



# ЭЛЕКТРО ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИЯ

ISSN 2218-3116

№ 4 (79), июль–август 2023

 **ТАВРИДА ЭЛЕКТРИК**  
Совершенство технических решений

## НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИСОЕДИНЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

РАЗРАБОТАНО  
И СДЕЛАНО  
В РОССИИ



16+

*Развитие и повышение  
надежности  
распределительных  
электрических сетей*

*Снижение потерь  
электрической  
энергии*

*Анализ изменений  
подходов к обучению  
по охране труда*

## «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ.

### Передача и распределение»

Издатель и учредитель журнала — ООО «КАБЕЛЬ»  
№ 4(79), июль–август 2023

#### Генеральный директор издательства

Екатерина Гусева,  
член секции «Технологии и оборудование  
линий электропередачи» НТС ПАО «Россети»,  
e-mail: info@eepir.ru

#### Заместитель генерального директора издательства

Наталья Гусарова, e-mail: inter@eepir.ru

#### Главный редактор

Владимир Тульский,  
к.т.н., доцент, директор Института  
электроэнергетики НИУ «МЭИ»,  
e-mail: chief@eepir.ru

#### Заместитель главного редактора

Наталья Салтыкова, e-mail: editor@eepir.ru

#### Научный редактор

Михаил Дмитриев,  
к.т.н., доцент кафедры «Электроэнергетическое  
оборудование электрических станций, подстанций  
и промышленных предприятий» ПЭИПК

#### Ведущий эксперт

Сергей Шумахер,  
Заслуженный энергетик РФ

#### Директор по стратегическим проектам

Александр Павлов, e-mail: pavlov@eepir.ru

#### Руководитель отдела рекламы и подписки

Марина Ефремова,  
e-mail: reklama@eepir.ru

#### Специалист по связям с общественностью

Маргарита Гафурова

#### Менеджер по работе с клиентами

Наталья Забавина

#### Обозреватель

Всеволод Пименов

#### Специалист по международной деятельности

Ринат Насыров

#### Технический переводчик

Максим Силаев

#### Корректор

Ольга Ашмарина

#### Дизайн и верстка

Евгения Ханова, Ольга Лебедева

#### Фотокорреспондент

Алексей Котов

#### Адрес редакции:

111123, Москва,

Электродный проезд, д. 6, оф. 14

Тел./факс: +7 (495) 645-12-41

E-mail: mail@eepir.ru

www.EEPIR.ru

Входит в Перечень рецензируемых научных изданий,  
в которых должны быть опубликованы основные  
научные результаты диссертаций на соискание  
ученых степеней кандидата и доктора наук,  
утвержденный ВАК Минобрнауки России.

Включен в реферативную базу данных  
«Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

Подписной индекс:  
«Урал-Пресс» — 36859 (на полугодие), 36861 (на год);  
«Почта России» — П7579 (на полугодие).

Периодичность — 6 раз в год. Тираж 15000 экз.

Свидетельство о регистрации средства массовой  
информации ПИ № ФС77-40297 от 25 июня 2010 г.

Подписано в печать 22.08.2023.

Цена свободная.

Отпечатано в типографии

ООО «АРТФРЕЗА».

Издательство не несет ответственности за  
содержание рекламных материалов — П.

Мнение редакции может не совпадать  
с мнением авторов статей.

Перепечатка или копирование материалов,  
опубликованных в журнале, допускаются только  
с письменного разрешения редакции.

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Шишкин А.Н.**, вице-президент по информатизации, инновациям  
и локализации ПАО «НК «Роснефть», председатель редакционного совета

**Черезов А.В.**, эксперт

**Голубев П.В.**, генеральный директор АО «Техническая инспекция ЕЭС»

**Лысцев С.В.**, генеральный директор СРО СОЮЗ «ЭНЕРГОСТРОЙ»

**Маслов А.Н.**, технический директор ООО «Электросетевая компания  
Нижнего Новгорода»

**Медведев Д.Б.**, начальник производственно-технического управления  
ПАО «Россети Московский регион»

**Механошин Б.И.**, заместитель генерального директора по специальным  
проектам журнала «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение»

**Павлушко С.А.**, первый заместитель председателя Правления  
АО «СО ЕЭС»

**Фролов Д.И.**, к.э.н., заместитель руководителя Ростехнадзора

**Чегодаев А.В.**, советник первого заместителя генерального директора —  
главного инженера ПАО «Россети Московский регион»

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Бартоломей П.И.**, д.т.н., профессор кафедры Автоматизированных  
электрических систем УралЭНИН УрФУ им. Б.Н. Ельцина

**Боев М.А.**, д.т.н., профессор кафедры Физики и технологии

электротехнических материалов и компонентов НИУ «МЭИ»

**Вариводов В.Н.**, д.т.н., профессор кафедры Техники и электрофизики  
высоких напряжений НИУ «МЭИ»

**Гвоздев Д.Б.**, к.т.н., первый заместитель генерального директора —  
главный инженер ПАО «Россети Московский регион», доцент кафедры  
ЭЭС Института электроэнергетики НИУ «МЭИ»

**Гольдштейн В.Г.**, д.т.н., профессор СамГТУ, действительный член

АЭН РФ

**Дарьян Л.А.**, д.т.н., директор по научно-техническому сопровождению

АО «Техническая инспекция ЕЭС», Заслуженный член СИГРЭ

**Дементьев Ю.А.**, председатель научно-технического совета, главный

научный сотрудник АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

**Илюшин П.В.**, д.т.н., главный научный сотрудник, руководитель

Центра «Интеллектуальные электроэнергетические системы и рас-  
пределенная энергетика» ИНЭИ РАН, руководитель Национального

исследовательского комитета С6 РНК СИГРЭ, председатель секции

НП «НТС ЕЭС»

**Кондратьева О.Е.**, д.т.н., доцент, заведующая кафедрой Инженерной  
экологии и охраны труда НИУ «МЭИ», член экспертного совета комиссии

по экологической политике Мосгордумы

**Крупенев Д.С.**, к.т.н., старший научный сотрудник, заведующий

лабораторией «Надежность топливо- и энергоснабжения»

ИСЭМ СО РАН

**Кудрявцев И.Е.**, к.э.н., исполнительный директор АО «НПО ВЭИ

Электроизоляция»

**Кужиков С.Л.**, д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭЭС ЮРГТУ (НПИ)

имени М.И. Платова

**Лачугин В.Ф.**, д.т.н., старший научный сотрудник разработки

преобразовательной техники АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

**Линт М.Г.**, к.т.н., член секции «Технологии и оборудование

подстанций» НТС ПАО «Россети»

**Макаричев Ю.А.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой

Электромеханики и автомобильного оборудования СамГТУ

**Мисриханов М.Ш.**, д.т.н., профессор, советник председателя

Правления компании «Россети ФСК ЕЭС», академик РАЕН

**Нагай В.И.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой

ЭСиЭЭС ЮРГТУ (НПИ) имени М.И. Платова

**Назарычев А.Н.**, д.т.н., профессор кафедры «Электроэнергетика

и электромеханика» Санкт-Петербургского горного университета

**Нудельман Г.С.**, к.т.н., профессор, заведующий кафедрой ТОЭ

и РЗА ЧГУ им. И.Н. Ульянова, действительный член АЭН РФ

**Паздерин А.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой

Автоматизированных электрических систем УралЭНИН УрФУ им. Б.Н. Ельцина

**Палис С. (Palis S.)**, Ph.D., младший профессор по направлению

«Управление системами с распределенными параметрами»

Магдебургского университета им. Отто фон Герике (Германия)

**Попов М. (Popov M.)**, дипл. инж., магистр, профессор, руководитель

группы Intelligent Electrical Power Grids факультета EEMCS Делфтского

технологического университета (Нидерланды), член CIGRE, старший

член IEEE

**Сауцк Е.И.**, д.т.н., доцент, начальник Службы внедрения

противоаварийной и режимной автоматики АО «СО ЕЭС»

**Смелков Г.И.**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник

ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ, Заслуженный деятель науки РФ,

действительный член АЭН РФ

**Смоловик С.В.**, д.т.н., профессор, старший научный сотрудник научно-

технического отдела АО «НТЦ ЕЭС», действительный член АЭН РФ

**Терзия В. (Terzija V.)**, дипл. инж., магистр, д. инж., профессор

в области электроэнергетических систем EPSRC Манчестерского

университета (Великобритания), член CIGRE, IEEE, IET

**Шамонов Р.Г.**, к.т.н., начальник управления сопровождения

ОТУ и режимов Департамента оперативно-технологического управления

«Россети ФСК ЕЭС»

**Шунтов А.В.**, д.т.н., профессор кафедры электроэнергетических

систем НИУ «МЭИ»

ISSN 2218-3116



9772218 311106

# СОДЕРЖАНИЕ

## СОБЫТИЯ

- 6 VIII Международная конференция «Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей» и Техническая выставка «ЭЭПиР»**

Обзор мероприятия

- 14 Новый взгляд на технологическое присоединение потребителей от компании «Таврида Электрик»**

Репортаж с технологического шоу «Think Smart 2023»

## ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГИЯ

- 18 Энергетические сообщества с возобновляемыми источниками энергии: эффективное планирование и управление в условиях многокритериальности. Часть 2 (УДК 621.311.1:004.855)**

Томин Н.В., Шакиров В.А., Курбацкий В.Г., Попова Е.В., Сидоров Д.Н., Козлов А.Н., Корев Д.А.

- 32 АСУ ТП для систем накопления электроэнергии — ключевой элемент энергетической инфраструктуры**

Группа компаний ЭНЭЛТ

- 34 Анализ факторов, снижающих энергоэффективность работы ветроэнергетических станций (УДК 621.311.24)**

Шпенст В.А., Ермолович В.С.

## УПРАВЛЕНИЕ СЕТЯМИ

- 40 Предиктивное управление ликвидацией аварийных ситуаций в ПАО «Россети Московский регион»**

## КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

- 44 Анализ отклонений частоты, несинусоидальности и несимметрии напряжения в автономной энергосистеме нефтедобывающего предприятия (УДК 621.316.7:621.313.17)**

Зырянов В.М., Нестеренко Г.Б., Пранкевич Г.А., Хатыленко Р.М.

- 54 Методика формирования математической модели ЭЭС для расчетов несинусоидальных установившихся режимов и исследования резонансных явлений. Часть 1. Алгоритм методики и практические аспекты моделирования (УДК 621.316.7:004.942)**

Солодовников В.Е., Флёров А.Н., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Королев А.А.

## УЧЕТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

- 64 Анализ эффективности современных информационных методов выявления нетехнических потерь электроэнергии (УДК 621.316.1)**

Самойленко В.О., Верховзин А.М., Тащилин В.А., Паздерин А.В., Мухлынин Н.Д.

- 76 Борьба с хищениями электроэнергии с помощью комплексного решения от МТС**

- 78 Гибридный канал связи PLC+RF: решение ТМ «Энергомера» для оптимальной работы ИСУЭ**

## ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ

- 80 Необходимость совершенствования нормативного регулирования в электроэнергетике**

ООО «ПО «Энергожелезобетонинвест»

- 86 Применение методов имитационного моделирования для расчета показателей надежности при реализации проектов по распределенной автоматизации воздушных сетей 6–20 кВ**

Encore Engineering (ООО «ТрансЭнергоСнаб»)



**90** Централизованное решение по автоматике распределителей 6–10 кВ с использованием «умных» разъединителей и выключателей нагрузки  
ГК «АНТРАКС»

**94** НПП «Авис» — 10 лет на рынке электротехнической продукции

**96** Применение высокотемпературных проводов нового поколения на действующих ВЛ в условиях смещения максимумов нагрузки с зимы на лето  
ООО «Метсбытсервис», ФГБОУ ВО «ВолгГТУ», ООО «Техприспро», АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

## КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ

**104** Проблемы выбора сечения экранов кабелей 6–500 кВ (УДК 621.315.21)  
Дмитриев М.В.

**108** Длительно допустимая токовая нагрузка силовых кабельных линий высокого напряжения в условиях трубно-блочной канализации (УДК 621.315.232)  
Волошин К.В., Грешняков Г.В., Кизеветтер Д.В., Титков В.В., Тукеев П.Д., Чесноков Е.А., Бушанова В.В., Херсонцева И.О.

## РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА

**114** Ключевые вопросы релейной защиты  
Обзор Сессии 5 «Релейная защита и автоматика электрических сетей» VIII Международной конференции «Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей»

## ОБОРУДОВАНИЕ

**122** Модернизация производства энергоэффективных трансформаторов с сердечником из аморфной стали  
ООО «НПК «АВТОПРИБОР»

**124** Надежное оборудование Huawei для стратегически важных объектов  
Интервью с генеральным директором ООО «Хуамин» Яценко А.В.

**126** Химия трансформатора  
ООО «Трансформер»

**128** Воздушные выключатели EKF BA-45 v2 — надежная защита объектов энергетики

**130** ЭНЕРГОПРОМ-АЛЬЯНС — только вперед!

**132** Режимы нейтрали и пути повышения надежности распределительных электрических сетей 6–35 кВ  
ФГБОУ ВО «НГТУ»

## ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ

**136** Развитие и повышение эффективности теплового контроля контактов и контактных соединений при эксплуатации электроустановок распределительных электрических сетей  
АО «ОЭК»

## ПОДГОТОВКА КАДРОВ

**142** В Татарстане определили лучшую бригаду электромонтеров среди подрядных организаций

## ОХРАНА ТРУДА

**146** Анализ изменений подходов к обучению работников энергетической отрасли по охране труда (УДК 331.453:621.31)  
Кондратьева О.Е., Локтионов О.А., Васильева Н.В., Мирошниченко Д.А., Кузнецов Н.С.

