

УДК 621.311

ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Сергей Викторович Кириллов^{1, 2}

кандидат технических наук, доцент

kirill_mich@mail.ru

Владимир Сергеевич Кириллов³

студент

¹Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре ОАО «РЖД»

г. Москва, Россия

²Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

г. Долгопрудный, Россия

Аннотация. Проблема энергосбережения является особенно важной в условиях роста цен на электроэнергию и ограниченной мощности объектов генерации. Важными мероприятиями энергосбережения являются - повышение точности учёта электрической энергии, принятие мер, не допускающих увеличения погрешности учета электрической энергии вследствие субъективного воздействия на приборы и комплексы учета, а также использование счетчиков электрической энергии с расширенным набором функций, которые обеспечивают контроль показателей качества электроэнергии и учёт выполнения показателей надежности электроснабжения. Для выполнения данных мероприятий возможно использование современных интеллектуальных счётчиков с реализацией технологии Smart Metering и построенных на их основе интеллектуальных систем учёта электроэнергии.

Данные счётчики являются приборами учета и одновременно измерителями и регистраторами показателей качества электроэнергии и параметров надёжности электроснабжения.

Ключевые слова: учет электрической энергии, проблемы учета электрической энергии, интеллектуальные счётчики электрической энергии, технология Smart Metering, надёжность электроснабжения, показатели качества электроэнергии.

Электрическая энергия вследствие простоты и экономичности транспортирования, а также возможности трансформирования в другие виды энергии является основным источником энергии для промышленных и сельскохозяйственных предприятий и в коммунально-бытовом секторе. Валовой национальный продукт и комфортность жизни корреляционно определяются электропотреблением, производительность труда в различных отраслях – электровооружённостью.

Проблема энергосбережения является особенно важной в условиях роста цен на электроэнергию и технической проблеме, которая явно обозначилась в последние годы – нехватка электрической мощности в отдельных регионах РФ. О том, что из-за роста энергопотребления некоторые города и предприятия сталкиваются с дефицитом электроэнергии, в своем выступлении на Восточном экономическом форуме в сентябре 2024 года заявил В. Путин. В продолжение, министр энергетики РФ Сергей Цивилев указал, что резервы СССР уже исчерпаны [9]. В этой связи оценка фактических значений непроизводственных потерь и внедрение мероприятий, направленных на снижение потерь электрической энергии является весьма актуальной задачей.

Комплекс мероприятий по снижению непроизводственных потерь электрической энергии включает в себя следующее:

- снижение потерь при генерировании, транспортировании и преобразовании электрической энергии;
- повышение точности измерительных комплексов учёта электрической энергии;
- принятие мер, не допускающих увеличения погрешности учета и недоучёта электрической энергии вследствие субъективных воздействий на приборы и комплексы учета, а также несанкционированного отбора энергии.

И если первое мероприятие достаточно изучено, и затрагивает проблему содержания и модернизации генерирующих, передающих, перерабатывающих мощностей и распределительных сетей, то второе и третье относится к

переходу на другой качественный уровень технических средств учёта электрической энергии и их способности выполнять возложенные функции в условиях практической эксплуатации [1].

Обеспечение надежности электроснабжения и качества поставляемой электрической энергии, а также анализ всех видов потерь в электрических сетях невозможны без полной и объективной информации о режимах работы систем подачи электрической энергии, количеству и длительности перерывов электроснабжения, действительных показателях качества электрической энергии. Поэтому одним из главных мероприятий по повышению надежности электроснабжения и выполнению требований качества электрической энергии является организация качественного учета электрической энергии. Данное мероприятие включает в себя применение современных счетчиков, обеспечивающих учет электрической энергии с требуемым уровнем точности, а также регистрацию необходимых показателей, для дальнейшего проведения анализа потребления электроэнергии, выполнения требований её качества и надежности работы системы электроснабжения.

Известно, что потери электроэнергии состоят из четырёх различных по природе и механизмам формирования составляющих [1]:

- технические потери;
- расход электроэнергии на собственные нужды электростанций, подстанций и других электроустановок;
- потери, обусловленные погрешностями системы учёта электроэнергии;
- коммерческие потери.

