

УДК 621.31

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕТРОЛОГИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭНЕРГОСИСТЕМ*Махмудов Санжар Йулдашали угли**Старший преподаватель кафедры «Электрических технологий» в Кокандском государственном Университете**Юнусова Мохира Рустам кизи**Ассистент кафедры «Системы энергоснабжения» в Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада аль-Хоразми**tohirabidova4@gmail.com*

Аннотация: В статье раскрывается современная взаимосвязь метрологии и электроэнергетики с учётом цифровизации энергосистем, внедрения интеллектуальных измерительных комплексов и автоматизированных систем учёта электроэнергии. Показано, что метрологическое обеспечение является ключевым фактором повышения надёжности, энергоэффективности и экономической прозрачности электроэнергетических систем. Приведены схемы, таблицы и практические примеры применения метрологии в электроэнергетике.

Ключевые слова: метрология, электроэнергетика, Smart Grid, измерение электрической энергии, интеллектуальные счётчики, стандартизация.

ЭНЕРГОСИСТЕМАЛАРДЫ САНАРИПТЕШТИРҮҮ ШАРТЫНДА МЕТРОЛОГИЯ МЕНЕН ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКАНЫН ӨЗ АРА БАЙЛАНЫШЫ*Махмудов Санжар Йулдашали уулу**Коканд мамлекеттик университетинин**«Электр технологиялары» кафедрасынын улук окутуучусу**Юнусова Мохира Рустам кызы**Мухаммад ал-Хоразмий атындагы Ташкент маалымат**технологиялары университетинин «Энергия менен**камсыздоо системалары» кафедрасынын ассистенти*

Аннотация: Макалада энергосистемаларды санариптештирүү шартында метрология менен электроэнергетиканын заманбап өз ара байланышы каралат. Интеллектуалдык өлчөө комплекстерин жана электр энергиясын

автоматташтырылган эсепке алуу системаларын киргизүү маселелери талданат. Метрологиялык камсыздоо электроэнергетикалык системалардын ишенимдүүлүгүн, энергияны үнөмдөө деңгээлин жана экономикалык ачык-айкындуулугун жогорулатуунун негизги фактору экендиги көрсөтүлөт. Макалада метрологиянын электроэнергетикадагы колдонулушуна байланыштуу схемалар, таблицалар жана практикалык мисалдар келтирилген.

Ачык сөздөр: метрология, электроэнергетика, Smart Grid, электр энергиясын өлчөө, интеллектуалдык эсептегичтер, стандартташтыруу.

INTERRELATION BETWEEN METROLOGY AND ELECTRIC POWER ENGINEERING UNDER THE CONDITIONS OF ENERGY SYSTEM DIGITALIZATION

Makhmudov Sanjar Yuldashali ugli

*Senior Lecturer of the Department of Electrical Technologies,
Kokand State University*

Yunusova Mohira Rustam qizi

*Assistant of the Department of Power Supply Systems,
Tashkent University of Information Technologies
named after Muhammad al-Khwarizmi*

Abstract: The article examines the modern interrelation between metrology and electric power engineering in the context of energy system digitalization. The implementation of intelligent measuring complexes and automated electricity metering systems is analyzed. It is shown that metrological support is a key factor in improving the reliability, energy efficiency, and economic transparency of electric power systems. Schemes, tables, and practical examples illustrating the application of metrology in electric power engineering are presented.

Keywords: metrology, electric power engineering, Smart Grid, electrical energy measurement, smart meters, standardization.

Введение

На современном этапе развития электроэнергетики наблюдается переход от традиционных централизованных энергосистем к интеллектуальным и цифровым энергетическим сетям. В этих условиях точность и достоверность измерений электрических величин приобретают критически важное значение. Метрология обеспечивает единство измерений, контроль погрешностей и

сопоставимость данных, на основе которых принимаются технические и экономические решения.

Актуальность взаимосвязи метрологии и электроэнергетики сегодня обусловлена следующими факторами: ростом объёмов потребления электроэнергии; внедрением возобновляемых источников энергии; развитием интеллектуальных систем учёта и управления; ужесточением требований к качеству электроэнергии.

