

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕБАЛАНСОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ, ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ И РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ БЕЗУЧЕТНОГО ИЛИ БЕЗДОГОВОРНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

АВТОРЫ:

О.В. ТУРКИНА, К.Т.Н.,
И.П. ВОЛТОВ,
Д.С. ИВАНОВ,
АО «ФИЦ»

М.В. ЩЕРБАКОВ, Д.Т.Н.,
ФГБОУ ВО «ВОЛГГТУ»

Фактические потери электроэнергии — это важнейший показатель эффективности работы линий электропередачи. При этом хищение электрической энергии все

еще является серьезной проблемой для электроэнергетики. Для выявления этих хищений целесообразно использовать все возможности современных интеллектуальных приборов учета.

Ключевые слова: передача электроэнергии; большие данные; машинное обучение; хищение электроэнергии; безучетное потребление; бездоговорное потребление.



Проблема корректного учета потребления электроэнергии становится все более и более актуальной

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам определения и снижения потерь электрической энергии посвящено большое количество научных трудов [1–7]. Размер фактических потерь энергии в электрических сетях определяется как разница между объемом энергии, поставленной в электрическую сеть из других сетей или от производителей энергии, и объемом электрической энергии, потребленной энергопринимающими устройствами, присоединенными к этой сети, а также переданной в другие сетевые компании.

Фактические потери электроэнергии на ее передачу и распределение по электрическим сетям являются важнейшим показателем эффективности передачи электроэнергии, наглядным индикатором состояния системы учета электрической энергии, эффективности энергосбытовой деятельности и ее взаимодействия с электросетевой деятельностью.

Структура потерь электроэнергии наиболее подробно описана в Инструкции по организации в Минэнерго России работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям [утв. приказом Минэнерго России от 30.12.2008 № 326, зарег. в Минюсте России от 12.02.2009 г. № 13314; далее — Инструкция].

Структура потерь электрической энергии в соответствии с Инструкцией представлена в табл. 1.

В соответствии с Правилами функционирования розничных рынков электрической энергии в переходный период реформирования электроэнергетики применяются следующие основные понятия: безучетное потребление; бездоговорное потребление; неучтенное потребление

электроэнергии. Безучетное потребление — это потребление с нарушением установленного договором энергоснабжения, а бездоговорное потребление — это самовольное подключение энергопринимающих устройств к объектам электросетевого хозяйства, другими словами, это хищения электрической энергии.

При сравнении фактических относительных потерь электроэнергии в электрических сетях России с уровнями потерь в промышленно развитых странах можно сделать вывод, что в нашей стране в целом имеется весьма существенный потенциал снижения потерь. По минимальным оценкам он составляет около 15–25 млрд кВт·ч в год, из них 20 млрд кВт·ч — потенциал снижения нетехнических потерь электроэнергии. Доля потенциала снижения значений фактических потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях колеблется в диапазоне от 10 до 40% [2].

Массовое внедрение интеллектуальных приборов учета (advanced metering infrastructure (AMI), smart meters) электроэнергии в России с небольшим отставанием от развитых стран началось в 2018 г. [8]. Так, только в некоторых электросетевых компаниях на начало 2021 г. установлено более 26 700 «умных» счетчиков [9]. Их внедрение повысило прозрачность процесса передачи электрической энергии, а также предоставило дополнительные возможности выявления случаев ее хищения. Поскольку интеллектуальные приборы учета передают показания достаточно часто (обычно один раз в 30 мин.) и на текущий момент в рамках одного региона страны установлено в среднем уже несколько тысяч, а то и десятков тысяч интеллектуальных приборов, то на серверах энергосбытовых и электросетевых компаний скапливаются значительные объемы данных (большие данные; big data) о протекающей по элемен-

там сети электроэнергии и профилях энергопотребления отдельных потребителей. Такое количество данных не может быть эффективно проанализировано вручную. Это обусловило запуск на территории одной из электросетевых компаний пилотного проекта по созданию информационной системы по управлению передачей электроэнергии с использованием технологии больших данных, предполагающий в том числе анализ поступающих показаний интеллектуальных приборов учета в автоматическом режиме.