Техническими (сетевыми) являются потери в питающих и распределительных сетях, а также в трансформаторах. Расчёт данного вида потерь осуществляется по утвержденным методикам в соответствии с законами электротехники. Данные потери – показатель качества проектных решений, технического состояния оборудования, уровня эксплуатации и эффективности системы учёта электроснабжающей организации. По международным

стандартам потери в 4 - 5% считаются удовлетворительными, а в 10% и более - максимальными, превышение которых связано с коммерческой составляющей. Конкретная оценка данных потерь зависит от класса напряжения электроустановки [1, 2].

Расход энергии на собственные нужды является учитываемыми потерями, которые строго лимитируются и, как правило, не превышают 1% от общего количества произведённой, переданной или преобразованной электрической энергии [1, 2].

Коммерческие потери – это потери, связанные с недоучетом электроэнергии, вызванные неисправностью, несовершенством и возникающей из-за этого повышенной погрешностью приборов учета и измерительных комплексов, а также субъективными факторами – ошибками при формировании отчетов и несанкционированным отбором энергии (хищения) [1, 2]. Зачастую коммерческие потери, по объективным или субъективным причинам включают в отчёт технических потерь, и вследствие этого отсутствует реальная картина об электропотреблении и причинах небаланса.

В связи с ростом тарифов на электроэнергию, большим износом технических средств и несовершенством средств учёта значительная доля потерь сохранится в ближайшем будущем, и сегодня требуются новые подходы к анализу потерь и разработке мероприятий по их снижению. В частности, необходим переход от простого расчёта и нормирования технических потерь в электрических сетях 0,4 (0,23) - 35 кВ к расчёту и анализу допустимых и фактических небалансов электроэнергии. Нормирование потерь и анализ допустимых небалансов в распределительных электрических сетях является способом стимулирования мероприятий по их снижению. Это достигается с помощью постепенного и целенаправленного снижения норматива по сравнению с фактическими значениями отчётных потерь, осуществляемого с целью достижения экономически обоснованного их уровня (перспективного норматива).

В настоящее время в условиях относительно высокого уровня отчетных потерь электроэнергии в распределительных сетях систем электроснабжения, задача анализа и принятия мер по снижению данных потерь, становится особенно актуальной. Как показывает практика, там, где отчетные потери составляют 20 % и более, значительная часть их приходится на причины, не связанные с состоянием сетей и оборудования, а являются частью, нетехнической (коммерческой) составляющей. Для выявления и принятия мер по снижению данного вида потерь, необходим расчет допустимых и определение фактических небалансов электрической энергии [1]. Дополнительно это позволит:

- выявить места максимального значения небалансов, участки сетей с наибольшими потерями – техническими и коммерческими;
- провести анализ причин возникновения данных небалансов и наметить пути их уменьшения;
- проводить целенаправленную работу энергосбытовыми и электросетевыми организациями по выявлению фактов хищений и неоплаты электроэнергии, и повысить экономическую эффективность работы систем электроснабжения;
- определить приоритеты по установке или замене систем или приборов учета на «проблемных» присоединениях подстанций 10 (6) / 0,4 кВ распределительных сетей и у потребителей.

В нашей стране несколько сот предприятий, которые имеют установленную мощность электроприемников несколько тысяч МВт. Однако основные проблемы порождают не крупные потребители, имеющие, как правило, свои собственные системы электроснабжения, а средние и мелкие объекты промышленности, транспорта, сельского хозяйства и административно-бытового сектора, которых абсолютное большинство. Проблемными для систем электроснабжения являются достаточно мощные потребители с нелинейными вольтамперными характеристиками. Данными