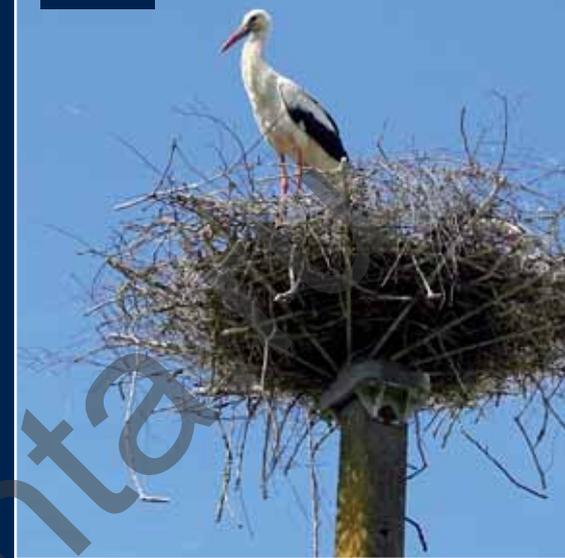
## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ТРАВМАТИЗМ

**152** Уроки, извлеченные из несчастных случаев  
Ростехнадзор

## ЭКОЛОГИЯ

**154** Оценка потенциала развития NetZero энергетики на примере объектов собственной энергогенерации ПАО «ГМК «Норильский никель»

94



114



142



154



# VIII Международная конференция «Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей» и Техническая выставка «ЭЭПиР»

СОБЫТИЯ



**В начале июля состоялась VIII Международная научно-техническая конференция «Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей», организованная компанией «Россети» и журналом «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение» при поддержке Министерства энергетики РФ. За два дня мероприятия его участники в рамках шести тематических сессий и впервые организованной постер-сессии обсудили более 90 докладов, представленных специалистами профильных ведомств, распределительных электросетевых компаний, крупных потребителей электроэнергии, а также учеными и экспертами отрасли. Техническая выставка «ЭЭПиР», сопровождающая конференцию, стала неотъемлемой частью дискуссии, местом встречи и знакомства представителей электросетевых компаний, ресурсодобывающих предприятий с разработчиками инновационных технических решений и производителями электротехнического оборудования.**

**А**ктуальность рассматриваемых в рамках ежегодных конференций вопросов развития и повышения надежности распределительных электрических сетей не вызывает сомнений у всех специалистов и экспертов отрасли. Именно поэтому с каждым годом мероприятие собирает на своей площадке все более представительные делегации не только из России, но и других стран СНГ. В текущем году общее число зарегистрированных участников составило более 1200 руководителей и экспертов.

На единственном в России отраслевом мероприятии, посвященном распределительному электросетевому комплексу, собрались представители всех регионов России (от Калининграда до Сахалина), всех

категорий владельцев распределительных электрических сетей (от крупных государственных холдингов до небольших частных организаций и энергетических подразделений предприятий нефтегазового комплекса), представители науки и производители продукции. Все участники обладают уникальным опытом управления распределительными сетями различного масштаба (от крупных регионов и мегаполисов до небольших поселков и хуторов) и в различных географических и климатических условиях. Спектр обсуждаемых вопросов конференции был ориентирован, в первую очередь, на качественное обновление объектов распределительного электросетевого комплекса и обеспечение поддержки укреплению надежности и безопасности сетей.



### ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ

Открывая пленарную сессию, ее модератор, ведущий эксперт журнала «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение», Заслуженный энергетик РФ **Сергей Шумахер** отметил, что распределительные сети (особенно сети среднего и низкого напряжения) являются самым большим сегментом электросетевого хозяйства страны: «Эти сети входят в состав предприятий не только энергетики, но также промышленности, жилищно-коммунального хозяйства, сельского хозяйства, в состав других самых разных организаций независимо от форм собственности».

Также Сергей Шумахер особо отметил участие в конференции специалистов из Республики Беларусь, а саму конференцию охарактеризовал, как «самое крупное тематическое мероприятие как по количеству участников, так и по перечню обсуждаемых вопросов».

Еще один акцент Сергей Шумахер сделал на формате конференции, который по сравнению с прошлыми годами был изменен: «В этом году участники мероприятия имеют возможность не только совместно обсуждать общие проблемы развития и эксплуатации распределительных электрических сетей, но и более детально погружаться в специальные вопросы для более качественной их проработки в рамках шести тематических сессий».

С приветственным словом к участникам конференции обратилась директор Департамента оперативного управления в ТЭК Министерства энергетики РФ **Елена Медведева**, которая, в первую очередь, отметила важность и результативность проводимого мероприятия. Его уникальность состоит в том, что собранные на одной дискуссионной площадке пред-

ставители различных направлений в ходе конструктивного диалога решают общую задачу повышения надежности и эффективности распределительных электрических сетей. Елена Анатольевна подчеркнула, что итоги конференции, формируемые ежегодно по результатам проводимых дискуссий, неизменно учитываются Министерством энергетики РФ при внесении поправок в нормативные и законодательные акты, формировании новых отраслевых документов.

Среди ключевых задач, которые на сегодняшний день стоят перед распределительным электросетевым комплексом, спикер отметила необходимость повышения надежности электроснабжения потребителей (и для этого в ряде регионов реализуются специальные программы), а также важность ускорения решения вопросов консолидации бесхозяйных сетей.

В рамках реализации этих задач все возникающие вопросы должны решаться компаниями электросетевого комплекса максимально оперативно, и для обеспечения таких возможностей Министерством энергетики проводится большая работа по оптимизации соответствующей законодательно-нормативной базы и снятию имеющихся ограничений. В заключение своего обращения к участникам конференции Елена Медведева выразила уверенность, что предложения, сформулированные по итогам мероприятия, помогут дополнительно конкретизировать принимаемые решения с учетом консолидированного мнения экспертов отрасли.

Заместитель главного инженера ПАО «Россети» **Василий Вычегжанин** в своем докладе отметил, что ключевой задачей Группы «Россети» является повышение надежности распределительных сетей,



Шумахер С.А.



Медведева Е.А.



Вычегжанин В.В.



Купчиков Т.В.



Роголев Н.Д.



Замосковный А.В.

включая объекты 0,4–20 кВ. Ее решению способствует внедрение единых принципов оперативно-технологического управления, единых требований технической и эксплуатационной политики. Реализуется комплекс мер по содержанию оборудования в состоянии эксплуатационной готовности, в том числе в рамках ежегодных ремонтных программ. Все распределительные сетевые компании Группы «Россети» осуществляют консолидацию активов, включая бесхозяйное имущество, используемое в процессе передачи электрической энергии.

В числе приоритетных задач Василий Вычегжанин также назвал уменьшение продолжительности и числа плановых отключений потребителей. С 2020 года «Россети» активно внедряют в распределительном комплексе технологию производства работ под напряжением. Обучение прошли уже более 580 бригад, за 2022 год они выполнили 35,5 тысяч таких ремонтов. Еще одним важным решением является использование передвижных электроустановок обратной трансформации и сервисных (временных) кабельных линий.

Параллельно идет работа по повышению качества электроснабжения: проводится реконструкция трансформаторных подстанций и линий электропередачи, на наиболее проблемных участках используются бустеры — автоматические устройства регулирования напряжения. Перспективным направлением является внедрение систем накопления (СНЭ), которые позволяют обеспечивать управляемую выдачу мощности в сеть по мере необходимости, например, в пиковые часы. Группа «Россети» эксплуатирует 35 СНЭ различной мощности, еще 16 проектов находятся сейчас в стадии реализации.

Более широкому применению современных технологий в распределительных сетях может способствовать совершенствование нормативно-правовой базы для включения СНЭ в рынок системных услуг, использования распределенной генерации как альтернативы строительству питающих удаленных потребителей ЛЭП и др.

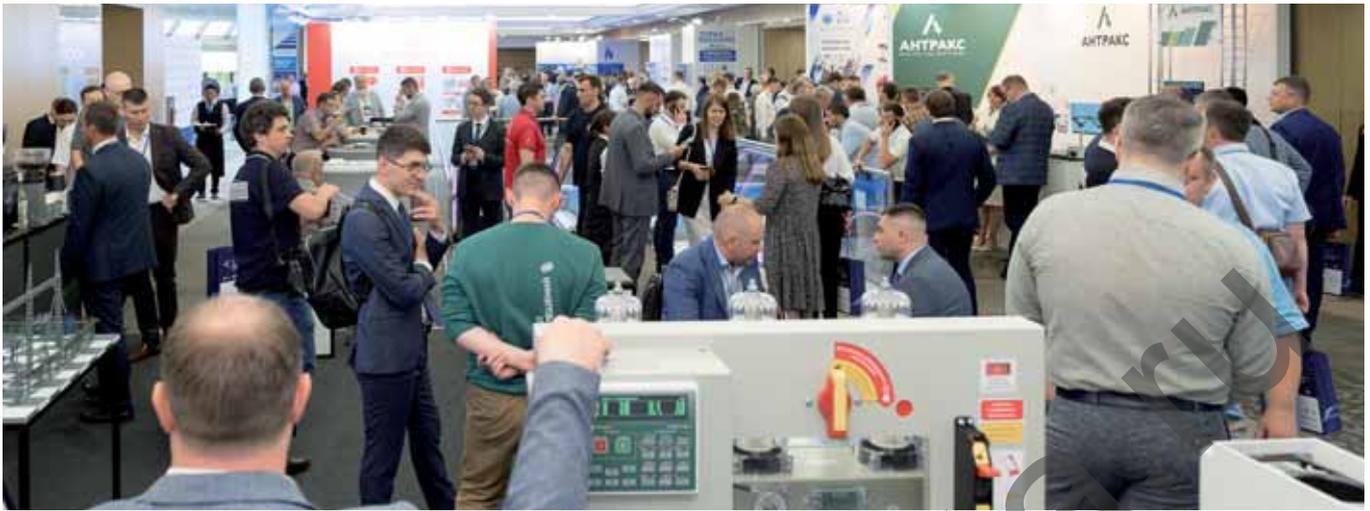
В рамках выступления с докладом «Энергетическая безопасность — роль и место инфраструктуры» Председатель ИК ЭЭС СНГ **Тарас Купчиков** отметил: «К настоящему моменту пришло понимание невозможности обеспечения энергетической безопасности в рамках одного государства. Необходимы оперативные решения по развитию межгосударственных и межсистемных связей для обеспечения “резервного контура” совместной энергетической безопасности

так называемого “Энергетического ОДКБ” для государств-участников СНГ, или, если говорить шире, для стран Большого Евразийского партнерства».

В своем приветственном слове ректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» **Николай Роголев** отметил масштабы конференции, уровень, представляемый ее участниками и спектр вопросов, вынесенных на обсуждение, сравнив мероприятие с лучшими международными дискуссионными площадками. Переходя к обсуждению актуальных вопросов развития электроэнергетики и распределительных электрических сетей, в частности, ректор НИУ «МЭИ» также подчеркнул необходимость обеспечения технологического суверенитета в отрасли. При этом речь ни в коем случае не идет об изоляции и концентрации на продукции исключительно российского производства. В данном вопросе необходимо выстраивать грамотную кооперацию с производителями из других стран, ориентируясь на новые требования безопасности.

Вопросы надежности электроснабжения потребителей в России стоят всегда на первом плане. В целях дальнейшего повышения надежности важными задачами для распределительных электрических сетей становятся оптимизация технических и топологических решений, а также консолидация сетей иных собственников, не обеспечивающих необходимый уровень надежности на своих участках. Важно также сосредоточиться на вопросах грамотной автоматизации сетей, выработать единые подходы к технико-экономическим принципам использования в распределительных сетях ВИЭ. Среди дополнительных вопросов, которые должны учитываться в подобных дискуссиях постоянно, Николай Дмитриевич отметил принципы и методы тарифного регулирования и подходы к подготовке персонала необходимых квалификаций.

О возможностях, предоставляемых Общероссийским отраслевым объединением работодателей электроэнергетики «Энергетическая работодателская ассоциация России», рассказал собравшимся президент Ассоциации **Аркадий Замосковный**. По поднятому вопросу повышения квалификации работников отрасли имеется и может быть уточнена позиция профессионального сообщества по содержанию профстандартов и требований к квалификации. Ассоциация также осуществляет контроль и мониторинг состояния охраны труда и производственного травматизма, производит независимую оценку квалификации персонала на соответствие профессиональным стандартам. Обобщенная информация об этом была представлена участникам пленарной сессии.



Техническая выставка «ЭЭПиР» в рамках конференции

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ВЫСТАВКА «ЭЭПИР»

Полноценной дискуссионной площадкой в рамках конференции в текущем году стала Техническая выставка «ЭЭПиР». На более чем 2000 м<sup>2</sup> экспозиции более 55 инновационных компаний России представили руководителям и экспертам распределительного электросетевого комплекса передовые технические решения более чем в 20 направлениях.

Помимо новейших видов оборудования для распределительных электрических сетей участники выставки предложили решения по комплексному сопровождению и поддержке реализации повседневных задач энергокомпаний: инженерный аудит энергопредприятий и промышленных предприятий, эксплуатирующих энергетическое оборудование, разработку инвестиционных программ и контроль их реализации от имени заказчика, анализ профессиональных рисков, разработку нормативно-технической документации.

Сразу после окончания пленарной части конференции выставку посетила делегация руководителей крупнейших компаний отрасли и профильных ведомств: представители Министерства энергетики РФ, технические руководители компании «Россети», спикеры пленарной сессии, а также главные инженеры ДЗО ПАО «Россети» и других электроэнергетических компаний.

Эксперты отрасли отметили большое разнообразие представленных на выставке технических решений, высокое качество продукции отечественных производителей, освоивших многие новые направления в рамках решения задачи по импортозамещению, а также востребованность предложенных решений на российском рынке. Руководители электросетевых компаний отметили уже имеющийся положительный опыт применения разработок, появившихся на рынке за последние годы, а также

выразили уверенность, что предложенные новинки, в свою очередь, в скором времени будут активно использоваться для повышения надежности и эффективности распределительных электрических сетей.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ СЕССИИ

В распределительных электрических сетях — самом динамично развивающемся сегменте электроэнергетики — на сегодняшний день сосредоточена масса вопросов, вызванных задачами, диктуемыми как со стороны потребителей и регуляторов, так и обусловленных изменениями внешней конъюнктуры, оказывающей свое влияние на экономику основных процессов.