Существует ряд обзорных западных публикаций [4–7], достаточно полно описывающих разработанные на текущий момент методы подобного анализа, где различные авторы предлагают те или иные методы статистического анализа, машинного обучения, демонстрируя результаты их применения на реальных или синтетических данных. Однако, изучив большое количество материалов, авторы данной публикации пришли к выводу, что пока не существует какого-либо единого набора данных (датасета) показаний приборов учета и информации о хищении электроэнергии (как ImageNet в задачах компьютерного зрения), на основе которого исследователи из разных стран могли бы сравнивать различные подходы. Также не было обнаружено сведений о значимых реализованных проектах в мире в этой области, успешно доведенных до ежедневного использования на практике. Поэтому создание описываемой информационной системы велось, хотя и с оглядкой на отраженный в публикациях накопленный мировой опыт, но не по шаблону и с учетом региональных особенностей.

Как было сказано ранее, случаи хищения электроэнергии принципиально могут быть поделены на случаи безучетного и бездоговорного потребления. Таким образом,

вмешательство в работу прибора учета является безучетным потреблением, а наброс провода на воздушную линию электропередач (ЛЭП) или подпольная майнингферма являются бездоговорным потреблением.

Бездоговорное потребление электроэнергии наказывается более крупным штрафом, чем безучетное для аналогичного потребителя [12]. В связи с этим поиск бездоговорного потребления для сетевых компаний является приоритетной задачей.

При разработке информационной системы определения небалансов в распределительной сети (ИСОН) был проведен анализ бизнес-процессов электросетевой компании

в части управления передачей электроэнергии и определены необходимые источники данных.

Источниками данных являлись:

- топология электрической сети;
- параметры участков электрической сети (в том числе паспортные данные ЛЭП);
- показания приборов учета электроэнергии от сбытовых компаний;
- показания приборов технического учета электроэнергии, расположенных в электрической сети (не у потребителей);

– сведения об объектах недвижимости и потребителях (справочный контент из открытых геоинформационных систем, информация о юридических лицах, полученная из специализированной системы проверки контрагентов);

– общие данные (сведения о погоде);

– данные о ранее выявленных случаях безучетного и бездоговорного потребления.

При этом основными этапами разработки были определены:

- дата-инжиниринг — выявление и сбор необходимой информации;

- разработка алгоритмических решений;
- проверка моделей и их тюнинг;
- реализация эргономичного пользовательского интерфейса, закрывающего задачи анализа объектов с вероятным безучетным или бездоговорным электропотреблением, и контроль заданий, выданных на эти объекты.

ИНТЕГРАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ИСОН

ВНУТРИКОРПОРАТИВНЫЙ СЕКТОР

Информационная система сбора данных с приборов учета

ИСОН поддерживает интеграцию с системами, обеспечивающими сбор данных с приборов учета электроэнергии (в том числе и с устройств сбора и передачи данных — УСПД), и выполняет автоматизированный учет транспорта и распределения энергоресурсов.

К данным учета энергоресурсов, получаемым с приборов учета и УСПД различных производителей, относятся:

- показания приборов учета суммарные и по тарифам, текущие и зафиксированные;
- данные на начало отчетного периода;
- интервальные энергии, мощности, расходы за 1 ч (30 мин);
- энергии, расходы за сутки, месяц, год;
- параметры качества электрической сети с построением векторной диаграммы;

- журналы событий оборудования связи и учета;
- журналы показателей качества электроэнергии (ПКЭ).

Сбор данных производится в автоматическом (по расписанию) и ручном (по запросу пользователя) режимах. Выполняются подробное журналирование и диагностика сбора данных и связи с использованием оборудования учета. База данных оптимизирована для хранения больших массивов данных с глубиной 3,5 года и более.

Геоинформационная система

Геоинформационная система является информационной системой для автоматизации процессов сбора, обработки, ввода, верификации и визуализации сведений об электросетевом хозяйстве, взаимосвязях объектов электросетевого хозяйства (ОЭСХ) на картографической основе.

Автоматизированная система технологического управления

Автоматизированная система технологического управления (АСТУ) представляет собой программный комплекс с изменяемым набором приложений (SCADA/EMS/DMS/OMS/DTS) для создания автоматизированных систем оперативно-диспетчерского, технологического и ситуационного управления объектами электроэнергетики. АСТУ является источником топологии энергетической сети класса напряжения 6–110 кВ.

Информационная система управления производственными активами

Информационная система управления производственными активами (СУПА) содержит сведения об оборудовании электросетевой компании (марки и параметры воздушных и кабельных линий, трансформаторов,

выключателей и т.д.). К настоящему времени проработаны интеграционные решения с информационной системой СУПА, реализованной на базе как 1С, так и SAP.

ВНЕШНИЙ СЕКТОР

Реализованы интеграционные решения с системой информационного обмена между электросетевой компанией и сбытовыми компаниями, представленными в данном регионе.