потребителями в промышленности являются электродуговые печи, электролизные установки, вентильные преобразователи, электрический транспорт и др. Также значительно изменился характер нагрузок в среднем и мелком производстве и быту. На промышленные и сельскохозяйственные предприятия пришло современное электрооборудование, использующее силовую и преобразовательную электронику, широко используются различные электротехнологии. Для освещения и облучения применяются дуговые и газоразрядные источники света, различного вида облучатели с электронной схемой запуска и управления. Характер бытовых электроприёмников так же значительно изменился со времён обширной электрификации, от ламп накаливания и электроплиток с практически линейной вольтамперной характеристикой, до электрооборудования, использующего сложные импульсные преобразователи, выпрямители и т.п. Применение в системах электроснабжения подобных электроприёмников приводит не только к дополнительным потерям энергии и снижению её качества, но и к нарушению электромагнитной совместимости (ЭМС) как отдельных приёмников электроэнергии, так и целых технологических процессов производств. В электроэнергетике термином ЭМС определяется степень взаимного влияния электротехнического оборудования, при которой отсутствует нарушение нормальной работы и уменьшение ниже некоторого предела экономически обоснованного режима ведения производства [1]. В сетях, где имеются потребители с нелинейными вольтамперными характеристиками, наблюдается рост гармонических составляющих токов и напряжений, и часть мощности передается на частотах данных гармонических составляющих. Эти составляющие, как показывают исследования, не только ухудшают качество электроэнергии, увеличивают потери в сети и нагрев оборудования, снижая срок его службы, но и отрицательно влияют на точность учета электроэнергии [1, 2]. В современных счётчиках электроэнергии алгоритмы её расчёта построены на учёте токов и напряжений основной частоты (первой

гармонической составляющей). Официально утверждённая методика расчета систематических погрешностей учета, возникающие из-за низкого качества электроэнергии в настоящее время отсутствует. В большинстве широко используемых в настоящее время цифровых счётчиках электроэнергии отсутствует контроль и учёт гармонических составляющих токов и напряжений, и других показателей качества электрической энергии [1, 2]. И как показано в исследовании [1], влияние гармонических составляющих, а именно - мощностей гармонических составляющих (высших гармоник) оказывает существенное влияние на учет электрической энергии счетчиков всех типов – индукционных, электронных и микропроцессорных (цифровых).

До настоящего времени не решены вопросы метрологической оценки погрешностей измерения и расчета технических потерь электроэнергии с учетом основных влияющих факторов на учёт электроэнергии. Практические результаты этих оценок достаточно противоречивы и далеки от применения в реальных условиях. Так же в приборах учета отсутствует функция контроля выполнения показателей надежности электроснабжения. Дополнительно, в последнее время возникают новые требования к организации учёта электрической энергии, связанные с современными вызовами, новыми задачами и технологиями. В первую очередь это относится к повышению достоверности и оперативности фактических и прогнозных балансов электроэнергии и их функциональных составляющих.

Решение указанных проблем при организации учета электрической энергии возможно с применением современных интеллектуальных счётчиков с реализацией технологии Smart Metering. Данные счётчики являются приборами учета электрической энергии и одновременно способны контролировать и регистрировать показатели качества электрической энергии и надёжности электроснабжения [3, 4, 5]. И существенным преимуществом использования данных счетчиков является то, что они могут быть интегрированы в интеллектуальную систему учета электрической энергии (ИСУЭ) [5, 6].

Интеллектуальная система учета электрической энергии (мощности) - совокупность функционально объединенных компонентов и устройств, предназначенная для удаленного сбора, обработки, передачи показаний приборов учета электрической энергии, обеспечивающая информационный обмен, хранение показаний приборов учета электрической энергии, удаленное управление ее компонентами, устройствами и приборами учета электрической энергии, не влияющее на результаты измерений, выполняемых приборами учета электрической энергии, а также предоставление информации о результатах измерений, данных о количестве и иных параметрах электрической энергии в соответствии с Правилами предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности), утвержденными Правительством Российской Федерации (в редакции Федерального закона от 27.12.2018 N 522-ФЗ "О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации").

