



**Некоммерческое партнерство
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ
Единой энергетической системы»**

111 250, Москва, проезд Завода Серп и Молот,
дом 10, офис 608, Тел. (495) +7 495 012 60 07
E-mail: dtv@nts-ees.ru, <http://www.nts-ees.ru/>
ИНН 7717150757

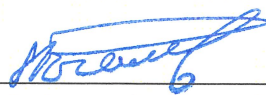


Основана в 1724 году

**Российская Академия Наук
Секция по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по
системным исследованиям в энергетике**

УТВЕРЖДАЮ

Президент, Председатель
Научно-технической коллегии,
д.т.н., профессор

 Н.Д. Рогалев
«05» декабря 2023 г.

ПРОТОКОЛ № 11

совместного заседания Секции «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и
Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным
исследованиям в энергетике

16 ноября 2023 года

г. Москва

Присутствовали: члены секции «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС»,
ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», сотрудники НП «НТС ЕЭС», ФГБУН «ИНЭИ РАН»,
ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», АО «СО ЕЭС», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», ГБОУ ВО
«Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет», ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева», ФГАОУ
ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», ФГБОУ
ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им.
первого Президента России Б.Н. Ельцина», ФГБОУ ВО «Сибирский
федеральный университет», АНО «НИЦ-«АТМОГРАФ», ООО НПП «ЭКРА»,
ООО «РТСофт-СГ», всего **45** человек.

Со вступительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. Илюшин П.В.

Во вступительном слове было отмечено, что проблема выявления нетехнических потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях остается актуальной. В нынешних условиях стало возможным использовать современные методы для поиска мест возникновения нетехнических потерь электроэнергии для выявления недобросовестных потребителей с целью принятия к ним соответствующих мер. Имеется некоторый международный опыт использования информационных методов для решения поставленной задачи, который успешно применяется в ряде стран мира. В России такого практического опыта нет, однако применение информационных методов, в условиях недостаточного количества персонала в распределительных сетевых компаниях, может дать значимые эффекты. Это позволит распространить полученный при реализации пилотных проектов опыт на всю страну.

С докладом **«Анализ информационных методов выявления нетехнических потерь электроэнергии»** выступил **Самойленко В.О.**, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные электрические системы» УралЭНИИ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Основные положения доклада приведены ниже. Презентация доклада прилагается (**Приложение 1**).

1. Обзорно-аналитическая часть

Нетехнические потери электроэнергии (НПЭЭ) наносят существенный ущерб экономике РФ и большинства стран мира.

Существуют две группы методов выявления нетехнических потерь электроэнергии – схемно-технические и информационные, и доклад посвящен анализу второй группы методов.

Эффективность развития и функционирования распределенных энергетических ресурсов критически зависит от фактической величины потребления электроэнергии, включающей нетехнические потери.

Искусственные нейронные сети различных видов рассматриваются в 41% современных международных публикаций по тематике выявления нетехнических потерь электроэнергии, что делает их наиболее популярной группой информационных методов.

Также два российских и более 12 современных зарубежных программных комплексов основаны на математическом аппарате искусственных нейронных сетей для решения указанной задачи.

Традиционные информационные методы из XX века не превосходили 60% достоверности выявления нетехнических потерь, современные методы достигают 99 % (на модельных данных).

Математически выявление источника нетехнических потерь сводится к бинарной классификации с результатами «истинно отрицательный», «ложноположительный», «ложноотрицательный» и «истинно положительный».

Основными используемыми метриками бинарной классификации НПЭЭ являются: чувствительность, достоверность и площадь под кривой истинно-положительных и ложноположительных результатов (AUC ROC).

В основном в работах и проектах по выявлению НПЭЭ используются только профили потребления электроэнергии дискретностью 30-60 мин. глубиной ретроспективы 1-2 года в сети без балансового счетчика, что позволяет выявить источники НПЭЭ за несколько месяцев-лет работы алгоритма.

Все виды НПЭЭ можно свести к 6 математическим моделям, из которых две – кражи, две – ошибки синхронизации (в настоящее время на практике невозможны) и две – некорректное восстановление утерянных данных после сбоя.

Для вычислительных экспериментов нужен открытый набор данных большой размерности, желательно не содержащий большого количества сбоев, опционально – с разметкой.

Лучшими наборами данных в открытых источниках являются SGCC и LCL SM TD.

Исходные данные подлежат удалению пропусков и нормализации.

Для успешного выявления НПЭЭ требуется от 20 тыс. точек, лучше от 100 тыс. точек в подготовленных выборках.

Дополнительные электрические и неэлектрические параметры из выборки повышают чувствительность алгоритма на 7-10% и снижают частоту ложноположительных значений на 3-5%.

Некоторой проблемой является обучение искусственной нейронной сети на несбалансированных данных, представленных в основном не содержащими НПЭЭ измерениями.

Для балансирования исходной выборки могут применяться методы повышения размерности меньшего из классов, методы понижения размерности большего из классов и комбинированные методы.

