

# Создание комплексных интегрированных систем энергоснабжения в условиях трансформации

Валентин БАРИНОВ, д.т.н., Кирилл ЛУНИН, к.т.н., Иван РЕДЬКО, д.т.н.,  
АО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского (АО «ЭНИН»)

## АННОТАЦИЯ

*В статье рассмотрена краткая характеристика Государственного плана электрификации России (ГОЭЛРО), разработанного по инициативе В.И. Ленина комиссией ГОЭЛРО во главе с Г.М. Кржижановским и принятого 22 декабря 1920 года VIII Всероссийским Съездом Советов, а также ключевые направления перспективного плана научных исследований по проблеме создания Единой энергосистемы страны (ЕЭС), разработанного комиссией под руководством Г.М. Кржижановского в 1957 году, которые заложили основу образования ЕЭС — самого крупного в мире на конец 1980-х годов централизованно управляемого энергообъединения. Приведены показатели развития и эффективности работы электроэнергетики страны. Рассмотрена сущностная часть проведённых в начале XXI века реформ в электроэнергетике России, их недостатки, приведшие к снижению эффективности функционирования отрасли и появлению различного рода «узких мест» и диспропорций. Рассмотрены идущие в мире процессы трансформации энергетических систем, в результате которых создаётся новая архитектура энергетических систем. Сформулированы первоочередные задачи, стоящие перед российской электроэнергетикой в этих условиях. Статья актуализирует и расширяет материал доклада с одноимённым названием, представленного авторами на Международной научной конференции «ENERGY-21: Sustainable Development & Smart Management / Энергетика XXI века: Устойчивое развитие и интеллектуальное управление», прошедшей в г. Иркутске с 7 по 11 сентября 2020 года.*

В своей речи на Генеральной Ассамблее ООН 22 сентября 2020 года, говоря о восстановлении глобальной экономики мира после пандемии коронавируса, президент Российской Федерации В.В. Путин озвучил идею качественного роста, «интеграции интеграций», которая заложена в российскую инициативу по формированию Большого Евразийского партнёрства с участием всех без исключения стран Азии и Европы.

Важной составляющей процесса «интеграции интеграций» является интеграция комплексных интегрированных систем электроснабжения, происходящая в условиях идущей в мире трансформации энергетических систем.

Особое значение для понимания механизмов интеграции и создания комплексных интегрированных систем электроснабжения имеет Государственный план электрификации России (план ГОЭЛРО) [1], столетие которого отмечается в 2020 году.

Развивая идеи плана ГОЭЛРО, электроэнергетика страны прошла громадный путь от предусмотренного планом ГОЭЛРО сооружения первых крупных электростанций и объединяющих их в энергосистемы электрических сетей до образования Единой энергосистемы страны (ЕЭС) — самого крупного в мире централизованно управляемого энергообъединения [2].

Перед Первой мировой войной суммарная мощность электростанций России составляла всего 1141 МВт, а годовая выработка электроэнергии — 2039 млн кВт·ч. Самая крупная тепловая электростанция (ТЭС) имела мощность 58 МВт; наибольшая мощность энергоагрегата — 10 МВт. Суммарная мощность гидроэлектростанций (ГЭС) составляла 16 МВт, самой крупной была ГЭС мощностью 1350 кВт.

На электростанциях, принадлежавших частным компаниям, применялись различные системы электрического тока: постоянный и переменный (однофазный и трёхфазный — в основном 50 и 25 Гц). Электростанции работали изолированно, и случаи параллельной работы были исключительными.

Все электрические сети напряжением выше генераторного имели протяжённость около 100 км. В 1914 г. вступила в строй первая линия электропередачи напряжением 70 кВ от подмосковной электростанции «Электропередача» до Москвы; это было наивысшее напряжение, освоенное до Первой мировой войны.

Энергетическое оборудование и электротехническая аппаратура были в основном импортными или изготавливались на находившихся в России заводах иностранных фирм. Самая крупная турбина, выпущенная в России, имела мощность 1250 кВт при давлении пара 1,2 МПа; трансформаторы, масляные выключатели, изоляторы, защитная аппаратура в стране не изготавливались.

Потребление электроэнергии на душу населения составляло в 1913 г. всего 12,8 кВт·ч в год. Электроэнергией пользовались не более 20 % населения.

