

УДК 621.3

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ INNOVATIVE MEASUREMENT METHODS IN THE ENERGY SECTOR

Сидоренко И.С.

Научный руководитель – Ринговский И.А., ассистент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

eie@bntu.by

Sidorenko I.

Supervisor – Ringovsky I., Assistant

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. Статья даёт обзор ключевых инновационных методов, применяемых для мониторинга и управления энергетическими системами, описывая их принципы работы и области применения. PMU обеспечивают синхронные измерения фазовых с высокой частотой, волоконно-оптические датчики – распределённый мониторинг температуры и деформации, а лидар – бесконтактную оценку ветрового потенциала. Инспекции линий с помощью дронов и тепловизоров повышают надёжность, цифровые двойники и АМІ выводят аналитику и управление на новый уровень, а NILM позволяет безвредно дисагрегировать нагрузку без установки дополнительных сенсоров.

Abstract. The article gives an overview of key innovative methods used for monitoring and control of power systems, describing their operating principles and applications. PMUs provide high frequency synchronous phasor measurements, fibre optic sensors provide distributed temperature and strain monitoring, and lidar provides non-contact wind potential assessment. Line inspections with drones and thermal imagers increase reliability, digital twins and AMIs take analytics and control to a new level, and NILM enables harmless load disaggregation without installing additional sensors.

Ключевые слова: фазориметрия, цифровые двойники, энергодисагрегация, волоконно-оптические датчики, LiDAR, беспилотники, тепловизионная инспекция линий электропередачи

Keywords: Phasor Measurement Units, digital twins, energy disaggregation, fibre optic sensors, LiDAR, drones, thermal imaging inspection of power transmission lines.

Введение

Точная и своевременная информация о состоянии энергетических систем критична для их эффективного управления и надёжности. В условиях роста интеграции возобновляемых источников и децентрализации производства данные необходимо собирать в реальном времени, охватывая широкие территории и разнообразные параметры. В статье рассматриваются новейшие методы измерений, включая фазориметры (PMU), волоконно-оптические датчики, лидар для оценки ветрового потенциала, инспекции линий электропередачи с помощью беспилотников и тепловизоров, цифровые двойники, продвинутые системы интеллектуального учёта (AMI) и безвредный мониторинг нагрузки (NILM). В со-

вокупности эти технологии создают основу для «умных сетей», способных адаптироваться к динамике нагрузки и обеспечивать оптимальное использование ресурсов.

Основная часть

1. Фазориоометрия (Phasor Measurement Units)

Phasor Measurement Unit (PMU) – это устройство, измеряющее так называемый фазор, который содержит информацию о величине и угле фазы переменного тока или напряжения в конкретной точке сети. Используя глобальную навигационную спутниковую систему (GPS), PMU проставляют точные временные метки каждому измерению, что позволяет синхронизировать данные с разных точек сети и получать широкозонную картину состояния энергосистемы

1.1. Применение и преимущества

синхронный мониторинг. PMU обеспечивают измерения с частотой до 30–60 выборок в секунду, что позволяет оперативно обнаруживать нестабильность и проводить анализ переходных процессов.

контроль частоты и угловой стабильности. Приборы используются для оценки угла между фазами генераторов и контроля угловых расстройств, предотвращая аварии.

интеграция в WAMS. Широкомасштабные системы мониторинга (Wide Area Monitoring Systems) на основе PMU повышают надёжность и гибкость управления сетями.

2. Волоконно-оптические датчики

Волоконно-оптические датчики используют физические свойства света в оптическом волокне для измерения температуры, деформации, ускорения и других параметров по всей длине кабеля. Благодаря возможности размещать сотни точек измерений на одном волокне, такие системы идеальны для структурного мониторинга и контроля состояния инфраструктуры.

2.1. Гибридные решения «питание-чувствование»

Недавние исследования демонстрируют возможность одновременной передачи энергии и выполнения распределённого акустического зондирования в одном волокне (Power-over-Fiber + DAS), что упрощает инфраструктуру и снижает издержки.

