

- Бадмаев Дандар Пурбуевич,**  
бакалавр, Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
e-mail: dandarbadmaev2222@gmail.com
- Бадueva Анна Дмитриевна,**  
магистрант, Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
e-mail: me@badueva.ru
- Болоев Евгений Викторович,**  
к.т.н., с.н.с., Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН  
доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
e-mail: boloev@isem.irk.ru
- Бугаев Евгений Александрович,**  
магистрант, Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
e-mail: yourbrightside@bk.ru
- Поспелов Яков Сергеевич,**  
магистрант, Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
e-mail: pospelov.yasha@gmail.com

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМИ<sup>1</sup>**

**Badmaev D.P., Badueva A.D., Boloev E.V., Bugaev E.A., Pospelov Y.S.**  
**PROSPECTS OF APPLICATION OF SMART ELECTRICITY METERING  
SYSTEMS BY USERS**

**Аннотация.** Подготовлен краткий литературный обзор по возможному применению интеллектуальных систем учета электроэнергии (мощности) (далее ИСУ ЭЭ), создаваемых в России электросетевыми организациями и гарантирующими поставщиками электроэнергии, для решения различных задач электроэнергетики. Обзор выполняется для пользователей ИСУ ЭЭ и содержит сведения о ключевых приложениях, методах и инструментах, используемых в мире. В целях сокращения трудоемкого поиска необходимых приложений пользователями ИСУ ЭЭ, библиографическая часть обзора составлена в виде таблицы со следующими колонками: приложение, имя пользователя ИСУ ЭЭ, ссылки на публикации в списке литературы.

**Ключевые слова:** интеллектуальный учет, интеллектуальные счетчики, распределительная электрическая сеть, применение данных.

**Abstract.** A brief literature review has been prepared on the possible use of intelligent energy (power) metering systems (IEMS) created in Russia by electric grid companies and guaranteeing electricity suppliers to solve various problems in the electric power industry. The review is carried out for users of IEMS and contains information about key applications, methods and tools used in the world. In order to reduce the labor-intensive search for necessary applications by users IEMS, the bibliographic part of the review is made in the form of a table with the following columns: application, IEMS user name, links to publications in the list of references.

**Keywords:** smart metering, smart meters; electric distribution networks, application of data.

За два последних десятилетия в распределительных электрических сетях по всему миру установлены сотни миллионов интеллектуальных счетчиков (ИС),

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

которые измеряют и обрабатывают данные о потреблении электроэнергии и параметрах режима сети, рассчитывают показатели качества электроэнергии (см. рисунок 1). Сбор данных с ИС, обработка, хранение и доступ к ним обеспечивают в нашей стране интеллектуальные системы учета электроэнергии (ИСУ ЭЭ) [1], а за рубежом – Advanced Metering Infrastructure (AMI) [2].