В качестве альтернативы может рассматриваться синтез дополнительных исходных данных генеративно-состязательными искусственными нейронными сетями.

Балансовые счетчики редко используются в качестве источника исходных данных, но эта практика оспаривается научным сообществом.

Наилучшими по достоверности выявления НПЭЭ являются свёрточные нейронные сети и автокодировщики с небольшим преимуществом первых.

Рекуррентные нейронные сети и нейронные сети долгосрочно-краткосрочной памяти не предоставляют повышают чувствительность алгоритма на 5-7% и снижают частоту ложноположительных значений на 3-5%, но более часто подвержены проблемам с обучением на реальных выборках.

Общая последовательность выявления НПЭЭ включает, как правило, от 12 до 17 расчетных этапов.

Принципиально существует два подхода выявления НПЭЭ: поиск НПЭЭ по подозрительному участку профиля и поиск НПЭЭ по подозрительному потребителю, нуждающихся в совместном применении с учетом достоинств и недостатков каждого подхода;

2. Расчетно-тестовая часть

Вычислительный эксперимент проводился с учетом лучших мировых практик в части информационных методов выявления НПЭЭ.

Вычислительный эксперимент проводился с использованием открытого набора данных LCL SM TD, включающего 200 млн измерений получасовых измерений потребления электроэнергии.

В ходе вычислительного эксперимента тестировались автокодировщики с полносвязными слоями на суточный график потребления электроэнергии, а также свёрточные автокодировщики: плоские одноканальные на суточный и недельный графики, многоканальный на недельный график, в т.ч. со среднеквадратической функцией ошибки и с логарифмической функцией ошибки.

Детальные настройки использованных искусственных нейронных сетей и вычислительного эксперимента приведены в презентации к докладу.

Для имитации НПЭЭ были использованы три модели НПЭЭ, каждая из которых использовалась для моделирования НПЭЭ 3 суток в неделю, или 5 суток в неделю, или 7 суток в неделю;

Наиболее высокую эффективность показал свёрточный многоканальный автокодировщик с логарифмической функцией ошибки.

Доля площади под кривой частот истинно-положительных и ложноположительных значений (ROC AUC) в качестве результата выявления НПЭЭ составляет 64 %, 80 % и 95 %, соответственно, что соответствует мировому уровню;

Время обучения выбранного автокодировщика составило 2,5 часа.

В качестве критерия отнесения потребителя к источнику НПЭЭ может быть рассмотрено положение на кривой среднеквадратической разницы между исходным и восстановленным графиками правее точки резкого подъема, что может быть определено по второй производной кривой.

Основные выводы по докладу:

Искусственные нейронные сети для выявления НПЭЭ используются в 41%

публикаций по методам выявления НПЭЭ, в т.ч. в 24% сверточные нейронные сети и в 9% автокодировщики.

В среднем искусственные нейронные сети не обеспечивают достоверность выявления модельных НПЭЭ на уровне 92%, лучшие – на уровне 95-97%.

В 76% публикаций используются только профили электропотребления без привлечения дополнительных исходных данных. Вспомогательными данными являются электрические параметры, метеоданные и, реже, кадастровые данные и геолокация.

Глубина ретроспективы 30-минутных профилей электропотребления должна составлять не менее 1 года, но желательно 2 года и более, а также несколько сотен потребителей.

Все основные виды НПЭЭ, в т.ч. сбои систем учета и хищения, можно смоделировать 6-ю типами искажений профиля электропотребления.

В научных публикациях тестирование искусственных нейронных сетей производится на архивных наборах данных из открытых источников.

Ученым и инженерам в России нужен подобный набор данных для проведения дальнейших исследований и разработки эффективных способов выявления НПЭЭ.

Для достижения результата крайне важна подготовка данных в виде восстановления пропусков, фильтрации, нормализации и, в случаях дефицита значений из наименьшего класса, балансировки выборки.

При проведении вычислительного эксперимента и тестовых расчетов достигнута эффективность выявления НПЭЭ на модельных данных, сопоставимая с лучшими результатами в мировых публикациях.

В обсуждении доклада и прениях выступили:

Воротницкий В.Э., Рабинович М.А. (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»), Голуб И.И. (ИСЭМ СО РАН), Илюшин П.В. (ИНЭИ РАН, НП «НТС ЕЭС»), Шведов Г.В. (НИУ «МЭИ»), Кивчун О.Р. (БФУ им. И. Канта), Николаев В.Г. (АНО «НИЦ-«АТМОГРАФ»), Суслов К.В., Тягунов М.Г. (НИУ «МЭИ»), Москвин И.А. (АО «СО ЕЭС»).

Воротницкий В.Э. – Главный научный сотрудник АО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы», д.т.н., профессор.

Отметил пользу и содержательность доклада.

Прокомментировал уровни нетехнических потерь электроэнергии и структуру нетехнических потерь электроэнергии в отечественных распределительных сетях.

Задал вопросы о требуемой глубине ретроспективы, безучётном и бездоговорном потреблении, о комбинированном использовании

информационных и схемно-технических методов.