Для того чтобы специалисты различного профиля имели возможность сосредоточиться на обсуждении наиболее важных вопросов, рассмотреть те или иные предложения во всех деталях, организаторами конференции было принято решение о разделении всех обсуждаемых тем на шесть технических сессий по различным направлениям.

Центральными темами деловой программы в рамках Сессии 1 «Планирование развития распределительных сетей» стали дискуссии о принципах формирования программ перспективного развития распределительных электрических сетей, рационального планирования и использования инвестицион-



Официальный обход Технической выставки «ЭЭПиР»

ных ресурсов, переосмысления подходов к обеспечению надежного электроснабжения потребителей, в том числе на отдельных территориях с помощью автономных источников электроснабжения. Также участники конференции обсудили применение современных цифровых решений и обеспечение кибербезопасности энергообъектов.

Было отмечено, что программами развития распределительных электрических сетей должно предусматриваться не только географическое развитие сети на традиционных принципах, но и модернизация существующих сетей с использованием новейших технологий для оптимизации режимов передачи электроэнергии. Также участники подтвердили необходимость разработки программ развития распределительных электрических сетей на среднесрочную и долгосрочную перспективу (5–20 лет). При этом было рекомендовано рассмотреть возможность передачи функций формирования таких программ системообразующим ТСО и выработать единые подходы к формированию программ развития распределительных электрических сетей.

В части решения большой задачи по обеспечению надежного электроснабжения потребителей прозвучал ряд докладов, в которых предлагалось уточнить (и расширить) критерии надежности для распределительных электрических сетей, а также подходы к определению целевых значений надежности для различных групп и категорий потребителей. Отмечена целесообразность синхронизации вновь выработанных подходов с понятием и допустимыми величинами ущерба от перерывов электроснабжения.

Развитие распределительного электросетевого комплекса должно вести к качественным изменениям, положительно влияющим на все аспекты его функционирования. В рамках Сессии 2 «Возможности применения инновационных решений в распреде-



*Заседание Сессии 1 «Планирование развития распределительных сетей»*

лительных сетях» докладчиками были продемонстрированы опыт и новые технические решения по оптимизации развития распределительных электрических сетей, реализации проектов по созданию их цифровых моделей с интеграцией во все основные бизнес-процессы компании. Участники мероприятия подробно обсудили преимущества внедрения в распределительных сетях систем накопления энергии, строительство высокоавтоматизированных подстанций 6–35 кВ модульного типа, использование силовых трансформаторов с сердечниками из аморфной стали и с энергоэффективными системами охлаждения, оборудования и технологий, обеспечивающих симметрирование нагрузки, и других технических решений.

В ходе обсуждения принципов организации планирования ремонтной деятельности электросетевых компаний на Сессии 3 «Применение новых методов и средств диагностирования для планирования ремонтной деятельности» участники конференции отметили необходимость продолжения работы по внедрению системы риск-ориентированного управления производственными активами. Для развития в этом направлении предложено расширять географию и области применения беспилотных летательных аппаратов и роботизированных комплексов, устройств мониторинга и диагностики технического состояния оборудования электрических сетей, в том числе термоиндикаторов, модулей дистанционной диагностики параметров ВЛ для контроля и предупреждения образования гололедно-изморозевых отложений.

Участники Сессии 4 «Надежность электроснабжения потребителей при плановых и аварийных работах» подробно обсудили разнообразные технологии и методы, применение которых может способствовать повышению надежности электроснабжения потребителей. На обсуждение были вынесены такие вопросы, как преимущества приме-



*Заседание Сессии 4 «Надежность электроснабжения потребителей при плановых и аварийных работах»*

нения железобетонных и деревянных опор для ВЛ 6–10 кВ, мобильных модульных подстанций. Во многих компаниях продолжается совершенствование технологий работы под напряжением и расширение географии и номенклатуры работ с их применением. Кроме этого, представителями научного сообщества были предложены методы поддержания работоспособности электрической сети в различных послеаварийных режимах. Со своей стороны, практическим опытом использования различных режимов заземления нейтрали поделились специалисты электросетевых компаний.

В ряде распределительных электросетевых компаний уже сегодня внедрены современные технические решения по автоматизации электрических сетей, на отдельных участках реализованы алгоритмы автоматического восстановления сети. Опыт внедрения подобных решений также был рассмотрен участниками технической сессии. По ряду решений были высказаны дополнительные предложения.

Особое внимание было уделено обсуждению новых Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (ПТЭС), утвержденных приказом Минэнерго России от 4 октября 2022 г. № 1070. Участниками сессии был отмечен ряд противоречий и неясностей, присутствующих в нормативном документе и сформулированы предложения по внесению соответствующих поправок.

В рамках Сессии 5 «Релейная защита и автоматика электрических сетей» были отмечены положительные тенденции в части развития цифровых систем РЗА в распределительном электросетевом комплексе. При этом участники обратили внимание на целесообразность разработки национальных стандартов в области электромагнитных воздействий и электромагнитной безопасности, информационной безопасности с учетом мирового опыта. Более подробно о дискуссиях Сессии 5 и принятых решениях в области совершенствования систем РЗА распределительных электросетевых компаний читайте в статье «Ключевые вопросы релейной защиты», опубликованной на стр. 114.

В этом году большое внимание на конференции было уделено вопросам охраны труда работников



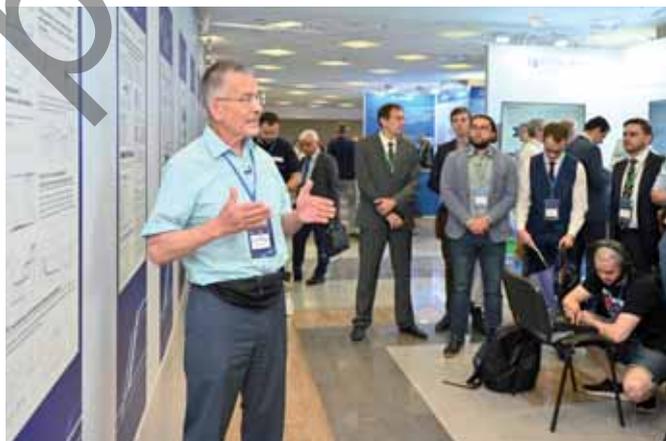
*Заседание Сессии 6 «Охрана труда»*

распределительного электросетевого комплекса (Сессия 6). Этот аспект является неотъемлемой частью обеспечения надежного, качественного и безопасного функционирования инфраструктуры. Наряду с применением современного оборудования и безопасных технологий важно создавать оптимальные условия труда, проводить своевременную подготовку персонала, повышать культуру безопасности производства. При этом к эффективным передовым практикам по сохранению жизни и здоровья работников электросетевого комплекса можно отнести: информационный производственный паспорт сотрудника, систему развития профессиональных навыков работников, цифровые сервисы для развития культуры безопасности, систему подготовки лидеров и тренеров в области нулевого травматизма, увеличение доли активных методов обучения (тренингов, решения кейсов и др.), сменный контроль здоровья работников посредством телемедицины, выдача нарядов-допусков в электронном формате.

Участники сессии также отметили, что современные программные комплексы в области промышленной безопасности и охраны труда являются эффективным инструментом для повышения культуры безопасности и мотивации работников электросетевого комплекса к безопасному труду. Кроме того, использование цифровых решений и видео-контента целесообразно применять как дополнительный инструмент для развития системы подготовки работников к безопасному проведению работ.

Новинкой этого года стала Постер-сессия, на площадке которой представители научно-исследовательских институтов и ряда электросетевых компаний в 11 докладах представили результаты своих исследований и разработок. Были предложены новые алгоритмы построения релейной защиты и автоматики распределительных сетей, схемы организации сбора и обработки данных с систем учета электрической энергии различных производителей в бытовом и промышленном секторе, алгоритмы моделирования развития зарядной инфраструктуры и размещения интеллектуальных устройств и другие.

Презентации и видеозаписи всех докладов представлены на официальном сайте конференции.



*Постер-сессия в рамках конференции*

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

По итогам всех обсуждений участники пришли к единому мнению о необходимости и важности оперативного внесения поправок в действующие нормативно-правовые акты, расширяющие возможности электросетевых компаний по повышению эффективности распределительного электросетевого комплекса в части:

- использования объектов малой генерации и гибридной генерации для технологического присоединения потребителей на отдаленных территориях, в качестве резервных источников электроснабжения для потребителей II, I и I особой категорий надежности;
- расчета индексов технического состояния и вероятности отказов сети, оценке влияния отказов в сетях 110 кВ и выше на распределительные сети;
- выбора режима заземления нейтрали в сетях 6–20 кВ;
- выполнения различных видов работ под напряжением;
- расширения полномочий Ростехнадзора в части определения готовности сотрудников к работе в электроустановках.

Дополнительно, по мнению участников конференции, требуется актуализировать «Правила расследования причин аварий в электроэнергетике» в части выявления объективных причин аварий и повреждений, ускорить разработку национальных стандартов, учитывая мировой опыт, в области электромагнитных воздействий и электромагнитной безопасности, а также проработать вопрос внесения изменений в единую техническую политику в части изменений

### Евгений Ляпунов,

заместитель генерального директора —  
главный инженер ПАО «Россети»:



— На всех технических сессиях во время обсуждения докладов было сформулировано много новых интересных предложений, направленных на повышение эффективности электросетевого комплекса. Прозвучавшие идеи и предложения зафиксированы организаторами конференции и будут использоваться специалистами компании для дальнейшего совершенствования технической политики, формирования предложений по внесению поправок в нормативные и законодательные акты. Уверен, что материалы конференции также будут полезны другим организациям, имеющим на своем балансе объекты распределительного сетевого комплекса.

(уточнений) требований к изоляторам для ВЛ напряжением 6–35 кВ.

В части реализации практических шагов по повышению надежности и эффективности распределительных электрических сетей при строительстве и модернизации объектов, по мнению энергетиков, необходимо внедрять современное оборудование и передовые решения на основе отечественных разработок или продукции с высокой степенью локализации.

В рамках конференции была подписана серия соглашений между электросетевыми компаниями и российскими производителями энергооборудования и образовательными учреждениями. В частности, «Россети» заключили девять соглашений об унификации порядка и состава работ при сервисном обслуживании устройств РЗА и АСУ ТП, а также о развитии сотрудничества. «Объединенная энергетическая компания» договорилась о взаимодействии с крупнейшими профессиональными колледжами Москвы, НИУ МГСУ и «Карабелли С.р.л.» о сотрудничестве в области разработки нормативно-технической документации для работ на высоте.

В заключительной части конференции модераторы тематических сессий обобщили результаты работы по каждому из направлений, расставили акценты на наиболее интересных предложениях, полученных в ходе обсуждения докладов, и обратили внимание собравшихся на задачи и вопросы, требующие дальнейшей проработки. 



Подведение итогов модераторами сессий

Презентации  
и видеозаписи  
докладов  
конференции:





# Российский стек ПО для создания ИТ-инфраструктур любого масштаба



Сервер. Десктоп. Мобайл.  
Защищенная ОС



Серверная  
виртуализация



Всесторонняя  
помощь  
при проектах  
миграции



Система  
для управления  
службой  
каталогов



Развертывание  
решений  
по клику



Облачная  
виртуализация



Инфраструктура  
виртуальных  
рабочих мест



Платформа  
для биллинга  
облачных  
сервисов



СУБД и платформа для  
администрирования  
и мониторинга



Корпоративная  
почта



Средство  
резервного  
копирования



Платформа  
для управления  
физической  
инфраструктурой



Мобильное  
рабочее место

- Широкая экосистема совместимых программных и аппаратных решений
- Безопасная разработка
- Стабильность и защита ИТ-инфраструктур
- Инструменты автоматизации и механизмы миграции
- Быстрое и легкое развертывание ПО
- Комплексное сопровождение проектов внедрения
- Круглосуточная техническая поддержка

## Более 2,5 млн инсталляций ОС Astra Linux



Российские  
ИТ-решения  
gk-astra.ru  
8(495) 369-48-16  
info@astralinux.ru

# Новый взгляд на технологическое присоединение потребителей от компании «Таврида Электрик»

В июле 2023 года в рамках VIII Международной научно-технической конференции «Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей» компания «Таврида Электрик» провела презентацию новых решений. В мероприятии приняло участие свыше 600 руководителей и специалистов отрасли из всех регионов России, а также стран СНГ. Примечательно, что презентация была организована в формате технологического шоу «Think Smart 2023», благодаря чему зрители смогли не только познакомиться с инновационными решениями «Таврида Электрик», но и проследить эволюцию технологий распределения электроэнергии. Среди зрителей был и корреспондент издания «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределения», самые яркие моменты шоу — в нашем репортаже.

## ИСТОРИЯ, ЭВОЛЮЦИЯ, КОНТЕКСТ

Перед началом технологического шоу зрителям была предоставлена возможность ознакомиться с экспозицией, посвященной зарождению и развитию технологий распределения электроэнергии. На выставке, организованной компанией «Таврида Электрик» совместно с Музеем Мосэнерго и энергетикой Москвы, были представлены измерительные системы, приборы учета, защиты и автоматики, коммутационные аппараты и распределительные устройства, наглядно демонстрирующие основные этапы развития техники и технологий распределения электрической энергии. «Некоторым из представленных экспонатов уже более 100 лет. По ним четко прослеживается влияние на электротехнику сквозных технологий: полупроводников, микропроцессоров, развитие материаловедения», — отмечают в «Таврида Электрик».

Забегая вперед, можно отметить, что выставка «Эволюция технологий распределения электрической энергии» создала тот исторический фон, на котором и разворачивалось основное действо. «Инженер-энергетик, не знающий истории своего дела, вряд ли сможет эффективно содействовать его развитию, — считают в компании. — Особенно сегодня, когда электроэнергетика стоит на пороге новых глобальных вызовов и изменений, новых открытий и изобретений».