Современная роль метрологии в электроэнергетике

В условиях цифровизации электроэнергетических систем роль метрологии существенно возрастает, поскольку точность, сопоставимость и достоверность измерительных данных напрямую влияют на устойчивость и эффективность функционирования энергосистем. Современная метрология в электроэнергетике выходит за рамки традиционных измерений электрических величин и охватывает весь жизненный цикл измерительной информации — от разработки и калибровки средств измерений до интеллектуальной обработки, передачи, хранения и анализа данных в цифровых платформах управления энергосистемами.

На этапе проектирования и внедрения средств измерений метрология обеспечивает соответствие приборов международным стандартам (IEC, IEEE, ISO), а также требованиям к точности, надёжности и электромагнитной совместимости. Особое значение приобретает метрологическое сопровождение интеллектуальных измерительных устройств, таких как цифровые трансформаторы тока и напряжения, интеллектуальные счётчики (Smart Meters), датчики качества электроэнергии и измерительные модули, интегрированные в системы Smart Grid.

Основными объектами метрологического контроля в электроэнергетике являются:

- **электрическое напряжение**, измеряемое с высокой точностью для обеспечения корректной работы электрооборудования и предотвращения аварийных режимов;
- **сила тока**, контроль которой необходим для оценки нагрузочной способности сетей и защиты от перегрузок;
- **активная, реактивная и полная мощность**, определяющие энергетическую эффективность и экономические расчёты между производителями и потребителями электроэнергии;
- **электрическая энергия**, являющаяся базовой величиной коммерческого учёта и финансовых взаиморасчётов;

- **частота и показатели качества электроэнергии** (коэффициенты искажений, отклонения напряжения, несимметрия фаз), критически важные для стабильности энергосистем и интеграции возобновляемых источников энергии.

С развитием автоматизированных систем учёта электроэнергии (АСКУЭ) и систем мониторинга в реальном времени метрология становится основой достоверного цифрового двойника энергосистемы. Высокоточные измерения позволяют реализовывать прогнозирование нагрузок, оптимизацию режимов работы, диагностику оборудования и предотвращение аварийных ситуаций. При этом возрастает значение программной метрологии, включающей алгоритмы коррекции погрешностей, синхронизацию измерений по времени (PMU, synchrophasors) и защиту измерительных данных от искажений и киберугроз.

Таким образом, современная метрология является неотъемлемым элементом цифровой электроэнергетики, обеспечивая надёжность измерений, прозрачность энергетических рынков и повышение общей энергоэффективности. В условиях перехода к интеллектуальным энергосистемам именно метрологическое обеспечение формирует основу для принятия обоснованных технических и управленческих решений.

Таблица 1 – Основные измеряемые величины в электроэнергетике

Измеряемая величина	Средства измерений	Практическое значение
Напряжение	Вольтметры, АЦП	Контроль режимов сети
Ток	Трансформаторы тока	Защита и учёт
Мощность	Ваттметры, анализаторы	Энергоэффективность
Электрическая энергия	Счётчики энергии	Коммерческий учёт
Частота	Частотомеры	Стабильность энергосистем

Коммерческий учёт электроэнергии и метрология

Коммерческий учёт электроэнергии является одной из наиболее чувствительных и ответственных областей электроэнергетики, поскольку даже незначительные погрешности измерений напрямую отражаются на финансовых расчётах между поставщиками, сетевыми организациями и конечными потребителями электроэнергии. В условиях либерализации энергетических рынков и цифровизации энергосистем достоверность измерительной информации приобретает стратегическое значение.

Современные автоматизированные системы коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ) представляют собой сложные многоуровневые комплексы, включающие интеллектуальные счётчики, измерительные трансформаторы тока и напряжения, устройства сбора и передачи данных, а

также программно-аппаратные платформы обработки информации. Для обеспечения корректной работы таких систем требуется строгий метрологический контроль на всех этапах их жизненного цикла — от производства и первичной поверки средств измерений до периодической калибровки и верификации измерительных данных в процессе эксплуатации.

Особое внимание в коммерческом учёте уделяется обеспечению заданных классов точности измерений электрической энергии и мощности, синхронизации измерений по времени, а также учёту влияния внешних факторов, таких как температурные колебания, электромагнитные помехи и несимметрия нагрузок. Нарушение метрологических требований может приводить к систематическим ошибкам учёта, экономическим потерям и возникновению спорных ситуаций между участниками энергетического рынка.