Внедрение ИСУЭ является базой построения цифровой электрической сети с интеграцией в общую автоматизированную систему управления электрическими сетями. Для этого требуются: создание комплексной многоуровневой интегрированной системы интеллектуального учета и управления электрическими сетями и системами электроснабжения; объединение программно-технических комплексов в единую систему; разработка и внедрение общей информационной модели электрической сети (Common Information Model, CIM), представляющей собой описание в цифровом виде объектов электрической генерации и потребителей, свойств данных объектов и связей между ними [5, 6].

Также для систем интеллектуального учета энергоресурсов большое значение имеют вопросы защиты баз данных, программного обеспечения, средств связи и передачи информации от несанкционированного доступа. Особенно это становится актуальным при применении приборов учета со

встроенными контроллерами и возможностью дистанционного ограничения потребления. В настоящее время в этом направлении ведутся активные работы в нашей стране и за рубежом [7].

Постановлением Правительства РФ от 19.06.2020 N 890 (ред. от 29.03.2024) "О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)" (вместе с "Правилами предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)" определен набор функций интеллектуальной системы учета:

- передача показаний и результатов измерений прибора учета электрической энергии, присоединенного к интеллектуальной системе учета;
- предоставление информации о количестве и иных параметрах электрической энергии;
- полное и (или) частичное ограничение режима потребления электрической энергии (приостановление или ограничение предоставления коммунальной услуги), а также возобновление подачи электрической энергии;
- установление и изменение зон суток (часов, дней недели, месяцев), по которым прибором учета электрической энергии, присоединенным к интеллектуальной системе учета, осуществляется суммирование объемов электрической энергии в соответствии с дифференциацией тарифов (цен), предусмотренной законодательством Российской Федерации (далее - тарифные зоны);
- передача данных о параметрах настройки и событиях, зафиксированных прибором учета электрической энергии, присоединенным к интеллектуальной системе учета;
 - передача справочной информации;
 - передача архива данных;
 - оповещение о возможных недостоверных данных, поступающих с приборов учета в случае срабатывания индикаторов вскрытия электронных

пломб на корпусе и клеммной крышке прибора учета, воздействия магнитным полем на элементы прибора учета, неработоспособности прибора учета вследствие аппаратного или программного сбоя, его отключения (после повторного включения), перезагрузки.

Ниже приведен перечень некоторых функций приборов учета электрической энергии, которые могут быть присоединены к интеллектуальной системе учета:

- измерение активной и реактивной энергии в сетях переменного тока в двух направлениях;

- измерение и вычисление: фазного напряжения в каждой фазе; линейного напряжения (для трехфазных приборов учета электрической энергии); фазного тока в каждой фазе; активной, реактивной и полной мощности; значения тока в нулевом проводе; небаланса токов в фазном и нулевом проводах (для однофазного прибора учета электрической энергии); частоты электрической сети;

- нарушение параметров качества электроснабжения;

- контроль наличия внешнего переменного и постоянного магнитного поля;

- защиту прибора учета электрической энергии от несанкционированного доступа с помощью реализации в приборе учета: идентификации и аутентификации; контроля доступа; контроля целостности; регистрации событий безопасности в журнале событий;

- фиксирование несанкционированного доступа к прибору учета посредством энергонезависимой электронной пломбы, и другие.

В рамках Программы реализации инвестиционного проекта АСКУЭ РРЭ ОАО «РЖД» на Юго-Восточной железной дороге внедрена автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учёта розничного рынка электроэнергии (напряжение 0,23 и 0,4 кВ) с использованием технологии PLC (Power Line Communication).

Целью создания данной системы стало [8]:

- получение информации для обеспечения финансовых расчётов на розничных рынках электроэнергии;
- выявление неучтённой электроэнергии;
- снижение коммерческой составляющей потерь;
- сокращение расходов на оплату труда и другие виды затрат на содержание работников, осуществляющих снятие и обработку показаний приборов учета;
- автоматизация и оперативный сбор информации о потреблении электроэнергии;
- получение информации для решения технических, технико-экономических и статистических задач на всех уровнях управления энергетического хозяйства жилищно-коммунального сектора ОАО «РЖД» в границах Юго-Восточной железной дороги.