Эта система информационного обмена содержит показания приборов учета электроэнергии, переданные сбытовыми компаниями (а тем, в свою очередь, передали сведения потребители; это показания физических и юридических лиц, общедомовые нужды).

Дополнительно для получения сведений о потребителях была реализована интеграция с информационной системой Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр) и информационной системой СПАРК [15]. Для получения сведений о погоде была выполнена интеграция с информационной системой OpenWeatherMap.

Представленный скриншот (рис. 1) демонстрирует интерфейс программы с детализацией объектов безучетного и бездоговорного электропотребления на карте (ГИС), соответствующей распределительной электросетевой компании (РЭС), а также сводной таблицей в разрезе адресов с детализацией вероятности безучетного и вероятности бездоговорного электропотребления.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСОН

ИСОН представляет собой систему поддержки принятия решений (СППР) для выявления безучетного и бездоговорного потребления.

СТРУКТУРА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Потери электроэнергии		Нетехнические потери*	
Технологические потери		дополнительные технические потери	нетехнические (коммерческие) потери
Технические потери		– Низкий уровень компенсации реактивной мощности – неоптимальные режимы работы сетей, перегрузка и недогрузка оборудования – плохое техническое состояние оборудования – устаревшее оборудование с повышенным потреблением электроэнергии – нерациональное построение сетей	– Безучетное и бездоговорное потребление – занижение полезного отпуска из-за недостатков энергосбытовой деятельности – задолженность по оплате за электроэнергию – и т.д.
условно-постоянные потери	переменные потери		
– на корону – в стали трансформаторов – в компенсирующих устройствах – в системе учета – в вентильных разрядниках и нелинейных ограничителях перенапряжений – в изоляции кабелей – от токов утечки по изоляторам воздушной линии – собственные нужды подстанций — плавка гололеда	Потери, обусловленные допустимой погрешностью системы учета электроэнергии – в линиях – в трансформаторах – в токоограничивающих реакторах		

Примечание. * В некоторых источниках нетехнические потери электроэнергии называются коммерческими, в зарубежных научных трудах также преимущественно используется термин non-technical loss(es) [4, 5].

Таблица 1

При разработке математического обеспечения ИСОН использовались следующие основные предположения:

- небаланс между показаниями приборов учета на последовательном участке электрической сети может указывать на безучетное или бездоговорное потребление;
- значительное отличие реального потребления от прогнозируемого может указывать на безучетное или бездоговорное потребление;
- характеристики временных рядов показаний физических и юридических лиц, осуществляющих хищение электроэнергии тем или иным способом, могут иметь особенности и в среднем отличаться от таких же характеристик для потребителей, не осуществляющих хищение электроэнергии;
- дополнительные сведения об объектах недвижимости и потребите-

лях могут повышать или понижать вероятность выявления у них случаев безучетного или бездоговорного потребления.

Последовательность обработки и анализа данных в ИСОН упрощенно можно представить следующим образом:

- на основе сведений о топологии электрической сети формируется (или корректируется) ее модель в виде графа (в случае изменения топологии обновляется);
- на основе сведений о местах расположения в сети приборов учета формируются балансовые группы (последовательные участки сети, на которых возможно по показаниям свести баланс поступившей и переданной дальше или потребленной электроэнергии), т. е. создается алгоритм формирования балансовых групп (АФБГ);
- для полученных балансовых групп рассчитывается небаланс, т. е. со-

здается алгоритм расчета небалансов в балансовых группах (АНБГ);

- рассчитываются технические потери в балансовых группах (алгоритм расчета технических потерь), происходит корректировка рассчитанных небалансов на величину технических потерь;
- производится оценка рассчитанных небалансов. В случае высокого значения небаланса оценивается процент передачи показаний входящими в рассматриваемую балансовую группу приборами учета. Если он очень высок, то оценивается процент соответствия предиктивного (прогнозируются показания приборов учета с помощью градиентного бустинга) и фактического небалансов. Если он не очень высок (т. е. предиктивный и фактический небалансы не совпадают — нехарактерный для данной балансовой группы небаланс), то осуществляется переход к интерпретации небаланса с возможным повышением вероятности хищения электроэнергии физическими и юридическими лицами;
- выполняется прогнозирование показаний физических и юридических лиц (с помощью градиентного бустинга с использованием библиотек XGboost и Catboost) и на основе оценки разницы предиктивных и фактических показаний рассчитываются индексы доверия показаниям физических и юридических лиц.