Специалисты нашей отрасли хорошо знают компанию «Таврида Электрик» прежде всего как производителя вакуумных выключателей и реклоузеров. Это неудивительно, поскольку более чем тридцатилетняя история компании началась именно с идеи непохожего на другие вакуумного выключателя, ставшего впоследствии стандартом в своем классе напряжения. А сердцем этого аппарата является вакуумная дугогасительная камера.

Собственное производство вакуумных камер — лишь финальная стадия длительного исторического процесса, начавшегося в 1803 году с экспе-

риментов Василия Петрова с электрической дугой в вакууме, которые в 1920-х годах продолжили иностранные инженеры. В 1957 году к исследованиям подключились советские ученые, которые всего за 6 лет создали свой прототип вакуумной камеры. И уже в 1988 году исследованиями и разработкой собственной вакуумной дугогасительной камеры начинает заниматься команда инженеров будущей компании «Таврида Электрик». Результат этих масштабных длительных исследований сегодня имеет мировое признание: выключатели «Таврида Электрик» эксплуатируются на всех континентах, а коллектив разработчиков компании в декабре 2022 года получил премию Правительства РФ в области науки и техники.

«В прошлом году мы впервые ввели тридцатилетнюю гарантию на всю линейку наших вакуумных выключателей. Сегодня они своего рода двигатель всех продуктов и решений компании, — отмечают в «Таврида Электрик». — Самым наукоемким компонентом выключателя является вакуумная дугогасительная камера. На сегодня это самая компактная камера в мире, которая по ключевым параметрам до сих пор является непревзойденной. Но это не просто продукт! В нем сконцентрировались удивительная многолетняя история технологий и развитие научной и инженерной мысли с XVIII века и до наших дней».

Впрочем, эта история — лишь один из примеров того, как некие точки на оси времени связываются в моменте, который приводит к появлению нового технического решения, изменяет что-либо, делает жизнь в какой-то степени лучше.

Возможно, один из таких моментов мы проживаем и сейчас, поскольку новые решения не заставляют себя ждать, считают в компании: «Сегодня мы вместе с вами введем новый термин, которого ранее не было, и представим принципиально новое техническое решение, которое может поменять точку зрения на привычный ход вещей».

## КРУ ETALON — ПУТЬ ОТ АБОНЕНТСКИХ ТП И РП ДО ОТВЕТСТВЕННЫХ ЦЕНТРОВ ПИТАНИЯ

Но прежде чем представить это принципиально новое решение, специалисты «Таврида Электрик» продемонстрировали зрителям два обновления уже существующей линейки продуктов. В первую очередь, была проведена презентация нового решения с КРУ Etalon.

Этот продукт известен отраслевым специалистам уже 8 лет и успел зарекомендовать себя наилучшим образом. Однако и здесь продолжаются традиции совершенствования и обновления. В 2023 году к известным преимуществам продукта (сверхкомпактность, функциональная универсальность, высокая степень заводской готовности) добавились новые функциональные возможности (комплексное применение теперь возможно не только в составе абонентских ТП и РП, но и в составе питающих центров). Кроме того, теперь доступен и новый формат — формат модульных зданий полной заводской готовности.

Все возможные технические и схемные решения по построению распределительных электрических сетей могут быть реализованы с применением всего четырех типов ячеек КРУ Etalon: шкафа коммутационного Etalon\_1 с номинальным током выключателя до 1000 А, шкафа коммутационного Etalon\_2 с номинальным током выключателя до 1600 А, шкафа трансформаторного с ТСН мощностью 6,3 кВА и 16 кВА и шкафа бесперебойного питания, обеспечивающего работу оборудования в автономном режиме при максимальной мощности нагрузки не менее 4 часов.

Заслуживают упоминания и универсальные модули управления КРУ Etalon — контроллеры присоединения. Это уникальная разработка инженеров «Таврида Электрик», реализующая в одном устройстве все необходимые функции: управление, измерение, защиту и автоматику, в том числе встроенную дуговую защиту, а также функции коммуникации. Обмен информацией между устройствами осуществляется по внутреннему каналу связи, что избавляет от необходимости проектирования вторичных цепей. Коммуникационные интерфейсы Ethernet, RS232/485 позволяют выполнить интеграцию в TELARM или во внешние SCADA-системы. Примечательно, что контроллер присоединения позволяет реализовать и функцию учета электрической энергии с классом точности 0,5S.

Модульные здания, в которых компания «Таврида Электрик» готова поставлять уже полностью готовые распределительные устройства, имеют четыре типоразмера: 5, 7, 9 и 11 метров, что по опыту специалистов компании может обеспечить реализацию проектов построения распределительных устройств любой сложности. При этом размеры модулей не превышают стандартные транспортные габариты, что существенно упрощает их доставку на объект и позволяет заказчику экономить на перевозке.

Оборудование поставляется в полностью собранном виде со всеми необходимыми смежными и обеспечивающими коммуникациями и системами (телемеханика и связь, шкаф собственных нужд, охранная и пожарная сигнализация, освещение и отопление), имеет возможность перспективного расширения.



Типовое модульное здание в транспортном габарите

Благодаря технологии Plug and Play, наладка вторичных цепей также не требуется. Панель центральной сигнализации, выполненная в виде планшета, позволяет осуществлять управление коммутационными аппаратами, а также считывать необходимую информацию.

С 2015 года в эксплуатации по всей России уже находится более 5 тысяч ячеек КРУ Etalon. Эволюция КРУ Etalon и отзывы пользователей о нем были представлены зрителям технологического шоу в специальном видеоролике. «Когда в 2014 году мы начали работу над этим продуктом, сложно было представить, что за такой короткий срок эти компактные непривычные ячейки смогут дойти до ответственных центров питания. И огромное вам спасибо, что вы оказываете доверие и не боитесь экспериментировать, применять новые технические решения. Результаты вы видели», — резюмировали специалисты «Таврида Электрик», обращаясь к зрителям технологического шоу.

## ОБЪЕДИНЯТЬ ЛУЧШИЕ ПРАКТИКИ

В 2021 году «Таврида Электрик» на аналогичной презентации представила руководителям и специалистам отрасли два новых технических решения. Одним из них было ОРУ 10 кВ. «И здесь нам пришлось ввести новый термин, — напоминают в компании. — До того момента на центрах питания 35/10 кВ на стороне 10 кВ применялись комплектные распределительные устройства наружной установки — КРУН 10. Мы же предложили оригинальную, не имевшую аналогов альтернативу — ОРУ 10 кВ».



Реконфигурируемое ОРУ Smart15 может быть применен и на подстанциях



ОРУ 10 является полноценной заменой КРУНа, но с другими потребительскими характеристиками

Вторым представленным тогда устройством был реклоузер Smart 15. На текущий момент это самый компактный реклоузер на рынке, а также единственное подобное устройство, оснащенное встроенной системой коммерческого учета электроэнергии.

А что если эти два удачных решения соединить вместе? Ответ на этот вопрос был дан в рамках технологического шоу «Think Smart 2023». Сегодня, объединив эти технические решения, «Таврида Электрик» смогла оптимизировать размещение оборудования и сократить количество вторичных цепей на 80% по сравнению с традиционными и ранее предлагаемыми решениями.

Уменьшение массы и габаритов применяемых аппаратов позволило серьезно уменьшить объем строительной части ОРУ, что в совокуп-

ности привело не только к снижению затрат на его создание, но и сроков выполнения строительно-монтажных работ. За счет применения аппарата, сочетающего в себе функции защиты, автоматики и коммерческого учета электроэнергии, существенно упростилась интеграция нового оборудования в информационно-измерительные системы.

Многokrатно расширяя возможности заказчиков по построению высоконадежных подстанций, ОРУ 10 кВ может применяться для строительства и модернизации объектов распределительных электрических сетей с номинальной мощностью силовых трансформаторов до 6,3 МВА включительно.

### НОВЫЙ ВЗГЛЯД, НОВЫЙ ТЕРМИН, НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ

Но основным событием технологического шоу «Think Smart 2023» стала презентация продукта «Точка трансформации 35 кВ». Как отмечают в компании, это название скоро станет нарицательным и войдет в повседневную практику. Однако обо всем по порядку.

Класс напряжения 35 кВ сегодня несправедливо рассматривается по остаточному принципу. Еще с советских времен бытует мнение, что он не имеет перспектив. Однако это не так — класс остается востребованным на многих территориях с низкой плотностью электрических нагрузок, применяется в качестве основного распределительного класса напряжения в компаниях нефтегазодобычи, на старательских приисках и других промышленных предприятиях.

На сегодня в электросетевом комплексе РФ насчитывается около 7500 подстанций напряжением 35 кВ, состояние которых, мягко говоря, не самое лучшее, акцентируют в «Таврида Электрик»: «Значительная часть подстанций находится в эксплуатации более 50 лет, а инвестиционные программы по модернизации традиционно нацелены на центры питания более высоких классов напряжения».

Тем не менее в компании уверены, что у данного класса напряжения большое будущее: «На предыдущих наших презентациях мы неоднократно и подробно говорили, как может измениться распределительное устройство 35 кВ, а сегодня мы поговорим о том, как может меняться подстанция 35 кВ в целом. И в дополнение к уже введенным ранее терминам мы хотим предло-



На макете показана концепция нового вида подстанций — Точка трансформации

жить еще один — точка трансформации 35 кВ».

По сути «Точка трансформации 35 кВ» — это новая концепция подстанции 35 кВ. Технологическими предпосылками такого решения стало внедрение компактного высокоавтоматизированного оборудования, практически не нуждающегося в обслуживании и имеющего большой эксплуатационный ресурс.

Точка трансформации 35 кВ представляет собой компактную быстровозводимую однострансформаторную подстанцию, состоящую из трех основных блоков: ОРУ 35 кВ с реклоузером Smart 35, силового трансформатора и ОРУ 10 кВ с реклоузером Smart 15. Все коммутационное оборудование размещается на двух опорах, что делает объект очень компактным (площадь землеотвода сокращается в 3 раза), быстровозводимым и безопасным с точки зрения эксплуатации.

Точка трансформации — оптимальное техническое решение для технологического присоединения потребителей как в сельской местности, так и на территориях, расположенных на значительном расстоянии от сетей 6–10 кВ. На объекте может быть установлен силовой трансформатор с номинальной мощностью до 6,3 МВА, что полностью удовлетворяет потребности большинства потребителей агропромышленного сектора и нефтегазового сектора, а также бытовых потребителей, проживающих в сельской местности.

Также точки трансформации могут стать полноценной альтернативой двухтрансформаторных подстанций при создании схем электроснабжения потребителей II и I категорий надежности. В этом случае резервирование потребителей будет осуществляться с помощью реклоузеров через сеть 10 кВ, что повысит надежность электроснабжения в целом. По расчетам компании, надежность электроснабжения в такой сети может быть выше в 3–10 раз по сравнению с традиционной радиальной сетью (зависит от длины ВЛ в сети), при этом затраты на создание такой сети могут быть снижены на 20–30%.

Еще одним немаловажным преимуществом точки трансформации 35 кВ является скорость ее возведения — монтаж на объекте занимает около 20 дней. Такая скорость достигается применением типовых компонентов, изготавливаемых на различных предприятиях. Все необходимые логистические взаимосвязи, а также неснижаемые складские запасы на сегодняшний день компанией «Таврида Электрик» сформированы. Вторым фактором, обеспечивающим скорость монтажа, является применение технологических карт, где поэтапно расписаны все операции.

Все перечисленные решения позволяют снизить стоимость реализации проекта по технологическому присоединению на 40% и сократить сроки его реализации на 50%.



Точка трансформации в натуральную величину

## ОБЩИМИ УСИЛИЯМИ

В финальной части презентации была затронута еще одна немаловажная тема, которая связана не только с будущим компании, а, вероятно, и всей отраслью энергетики. По мнению компании, сегодня профессия инженера вновь становится первостепенной в гонке технологий, скорость изменения которых стремительная. И несмотря на то, что Русская инженерная школа имеет славные традиции, для дальнейшего развития и формирования технологического суверенитета необходимо иметь надежный фундамент.

Поэтому компания участвует в проектах подготовки молодых специалистов отрасли: при поддержке «Тавриды Электрик» в ряде вузов на сегодняшний день функционируют лаборатории по моделированию распределительных электрических сетей будущего. Работать с перспективными техническими решениями уже имеют возможность студенты Белорусского национального технического университета и Ивановского государственного энергетического университета, в 2023 году открывается лаборатория компании в Новосибирском государственном техническом университете и Алматинском университете энергетики и связи. Кроме того, в текущем году планируется совместно с ведущими отраслевыми экспертами запустить проект по созданию сетевого курса для университетов «История развития мировой электротехники и электроэнергетики».

Компания «Таврида Электрик» приглашает к сотрудничеству все организации и всех специалистов электросетевого комплекса для совместного решения задач повышения эффективности распределительных электрических сетей России, укрепления ее технологического суверенитета и энергетической безопасности. **Р**



**ТАВРИДА ЭЛЕКТРИК**

Совершенство технических решений  
[www.tavrida.ru](http://www.tavrida.ru)

# Энергетические сообщества с возобновляемыми источниками энергии: эффективное планирование и управление в условиях многокритериальности. Часть 2

УДК 621.311.1:004.855

Агрегация конечных потребителей, которые производят, потребляют и обмениваются излишками энергии в пределах одного и того же географического периметра, выражает новый способ использования возобновляемой энергии, представленный энергетическими сообществами (ЭСО). В первой части статьи был представлен детальный анализ новых энергетических практик в мире и России для построения ЭСО. На основе проведенных аналитических исследований было сделано заключение о необходимости разработки многокритериальных подходов к управлению ЭСО с учетом различных интересов его участников. Во второй части статьи представлен разработанный авторами единый многокритериальный подход к созданию и управлению ЭСО с ВИЭ с учетом множества усложняющих факторов. Его эффективность была продемонстрирована на численном примере для трех удаленных поселений Приморского края. При построении ЭСО были рассмотрены три сценария, в которых приоритет отдается экономической экологической эффективности или сбалансированному развитию.

