаварийных режимов не производится совсем. Все это увеличивает время восстановления электроснабжения и простоев электроприемников [2].

В существующих системах телемеханики на уровне подстанции могут быть доступны [3]:

- телеизмерения;
- телесигналы;
- данные релейной защиты;
- информация о коммутационных состояниях оборудования.

Указанные данные представляют собой наиболее доступную информационную базу для онлайн-мониторинга отходящего присоединения 6–10 кВ. Однако такие измерения характеризуют в первую очередь головной участок сети и не обеспечивают прямого наблюдения состояния всей линии по ее длине. Следовательно, задача онлайн-мониторинга ЛЭП 6–10 кВ не может быть сведена только к сбору телеметрии на подстанции. Для повышения наблюдаемости линии и принятия своевременных эксплуатационных решений требуется дополнительный аналитический уровень, позволяющий интерпретировать ограниченный набор измерений с учетом топологии сети, параметров ее элементов и текущего режима работы. В современной научной литературе

такая постановка задачи все чаще связывается с концепцией цифрового двойника ЛЭП, который объединяет физический объект, цифровую модель, поток эксплуатационных данных, сервисы для расчета и анализа данных для оценивания состояния и поддержки принятия решений.

В таком случае цифровой двойник ЛЭП 6-10 кВ на угольных разрезах должен рассматриваться не как замена существующих средств контроля, а как следующий этап цифровизации электрохозяйства. Это позволяет повысить наблюдаемость линии без необходимости оснащения всей трассы большим количеством полевых датчиков.

Таким образом, представляется актуальным рассмотреть возможность применения цифрового двойника ЛЭП 6–10 кВ на угольных разрезах для решения задач онлайн-мониторинга на основе данных фидеров питающей подстанции. Целью настоящей статьи является обзор существующих подходов к контролю технического состояния, диагностике и режимному мониторингу распределительных сетей 6–10 кВ и обоснование возможности использования концепции цифрового двойника для повышения наблюдаемости сети в условиях ограниченной измерительной инфраструктуры.

Особенности ЛЭП 6–10 кВ и существующие подходы к контролю и мониторингу на угольных разрезах

ЛЭП 6–10 кВ на угольных разрезах обеспечивают питание технологических потребителей, расположенных на большом расстоянии друг от друга, и работают в условиях протяжённой и регулярно меняющейся схемы электропитания. Эксплуатация таких линий осложняется [4]:

- высокой степенью запыленности и загрязнения;
- ветровыми нагрузками;
- воздействием горной техники;
- последствиями буровзрывных работ.

При этом оперативная информация о состоянии сети в основном формируется на уровне подстанции и отходящего фидера, что ограничивает прямую наблюдаемость линии по всей её длине.

Существующие инструменты для контроля и мониторинга ЛЭП 6–10 кВ на угольных разрезах включают [5], [6], [7]:

- традиционные меры технической эксплуатации:
 - плановые и внеплановые осмотры;
 - регламентные испытания;
 - анализ аварийных отключений;
- средства телемеханики, обеспечивающие непрерывный режимный контроль на уровне подстанций и отходящих фидеров.

В системах телемеханики измеряются токи, напряжения, мощности и фиксируются состояния коммутационных аппаратов, что позволяет в режиме реального времени отслеживать эти параметры. Но это даёт косвенную информацию о состоянии удалённых участков линии [8]. Для углублённого контроля состояния применяются дистанционные методы диагностики (датчики на проводах и опорах, оптическая и тепловизионная съёмка трассы ЛЭП), которые

дают детализированную информацию, но требуют развитой полевой инфраструктуры или используются эпизодически [9], [10]. В итоге непрерывный мониторинг режимов в большей степени сосредоточен на уровне подстанции и фидера, тогда как сама линия остаётся лишь частично наблюдаемой, что обосновывает необходимость расчетно-аналитических подходов, использующих данные фидера для оценки состояния ЛЭП 6–10 кВ.

Информационно-аналитическая основа онлайн-мониторинга ЛЭП 6–10 кВ

Информационная база онлайн-мониторинга на уровне фидера подстанции включает [11]:

- телеизмерения;
- телесигналы;
- архивы событий;
- параметрическую модель сети, формируемую:
 - средствами телемеханики;
 - микропроцессорными устройствами ячеек.

Эти системы обеспечивают сбор, передачу, отображение и архивирование данных о текущем режиме работы присоединения, но не дают расчетной оценки состояния ненаблюдаемых участков линии. Для решения этой задачи поверх информационной базы может быть реализован расчетно-аналитический модуль, использующий измерения фидера, топологию сети и параметры ее элементов для оценивания состояния, расчета режимов и выявления аномальных отклонений. Наличие такого модуля отличает систему онлайн-мониторинга на основе цифрового двойника от SCADA-системы.