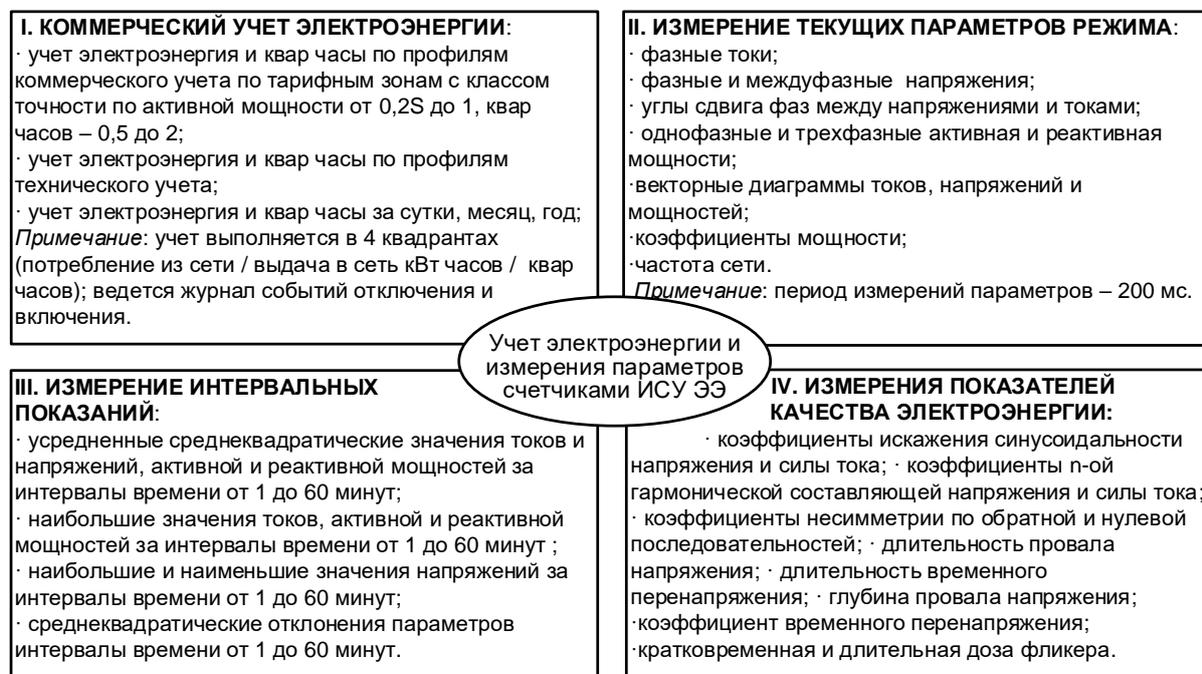


Рисунок 1 – Сведения об учете электроэнергии, измеряемых параметрах режима и рассчитываемых показателях качества электроэнергии ИС

В России ИСУ ЭЭ электросетевые организации и гарантирующие поставщики (владельцы ИСУ ЭЭ) начали внедрять несколько лет назад после принятия Федерального закона № 522-ФЗ [1]. Владельцы ИСУ ЭЭ согласно требованию законодательства [3, 4] на безвозмездной основе стали предоставлять доступ к ИСУ ЭЭ пользователям: потребителям и производителям электроэнергии; энергосбытовым и электросетевым организациям; системному оператору и субъектам оперативно-диспетчерского управления; организациям коммерческой инфраструктуры – совету рынка и коммерческим операторам. Нормативно-правовая база по созданию, организации информационного обмена между владельцами и пользователями, применению ИСУ ЭЭ в настоящий момент находится в стадии формирования [4-7]. За короткий период внедрения ИСУ ЭЭ в России владельцы и пользователи не получили достаточного опыта использования данных ИС, хранимых в ИСУ ЭЭ, в решении актуальных для них задач. В то время как за рубежом, пользователями интеллектуального учета АМІ за более чем десять лет его эксплуатации накоплен огромный опыт применения его расширен-

ной системы измерений для решения различных задач электроэнергетики, который может быть успешно использован в России. В работе приведен краткий литературный обзор по возможному применению интеллектуального учета.

Для финансового стимулирования перехода от обычного коммунально-бытового потребителя к потребителю-регулятору [1] в Российской Федерации были введены дифференцированные цены (тарифы) на электроэнергию по времени суток [8]. Систему дифференцированных тарифов на электроэнергию формируют таким образом, чтобы самый дорогой тариф был в режиме пиковых электрических нагрузок в утренние и вечерние часы, а самый дешевый тариф – в режиме минимальных нагрузок ночью. Коммунально-бытовые потребители, способные ограничить энергоемкие процессы хозяйствования в дневное время, такие как, например, стирка, и перенести их на ночное время могут уменьшить размер платы за электроэнергию без снижения электропотребления. Изменяя процесс хозяйствования с целью уменьшения размера платы за электроэнергию, потребители участвуют в снижении пиковых нагрузок в питающих их электрических сетях и в энергосистеме в целом. Обоснованный выбор дифференцированного тарифа на электроэнергию потребитель может выполнить по ретроспективным часовым профилям коммерческого учета электроэнергии ИС и установленным для населения тарифам [9]. По этим профилям коммерческие операторы могут формировать динамические тарифы для потребителей. В [10] выполнен библиометрический анализ и литературный обзор по динамическому ценообразованию: по времени суток (Time of Use tariff), по котировке цен в режиме реального времени (Real-Time Pricing); по времени на сутки вперед (Prediction of Use tariff).

Современные потребители не отказывают себе в использовании электроэнергии, все более широко используя в своей хозяйственной деятельности всевозможную электробытовую технику. Эксплуатируемые низковольтные распределительные сети, проектирование которых было выполнено десять и более лет назад, не рассчитаны на электрические нагрузки современных потребителей. Одновременное использование в том или ином составе потребителем электробытовых приборов и машин может приводить к превышению максимальной мощности заявленной в договоре электроснабжения между энергокомпанией и потребителем и как следствие возможно возникновение перегрузки в низковольтной сети. Для контроля и ограничения электрических нагрузок потребителей используются ИС электроэнергии с функцией управления нагрузкой. Отключение потребителя этим счетчиком выполняется автоматически при превышении максимальной мощности заявленной в договоре электроснабжения. Если отключение потребителя из-за превышения максимальной нагрузки происходит в режиме загрузки электрической сети близкой к максимально допустимой, то удастся избежать аварии. В случае, если отключение потребителя из-за превышения максимальной нагрузки происходит в режиме недогрузки электрической сети, то от

возникающего перерыва в электроснабжении пострадает не только потребитель, но и энергокомпания, которые не получают прибыль от сбыта и передачи электроэнергии потребителю. Возникает необходимость в контроле и управлении ограничением нагрузок потребителей ИС. Использование ИС операторами распределительной сети во время пиковых нагрузок для снижения риска отключения и улучшения качества электроэнергии рассмотрено в работах [11-13].