**Томин Н.В.,**

к.т.н., старший научный сотрудник, заведующей лабораторией управления функционированием электроэнергетических систем ИСЭМ СО РАН

**Шакиров В.А.,**

к.т.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией межотраслевых и межрегиональных проблем ТЭК, отдел комплексных и региональных проблем энергетики ИСЭМ СО РАН

**Курбацкий В.Г.,**

д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ИСЭМ СО РАН

**Попова Е.В.,**

к.т.н., старший инженер-исследователь ИСЭМ СО РАН

**Сидоров Д.Н.,**

д.ф.-м.н., профессор РАН, главный научный сотрудник ИСЭМ СО РАН

**Козлов А.Н.,**

к.т.н., старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН

**Корев Д.А.,**

начальник Управления стратегического развития ПАО «РусГидро»

**Ключевые слова:**

энергетическое сообщество, микросеть, возобновляемая энергия, многокритериальный выбор, многоцелевая оптимизация, обучение с подкреплением, нулевая эмиссия выбросов углерода, локальный рынок, двухуровневая оптимизация



## ПРЕДЛАГАЕМАЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СООБЩЕСТВА

Общая схема подхода многокритериального планирования и управления функционированием сообщества микросетей. Общая схема предлагаемого многокритериального подхода к созданию и управлению функционированием энергетического сообщества (ЭСО) представлена на рисунке 1. На первом этапе формируется состав существующих и перспективных потребителей, проводится расчет электрических нагрузок для каждой микросети потенциального ЭСО, анализ топливных и энергетических ресурсов. На этой основе формируются сценарии развития энергетической системы, обеспечивающие достижение важных для лиц, принимающих решения (ЛПР), целей.

Второй этап при создании конфигурации ЭСО заключается в разработке альтернативных конфигураций сообщества микрогридов. Для этого во многих исследованиях применяют программное обеспечение HOMER PRO, iHOGA, RETScreen, TRNSYS и другое [1]. HOMER PRO используется наиболее часто в связи с широким набором настроек технических параметров [2, 3]. В этом исследовании конфигурации ЭСО также определяются с использованием HOMER PRO. График электрических нагрузок ЭСО складывается из графиков всех микрогридов. Разнообразие конфигураций обеспечивается заданием различных наборов энергетических установок.

Из-за того, что HOMER PRO проводит оптимизацию конфигураций по единственному критерию суммарных за расчетный период дисконтированных затрат, во многих исследованиях были предложены многокритериальные подходы с использованием методов TOPSIS, VIKOR, ANP, COPRAS [4–7] и других. В этом исследовании на третьем этапе проводится многокритериальная оценка конфигураций с учетом неопределенности предпочтений ЛПР, в отношении важности критериев по каждому из рассматриваемых сценариев. Для оценки конфигураций используется модифицированный метод многокритериальной теории ценности (Multi-attribute value theory, MAVT). Предлагаемая модификация отличается от известных [8, 9] построением интервальных функций ценности и интервальных шкалирующих коэффициентов. Окончательный выбор альтернатив проводится на основе анализа интервальных многокритериальных оценок.

На четвертом этапе для оценки эффективности выбранных сценариев ЭСО используется двух-

уровневая модель «оператора ЭСО» Community EMS (Community Energy Management System) [10], учитывающая широкий круг экономических и экологических критериев в целевой функции нижнего уровня. Последнюю минимизирует агент многокритериальной версии алгоритма Монте-Карло по поиску в дереве (МКПД) [11], который фактически представляет собой локальную систему управления Local EMS для поиска оптимальной стратегии управления микрогридом в условиях многокритериальности. Нижний уровень решает задачу нахождения рыночного равновесия, через определение оптимальных объемов обмена мощностью, цены и пиковую мощность в ЭСО. Верхний уровень необходим для реализации социальной справедливости, когда из множества возможных стратегий нижнего уровня выбирается та, которая (согласно условию эффективности по Парето) дает справедливое распределение прибылей между членами ЭСО. Фактически на нижнем уровне модель Community EMS старается учесть экономические (максимум прибыли) и экологические (минимум выбросов CO<sub>2</sub>) критерии, а на верхнем — социальные через организацию справедливого локального рынка для стимулирования долговременного участия в ЭСО.

По результатам оценок эффективности функционирования в конце четвертого этапа выбирается оптимальный сценарий создания ЭСО. Для этого сценария на пятом этапе финализируется реализуемая двухуровневая модель «оператора ЭСО» с целью ее практического внедрения в текущую эксплуатацию. Для этого агенты МКПД системы Community EMS обучаются уже на большом объеме реальных данных,

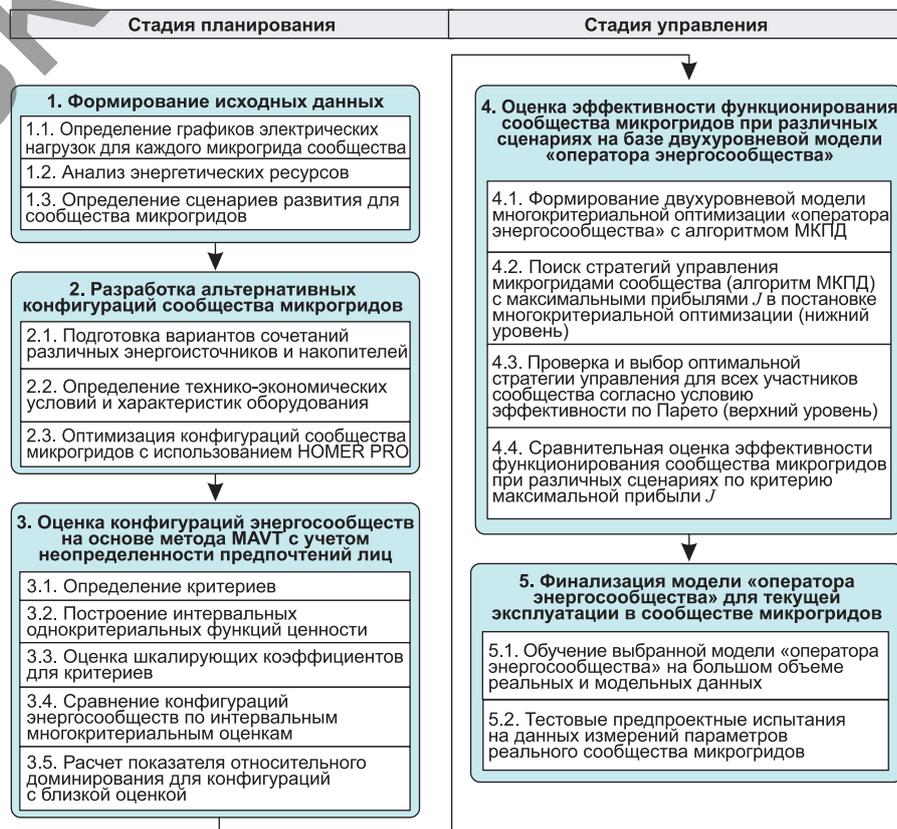


Рис. 1. Общая схема предложенного многокритериального планирования и управления функционированием ЭСО

полученных, в том числе, на основе различных фактических измерений от сенсоров и интеллектуальных счетчиков, установленных в микрогридах ЭСО.

**Многокритериальное планирование.** На этапе 3 (рисунок 1) проводится многокритериальное сравнение подготовленных с использованием HOMER PRO конфигураций ЭСО для выбора из них наиболее соответствующих разработанным типовым сценариям.

Для формирования критериев необходимо сформулировать цели построения энергетического сообщества и определить показатели, которые позволяют отразить степень достижения этих целей. В большинстве исследований целями являются обеспечение высокой экономической и технической эффективности, снижения воздействий на окружающую среду. Показателями достижения экономической эффективности могут быть единовременные капитальные затраты, дисконтированные затраты за расчетный период или нормированная стоимость производства электроэнергии. Показателями технической эффективности могут быть эксплуатационные показатели, например ежегодное число запусков генераторов, число замен аккумуляторных батарей за расчетный период. Показателями, отражающими экологическую эффективность, могут выступать выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, доля ВИЭ в производстве электроэнергии, площадь изымаемых земель и другие. Таким образом, набор критериев может быть разным, но должен отражать степень достижения всех поставленных целей.

Жизненный цикл энергетической системы ЭСО составляет несколько десятилетий. Из-за высокого уровня неопределенности будущих условий развития при решении задачи необходимо использовать неточные оценки. Для ЛПР наиболее естественным выражением неопределенности своих оценок является задание интервалов граничных значений. Интервальные оценки также удобны при ответах нескольких ЛПР. Разработанная для таких условий модификация метода MAVT сохраняет процедуру построения однокритериальных функций ценности и определения шкалирующих коэффициентов [12], но с возможностью задания интервальных ответов.

Интервальная многокритериальная оценка конфигурации:

$$\bar{V}_i = \sum_{j=1}^n \bar{v}_j(\bar{y}_{ji}) \cdot \bar{k}_j, \quad (1)$$

где  $V_i$  — многокритериальная оценка  $i$ -й альтернативы;  $\bar{v}_j(\bar{y}_{ji})$  — интервальная однокритериальная оценка  $i$ -й альтернативы по  $j$ -му критерию;  $n$  — количество критериев;  $\bar{k}_j$  — интервальный шкалирующий коэффициент  $j$ -го критерия (сумма шкалирующих коэффициентов равна 1).

Подход к определению интервальных многокритериальных оценок изложен в работе [13]. В основе этой процедуры лежат попарные сравнения оценок критериев лицом, принимающим решения.

Если в результате применения метода по формуле (1) интервальные многокритериальные оценки альтернатив не пересекаются, то предпочтение может быть отдано той, у которой границы интервалов име-

ют наибольшие значения. Альтернативы, имеющие пересекающиеся интервальные оценки, сравниваются по показателю относительного доминирования:

$$R_{zx} = \frac{d_z}{d_z + d_x}, \quad (2)$$

где  $d_z, d_x$  — количество вариантов предпочтений, при которых альтернатива  $z$  предпочтительнее альтернативы  $x$  и наоборот.

На основании показателя  $R_{zx}$  определяется лучшая конфигурация ЭСО. Выбранное решение устойчиво к различным изменениям предпочтений ЛПР.

**Многокритериальная модель «оператора энергетического сообщества».** Для достижения ряда преимуществ от объединения в долгосрочное ЭСО нами предложена концепция «оператора ЭСО» (Community EMS) [10], который способен автоматически перераспределять доходы и расходы между участниками ЭСО с помощью аппарата двухуровневой оптимизации и машинного обучения. При этом каждая микросеть имеет свою локальную систему управления (Local EMS) для оптимизации режима на основе алгоритма обучения с подкреплением МКПД, целью которой является минимизация суммарных эксплуатационных затрат отдельной микросети для обеспечения внутреннего баланса мощности и определения необходимых объемов покупки и продажи электроэнергии. Благодаря двухуровневой модели Community EMS локальные автоматик Local EMS имеют возможность не только учиться оптимально управлять своей микросетью, но и (через концепцию справедливого локального рынка на основе эффективности по Парето) выгодно для всех «общаться» между собой с целью максимизации социального благосостояния всего ЭСО. Под «общением» мы здесь понимаем оптимальный справедливый обмен электроэнергией и услугами энергетической гибкости.

В двухуровневой модели Community EMS нижний уровень, по аналогии с [10], решает задачу нахождения локального рыночного равновесия ЭСО, определяя оптимальные объемы обмена мощности, оптимизируя пиковую мощность, цены на электроэнергию в ЭСО с учетом расширенного количества экологических и экономических критериев (введены компоненты затрат, связанные с выбросами  $\text{CO}_2$  и использованием ВИЭ и АКБ). Последнее связано с необходимостью учета капитальных вложений в генерирующие и сетевые активы, которые участники ЭСО в реальных условиях, как правило, должны оплачивать в рамках, например, ссуды или кредита при текущей эксплуатации оборудования. В этом отношении предложенный нами многокритериальный подход более реалистичный, в отличие от рассмотренных в литературе ранее [14, 15], так как позволяет вариативно оценить доходы и затраты участников ЭСО для обоих этапов. Цель этого уровня — максимизация благосостояния ЭСО через максимизацию прибыли микросетей  $J^*$  (этап 4.2 на блок-схеме рисунка 1). При этом обновленная целевая функция нижнего уровня может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned}
 J^* = & -\sum_{u \in U} \sum_{t \in T} \left( \sum_{d \in D_{u,t}^{she}} \pi_{d,t}^{she} C_{d,t}^{she} \Delta_T \alpha_{d,t}^{she} + \sum_{d \in D_{u,t}^{CO_2}} \pi_{d,t}^{CO_2} P_{d,t}^{CO_2} \Delta_T \alpha_{d,t}^{CO_2} + \right. \\
 & + \sum_{d \in D_{u,t}^{RES}} \pi_{d,t}^{RES} P_{d,t}^{RES} \Delta_T \alpha_{d,t}^{RES} + \sum_{d \in D_{u,t}^{ste}} \pi_{d,t}^{ste} P_{d,t}^{ste} \Delta_T \alpha_{d,t}^{ste} + \\
 & + \pi_{i,t}^{gr} e_{i,t}^{gr} + \pi_{i,t}^{gr} i_{i,t}^{gr} + \gamma^{com} (e_{u,t}^{com} + i_{u,t}^{com}) + \\
 & \left. + \sum_{d \in D_{u,t}^{sto}} \gamma_d^{sto} \Delta_T \left( \bar{P}_d \eta_d^{cha} \alpha_d^{cha} + \frac{\bar{P}_d}{\eta_d^{dis}} \alpha_d^{dis} \right) - \pi^{peak} \bar{p} \right) \quad (3)
 \end{aligned}$$