Возможность применения цифрового двойника ЛЭП 6–10 кВ для онлайн-мониторинга

Возможность применения цифрового двойника ЛЭП 6–10 кВ для онлайн-мониторинга целесообразно рассматривать в рамках современной пятимерной архитектуры цифрового двойника, включающей физическую сущность, виртуальную сущность, данные, сервисы и связь между ними [12]. Применительно к условиям угольных разрезов физическую сущность образуют подстанционное оборудование, ЛЭП 6–10 кВ, секционные ячейки, приключательные пункт и электроприемники. Виртуальная сущность представляет собой топологическую и параметрическую модель сети, дополненную расчетными моделями режимов и возможных повреждений. Данные цифрового двойника формируются на основе телеизмерений и телесигналов фидера, архивов событий и осциллограмм терминалов РЗА. Связи в такой архитектуре обеспечивают постоянный обмен данными между физическим объектом, цифровой моделью и оператором, а сервисный слой реализует ключевые функции онлайн-мониторинга:

- оценка состояния линии:
 - реализуется на основе алгоритмов DSSE (Distribution System State Estimation) с использованием данных головного фидера и

- псевдоизмерений нагрузки, что обеспечивает расчет параметров режима в узлах, не оснащенных средствами измерения [13];
- предиктивная аналитика аварийных и предаварийных состояний:
 - основана на анализе телеметрических временных рядов и осциллограмм РЗА для выявления ранних признаков развивающихся повреждений и деградации оборудования [14];
 - выявление аномалий и их интерпретация:
 - осуществляется путем сопоставления фактических аварийных данных с результатами моделирования аварийных режимов в цифровой модели сети [15];
 - поддержка эксплуатационных решений:
 - обеспечивается за счет сценарного моделирования режимов работы сети при изменении топологии, состава нагрузки и условий эксплуатации [16].

В отличие от традиционной SCADA или телемеханической системы, где отображаются непосредственно измеренные параметры, цифровой двойник использует расчетно-аналитический модуль для интерпретации неполной телеметрии и получения дополнительной информации о состоянии всей линии.

Ограничения и перспективы

Ограничения применения цифрового двойника ЛЭП 6–10 кВ для онлайн-мониторинга связаны прежде всего с неполнотой и неоднородностью исходных данных, поскольку измерения на уровне фидера не обеспечивают прямой наблюдаемости всей линии и требуют привлечения расчетных допущений, расчетных значений параметров и актуальной модели сети [17]. Существенным фактором также остается качество топологической и параметрической модели, так как ошибки в схемах снижают точность оценивания состояния и могут искажать результаты аналитики. Для условий угольных разрезов дополнительную сложность создают регулярные изменения схем электроснабжения по мере развития горных работ, из-за чего цифровая модель сети должна регулярно актуализироваться. Практическое внедрение такого подхода также ограничивается необходимостью интеграции разрозненных данных телемеханики, архивов РЗА и расчетных моделей в единую информационно-аналитическую среду [18]. Также применение цифрового двойника не отменяет потребности в натурной диагностике, поскольку расчетно-аналитический модуль позволяет сузить зону поиска дефекта и выявить аномалию режима, но не всегда обеспечивает однозначную идентификацию конкретного повреждения без дополнительных измерений или осмотра.

Заключение

Проведенный обзор показывает, что применение цифрового двойника ЛЭП 6–10 кВ угольных разрезов для онлайн-мониторинга является обоснованным направлением развития существующих систем контроля распределительных сетей. Актуальность такого подхода определяется ограниченной наблюдаемостью ЛЭП 6–10 кВ и наличием на уровне подстанции и фидера исходных данных, которые могут использоваться для расчетно-аналитической оценки

состояния линии. Показано, что в отличие от традиционной телемеханики, обеспечивающей базовый онлайн-мониторинг непосредственно измеряемых параметров, цифровой двойник позволяет повысить информативность такого мониторинга за счет совместного использования топологической и параметрической модели сети с эксплуатационными данными.

Цифровой двойник ЛЭП 6–10 кВ целесообразно рассматривать как информационно-аналитическую надстройку над существующей системой телемеханики, построенную на основе актуальной архитектуры, включающей физический объект, виртуальную модель, данные, сервисы и связи между ними. Для условий угольных разрезов такой подход особенно важен, поскольку схема электроснабжения и конфигурация нагрузки могут изменяться по мере развития горных работ, а сама линия функционирует в сложных эксплуатационных условиях.