Первая мировая война, интервенция и Гражданская война привели к тяжёлой хозяйственной разрухе. Производство электроэнергии в 1921 г. сократилось в четыре раза по сравнению с довоенным уровнем, было выработано всего 520 млн кВт·ч электроэнергии. Значительная часть электрических сетей была разрушена.

Коренное изменение положения в электроэнергетике страны началось после Великой Октябрьской революции и связано с разработкой и реализацией Государственного плана электрификации России (ГОЭЛРО), разработанного по инициативе В.И. Ленина комиссией ГОЭЛРО во главе с Г.М. Кржижановским и принятого 22 декабря 1920 г. VIII Всероссийским съездом Советов.

План ГОЭЛРО — это первый единый государственный план развития народного хозяйства страны, в котором были определены основные направления хозяйственного строительства: индустриализация страны при опережающем разви-

тии электрификации; рациональное размещение по стране промышленности с концентрацией производства путём создания энергопромышленных комбинатов; широкое распространение электроэнергии в промышленности и сельскохозяйственном производстве; всемерное развитие железнодорожного транспорта на основе электрификации.

План ГОЭЛРО предусматривал широкое использование для целей энергетики местных низкосортных видов топлива (торф, бурые угли, отбросы и т.п.), гидроэнергии и создание централизованного энергоснабжения экономических районов путём сооружения мощных электростанций и высоковольтных линий передачи 35 и 110 кВ. Вместе с тем, план ГОЭЛРО придавал большое значение развитию местной электрификации на небольших электростанциях, в особенности для сельского хозяйства и местной промышленности. Планом электрификации было выделено восемь экономических районов: Северный, Центрально-Промышленный, Южный, Приволжский, Уральский, Западно-Сибирский, Кавказский и Туркестанский.

Разработка плана ГОЭЛРО базировалась на руководящих указаниях В.И. Ленина относительно составления плана реорганизации промышленности и экономического подъёма России, в которых обращалось особое внимание на электрификацию промышленности и транспорта и применение электричества для земледелия, на использование непервоклассных сортов топлива для получения электрической энергии с наименьшими затратами; на разработанном Г.М. Кржижановским комплексном методе, предусматривающем органическую связь между развитием всего народного хозяйства и энергетикой. В последующем этот метод был обобщён и развит соратниками Г.М. Кржижановского и их последователями в виде методологии системных исследований [3–7].

Комплексность плана ГОЭЛРО состояла также и в создании научной базы для развития энергетики страны и подготовки кадров. С этой целью в 20-е и 30-е гг. были созданы базовые научно-исследовательские и проектные институты, а также учебные институты для подготовки инженерных кадров.

Так, академик Г.М. Кржижановский в 1930 г. организовал и более четверти века возглавлял Энергетический институт АН СССР (ЭНИН АН СССР). Основное научное ядро института составили учёные-энергетики, участвовавшие в разработке плана ГОЭЛРО. В ЭНИН в разное время работали крупнейшие учёные-энергетики, создавшие ряд научных школ. Это академики АН СССР: А.В. Винтер,

М. В. Кирпичёв, Л. А. Мелентьев, М. А. Михеев, В. Ф. Миткевич, Л. Р. Нейман, В. И. Попков, Н. Д. Папалекси, М. А. Стырикович, А. А. Чернышёв, К. И. Шенфер, Э. П. Волков; члены-корреспонденты АН СССР: Б. К. Александров, И. С. Брук, В. И. Вейц, М. А. Великанов, В. П. Вологдин, В. А. Голубцов, Д. Г. Жимерин, К. А. Круг, Н. Я. Матюхин, А. С. Предводителей, Л. Н. Хитрин, З. Ф. Чуханов, Г. Н. Кружидин, Л. С. Попырин.

План ГОЭЛРО, рассчитанный на 10–15 лет, предусматривал строительство 30 новых районных ТЭС и ГЭС общей мощностью 1750 МВт, сооружение электрических сетей, соединение электростанций на параллельную работу, создание региональных энергосистем и их последующую интеграцию в объединённые энергосистемы.