В результате данных действий создается ранжированный по величине небалансов перечень адресов объектов с возможным хищением электроэнергии и указанием на более вероятные в плане хищения группы потребителей (физических и юридических лиц).

Для детального анализа потребления в ИСОН с целью выявления возможных случаев безучетного и бездоговорного потребления была применена нейросетевая модель «долгая краткосрочная память» (Long short-term memory, LSTM), с помощью которой анализировались временные ряды потребления электроэнергии различными потребителями.

Кроме того, в модели использовались адреса объектов, индексы доверия показаниям потребителей, данные о погоде, производственный календарь (выходные и рабочие дни), процент передачи показаний приборов учета, данные из информационной системы проверки контрагентов СПАРК, данные о выявленных ранее случаях безучетного и бездоговорного потребления.

В результате с помощью вышеописанной модели LSTM был создан ранжированный по убыванию вероятности хищения электроэнергии перечень адресов объектов с указанием групп потребителей (физических и юридических лиц), которые с большой вероятностью могут похищать электроэнергию.

Далее два списка проходят перекрестное сравнение и в итоговом перечне для пользователя ИСОН определяются объекты, отобранные с помощью выявления небалансов в распределительной сети и нейросетевой модели LSTM.

Приведем более подробное описание некоторых алгоритмов, реализованных для определения небалансов в распределительной сети и их интерпретации.

1. АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ БАЛАНСОВЫХ ГРУПП И НЕБАЛАНСА

Назначение: формирование балансовых групп (балансовая

ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ИНТЕРФЕЙС, ДЕМОНСТРИРУЮЩИЙ БАЛАНСОВЫЕ ГРУППЫ

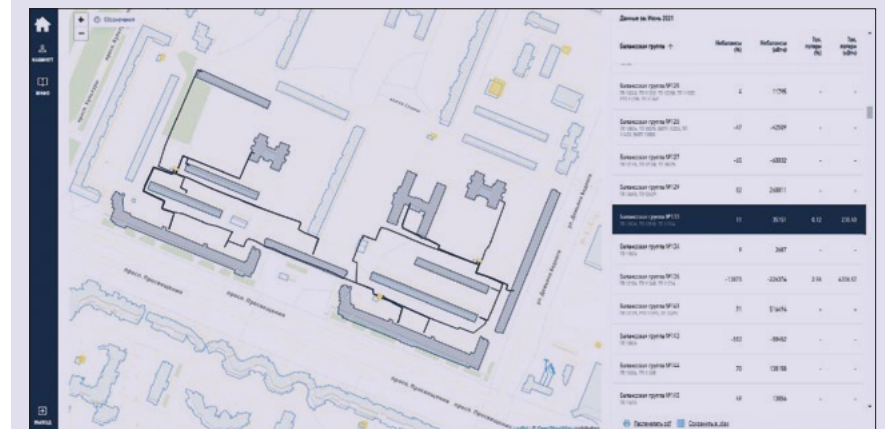


Рис. 2

группа — это часть электрической сети, оснащенная действующими приборами учета электроэнергии, по показаниям которых можно свести баланс полученной балансовой группой электроэнергии и потребленной и/или переданной дальше) для дальнейшего определения в них небаланса, одной из интерпретаций которого является хищение электроэнергии в том или ином виде, искомое в проекте.

Идея: определить «входные» и «выходные» приборы учета в схеме таким образом, чтобы в результате были сформированы отдельные участки сети небольшого размера, на которых можно вычислить небаланс (разность «поступившей» и «отданной» электроэнергии с учетом технических потерь на участке).

Входные данные: сведения о топологии электрической сети, адресах домов, расположении и показаниях приборов учета.

Выходные данные: перечень балансовых групп.

На представленном скриншоте (рис. 2) можно увидеть, как программа отображает сформированную балансовую группу с указанием данных небалансов и технических потерь в процентах и киловатт-часах.

2. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Назначение: расчет технических потерь электроэнергии в элементах сети в соответствии с Инструкцией.

Идея: рассчитать технические потери электроэнергии в элементах сети, для того чтобы учесть их при расчете небаланса в балансовых группах.

Входные данные: сведения о топологии электрической сети, параметрах и справочных данных по кабельным линиям и силовым трансформаторам, показания приборов учета.

Выходные данные: технические потери электроэнергии в элементах сети и балансовых группах.

КАРТА БЕЗУЧЕТНОГО И БЕЗДОГОВОРНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕБАЛАНСОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ



Рис. 1

3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАНИЙ ПРИБОРОВ УЧЕТА ФИЗИЧЕСКИХ И ЮРИДИЧЕСКИХ ЛИЦ

Назначение: прогнозирование показаний приборов учета физических и юридических лиц для последующего соотнесения с фактическими показаниями.