В условиях внедрения интеллектуальных счётчиков и цифровых каналов передачи данных возрастает роль программной метрологии, направленной на контроль алгоритмов обработки измерительной информации, защиту данных от несанкционированного доступа и обеспечение их юридической значимости. Применение международных стандартов (IEC 62052, IEC 62053, ISO/IEC 17025) позволяет обеспечить сопоставимость результатов измерений и доверие к данным коммерческого учёта на национальном и международном уровнях.

Пример практической ситуации

Практическая значимость метрологического обеспечения коммерческого учёта электроэнергии наглядно проявляется при анализе влияния погрешностей измерений на экономические показатели. Так, если относительная погрешность счётчика электрической энергии составляет всего **1%**, то при годовом потреблении крупного промышленного предприятия в объёме **10 млн кВт·ч** суммарная ошибка учёта может достигать **100 000 кВт·ч**. При действующих тарифах на электроэнергию такая величина погрешности приводит к существенным финансовым потерям как для потребителя, так и для энергоснабжающей организации, а также может стать причиной коммерческих споров.

В условиях цифровизации энергосистем подобные риски усиливаются вследствие роста объёмов измерительных данных и увеличения количества участников рынка электроэнергии. Это требует применения средств измерений повышенной точности, регулярной поверки и калибровки приборов, а также использования алгоритмов автоматического контроля корректности измерений.

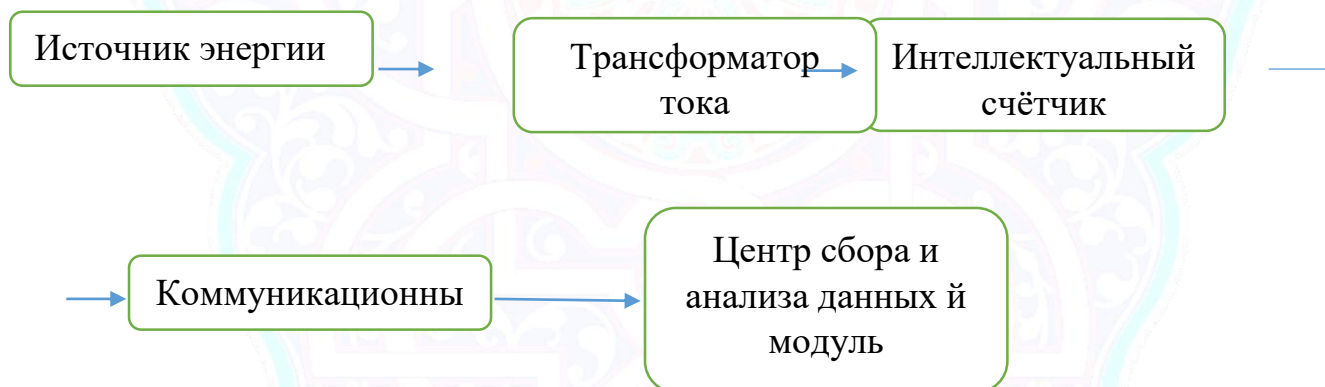
Типовая система коммерческого учёта электроэнергии включает несколько функциональных уровней. На первичном уровне располагаются **измерительные трансформаторы тока и напряжения**, обеспечивающие

безопасное и точное преобразование параметров сети. Далее измерительная информация поступает на **интеллектуальные счётчики электроэнергии**, осуществляющие расчёт активной и реактивной энергии, мощности и показателей качества электроэнергии. Счётчики подключаются к **устройствам сбора и передачи данных (УСПД)**, которые обеспечивают агрегацию, временную синхронизацию и передачу данных по защищённым каналам связи (PLC, GSM, Ethernet, IoT).

На верхнем уровне системы функционирует **серверная и программная инфраструктура АСКУЭ**, предназначенная для хранения, анализа и визуализации измерительных данных, формирования отчётности и обеспечения коммерческих расчётов. В рамках метрологического обеспечения проводится контроль целостности данных, анализ отклонений, выявление нештатных режимов и оценка неопределённости измерений.

Практический пример показывает, что даже малые погрешности измерений при больших объёмах потребления приводят к значительным экономическим последствиям, а типовая схема системы учёта электроэнергии демонстрирует ключевую роль метрологии в обеспечении точности, надёжности и прозрачности коммерческого учёта в современных цифровых энергосистемах.