В ходе реконструкции, ремонта и обслуживания распределительной низковольтной сети, электрификации новых потребителей могут изменяться: топология сети и параметры ее участков, схема, тип и узлы подключения ИС. Необходимо периодически перед решением электросетевых задач выполнять проверку расчетной схемы на соответствие реальной сети [14] и идентификацию фаз подключения ИС [15].

В настоящее время параметры распределительных электрических сетей определяются по паспортным или справочным данным. Паспортные данные для токоведущих частей распределительных сетей, которые строились несколько десятилетий назад, в большинстве случаев утеряны. При отсутствии маркировки на токоведущих частях невозможно определить тип и завод изготовитель. Поэтому не всегда возможно воспользоваться справочными данными на токоведущие части. Отметим, что параметры на одни и те же марки токоведущих частей у различных заводов изготовителей и даже у одного завода изготовителя в разные годы выпуска могут отличаться друг от друга. Параметры токоведущих частей могут так же изменяться в процессе эксплуатации под влиянием различных внешних воздействий, в том числе существенно при механических повреждениях. В связи с неопределенностью параметров сети возникает необходимость в их идентификации. В [16] рассмотрена идентификация параметров по измерениям ИС и устройств  $\mu$ PMU.

Несбалансированность фазных нагрузок в трехфазной низковольтной распределительной сети приводит к появлению тем большего тока и падения напряжения в нейтральном проводе, чем больше несбалансированность фазных нагрузок. Возрастание напряжения в нейтральном проводе приводит к изменению напряжений фазных проводов относительно нейтрального провода и изменению технических потерь мощности в фазных проводах. В [17] исследованы подходы к определению технических потерь мощности в распределительной сети низкого напряжения на основе информации измерений напряжений, активных и реактивных мощностей потребителей, а также факторов, влияющих на разнесение суммарных потерь мощности между фазными проводами и нейтральным проводом. Обработка информации осуществляется методом адресности [17], позволяющим определить потоки мощности, текущие по ветвям схемы замещения фидера из узла питания в каждый нагрузочный узел, и потерь мощности, возникающих при такой передаче. В [17] показана возможность разнесения полных потерь мощности между фазными проводами и нейтральным

проводом, только между фазными проводами, между подключенными к фазам нагрузками отдельных потребителей.

Несбалансированность фазных нагрузок является естественным негативным свойством низковольтной трехфазной четырехпроводной сети обусловленным неравномерным подключением к фазам и различием индивидуального спроса на электроэнергию у потребителей. Дисбаланс фазных нагрузок в узлах сети приводит к снижению качества электроэнергии, завышенным техническим потерям в сети и к токовым перегрузкам в одной из фаз линий электропередачи. Наименее затратным методом снижения дисбаланса фазных нагрузок является балансировка – переключение потребителей и ответвлений-фидеров с одной фазы на другую, по возможности, с равномерной загрузкой каждой фазы по данным о фактическом электропотреблении из сети. Такое перераспределение можно осуществить по среднечасовым показаниям интеллектуальных счетчиков, установленных у потребителей. Обзор методов и алгоритмов балансирования фазных нагрузок выполнен в [18].

Использование потребителями электроэнергии однофазной и трехфазной распределенной генерации (газотурбинных и парогазовых установок, накопителей и возобновляемых источников энергии) приводит к появлению в распределительных сетях низкого напряжения двунаправленных перетоков мощности и перенапряжений. Необходимая для эффективного мониторинга и управления распределительной сетью информация о текущих значениях всех переменных режима может быть получена в результате обработки измерений, поступающих в ИСУ ЭЭ, методами расчета трехфазного потокораспределения [19] и оценивания состояния [20, 21].