Идея: выполнить прогнозирование показаний (решить задачу регрессии) качественной регрессионной моделью.

Входные данные: показания приборов учета, данные о погоде, сведения об объекте недвижимости.

Выходные данные: прогнозируемые показания приборов учета.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Построена уникальная информационная система, обеспечивающая интеграцию с корпоративными информационными системами ДЗО ПАО «Россети».

В 2021 г. реализовано внедрение данной информационной системы с некоторыми доработками в одном из ДЗО ПАО «Россети».

Средний уровень выявления случаев безучетного и бездоговорного потребления с использованием данной системы (около 10 случаев на 100 объектов) превосходит средний уровень аналогичного выявления «вручную» (около 3–5 случаев на 100 объектов). Для оценки необходимости изменения или дополнения применяемых моделей следует использовать данные от пользователей за конкретный период и проанализировать полученную ранее статистику.

ВЫВОДЫ

Хищение электрической энергии является серьезной проблемой

для электроэнергетики, а фактические потери электроэнергии — это важнейший показатель эффективности передачи электроэнергии.

Для выявления хищения электроэнергии целесообразно использовать возможности анализа показаний интеллектуальных приборов учета, дистанционно передающих показания с высокой частотой, установка которых является в энергетике одним из значимых мировых и отечественных трендов последних лет. Из-за большого объема накапливаемых данных целесообразно использовать методы интеллектуальной обработки данных, в том числе машинного обучения.

В результате внедрения и опытной эксплуатации были выявлены случаи безучетного и бездоговорного потребления на основе рекомендаций ИСОН. Предварительные результаты оказались выше среднего уровня выявления случаев безучетного и бездоговорного потребления без использования алгоритмов и методик, заложенных в ИСОН. При этом время, затрачиваемое на принятие решения, существенно сократилось.

В ходе реализации проекта может быть построена единая информационная система по принципу единого хранилища данных, «привязывающая» приборы учета к топологии электрической сети и позволяющая наглядно видеть оснащенность ими электрических сетей.

ИСОН обладает эргономичным человекомашинным интерфейсом в области визуализации и анализа транспорта электроэнергии, пригодного для дальнейшего развития и автоматизации. Получено свидетельство о регистрации программного обеспечения, что позволяет рассматривать ИСОН как коробочное отраслевое решение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009.
2. Вороничкий В.В. Анализ динамики, структуры и мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях//Энергоэксперт. 2017. № 5–6 (64).
3. Данилов М.И., Романенко И.Г. Метод расчета и мониторинга нетехнических потерь электроэнергии в распределительной сети 380 В, контролируемой системой учета//Электроника. Передача и распределение. 2020. № 6 (63). С. 46–53.
4. Glauner P., et al. The Challenge of Non-Technical Loss Detection using Artificial Intelligence: A Survey// International Journal of Computational Intelligence Systems. 2017. №. 10 (1). P. 760–775.
5. Viegas J.L., et al. Solutions for detection of non-technical losses in the electricity grid: A review//Renew. Sustain. Energy Rev. 2017. №. 80. P. 1256–1268.
6. Messinis G.M., Hatzigrygiou N.D. Review of non-technical loss detection methods//Electr. Power Syst. Res. 2018. №. 158. P. 250–266.
7. Buzau M. Machine learning algorithms for the detection of non-technical losses in electrical distribution networks. PhD Thesis 2019. URL: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/99057/Buzau%20Madalina%20Mihaela%20Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
8. Красник В.В. 101 способ хищения электроэнергии. М.: ЭНАС, 2005.
9. ПАО «Россети». Концепция «Цифровая трансформация 2030» (протокол заседания Совета директоров ПАО «Россети» от 21.12.2018 № 336). URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf
10. Дорожная карта по реализации концепции «Цифровая трансформация 2030» (приказ ПАО «Россети» от 20.03.2019 № 56).
11. Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии».
12. Электронный ресурс. URL: <http://www.sicon.ru/prod/ro/pyramidnet/>
13. Электронный ресурс. URL: <https://monitel.ru/products/ck-11/>
14. Электронный ресурс. URL: <https://www.spark-interfax.ru/>
15. Электронный ресурс. URL: <https://openweathermap.org/>



РОССЕТИ

ОСК ЕЭС

Научно-технический центр

В СТРЕМЛЕНИИ К ИННОВАЦИЯМ