Рабинович М.А. – Главный научный сотрудник АО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы», д.т.н., с.н.с.

Отметил отсутствие классификации источников нетехнических потерь и нестационарность статистики потребления электроэнергии.

Задал вопрос о циклическом переобучении нейронной сети.

Голуб И.И. – Ведущий научный сотрудник Отдела электроэнергетических систем №40 ФГБУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук», д.т.н., профессор.

Отметила важность научной работы в представленном направлении, а также научную новизну подхода в рамках российской науки.

Прокомментировала переменчивость терминологии по рассматриваемой тематике и необязательность использования балансового счетчика электроэнергии.

Задала вопросы о борьбе с обходом счетчика электроэнергии и использовании других методов выявления НПЭЭ.

Илюшин П.В. – Руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований Российской академии наук», председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н.

Задал вопросы об особенностях выявления набросов на линии электропередачи 0,4 кВ информационными методами и степени развития автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии.

Шведов Г.В. – Доцент Кафедры электроэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», к.т.н., доцент.

Задал вопросы о влиянии нестационарности потребления электроэнергии и территориальной изменчивости статистики, необходимой для обучения нейронной сети.

Кивчун О.Р. – Доцент Кафедры телекоммуникаций Института физико-математических наук и информационных технологий ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта».

Задал вопрос о нормализации исходных данных.

Прокомментировал сокращение выборки при удалении недостоверных измерений и пропусков измерений.

Николаев В.Г. – Директор Автономной некоммерческой организации «Научно-информационный центр – «АТМОГРАФ», д.т.н.

Задал вопросы о количестве специалистов одновременно в области электроэнергетики и искусственный нейронных сетей, влиянии ВИЭ на нетехнические потери электроэнергии, а также перспективах борьбы с нетехническими потерями электроэнергии.

Суслов К.В. – Профессор кафедры Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», д.т.н., доцент.

Задал вопросы о распознавании образов среднестатистических и уникальных потребителей нейронной сетью и сдвиге профилей потребления во времени.

Тягунов М.Г. – Профессор кафедры Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», д.т.н., профессор.

Задал вопросы о работе искусственной нейронной сети в условиях существования устойчивого тренда изменения потребления электроэнергии, а также о применимости (степени отличия) нейронной сети для прогнозирования потребления электроэнергии.

Москвин И.А. – ведущий эксперт Департамента развития персонала АО «СО ЕЭС», к.т.н.

Отметил перманентную несбалансированность исходных данных в задаче выявления нетехнических потерь электроэнергии.

Задал вопросы о метрике результатов выявления потерь и методиках приведения размерности разных классов к одному порядку.

Заслушав выступления экспертов по результатам дискуссии совместное заседание Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **отмечает:**

1. В настоящее время в России имеется техническая готовность к внедрению технологий искусственного интеллекта не более чем в 20% распределительных сетей.

2. Влияние генерации на основе ВИЭ усложнит анализ проявления нетехнических потерь электроэнергии в распределительных сетях.

3. Основные положения представленного на заседании доклада изложены в опубликованных научных статьях в журнале «Электроэнергия. Передача и распределение», №4, 5 за 2023 г.

Совместное заседание Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **решило:**

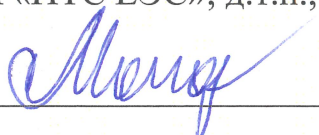
1. Рекомендовать коллективу авторов продолжить исследования и разработки в данном научном направлении.

2. Рекомендовать научному сообществу России заниматься вопросами реализации пилотных проектов внедрения искусственных нейронных сетей в электроэнергетической отрасли для решения актуальных задач.

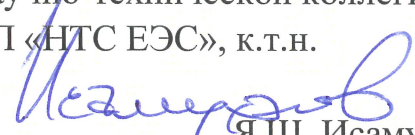
3. Рекомендовать коллективу авторов уделить особое внимание анализу случаев неуспешного применения искусственных нейронных сетей с целью выявления их причин.

С заключительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н. Илюшин П.В., в котором отметил, что доклад посвящен теме, по которой выпускается сравнительно небольшое количество научных публикаций. В рассматриваемой тематике сделан значимый шаг в освоении использования информационных методов выявления нетехнических потерь электроэнергии, а в целом в электроэнергетике – шаг в освоении методов искусственного интеллекта. При этом необходимо активизировать взаимодействие с научным сообществом для обмена опытом, а также производственным сообществом для внедрения полученных результатов.

Первый заместитель Председателя
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор


В.В. Молодцов

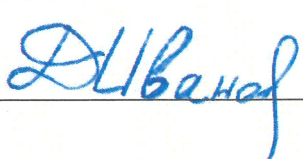
Ученый секретарь
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.


Я.И. Исамухамедов

Председатель секции «АСРЭ и РЭР»
НП «НТС ЕЭС», ученый секретарь
Секции по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по системным
исследованиям в энергетике, д.т.н.


П.В. Илюшин

Ученый секретарь секции
«Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные
энергетические ресурсы» НП «НТС
ЕЭС»


Д.А. Ивановский