Вместе с тем эффективность применения цифрового двойника напрямую зависит от качества исходной информационной базы и степени актуальности модели сети. Существенными ограничениями остаются неполнота измерений, неоднородность данных, необходимость постоянной актуализации схемы электроснабжения и сложность интеграции телемеханики, архивов РЗА и расчетных моделей в единую цифровую среду. Поэтому на современном этапе цифровой двойник ЛЭП 6–10 кВ следует рассматривать не как полностью автономный инструмент, а как перспективное средство поддержки мониторинга и эксплуатационного анализа, эффективность которого возрастает по мере повышения цифровой зрелости системы электроснабжения.

Перспективы дальнейшего развития данного подхода связаны с расширением состава измеряемых параметров, развитием предиктивной аналитики, совершенствованием алгоритмов оценивания состояния и более глубокой интеграцией цифровых моделей в контур оперативного управления электроснабжением. В прикладном отношении это означает переход от фиксации текущего режима к более раннему выявлению признаков аварийных процессов, снижению неопределенности при анализе повреждений и повышению обоснованности принимаемых эксплуатационных решений. Следовательно, применение цифрового двойника ЛЭП 6–10 кВ угольных разрезов может рассматриваться как перспективное направление повышения надежности и управляемости распределительной сети при условии поэтапного формирования достоверной и согласованной информационной базы.

Список литературы

1. Шахнович, Д. И. Основные проблемы распределительных сетей 6–10 кВ / Д. И. Шахнович // III Всероссийская с международным участием молодёжная конференция «Бутаковские чтения». - Томск, 2023. - С. 63–66.
2. Горюнов, А. Г. Телеконтроль и телеуправление : учебное пособие / А. Г. Горюнов, С. Н. Ливенцов, А. А. Лысенко. - Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. - 130 с.

3. Околоков, Р. В. Цифровые технологии в энергетике : учебное пособие / Р. В. Околоков, А. А. Тимофеева. - Санкт-Петербург : Политех-Пресс, 2025.
4. Электрофикация открытых горных работ [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.geokniga.org/books/18920> (дата обращения: 09.05.2026).
5. Телемеханика распределительных сетей 6–10 кВ [Электронный ресурс]. - URL: <https://moxa.ru.com/blogs/solutions/sistema-telemehaniki-raspredelitelnyh-setey-6-10-kv> (дата обращения: 09.05.2026).
6. Инструкция по эксплуатации ВЛ 6–10 кВ [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.ess-ltd.ru/elektro/raspredelitelnye-seti/instruktsiya-vl-6-10-kv/> (дата обращения: 09.05.2026).
7. Телемеханика [Электронный ресурс] // СИКОН. - URL: <https://www.sicon.ru/reshenie/telemekhanika/> (дата обращения: 09.05.2026).
8. Старцев, А. П. Система мониторинга участков электрических сетей [Электронный ресурс] / А. П. Старцев. - URL: <https://eepir.ru/article/sistema-monitoringa-uchastkov-elektricheskikh-setej/> (дата обращения: 09.05.2026).
9. Система мониторинга участков электрических сетей [Электронный ресурс]. - URL: <https://eepir.ru/article/sistema-monitoringa-uchastkov-elektricheskikh-setej/> (дата обращения: 09.05.2026).
10. Системы телемеханики, АСДУ, ССПИ, СОТИ, АССО [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.energsoyuz.spb.ru/ru/content/sistemy-telemehaniki-asdu-sspi-soti-asso> (дата обращения: 09.05.2026).
11. Tao et al. Five-Dimension Digital Twin Modeling and Its Key Technologies [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.sciencegate.app/document/10.1016/b978-0-12-817630-6.00003-5> (дата обращения: 09.05.2026).
12. Primadianto, A. A Review on Distribution System State Estimation / A. Primadianto, C. N. Lu // IEEE Transactions on Power Systems. - 2017.
13. Куликов, А. Л. Методы определения места повреждения ЛЭП при замыканиях на землю.
14. Куликов, А. Л. Повышение точности алгоритмов определения места повреждения ЛЭП 6–35 кВ / А. Л. Куликов, В. Ю. Осокин.
15. Куликов, А. Л. Повышение точности алгоритмов определения места повреждения ЛЭП 6–35 кВ / А. Л. Куликов, В. Ю. Осокин.
16. Digital twin advanced distribution management systems (ADMS) and methods : patent US 11881713 B2 / Jay Tillay Johnson, Rachid Darbali-Zamora, Adam Summers, Clifford W. Hansen; assignee National Technology & Engineering Solutions of Sandia, LLC. - Patented Jan. 23, 2024.
17. Цифровой двойник ЛЭП [Электронный ресурс]. - URL: <https://skyeermap.com/blog/cases/digital-dvoynik-lep> (дата обращения: 09.05.2026).

18. Цифровой двойник ЛЭП [Электронный ресурс] // SkyerMap. - URL: <https://skyeermap.com/blog/cases/digital-dvoinik-lep/> (дата обращения: 09.05.2026).