В число основных функций системы АСКУЭ РРЭ входит следующее [8]:

- выполнение в точках поставки (учёта) измерений почасовых изменений расхода активной и реактивной электроэнергии, характеризующих оборот товарной продукции на розничных рынках электроэнергии;
- автоматический сбор с заданной периодичностью привязанных к единому времени данных измерений;
- формирование сигналов управления нагрузкой потребления;
- выявление случаев хищения электроэнергии;
- предоставление доступа пользователям к результатам измерений;
- обеспечение защиты оборудования, программного обеспечения и данных от несанкционированного доступа на физическом и программном уровне;

- диагностика и мониторинг функционирования технических и программных средств;
- конфигурирование и настройка параметров;
- ведение системы единого времени.

На рисунке 1 представлена структурная схема реализации автоматизированной системы учёта с использованием технологии PLC (Power Line Communication), на примере одной подстанции 10(6) /0,4 (0,23) кВ [8].

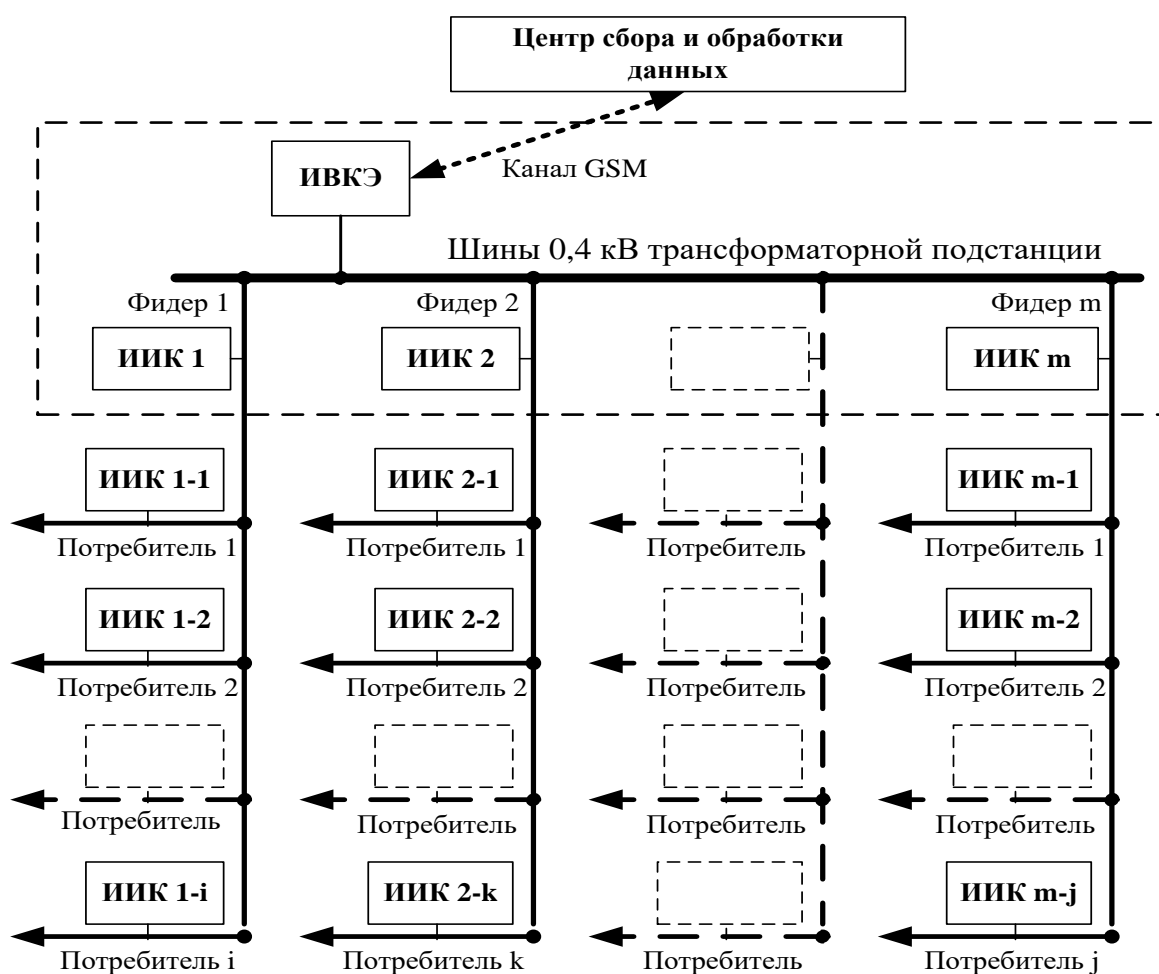


Рисунок 1 – Структура автоматизированной системы учёта розничного рынка электроэнергии (на примере одной подстанции)

Счётчик электрической энергии Echelon – интеллектуальный полнофункциональный счётчик электроэнергии, соответствующий требованиям МЭК, класса точности 1 (активная мощность) и 2 (реактивная мощность) обладает всеми функциями современных программируемых счётчиков, в то же время необходимо отдельно выделить следующие [8]:

- максимальный ток до 100 А; имеется встроенный выключатель, который может управляться в ручную (с помощью внешнего рычага) или с использованием программного обеспечения;

- ограничение по максимальной мощности; нагрузка отключается при превышении настраиваемого порога мощности.

- расход энергии по кредитной схеме с предоплатой, включая различные варианты в зависимости от времени, настраиваемый аварийный порог кредита и звуковой сигнал о низком уровне кредита;

- система обнаружения попыток несанкционированных действий;

- возможность автономной работы, а также обмена данными с системой концентраторов Echelon NES DC-1000 по каналам связи (PLC) с автоматической функцией повторения, использующим линии силовых электросетей А-диапазона Echelon, соответствующие требованиям Европейского комитета по электротехническим стандартам;

- при взаимодействии по линиям силовых электросетей может использоваться шифрование данных (в зависимости от модели).