где  $\pi_{d,t}^{she}$ ,  $\pi_{d,t}^{CO_2}$ ,  $\pi_{d,t}^{RES}$ ,  $\pi_{d,t}^{ste}$  — стоимость отключения нагрузки, выбросов CO<sub>2</sub>, стоимость производства энергии топливными и ВИЭ-генераторами соответственно \$/кВт, определяемая на этапе многокритериального планирования;  $\pi_{i,t}^{gr}$ ,  $\pi_{i,t}^{gr}$  — цена электроэнергии \$/кВт·ч, экспортируемой или импортируемой во внешнюю сеть или кооперативную микросеть (при изолированном ЭСО), определяемая также на этапе многокритериального планирования;  $\gamma^{com}$  — единая плата оператора Community EMS, \$;  $C_{d,t}^{she}$  — отключаемая нагрузка (или гибкая нагрузка, если есть управление спросом), кВт;  $P_{d,t}^{ste}$ ,  $P_{d,t}^{RES}$ ,  $P_{d,t}^{CO_2}$  — мощность управляемой генерации от топливного генератора, мощность неуправляемой генерации от ВИЭ, мощность от топливного генератора, имеющего выбросы CO<sub>2</sub>, соответственно, кВт;  $\bar{P}_d$ ,  $\bar{p}_d$  — максимальный уровень зарядки и разрядки АКБ, кВт;  $\pi^{peak}$  — удельная стоимость (штраф) за пиковую мощность, руб./кВт;  $\bar{p}$  — пиковая мощность микросети за определенный горизонт планирования, кВт;  $\alpha_{d,t}^{she}$ ,  $\alpha_{d,t}^{RES}$ ,  $\alpha_{d,t}^{CO_2}$  — доля управляемой, неуправляемой генерации, генерации с выбросами CO<sub>2</sub> соответственно, которая активируется в период времени  $t$ , с [0,1];  $\alpha_{d,t}^{ste}$  — доля регулируемой выработки электроэнергии, которая активируется в период времени  $t$ , с [0,1];  $\alpha_d^{cha}$ ,  $\alpha_d^{dis}$  — доля максимальной мощности зарядки/разрядки, используемой для батареи  $d$  в период времени  $t$ , с [0,1];  $\gamma_d^{sto}$  — стоимость разрядки АКБ, \$/кВт.

Допустимое множество задачи нижнего уровня (3) определяется различными наборами ограничений, в том числе ограничения двойных переменных. Все ограничения можно разделить на два набора. Первый набор включает нижние ограничения ряда переменных  $\alpha_{d,t}^{ste}$ ,  $\alpha_{d,t}^{RES}$ ,  $\alpha_{d,t}^{CO_2}$ ,  $\alpha_{d,t}^{she}$ ,  $\alpha_d^{cha}$ ,  $\alpha_d^{dis}$ . Второй набор ограничений связан с перетоками электроэнергии внутри и вне ЭСО. Более подробно ограничения представлены в [10].

Роль верхнего уровня состоит в том, чтобы справедливо разделить между микросетями прибыль ЭСО  $J^*$ , гарантируя, что ни одна микросеть не будет финансово наказана за индивидуальные действия (этап 4.3 на блок-схеме рисунка 1). Для этого рассчитывается максимальная прибыль  $J_{u,opt}^{SU}$ , которую микросеть могла бы получить за время  $T$ , не вступая в ЭСО. Это значение вычисляется для каждой микросети путем решения задачи оптимизации, полученной из задачи нижнего уровня. В итоге требование, что все члены ЭСО (микросети) должны получать

выгоду от присоединения к сообществу, задается условием:

$$J_{u,opt} \geq J_{u,opt}^{SU} + \alpha, \quad (4)$$

где  $J_{u,opt} = J_{u,opt}^{energy} + J_{u,opt}^{peak}$  — общая прибыль микрогрида  $u$  в составе ЭСО (при этом  $e_{u,t}^{com}$  и  $i_{u,t}^{com}$  при расчете  $J_{u,opt}^{energy}$ , оцениваются уже по цене  $\pi_{u,t}^{com}$ , то есть рыночной цене для микрогрида  $u$  в момент  $t$ );  $\alpha \geq 0$  — резервная переменная, которую нужно максимизировать. Важно заметить, что максимизация  $\alpha$  соответствует максимизации условия  $\min(J_{u,opt} - J_{u,opt}^{SU})$ , то есть минимального увеличения прибыли, достигнутого всеми участниками  $u$  ЭСО.

При этом если хотя бы одно неравенство в (4) выполняется строго, то состояние ЭСО называется парето-превосходным по сравнению с состоянием, когда микросети действуют индивидуально [16]. Важно также заметить, что задача нижнего уровня может иметь несколько решений, а задача верхнего уровня исследует их все.

Таким образом, верхний уровень можно рассматривать как многокритериальный «справедливый оператор», который управляет ЭСО в интересах всех участников с учетом индивидуальных экономических, экологических и даже социальных ограничений каждого микрогрида (рисунок 2).

В зависимости от требований конкретного микрогрида (поселения, коммуны, промышленного предприятия) функция нижнего уровня (3) может включать различные компоненты затрат, которые конвертируют различные ограничения в денежные штрафы или поощрения. Локальная система управления Local EMS будет искать стратегии управления режимом микрогрида в различных условиях многокритериальности для максимизации их общей прибыли, чтобы потом Community EMS, согласно (4), выбрала оптимальное управление для всего ЭСО. Решение этой оптимизационной задачи достижимо за счет применения многокритериального алгоритма обучения с подкреплением МКПД, который лежит в основе Local EMS.

Основной областью крайне успешного применения стандартного алгоритма МКПД были игры, в которых после некоторого количества ходов или действий игра заканчивается, и игрок побежда-

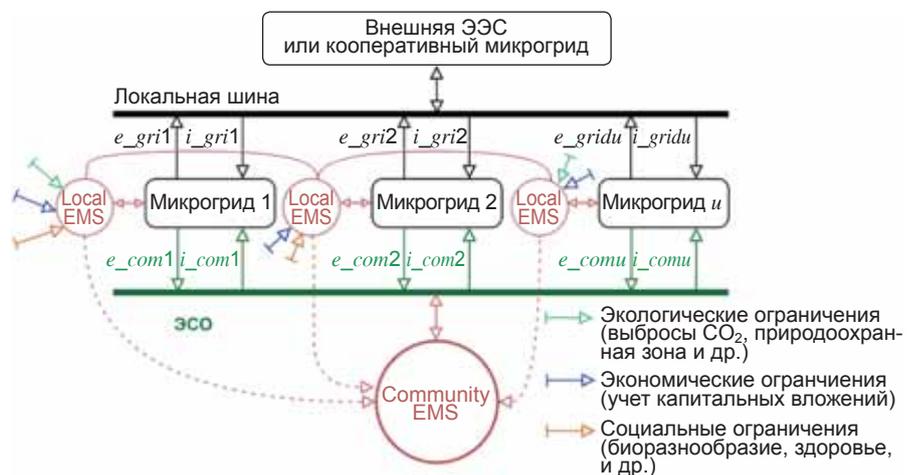


Рис. 2. Схематическое представление структуры ЭСО и управления им с учетом многокритериальности

Табл. 1. Характеристика поселков

Название поселения	Численность населения, чел.	Перспектива развития	Максимальная нагрузка сети, кВт	Виды энергоресурсов
Единка	50	Рыбопереработка	44,1	Ветер, солнце, щепа, дизельное топливо
Перетычиха	200	Деревопереработка	54,4	Солнце, щепа, дизельное топливо
Самарга	180	Туризм	30	

ет. В данной статье мы моделируем процесс поиска как однопользовательскую игру, в которой игрок выступает в роли Local EMS, управляя различными сетевыми активами в микрогриде (накопители, дизельные генераторы и пр.). Важным преимуществом алгоритма МКПД является метод онлайн-планирования, лежащий в его основе: план (действия, которые нужно выполнить) пересчитывается на каждом временном шаге [17]. Это означает, что агент МКПД способен обучаться и действовать одновременно в режиме онлайн.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ**

Подход к многокритериальному планированию и управлению функционированием энергетических сообществ может применяться для разнообразных потребителей: небольших промышленных предприятий или объектов, группы небольших населенных пунктов, нескольких районов в крупных населенных пунктах. Важными условиями для создания эффективного сообщества являются близкое расположение, отличие в графике электропотребления, наличие разнообразных возобновляемых энергоресурсов. Последние два условия обеспечивают возможность взаимовыгодного обмена избыточной энергией. В статье предлагается рассмотреть один из характерных случаев образования энергетического сообщества для трех близко расположенных населенных пунктов.

*Описание объекта исследования.* Применение предлагаемого подхода рассматривается для 3 поселений, расположенных в непосредственной близости: Единка, Перетычиха, Самарга (рисунок 3). Поселения, сильно удаленные от электрической системы, расположены на побережье Японского моря в Приморском крае. Для их электроснабжения используются дизельные генераторы, имеющие высокий износ и низкую эффективность. В Схеме и программе перспективного развития электроэнергетики Приморского края на 5-летний период поставлен вопрос о создании гибридных систем с ВИЭ в этих поселках,

а также об объединении их в ЭСО. Характеристика поселков приведена в таблице 1.

Село Единка расположено непосредственно на побережье, имеет перспективу развития рыбопереработки. В селе Самарга имеется перспектива развития туристических баз. Село Перетычиха расположено в лесной зоне, где в окрестностях ведется лесозаготовка, поэтому рассматривается перспектива развития деревопереработки. На рисунке 3б показаны суммарные графики электрических нагрузок трех поселков для 4 сезонов.

Проведенный анализ энергетических ресурсов показал наличие ресурсов древесной щепы в результате ведущихся лесозаготовок. Суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность в этом районе составляет 1282,5 кВт·ч/м². Средняя скорость ветра на побережье на высоте 10 м составляет 3,6 м/с.

Рассматриваемый район характеризуется потенциалом экономического развития. С другой стороны, природа района уникальна и имеет потенциал развития экотуризма. Поэтому развитие ЭСО будет рассмотрено для трех сценариев:

- 1) экономический сценарий направлен на построение энергетического ЭСО с наибольшей технико-экономической эффективностью;
- 2) экологический сценарий направлен на обеспечение минимального воздействия на окружающую среду при обеспечении технической эффективности;
- 3) сбалансированный сценарий предусматривает внимание ко всем аспектам развития ЭСО.

*Разработка конфигураций ЭСО и их многокритериальное сравнение.* Исходя из анализа энергоресурсов ЭСО может включать следующие источники энергии: газификаторы биомассы на древесной щепе (BG), фотоэлектрические преобразователи (PV), ветроэнергетические установки (WT) и дизельные генераторы (DG), а также аккумуляторные батареи (ES). Подключение поселений к электрической системе не рассматривается из-за их удаленности от нее более чем на 200 км.

Была проведена оптимизация 17 конфигураций ЭСО с использованием HOMER PRO по критерию минимума суммарных дисконтированных затрат.

Многокритериальное сравнение конфигураций проводилось по пяти критериям, выбор которых был обусловлен целями, преследуемыми при создании энергетического сообщества: обеспечение максимальной экономической эффектив-



Рис. 3. Ситуационный план поселений (а) и прогнозный график электрических нагрузок (б)

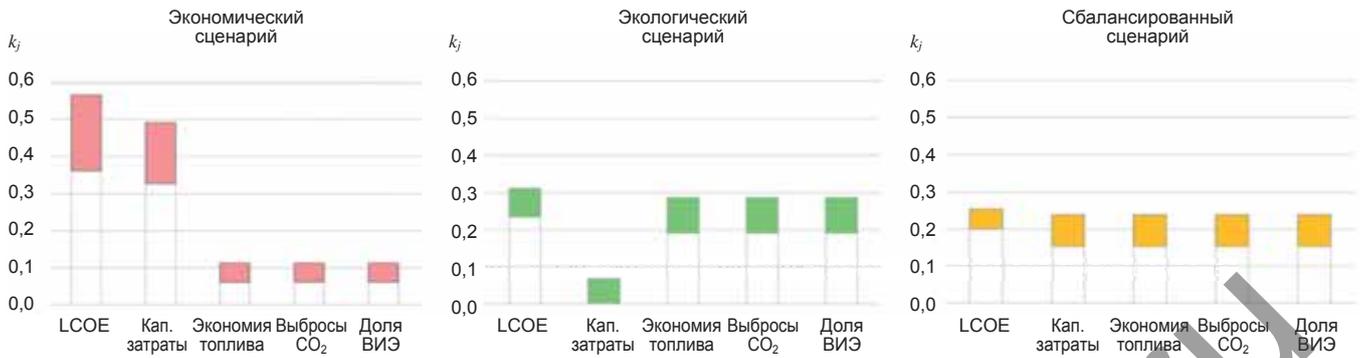


Рис. 4. Оценки шкалирующих коэффициентов для трех сценариев

ности (критерий 1 и 2), обеспечение технической эффективности (критерий 3), обеспечение минимизации воздействий на окружающую среду и социальной эффективности (критерий 4, критерий 5):

- 1) нормированная стоимость электроэнергии (LCOE), долл./кВт·ч;
- 2) капитальные затраты, тыс. долл.;
- 3) экономия топлива, %;
- 4) выбросы CO<sub>2</sub>, т/год;
- 5) доля ВИЭ в покрытии нагрузки, %.

Нормированная стоимость электроэнергии является одним из наиболее используемых критериев при оценке проектов в области энергоснабжения. Этот показатель включает суммарные дисконтированные затраты проекта за расчетный период и объем выработки электроэнергии. Хотя при оценке LCOE учитываются капитальные затраты, однако выделение их в отдельный критерий позволяет выявлять эффективные конфигурации энергетического сообщества, не требующие значительных первоначальных вложений.

Критерий «экономия топлива» оценивается расчетом снижения расхода как дизельного топлива, так и биомассы в сравнении с вариантом, где такой расход максимален. Этот критерий отражает эффективность варианта в отношении одновременно ресурсосбережения, оптимизации инфраструктуры хранения топлива, экологической эффективности.