Прогноз электрических нагрузок потребителей играет важную роль при реализации концепций интеллектуальных распределительных сетей Smart Grid и умных домов Smart Home. Прогнозирование нагрузки на сутки вперед используется: сбытовыми компаниями – при формировании тарифов на электроэнергию; сетевыми и генерирующими компаниями – при планировании и оптимизации режимов сетей, распределенных генераторов и накопителей энергии; потребителями – при выборе тарифа оплаты за потребленную электроэнергию, оптимизации режимов работы бытовых приборов, фотовольтаиков, ветрогенераторов и аккумуляторов энергии, снижении пиковой нагрузки и эксплуатационных расходов. Так как от точности прогноза нагрузки зависит получаемые компаниями и потребителями выгоды, то актуальна задача разработки новых и совершенствования предложенных моделей и методов прогноза нагрузки потребителей по показаниям интеллектуальных счетчиков в распределительных сетях, всесторонний обзор которых с рекомендациями по практическому использованию выполнен в [22, 23].

Неучтенное потребление электроэнергии, называемое также «хищениями электроэнергии», проявляется в ее незаконном использовании с целью уклонения от оплаты коммунальных услуг. Согласно опубликованному в 2017 г. исследованию [24] хищения электроэнергии в мире приводят к ежегодным потерям энергетическими компаниями около 90 миллиардов долларов. Хищения электроэнергии приводят к повышению цен для платежеспособных потребителей, дорогостоящим государственным субсидиям, к кризису в энергетических компаниях из-за нарушения их финансовой устойчивости. Методы выявления виновником бездоговорного и безучетного электропотребления в РЭС по измерениям ИС приведены в [25-30].

Перечень приложений с указанием пользователей ИСУ ЭЭ и ссылок на литературу, сведен в таблицу 1.

Таблица 1

Перечень приложений создаваемых для пользователей ИСУ ЭЭ

Приложение	Имя пользователя ИСУ ЭЭ	Ссылка(и) на литературу
Выбор тарифа на электроэнергию	Потребители	[9]
Формирование тарифа на электроэнергию (мощность)	Коммерческие операторы, энергосбытовые организации, гарантирующие поставщики	[10]
Контроль и управления нагрузкой потребителей	Электросетевые организации	[11-13]
Идентификация фаз подключения ИС		[14]
Идентификация топологии распределительных электрических сетей		[15]
Идентификация параметров участков распределительных электрических сетей		[16]
Балансирование фазных нагрузок в распределительных электрических сетях		[18]
Расчет трехфазного потокораспределения в распределительных сетях		[19]
Оценивание состояния в распределительных сетях		[20, 21]
Расчет технических потерь электроэнергии. Разнесение потерь между потребителями.	Электросетевые и энергосбытовые организации, гарантирующие поставщики	[17]
Выявление бездоговорного и безучетного электропотребления		[25-30]
Прогнозирование электрических нагрузок потребителей в распределительных сетях	Системный оператор, оперативно-диспетчерское управление, потребители и производители электроэнергии, энергосбытовые и электросетевые организации, совет рынка, коммерческие операторы	[22, 23]

## ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон от 27.12.2018 № 522-ФЗ О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации // Официальное опубликование правовых актов. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201812280018> (дата обращения: 24.04.2024).

2. **Barai, G.R.** Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid - a review / G.R. Barai, S. Krishnan, B. Venkatesh // 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). – 2015. – P. 138-145.

3. Федеральный закон от 26.03.2003 г. № 35-ФЗ Об электроэнергетике // Документы Правительства России. – URL: <http://government.ru/docs/all/97451/> (дата обращения: 24.04.2024).

4. Правила предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности): утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 19.06.2020 г. № 890 // Официальное опубликование правовых актов. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/0001202006230034> (дата обращения: 24.04.2024).

5. Перечень и спецификация защищенного протокола передачи данных, который может быть использован для организации информационного обмена между владельцами и пользователями интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности): утвержден приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 30.12.2020 года № 1234 // Официальное опубликование правовых актов. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202102030015> (дата обращения: 24.04.2024).

6. Порядок кодификации мест установки приборов учета электрической и энергии и точек поставки электрической энергии: утвержден приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 06.10.2021 года № 1021 // Официальное опубликование правовых актов. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112170056> (дата обращения: 24.04.2024).

7. ГОСТ Р 71331-2024 Интеллектуальные системы учета электрической энергии (мощности). Общие технические требования: дата введения 2024-05-01 – Изд. официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 28 с.

8. Постановление Правительства Российской Федерации от 29 декабря 2011 г. № 1178 О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике // Документы Правительства России. – URL: <http://government.ru/docs/all/80637/> (дата обращения: 24.04.2024).

9. **Говоров, В.М.** Выбор коммунально-бытовыми потребителями тарифа на электроэнергию / В.М. Говоров, Е.В. Болоев // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы

Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. (Иркутск, 19 – 22 апреля 2022 г.) – Иркутск: изд-во ИРНТУ, 2022. С. 300-305.