При взаимодействии ИВКЭ и ИИК (рис.1) осуществляется обмен коммерческой и технической информацией полученной на объекте и состояния средств измерения на нём.

Указанная автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учёта розничного рынка электроэнергии не в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к системам учета, определяемые постановлением Правительства РФ от 19.06.2020 N 890 (ред. от 29.03.2024) "О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)" (вместе с "Правилами предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)", однако она является значительным шагом к развитию систем учета электрической

энергии, и в ней реализованы большая часть функций, определяемые постановлением Правительства РФ.

Интеллектуальная система учета электроэнергии Smart Metering также способствует повышению надежности электроснабжения за счет следующего:

- сбор и передача статистики нарушений электроснабжения;
- улучшения мониторинга состояния сети: Smart Metering позволяет в режиме реального времени отслеживать состояние сети и оперативно принимать меры реагирования на возникающие проблемы;
- сокращения времени восстановления электроснабжения: удаленное отключение и подключение потребителей позволяет быстрее локализовать и устранить аварии;
- прогнозирования нагрузок на сеть: анализ данных об энергопотреблении позволяет прогнозировать пиковые нагрузки и принимать меры по их регулированию;
- интеграции с системами автоматического управления электросетями: Smart Metering является важным элементом интеллектуальных сетей (Smart Grid), позволяющих автоматизировать управление электроснабжением.

Выводы

- В современных условиях эксплуатации распределительных электрических сетей могут возникать необоснованные потери электрической энергии, вызванные несанкционированными воздействиями на учет, завышенными техническими потерями в элементах сетей, и несовершенством или неисправностью приборов учета.
- Интеллектуальные системы учета электроэнергии с использованием счетчиков с реализацией технологии Smart Metering являются основным инструментом повышения энергоэффективности и надежности электроснабжения в распределительных сетях.
- Внедрение интеллектуальных систем учета электроэнергии с реализацией технологии Smart Metering позволит снизить потери

электроэнергии, проводить расчёт балансов, в т.ч. прогнозных, оптимизировать потребление, контролировать качество электроэнергии и показатели надежности электроснабжения.