Критерий, учитывающий выбросы CO<sub>2</sub>, позволяет учесть важный тренд декарбонизации, закрепленный в Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Одновременно этот критерий характеризует объем выбросов других загрязняющих веществ, так как рассчитывается через объем сжигаемого дизельного топлива. Выбросы CO<sub>2</sub> при производстве электроэнергии газификаторами биомассы не учитывались, так как эта технология считается CO<sub>2</sub>-нейтральной.

Критерий «доля ВИЭ в покрытии нагрузки» имеет как экологический, так и социальный аспект. Проекты с большой долей ВИЭ в генерации обеспечивают минимальное воздействие на окружающую среду и положительно воспринимаются обществом. В рассматриваемом случае развитие ВИЭ может содействовать развитию экотуризма.

После определения критериев было выполнено построение однокритериальных функций ценности и определены интервальные шкалирующие коэффициенты. Подробно подходы к этим процедурам представлены в работах [10, 16]. На рисунке 4 показаны результаты оценивания интервальных шкалирующих коэффициентов для трех сценариев.

На рисунке 5 приведены многокритериальные оценки конфигураций ЭСО для трех сценариев. Конфигурации с наиболее высокими оценками выделены цветом.

Сравнение конфигураций с близкими оценками проводится по показателю относительного доминирования. Параметры лучших конфигураций представлены в таблицах 2 и 3.

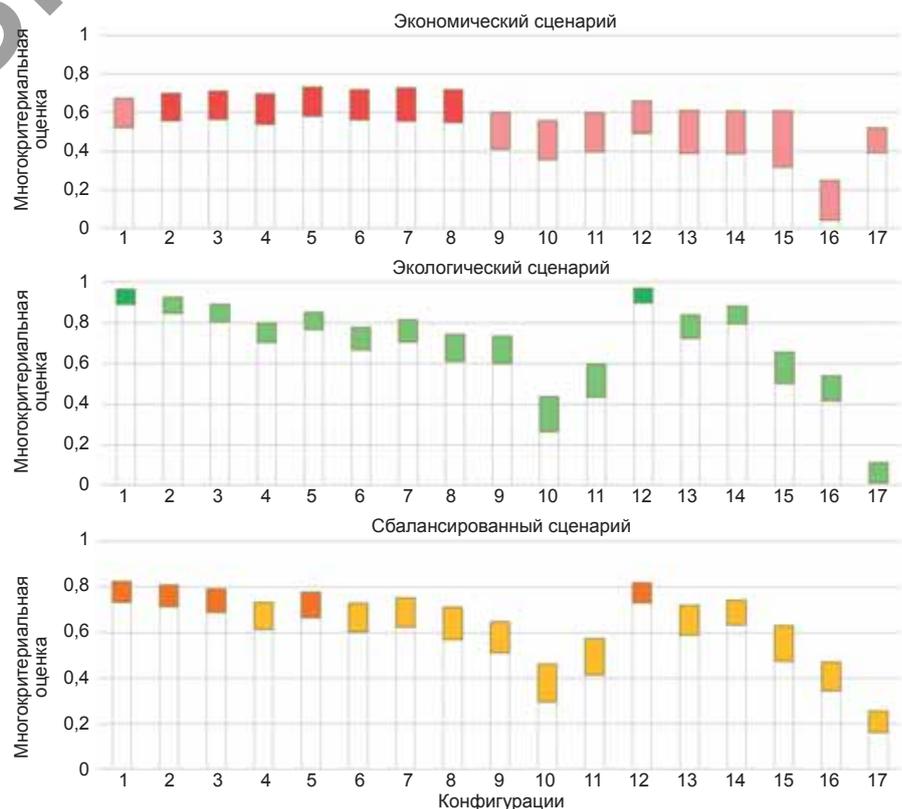


Рис. 5. Многокритериальные оценки конфигураций ЭСО для трех сценариев

Табл. 2. Выбранные конфигурации ЭСО поселений

Сценарий	Конфигурация					
	Дизельный генератор*	Газификатор биомассы*	Фотоэлектрический преобразователь*	Ветро-турбина*	Накопитель**	Инвертор*
Экономический	50	75	75	50	100	100
Экологический	–	100	100	75	175	100
Сбалансированный	25	75	125	75	175	100

\* кВт, \*\* кВт·ч

Табл. 3. Показатели конфигураций ЭСО поселений

Сценарий	LCOE, \$/кВт·ч	Капитальные затраты, тыс. \$	Дизельное топливо, т/год	Древесная щепа, т/год	Выбросы CO <sub>2</sub> , т/год	Доля ВИЭ, %
Экономический	0,238	514,8	12,2	366	38	91,8
Экологический	0,232	690,1	0	345	0	100
Сбалансированный	0,230	672,9	5,8	304	18	96

Для экономического сценария наиболее подходящей является конфигурация 5 с низкими значениями LCOE и капитальных затрат. В конфигурацию входят все виды источников энергии. Для экологического сценария наиболее подходящей является конфигурация 2, у которой, при сравнительно низком LCOE, высокая экономия топлива, низкие выбросы CO<sub>2</sub>. Доля ВИЭ в генерации составляет 100%. Для сбалансированного сценария выбрана конфигурация 1. Эта конфигурация отличается лучшей оценкой LCOE среди всех альтернатив, а также близкими к лучшим оценками по остальным критериям. Единственным недостатком являются высокие капитальные вложения.

В таблицах 4, 5 представлены результаты оптимизации конфигураций для микрогридов поселений при их изолированной работе. Эти результаты позволяют оценить эффективность объединения микрогридов в ЭСО.

Сопоставляя таблицы 3 и 5, можно отметить эффекты объединения микросетей поселений в ЭСМ. Показатели LCOE выбранных конфигураций ЭСМ лучше, чем у изолированных микросетей. Капи-

тальные затраты на конфигурацию ЭСМ, разработанную в Экономическом сценарии, всего на 5,9% выше, чем у изолированных микросетей. Превышение капитальных затрат объясняется затратами на электрическую сеть 10 кВ, общая протяженность которой составляет около 16 км. В то же время сравнение состава оборудования ЭСМ и изолированных микросетей (таблицы 2 и 4) показывает очевидную экономию при объединении микросетей в сообщество. Можно сделать вывод, что для случаев, когда микросети находятся на более близком расстоянии, капитальные вложения будут меньше при объединении в сообщество. Выбранные конфигурации сообщества имеют лучшие показатели по выбросам CO<sub>2</sub> и доле ВИЭ в генерации, чем изолированные микросети.

Многокритериальный выбор конфигурации ЭСМ с учетом неопределенности предпочтений ЛПР обеспечивает устойчивость проекта к возможным изменениям внешних условий. Конфигурации, выбранные с учетом неопределенности предпочтений ЛПР, также более адаптивны к различным целям на этапе управления сообществом.

Табл. 4. Оптимальные конфигурации микрогридов при изолированной работе

Населенный пункт	Конфигурация					
	Дизельный генератор*	Газификатор биомассы*	Фотоэлектрический преобразователь*	Ветро-турбина*	Накопитель**	Инвертор*
Единка	30	25	50	25	75	50
Перетычиха	30	25	100	–	75	50
Самарга	30	–	25	–	50	50
ИТОГО	90	50	175	25	200	150

\* кВт, \*\* кВт·ч

Табл. 5. Показатели конфигураций микрогридов при изолированной работе

Населенный пункт	LCOE, \$/кВт·ч	Капитальные затраты, тыс. \$	Дизельное топливо, т/год	Древесная щепа, т/год	Выбросы CO <sub>2</sub> , т/год	Доля ВИЭ, %
Единка	0,249	254,6	8,7	111	27	85,3
Перетычиха	0,263	249,6	17,5	106	54	72,6
Самарга	0,374	74,3	17,7	–	55	23,6
ИТОГО	0,274	578,5	43,9	217	136	70,3

Табл. 6. Ценовые показатели для Local EMS при изолированной работе рассматриваемых микрогридов

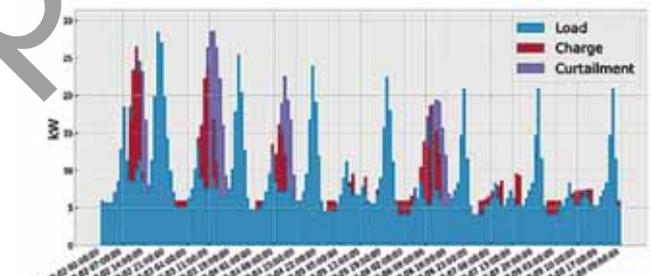
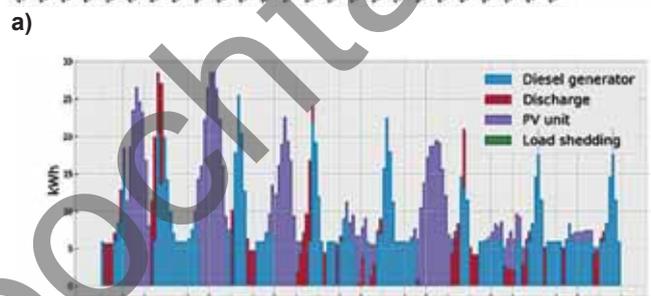
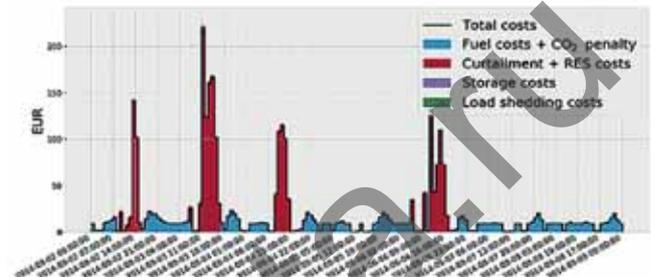
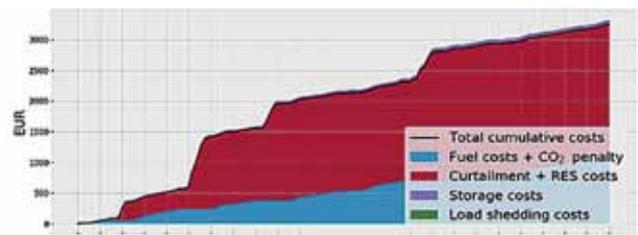
Ценовые показатели для агента МКПД	Значение, \$/кВт·ч
Стоимость отключения нагрузки (штраф нарушения баланса), $\pi_{d,t}^{shc}$	90
Стоимость сокращения мощности ВИЭ, $\pi_i^{igr}$	9
Стоимость выбросов CO <sub>2</sub> (для дизельного генератора), $\pi_{d,t}^{CO_2}$	0,1
Стоимость топлива газогенератора (древесная щепа), $\pi_{d,t}^{sgc}$	0,1983
Стоимость топлива дизельного генератора, $\pi_{d,t}^{sgc}$	0,8789
Стоимость производства электроэнергии ВИЭ (ВЭУ/ФЭП), $\pi_{d,t}^{RES}$	0,125/0,093
Стоимость использования АКБ (разрядка), $\gamma_d^{so}$	0,351
Стоимость единицы (штраф) за пиковую мощность, $\pi^{peak}$	0,01

Оценка эффективности функционирования различных сценариев сообщества микрогридов на базе модели «оператора энергосообщества». Изолированная работа микрогрида. Изначально была проведена оценка эффективности управления для конфигураций, полученных для изолированной работы микрогридов рассматриваемых поселений (таблица 4). Для оптимизации управления сообществом микрогридов были оценены показатели LCOE при расчетном сроке 25 лет для источников энергии и накопителей энергии. Оценки получены с использованием данных HOMER PRO для выбранных конфигураций. При расчете LCOE учитываются капитальные затраты, затраты на топливо, эксплуатационные затраты, затраты на замену оборудования по истечении срока эксплуатации.

При этом были приняты следующие ценовые показатели для функции (3), которые фактически являлись штрафами при действиях агента МКПД (таблица 6). При расчете ценовых показателей в их состав были включены капитальные и эксплуатационные затраты, затраты на периодическую замену оборудования. В случае изолированной работы микрогрида агент МКПД решал обычную одноуровневую задачу линейного программирования MILP. При этом целевая функция (3) представляла собой многокритериальную функцию вознаграждения агента:

$$R = -J^* = r_1 + r_2 + \dots + r_n.$$

Ниже представлен пример оптимального управления на базе Local EMS микрогридом села Самарга при его изолированной работе. В качестве тестового периода рассмотрена одна летняя неделя в августе. Из рисунка 6а хорошо видно, что основная статья расходов — затраты на сокращение ВИЭ-генерации. Это объясняется локальным эффектом так называемой «калифорнийской утки» [18], когда мы имеем несовпадение пика генерации от ФЭП с пиком потребления. Хотя модель Local EMS выбирает верную стратегию максимальной зарядки АКБ в часы пика генерации от ФЭП (примерно с 10:00 до 14:00), одна-



а)

Рис. 6. Затраты (а), генерация и нагрузка микросети (б) для села Самарга

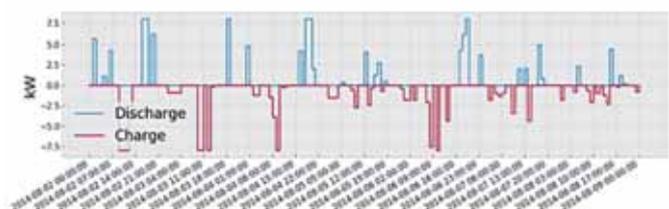


Рис. 7. Динамика зарядки/разрядки одного из АКБ в селе Самарга

ко все равно остается «лишняя» ВИЭ-генерация, которая интерпретируется как штраф для агента МКПД (рисунки 6б и 7).