10. **Paz, J.M.M.** Dynamic Electricity Tariff in Distribution Systems: Bibliometric Analysis and Literature Review / J. M. M. Paz, G. C. Pantano and A. A. R. Quete // 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON). – 2022. – P. 1-8.

11. **Arafat, Y.** Possibilities of demand side management with Smart Meters / Y. Arafat, L.T. Bertling, P-A. Gustafsson // Conference: International Conference on Electricity Distribution (CIRED). – 2015. – 0109. – P. 1/1–1/5.

12. **Shalaby, H.H.** A Review on Demand Side Management Applications, Techniques, and Potential Energy and Cost saving / H.H. Shalaby [et al] // ELEKTRIKA – Journal of Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 20. №1. – P. 21–33.

13. **Panwar, M.** Design of Resilient Electric Distribution Systems for Remote Communities: Surgical Load Management using Smart Meters / M. Panwar [et al] // Preprint. Presented at Resilience Week. National Renewable Energy Laboratory. – 2021. – 4 p.

14. **Luan, W.** Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification / W. Luan [et al.] // IEEE Trans Smart Grid. – 2015. – Vol. 6. Issue 4. – P. 1964–1971.

15. **Кузькина, Я.И.** Идентификация фаз подключения интеллектуальных счетчиков в низковольтной распределительной сети / Я.И. Кузькина, И.И. Голуб // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. № 1. – С. 135–144.

16. **Srinivas, V.L.** Topology and Parameter Identification of Distribution Network Using Smart Meter and  $\mu$ PMU Measurements / V.L. Srinivas, J. Wu // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2022. – Vol. 71. – P. 1-14.

17. **Крупенёва, Я.И.** Разнесение потерь мощности и энергии в распределительной сети / Я.И. Крупенёва, Е.В. Болоев, И.И. Голуб // iPolytech Journal. – 2023. – 27(4). – С. 727-736.

18. **Ma, K.** Review of distribution network phase unbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions / K. Ma, L. Fang, W. Kong // CSEE Journal of Power and Energy Systems. – 2020. – Vol. 6. № 3. – P. 479-488.

19. **Голуб, И.И.** Метод расчета потокораспределения вторичной распределительной сети по измерениям интеллектуальных счетчиков / И.И. Голуб, Е.В. Болоев, Я.И. Кузькина // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации. В 3-х книгах. Книга 2. отв. ред. Н.И. Воропай. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2020. – С. 123-133.

20. **Голуб, И.И.** Оценивание состояния распределительной сети низкого напряжения по измерениям интеллектуальных счетчиков / И.И. Голуб, Е.В. Болоев, В.В. Федчишин // Вестник ИРГТУ. – 2018. №2. – С. 95-106.

21. **Primadianto, A.A.** review on distribution system state estimation / A. Primadianto, C. Lu // IEEE Transactions on Power System. – 2017. – Vol. 32. Issue 5. – P. 3875-3883.
22. **Haben, S.** Review of Low-Voltage Load Forecasting: Methods, Applications, and Recommendations / S. Haben [et al.] // Applied Energy. – 2021. – Vol. 304. 1177982021. – 47 p.
23. **Paoletti, S.** Load forecasting for active distribution networks / S. Paoletti [et al.] // 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). – 2011. – P.1-6.
24. Electricity Theft and Non-Technical Losses: Global Markets, Solutions & Vendors. // Research and Markets. – 2017. – URL: <http://www.northeast-group.com/reports/Brochure-Electricity%20Theft%20&%20Non-Technical%20Losses%20-%20Northeast%20Group.pdf> (дата обращения: 24.04.2024).
25. **Messinis, G.M.** Review of non-technical loss detection methods / G. M. Messinis, N. D. Hatziaargyriou // Electric Power Systems Research. – 2018. – 158. – P. 250-266.
26. **Ahmad, T.** Review of various modeling techniques for the detection of electricity theft in smart grid environment / T. Ahmad [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – P. 2916-2933.
27. **Savian, F. de S.** Non-technical losses: A systematic contemporary article review / F. de S. Savian [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. –2021. – 147 (111205). – 13 p.
29. **Golub, I.** Identification of electricity theft perpetrators in the low-voltage distribution network / I. Golub [et al.] // Rudenko International Conference. Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems (RSES 2023) E3S Web of Conferences. – 2023. – 461, 01029. – 7 p.
30. **Паздерин, А.В.** Анализ схемно-технических методов выявления и локализации нетехнических потерь электроэнергии / А.В. Паздерин [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 5 (80). – С. 62-71.