Схема типовой системы учёта электроэнергии



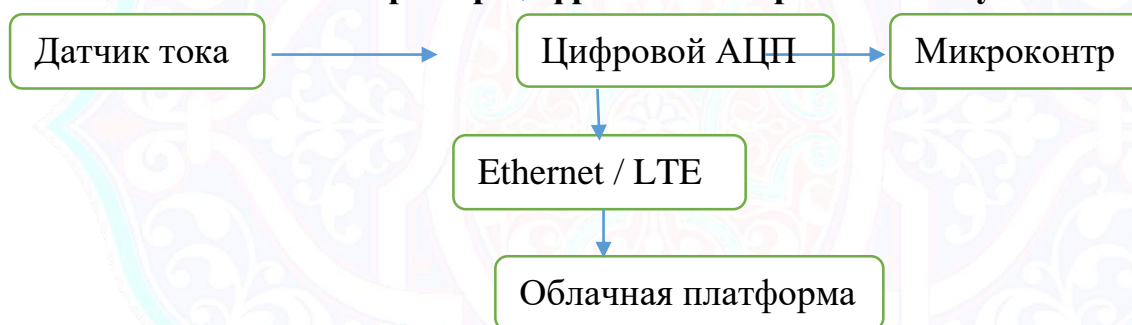
Метрология и Smart Grid

Концепция **Smart Grid** основана на глубокой цифровизации электроэнергетических систем и предполагает использование распределённых измерений и двустороннего обмена данными между потребителями, распределительными сетями и источниками генерации. В таких системах измерения перестают быть локальными и изолированными, а формируют единую распределённую измерительную среду, функционирующую в режиме реального времени.

В условиях Smart Grid метрология приобретает системный характер и охватывает не только аппаратную часть измерений, но и программные алгоритмы обработки данных, синхронизацию измерений по времени и обеспечение кибербезопасности измерительной информации. Применение цифровых датчиков, интеллектуальных счётчиков, фазовых измерительных устройств (PMU) и систем мониторинга качества электроэнергии позволяет получать высокоточные и синхронизированные данные о состоянии энергосистемы на различных уровнях — от конечного потребителя до магистральных сетей.

Распределённый характер измерений в Smart Grid требует согласованности метрологических характеристик всех измерительных узлов, поскольку ошибки отдельных элементов могут накапливаться и приводить к искажению общей картины состояния энергосистемы. В связи с этим особое значение приобретают единые метрологические стандарты, процедуры калибровки и верификации измерительных устройств, а также методы оценки неопределённости измерений в распределённых измерительных системах.

Пример цифрового измерительного узла



Стандартизация и нормативное обеспечение

Современная электроэнергетика в условиях цифровизации и интеграции интеллектуальных технологий опирается на систему международных и национальных стандартов, формирующих единые требования к измерениям электрических величин, средствам измерений и методам обработки данных. Стандартизация играет ключевую роль в обеспечении сопоставимости результатов измерений, их юридической значимости и доверия к измерительной информации на уровне отдельных предприятий, национальных энергосистем и международных энергетических рынков.

В области метрологии и электроэнергетики широкое применение находят международные стандарты организаций **IEC (International Electrotechnical Commission)**, **ISO (International Organization for Standardization)** и **IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)**. Эти документы регламентируют требования к точности и надёжности измерительных приборов,

методикам поверки и калибровки, а также к цифровым протоколам обмена измерительными данными. В частности, стандарты серии **IEC 62052** и **IEC 62053** устанавливают требования к счётчикам электрической энергии, а стандарт **IEC 61850** определяет архитектуру цифровых подстанций и обмен данными в интеллектуальных энергосистемах.

Таблица 2 – Актуальные стандарты в области метрологии и электроэнергетики

Стандарт	Назначение
IEC 62053	Счётчики электрической энергии
IEC 61000	Качество электроэнергии
ISO 9001	Системы менеджмента качества
ISO/IEC 17025	Компетентность испытательных лабораторий
O'z DSt	Национальная система стандартизации

Соблюдение стандартов обеспечивает достоверность измерений и доверие к результатам учёта электроэнергии.

Современные тенденции и перспективы

На современном этапе развития электроэнергетики метрология эволюционирует от традиционной функции контроля точности измерений к комплексной аналитической дисциплине, обеспечивающей поддержку принятия технических и управленческих решений. Данный переход обусловлен цифровизацией энергосистем, ростом объёмов измерительной информации и усложнением режимов работы электроэнергетических сетей.