Список литературы:

1. Кириллов С.В. Методы повышения точности учета электрической энергии при электроснабжении сельских потребителей от электрических сетей железных дорог / Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. 200 с. ISBN 978-5-00261-395-3. EDN TCMXCX.

2. Kirillov S.V., Vinogradov A.V. The Causes of Errors in Accounting for Electric Energy of Agricultural Consumers. In: 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk: SUMMA, 2024, p. 1017-1021, doi: 10.1109/SUMMA64428.2024.10803804.

3. Мифтахов А.Р. Интеллектуальные системы учета электрической энергии (ИСУЭ) // Актуальные вопросы развития естественных и технических наук: Материалы XXX Всероссийской научно-практической конференции, Ставрополь, 20 ноября 2023 года. Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью "Ставропольское издательство "Параграф", 2023. С. 130-131. EDN AYNIBQ.

4. Scheduling optimization of electric energy meter distribution vehicles for intelligent batch rotation / Zh. He, X. Zhou, C. Lin et al. // Heliyon. 2024. Vol. 10, No. 4. P. e26516. DOI 10.1016/j.heliyon.2024.e26516. EDN HXLARGE.

5. Галиулина А.Р., Умурзаков А.К. Перспективы развития и внедрения интеллектуальных систем учета электроэнергии в России // Технические и естественнонаучные исследования современной России: проблемы, тенденции развития: Сборник научных статей. Волгоград: ООО "Сфера", 2024. С. 22-25. EDN BZBNUG.

6. Щербаков А.А. Интеллектуальные системы учета электроэнергии (Smart Metering) как инструмент повышения энергоэффективности и надежности электроснабжения // Молодой ученый. 2025. № 20(571). С. 55-58. – EDN IGRBWH.

7. Воротницкий В.Э., Лазарев Г.Б. Интеллектуальные системы учёта электроэнергии. Проблемы внедрения, направления развития и повышения эффективности // Энергетик. 2025. № 11. С. 4-9. DOI 10.71527/EP.EN.2025.11.001. EDN ZGPMLT.

8. Кириллов С.В. Автоматизированная информационно измерительная система коммерческого учёта розничного рынка электроэнергии Юго-Восточной железной дороги // Проблемы электроэнергетики: сборник научных трудов. Саратовский государственный технический университет, 2009. С. 102-106.

9. Минэнерго заявило об исчерпании резервов, оставшихся от СССР // РБК. Новости Черноземья. – URL: <https://www.rbc.ru/politics/09/09/2024/66de9e739a79477a9c42a3e1?ysclid=m0wicvd3m1980369809>

UDC 621.311

PROBLEMS OF ELECTRICITY ACCOUNTING IN DISTRIBUTION NETWORKS AND THEIR SOLUTIONS

Sergey V. Kirillov^{1,2}

candidate of technical sciences, associate professor

kirill_mich@mail.ru

Vladimir S. Kirillov³

student

¹Design and Engineering Bureau for Infrastructure of JSCo «RZD»

Moscow, Russia

²Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

Dolgoprudny, Russia

Annotation. The problem of energy saving is especially important in the context of rising electricity prices and limited capacity of generation facilities. Important energy saving measures include improving the accuracy of electricity metering, taking measures to prevent the increase of electricity metering errors due to subjective influence on meters and metering systems, and using electricity meters with advanced features that allow for monitoring of electricity quality indicators and ensuring reliable electricity supply. To implement these measures, modern smart meters with Smart Metering technology and smart electricity metering systems based on them can be used. These meters are both metering devices and indicators and recorders of electricity quality and reliability parameters.

Key words: electric energy accounting, electric energy accounting problems, smart electric energy meters, Smart Metering technology, reliable power supply, and electric energy quality indicators.

Статья поступила в редакцию 24.10.2025; одобрена после рецензирования 20.12.2025; принята к публикации 29.12.2025.

The article was submitted 24.10.2025; approved after reviewing 20.12.2025; accepted for publication 29.12.2025.