3. Лидар в ветроэнергетике

LiDAR (Light Detection and Ranging) применяется для бесконтактного измерения скорости и направления ветра с помощью лазерных импульсов. Наземные лидары посылают лучи и анализируют доплеровское смещение обратно рассеянного света, что позволяет получать профиль ветра на различных высотах.

3.1. Банковская оценка ветрового ресурса

Вертикальные лидары признаны «банковыми» инструментами для оценки ветрового потенциала при развитии ветропарков, так как они дают надёжные данные и быстро разворачиваются на площадке

4 Беспилотники и тепловая инспекция

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с тепловизионными камерами используются для инспекции линий электропередачи и подстанций. Тепловизоры регистрируют инфракрасное излучение, выявляя участки перегрева, что

позволяет обнаружить повышенное контактное сопротивление и аномалии ещё до возникновения отказа.

4.1. Практические кейсы

Исследователи ORNL продемонстрировали, что дроны с камерами и дополнительными датчиками могут эффективно и безопасно обследовать линии электропередачи, сокращая затраты и время на инспекцию.

5. Цифровые двойники (Digital Twins)

Digital Twin – виртуальная копия физического объекта или процесса, непрерывно обновляемая данными в реальном времени. Энергетические цифровые двойники способствуют повышению эффективности и надёжности систем за счёт моделирования различных сценариев работы и прогнозирования неисправностей.

5.1. Энергоэффективность и управление

Исследование MDPI подчёркивает, что цифровые двойники позволяют более точно и проактивно управлять потреблением энергии, что ведёт к снижению затрат и уменьшению выбросов CO₂.

6. Продвинутая инфраструктура интеллектуального учёта (AMI)

Advanced Metering Infrastructure (AMI) – интегрированная система «умных» счётчиков, сетей связи и ПО для двустороннего обмена данными между потребителем и поставщиком энергии.

6.1. Эволюция AMI и «AMI 2.0»

Новая генерация AMI (AMI 2.0) включает вычисления на периферии сети (edge computing), что обеспечивает почти мгновенный анализ данных и повышает устойчивость сети при интеграции возобновляемых источников.

6.2. БПЛА для сбора показаний

В качестве передового решения предлагаются системы на основе роя беспилотников для автономного и энергоэффективного сбора данных со «умных» счётчиков в труднодоступных районах.

7. Безвредный мониторинг нагрузки (NILM)

Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) или энергодисагрегация анализирует совокупные сигналы тока и напряжения и определяет индивидуальное потребление каждого прибора без установки дополнительных датчиков.

7.1. Преимущества и применение

NILM позволяет дешёво и эффективно отслеживать эксплуатацию бытовых и промышленных объектов, поддерживать программы по снижению нагрузок и оптимизировать энергопотребление.

Заключение

Современная энергетика всё активнее внедряет инновационные методы измерений, которые повышают устойчивость, надёжность и эффективность систем. Синхронные фазореоометры, распределённые оптические и лазерные технологии, дроны, цифровые двойники, передовые счётчики и NILM создают основу «умных» энергосистем будущего. Ожидается дальнейшее слияние этих методов с искусственным интеллектом и Интернетом вещей, что откроет новые горизонты для мониторинга и управления энергопотреблением.

Литература

1. Rodriguez, J., & Singh, M. «Phasor Estimation and Modelling Techniques of PMU – A Review.» *Procedia Computer Science*, 2017.
2. Zeni, L., & Kozlowski, T. “Distributed Optical Fibre Sensors for Infrastructure Monitoring.” *Measurement*, 2021.
3. Савкова, Е. Н. , Ринговский, И. А. Электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Метрология, стандартизация и оценка соответствия» – 2025.
4. Lee, J., & Kim, S. «Online Non-Intrusive Load Monitoring: A Review.» *Electric Power Systems Research*, 2024.
5. Richards, J., et al. «Protecting Electric Grid Health with Drone-Based Power Line Inspection.» *Oak Ridge National Laboratory News*, August 27, 2024.