Одной из ключевых тенденций является **переход к цифровым измерительным трансформаторам тока и напряжения**, которые обеспечивают высокую точность, расширенный динамический диапазон и возможность прямой интеграции в цифровые подстанции. Такие устройства существенно упрощают архитектуру измерительных систем и повышают надёжность передачи данных.

Важным направлением является **внедрение интеллектуальных датчиков**, способных выполнять первичную обработку измерительных сигналов, самодиагностику и адаптацию к изменяющимся условиям эксплуатации. Интеллектуальные датчики становятся основой распределённых измерительных систем Smart Grid, обеспечивая непрерывный мониторинг состояния энергосети.

Перспективным является **глубокая интеграция измерений с системами SCADA и EMS**, что позволяет объединить данные коммерческого и технического учёта с системами диспетчерского управления и оптимизации

режимов работы энергосистем. Это обеспечивает повышение оперативности управления, снижение потерь электроэнергии и улучшение качества электроснабжения.

Особое внимание в последние годы уделяется **использованию методов искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа измерительных данных**. Алгоритмы интеллектуального анализа позволяют выявлять скрытые закономерности, прогнозировать нагрузки, обнаруживать аномалии и оценивать техническое состояние оборудования. В этом контексте метрология становится не только инструментом обеспечения точности измерений, но и источником достоверных данных для интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

Заключение

В современных условиях развития электроэнергетики метрология и электроэнергетика представляют собой неразрывно связанные и взаимодополняющие области, формирующие основу надёжного функционирования цифровых энергосистем. Переход к интеллектуальным сетям, автоматизированному коммерческому учёту электроэнергии и системам цифрового управления требует не только внедрения современных измерительных технологий, но и комплексного метрологического обеспечения на всех этапах жизненного цикла измерений.

Высокоточная и стандартизированная измерительная информация является ключевым фактором обеспечения устойчивости энергосистем, повышения энергоэффективности и прозрачности коммерческих расчётов. В условиях распределённой генерации, активного участия потребителей и интеграции возобновляемых источников энергии значение достоверных и синхронизированных измерений существенно возрастает. Именно метрология обеспечивает единство измерений, контроль погрешностей и сопоставимость данных, на основе которых принимаются технические, экономические и управленческие решения.

Анализ современных тенденций показывает, что метрология трансформируется из вспомогательной контрольной функции в интеллектуальный аналитический инструмент, поддерживающий прогнозирование режимов работы, диагностику оборудования и оптимизацию процессов управления в электроэнергетике. В перспективе актуальность взаимосвязи метрологии и электроэнергетики будет только возрастать по мере усложнения энергетической инфраструктуры, расширения цифровых технологий и внедрения инновационных решений в области Smart Grid и интеллектуальных энергосистем./

Список использованной литературы:

1. Бабаков И. А. **Метрология в электроэнергетике.** – М.: Энергоатомиздат, 2022.
2. Кузнецов В. Н. **Измерение электрических величин и электроэнергии.** – СПб.: Питер, 2021.
3. Сергеев А. Г., Терентьев В. И. **Метрология, стандартизация и сертификация.** – М.: Юрайт, 2023.
4. Федоров В. П. **Измерительные преобразователи в электроэнергетике.** – М.: Энергия, 2020.
5. Шандаров В. М. **Электроэнергетические системы и сети.** – М.: Академия, 2021.
6. IEC 62053-21:2020. **Electricity metering equipment – AC static watt-hour meters.**
7. IEC 62053-22:2020. **Electricity metering equipment – Static meters for active energy (classes 0.2S and 0.5S).**
8. IEC 61000-4-30:2021. **Power quality measurement methods.**
9. IEC 61850. **Communication networks and systems for power utility automation.**
10. IEC 60044 / IEC 61869. **Instrument transformers.**
11. ISO 9001:2015. **Quality management systems – Requirements.**
12. ISO/IEC 17025:2017. **General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.**
13. ISO 50001:2018. **Energy management systems – Requirements.**
14. ГОСТ 8.009–2018. **Государственная система обеспечения единства измерений.**
15. ГОСТ 32144–2013. **Электрическая энергия. Совместимость технических средств.**
16. Kundur P. **Power System Stability and Control.** – McGraw-Hill, 2019.
17. Gungor V. C., Lambert F. C. **A Survey on Smart Grid Technologies.** – IEEE Communications Surveys, 2020.
18. Momoh J. A. **Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis.** – Wiley-IEEE Press, 2021.