

А.Р. АХМЕТГАРЕЕВ, аспирант гр. ЭТа-251 (КузГТУ)
Научный руководитель Р.В. БЕЛЯЕВСКИЙ, к.т.н., доцент (КузГТУ)
г. Кемерово

ОБЗОР КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ

Вопросы энергоснабжения и повышения энергоэффективности в промышленности остаются приоритетными направлениями развития технологического потенциала Российской Федерации. Согласно Указу Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» [1], одной из ключевых задач является достижение к 2030 году «цифровой зрелости» ключевых отраслей экономики, включая энергетику и добывающую промышленность. Цифровая трансформация электрических сетей промышленных предприятий предоставляет возможность для оптимизации режимов работы, снижения потерь мощности и повышения надежности электроснабжения [2].

Системы электроснабжения угольных разрезов характеризуются рядом особенностей, обусловленных спецификой открытых горных работ [3]:

- передвижной характер работы оборудования с перемещением по фронту карьера;
- работа электрооборудования в условиях атмосферных осадков, перепадов температур и ветровых нагрузок;
- территориальная удаленность электроприемников от трансформаторных подстанций;
- высокая установленная мощность основного технологического оборудования (экскаваторы, насосное оборудование систем дренажа и водоснабжения);
- наличие мощных электродвигателей с переменной нагрузкой и тяжелыми переходными режимами при пуске и остановке;
- наличие особых требований к надежности и безопасности эксплуатации электрохозяйства.

Указанные особенности обуславливают специфику протекания электрических процессов в сетях угольных разрезов. Протяженные линии электропередачи, использование мощного асинхронного оборудования и переменный характер нагрузок создают условия для возникновения множества проблем.

В электросетях угольных разрезов присутствуют следующие проблемы:

- значительные потери мощности и отклонение напряжения на удалённых участках сети, связанные с протяжённостью линий электропередачи и переменной нагрузкой оборудования [4, 5];
- низкое качество электроэнергии вследствие формирования высших гармоник тока и напряжения, что приводит к нарушению режимов работы и сокращению срока службы электроустановок [6, 7];
- износ и устаревание оборудования из-за длительной эксплуатации в тяжелых условиях и роста мощности, что увеличивает риск отказов [4, 8].

Согласно ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [9], цифровой двойник представляет собой систему, состоящую из цифровой модели объекта и двусторонних информационных связей с объектом (при наличии объекта) и (или) его составными частями. Майкл Гривс, впервые предложивший концепцию цифрового двойника в 2002 году [10], определяет его как «набор виртуальных информационных конструкций, который полностью описывает потенциальное или фактическое промышленное изделие от его атомарных функций до геометрии». Ключевой особенностью цифрового двойника является наличие двусторонней обратной связи между виртуальным компонентом системы и реальным объектом, что позволяет осуществлять непрерывную синхронизацию между физическим и цифровым пространствами [11].

Для электрических сетей цифровой двойник представляет собой комплексную виртуальную модель, позволяющую решать следующие задачи [12, 13, 14]:

- расчет и анализ установившихся режимов работы электрических сетей;
- расчет токов короткого замыкания и проверка селективности защиты;
- анализ качества электроэнергии и выявление причин отклонения параметров;
- оптимизация режимов работы сети с учетом текущей нагрузки и состояния оборудования;
- планирование развития сети и оценка влияния подключения новых потребителей;
- обучение оперативного персонала работе в различных режимах.

Для моделирования электрических сетей промышленных предприятий применяется специализированное программное обеспечение [15, 16, 17], например:

- PSS SINCAL компании Siemens – система для создания цифровых двойников с детальной информацией о технических параметрах оборудования и географическом расположении элементов сети;

- ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) – программный комплекс для анализа электрических сетей, расчета установившихся режимов и токов короткого замыкания;

- DIgSILENT PowerFactory – универсальная платформа для комплексных расчетов и анализа электроэнергетических систем.

В рамках проведенной работы была создана модель системы электроснабжения угольного разреза, включающая трансформаторы ГПП, секции шин, воздушные и кабельные линии электропередачи, секционные ячейки, переключательные пункты и сами электроприемники. Был выполнен расчет установившегося режима работы сети. Анализ результатов расчета позволил выявить следующие критические параметры:

- отклонение напряжения свыше 10 процентов от номинального на секциях шин ГПП и в самых удаленных точках сети на электроприемниках;

- большое количество реактивной мощности, циркулирующей в сетях и обусловленной наличием мощного асинхронного оборудования;

- большие потери мощности в линиях электропередачи, связанные с высокими сопротивлениями и протяженностью сети.