В случае включения села Самарга в ЭСО, микрогрид мог бы реализовать функции просьюмера, чтобы продать излишки генерации от ФЭП соседним

микрогридам (или во внешнюю сеть) и тем самым преобразовать затраты в доходы. Также из рисунка бб хорошо видно, что для покрытия вечернего пика нагрузки модель Local EMS сначала начинает разряжать АКБ и только потом включает дизельный генератор. Такая стратегия управления связана с тем, что использование АКБ дешевле ( $\gamma_{d,t}^{sg} = 0,351$  \$/кВт·ч), нежели включение дизельного генератора, затраты которого складываются не только из стоимости топлива, но и штрафа за выбросы  $\text{CO}_2$  ( $\pi_{d,t}^{sg} + \pi_{d,t}^{\text{CO}_2} = 0,88 + 0,1 = 0,98$  \$/кВт·ч).

На рисунке 8 представлен пример стратегии управления Local EMS, выработанный для села Перетычиха. Хорошо видно, что и в данном случае возникает эффект «калифорнийской утки», что также сильно увеличивает затраты изолированной работы микрогрида.

В результате, аналогично селу Самарга, на максимуме солнечной генерации днем заряжаются АКБ, в вечерний пик включаются топливные генераторы (дизель, газификатор), а также АКБ на разряд. Примечательно, что агент МКПД решает, в основном, использовать газификатор, в то время как дизельный генератор включается кратковременно, когда АКБ и газификатору не удается самостоятельно «осилить» какой-то пик нагрузки. К концу недели солнечной энергии становится мало, в результате АКБ имеют малый заряд, и поэтому дизельный генератор вынужденно используется чаще.

При сравнении графиков затрат на выбросы  $\text{CO}_2$  Самарги и Перетычихи хорошо видно, что присутствие газификатора в микрогриде последнего позволяет реализовать более «экологичное» управление (рисунок 9). Так для чисто «дизельного» села Самарга  $J_{\text{CO}_2} = 33$  \$/неделя, а для села Перетычиха  $J_{\text{CO}_2} = 11,8$  \$/неделя. Очевидно, это прежде всего связано с тем, что стоимость древесной щепы значительно дешевле дизельного топлива (таблица 6), а значит использование газификатора ( $\pi_{d,t}^{sg} = 0,19$  \$/кВт·ч) становится выгоднее включения АКБ (по крайней мере на первом этапе работы микрогрида, когда необходимо окупить капвложения в новое энергооборудование).

Таким образом очевидно, что изолированная работа рассматриваемых микрогридов, даже при интеллектуальном управлении от системы Local EMS, приводит к дополнительным затратам либо от не-

возможности реализовать «лишнюю» мощность от ВИЭ, либо при необходимости отключения потребителей в случае возникновения небаланса (например, в зимние месяцы).

*Энергетическое сообщество микрогридов.* Для всех сценариев была рассмотрена следующая энергетическая практика. Часть генерирующего оборудования находится в собственности самих поселений и территориально входит в состав их микросетей. Другая часть оборудования образует кооперативную микросеть, которая не имеет нагрузки и рассматривается как аналог внешней электрической сети для нужд покупки и продажи электроэнергии. Такая микросеть необходима для случаев, когда обмен между участниками ЭСО экономически или технически нецелесообразен, например, при возникновении «калифорнийской утки» внутри ЭСО, то есть она выступает в роли своеобразного энергетического буфера. Для сценария существования ЭСО кооперативная микросеть представляет собой предельную единицу продукции (электроэнергии), а цена ее предложения определяет цену на локальном рынке для этой микросети.

Ранее в результате процедуры многокритериального планирования из 17 конфигураций (сценариев) ЭСО, в которое объединяются три анализируемых поселения, были выбраны три (таблица 2). Ниже рассмотрены примеры использования предложенной модели «оператора энергосообщества» для этих сценариев. В этом случае обычная одноуровневая задача MILP трансформируется в задачу двухуровневого программирования с возникновением локального рынка при взаимодействии интеллектуальных систем Local EMS (агентов МКПД). Такое взаимодействие регулируется моделью «оператора энергосообщества» Community EMS за счет появления целевой функции верхнего уровня (4).

*Сценарий 1 — Минимум затрат.* Исходные ценовые параметры аналогичны для случая изолированной работы (таблица 6). Однако использование модели Community EMS вводит следующие дополнительные платы: цена покупки электроэнергии в кооперативной микросети  $\pi_{i,t}^{gr} = 0,238$  \$/кВт·ч (на основе значения LCOE), цена продажи в кооперативную микросеть  $\pi_{i,t}^{gr} = 0,06$  \$/кВт·ч. Также были приняты: штраф за пиковую мощность  $\pi^{peak} = 0,01$  \$/кВт·ч

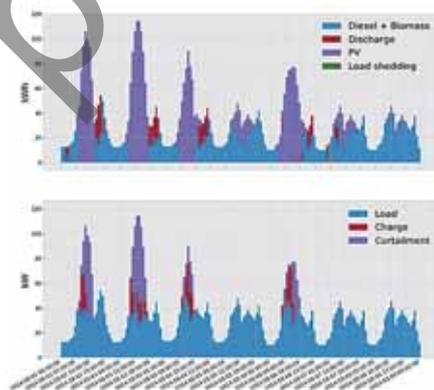


Рис. 8. Генерация и нагрузка микросети для села Перетычиха

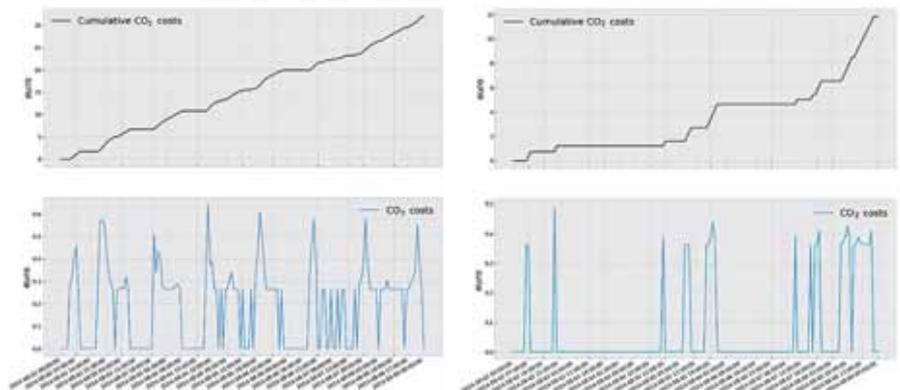


Рис. 9. Сравнение затрат выбросов  $\text{CO}_2$  для микросетей: а) Самарги (дизель); б) Перетычихи (дизель+газификатор)

и единая плата Community EMS  $\gamma^{com} = 0,025$  \$/кВт·ч. Конфигурация ЭСО для этого сценария представлена на рисунке 10.

На рисунке 11 представлен пример управления микрогридом ЭСО для Самарги на базе модели Community EMS. Из рисунка 11а видно, что в период с 5:00 до 16:00 село Самарга выполняет в ЭСО активную просьюмерскую роль, продавая электроэнергию (преимущественно полученную от ФЭП) как «соседям», так и в энергетический «буфер» — кооперативный микрогрид. Как видно из рисунка 11б, такое подключение Самарги к ЭСО приводит к сокращению нормированной стоимости электроэнергии LCOE более чем в два раза, преимущественно в периоды активной торговли электроэнергией. Например, для Самарги с 12:00 до 14:00 (пик солнечной генерации) цена на электроэнергию на локальном рынке падает с установленных 0,238 \$/кВт·ч до 0,06 \$/кВт·ч за счет активного обмена электроэнергией между микросетями внутри ЭСО.

Рисунок 11а иллюстрирует выполнение условия справедливого ЭСО на основе эффективности по Парето, когда Самарга получает большую прибыль от работы в ЭСО ( $J_{u,opt} = 13,76$  \$/сутки) по сравнению с его изолированной работой ( $J_{u,opt}^{SU} = 11,08$  \$/сутки). Другие поселения также получают дополнительную выгоду в виде сокращения затрат, так село Единка имеет  $J_{u,opt} = -12,46$  \$/сутки в сравнении с  $J_{u,opt}^{SU} = -14,06$  \$/сутки, а село Перетычиха  $J_{u,opt} = -27,90$  \$/сутки в сравнении с  $J_{u,opt}^{SU} = -32,64$  \$/сутки.

Сценарий 2 — Минимум выбросов CO<sub>2</sub>. Исходные данные — аналогичные предыдущему Сценарию 1. При этом конфигурация ЭСО не включает дизельные генераторы для минимизации выбросов CO<sub>2</sub> (рисунок 12). На рисунке 13 представлен пример управления ЭСО для Самарги на базе модели Community EMS для Сценария 2. Хорошо видно, что в этом сценарии присоединение в ЭСО для Самарги дает большую дополнительную прибыль (рисунок 13а), нежели в предыдущем сценарии минимума затрат  $J_{u,opt} = 10,12$  \$/сутки против  $J_{u,opt}^{SU} = 16,82$  \$/сутки. Вероятно, это связано с тем, что установленная мощность ФЭП для Самарги воз-

росла с 25 до 50 кВт и затраты топливного генератора снизились, так как на смену дизеля пришел газификатор.

Кроме того, Самарга для этих тестовых суток имеет выигрышную роль, продавая излишки своей электроэнергии Единке и Перетычихе, которые в Сценарии 2 имеют более ограниченные условия по гибким генерирующим активам. Низкоуглеродная конфигурация ожидаемо отражается на увели-

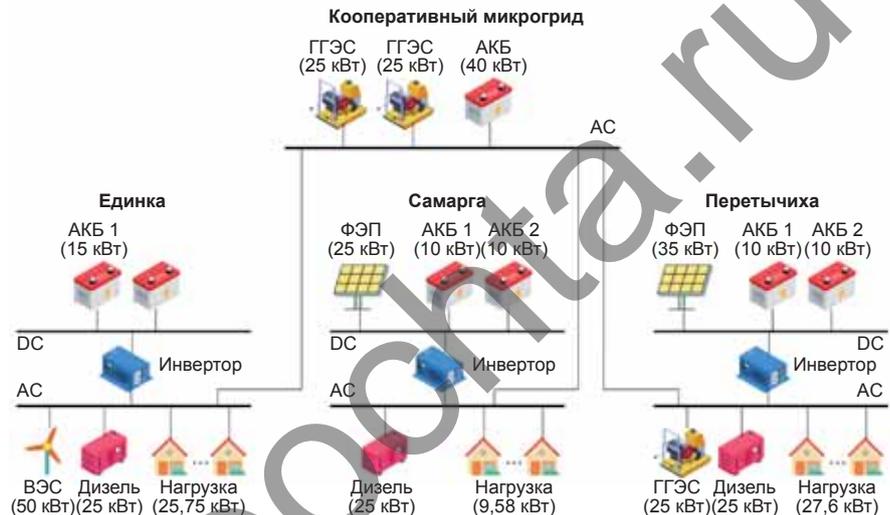


Рис. 10. Конфигурация ЭСО для сценария минимума затрат

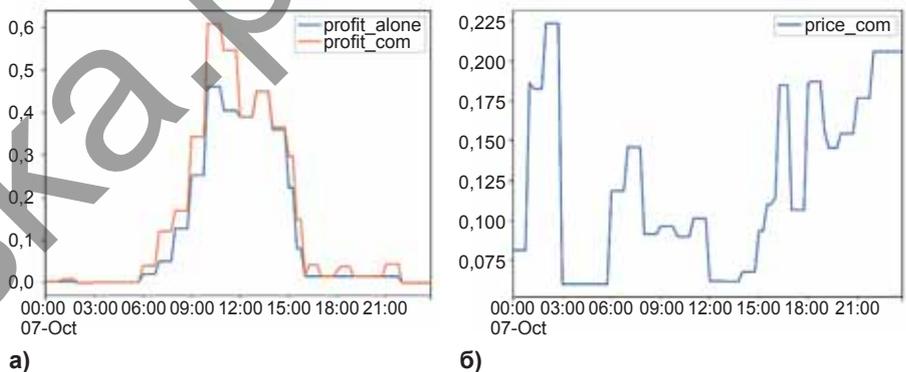


Рис. 11. Результаты работы в ЭСО для села Самарга: а) прибыль микросети по сравнению со сценарием, когда они работают индивидуально (\$); б) цена на электроэнергию в ЭСО при обмене мощностью (\$/кВт·ч)

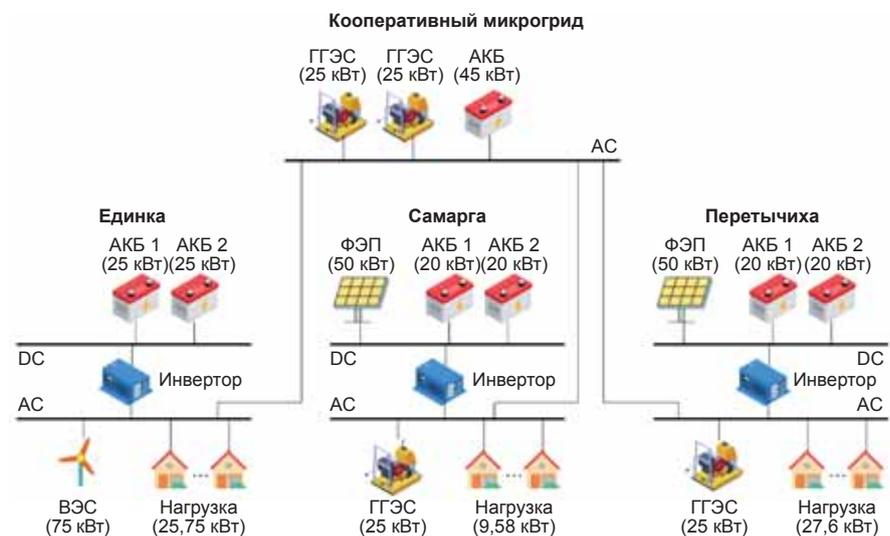


Рис. 12. Конфигурация энергетического сообщества для сценария минимума выбросов CO<sub>2</sub>