На основе выявленных критических параметров были разработаны и реализованы следующие решения:

- компенсация реактивной мощности путем установки компенсирующих устройств у электроприемников для снижения количества реактивной мощности в системе;

- перераспределение нагрузки между секциями шин для выравнивания напряжений и уменьшения потерь.

После внедрения предложенных решений были достигнуты следующие улучшения:

- напряжение на секциях шин ГПП и электроприемниках увеличилось на 12 процентов, что позволило достичь нормативных значений ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия»;

- потери мощности в воздушных линиях уменьшились на 30 процентов.

Полученные результаты демонстрируют эффективность применения цифровых методов анализа электрических сетей для выявления узких мест и обоснования решений по улучшению режимов. Перспективными направлениями развития проекта являются анализ переходных процессов при запуске и отключении мощного оборудования, сверка расчетных данных модели с фактическими измерениями на сети, а также интеграция модели с информационными системами предприятия для оперативного

управления электроснабжением. Это позволит повысить достоверность модели, реализовать основной принцип цифрового двойника – двусторонний обмен данными между реальной системой и её цифровой моделью, и расширить возможности её применения при планировании развития сети.

Список литературы:

1. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» // Консультант Плюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_475991/.
2. Как цифровой двойник повышает надежность и энергоэффективность // Prostor Lab. – 2024. – 13 марта. URL: <https://prostorlab.com/2024/03/13/>.
3. Щуцкий, В. И. Электрификация открытых горных работ: учебник / В. И. Щуцкий. – Москва: Московский государственный горный университет, 2014. – 528 с.
4. Волотковский, С. А. Электроснабжение угольных шахт: учебное пособие / С. А. Волотковский, В. И. Раковский. – Кемерово, 2015. – 180 с.
5. Об особенностях компенсации реактивной мощности в электрических сетях угольных разрезов // ГЕКОМС. – 2021. – 30 июля. URL: <https://gekoms.org/2021/07/30/ob-osobennostyah-kompensacii-reaktivnoj-moshhnosti-v-elektricheskikh-setyah-ugolnyh-razrezov/>.
6. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных шахт и разрезов // Диссертация, МИСиС. URL: <https://www.dissercat.com/content/povyshenie-kachestva-elektricheskoi-energii-v-podzemnykh-elektricheskikh-setyakh-vysokoproiz>.
7. К вопросу повышения показателей качества электроэнергии в электротехнических системах угольных шахт // CyberLeninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-povysheniya-pokazateley-kachestva-elektroenergii-v-elektrotehnicheskikh-sistemah-ugolnyh-shaht>.
8. Проблемы и пути решения вопросов надежности внешнего электроснабжения угольных шахт // CyberLeninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problems-i-puti-resheniya-voprosov-nadezhnosti-vneshnego-elektrosnabzheniya-ugolnyh-shaht>.
9. ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – Москва: Стандартинформ, 2021.
10. Что нам может дать цифровой двойник // Control Engineering Россия. URL: <https://controleng.ru/innovatsii/cifrovye-dvojniki/chto/>.
11. Картоотека: цифровой двойник // IQ Media. – 2024. – 11 февраля. URL: <https://iq-media.ru/archive/896065069>.

12. Цифровой двойник электростанции // Info-Pro. – 2024. – 19 июня. URL: <https://www.info-pro.ru/mediatsentr/blog/tsifrovoy-dvoynik-elektrostantsii/>.

13. Попали в сети: как работают цифровые двойники в энергетике // RGTR. – 2019. – 5 ноября. URL: <https://rgtr.ru/press-tsentr/1016>.

14. Комплексное обследование и создание цифрового двойника электрических сетей // Siemens. URL: <https://www.siemens-pro.ru/articles/siemens-articles-80.html>.

15. Компания «Сименс» представила концепции цифрового двойника для энергетики // EnergoSMI. – 2019. – 23 апреля. URL: <https://energosmi.ru/archives/34945>.

16. DIgSILENT PowerFactory – единая платформа для расчета электрических сетей // РТСофт. URL: <https://www.rtsoft.ru/project-cards/sgt/PowerFactory/>.

17. EnergyCS – модули для расчета режимов электрических сетей // BimAcad. – 2024. – 18 октября. URL: <https://bimacad.ru/produkty/energycs/>.

Информация об авторах:

Ахметгареев Альберт Риннатович, аспирант гр. Эта-251, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, alb3008@yandex.ru

Беляевский Роман Владимирович, к.т.н., доцент, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, brv.egpp@kuzstu.ru