Программа плана ГОЭЛРО была выполнена уже в 1930 г. К концу 1935 г., т. е. к 15-летию плана ГОЭЛРО, вместо 30 было построено 40 районных электростанций, на которых вместе с другими крупными промышленными станциями районного значения было введено втрое больше мощности, чем предусматривалось планом ГОЭЛРО. В 1935 г. среди районных электростанций было 13 электроцентралей мощностью в 100 тыс. кВт каждая и выше. К началу 1935 г. общая установленная мощность советских гидроэлектростанций достигла почти 700 тыс. кВт, и в составе этих электростанций были такие мощные, как крупнейшая в то время в мире Днепровская ГЭС (434 тыс. кВт при полной мощности 558 тыс. кВт), Свирская 3-я (72 тыс. кВт при полной мощности 100 тыс. кВт), Волховская (тогда 58 тыс. кВт), Рионская (48 тыс. кВт) и др.

Быстрый рост в это время высоковольтных электрических сетей позволил создать крупные энергетические системы. Первые энергосистемы — Московская и Петроградская — были созданы в 1921 г. В 1935 г. в стране в результате объединения электростанций по крупнейшим районам страны работало шесть ведущих энергосистем с годовой выработкой электроэнергии свыше 1 млрд кВт·ч каждая, в том числе четыре (Московская, Ленинградская, Донецкая и Днепровская) с годовой выработкой электроэнергии свыше 2 млрд кВт·ч каждая. Общая выработка электроэнергии в стране в 1935 г. превысила в 13,5 раза уровень производства электроэнергии в 1913 г. и более чем в 52 раза уровень производства в 1921 г.

Ускоренные темпы роста мощности электростанций, производства ими электроэнергии, создание региональных энергосистем сыграли особенно важную роль в период Великой Отечественной войны. Широкое строительство электростанций

и энергосистем в восточных районах и в особенности на Урале обеспечило возможность бесперебойного снабжения электроэнергией имевшегося здесь и перебазированного на восток огромного количества промышленных предприятий Советского Союза. Преимущественное использование электростанциями местных видов топлива позволило в военные годы быстро и с высокой эффективностью справляться с трудностями снабжения тепловых электростанций топливом.

Несмотря на колоссальный урон, причинённый электроэнергетике и всему народному хозяйству в результате Великой Отечественной войны, Советский Союз в послевоенные годы в кратчайшие сроки благодаря заложенным планом ГОЭЛРО производственным базисом и механизмами развития добился быстрого восстановления электроэнергетики до довоенного уровня и продолжал её развитие ещё более ускоренными темпами. Довоенная мощность электростанций была восстановлена и превзойдена уже в 1946 г. Выработка электроэнергии увеличилась по сравнению с 1940 г. на 87% и составила более 90 млрд кВт·ч. Ежегодный прирост мощностей в это время почти в 2 раза превышал всю 10–15-летнюю программу электростроительства по плану ГОЭЛРО. В 1954 г. валовая продукция крупной промышленности СССР превысила уровень 1913 г. (в сравнимых ценах) в 35 раз, производство средств производства увеличилось почти в 60 раз, электроэнергии — более чем в 75 раз, машиностроения — более чем в 160 раз.

Значительное развитие получили три работавшие отдельно ОЭС Европейской части страны: Центра, Урала и Юга, суммарная выработка электроэнергии этих ОЭС составляла около половины всей производимой в стране электроэнергии. С вводом в работу в 1956 г. первой электропередачи 400 кВ Куйбышев — Москва на параллельную работу с энергосистемами Центра присоединилась Куйбышевская система района Средней Волги; этим было положено начало объединения энергосистем различных регионов и создание ЕЭС Европейской части СССР.

Государство в послевоенные годы особое внимание уделяло опережающему развитию электроэнергетики, о чём свидетельствуют директивы по пятому (1951–1955 гг.) и шестому (1956–1960 гг.) пятилетним планам развития народного хозяйства страны.

Во исполнение этих директив комиссией под руководством Г. М. Кржижановского в 1957 г. был разработан перспективный план научных исследований по проблеме создания ЕЭС СССР. В соот-

ветствии с этим перспективным планом создание и развитие ЕЭС должно было характеризоваться переводом всей энергетической техники на качественно новую ступень. К числу основных направлений этой стратегии относились [3]:

- атомные электростанции различных типов и параметров;
- сверхмощные конденсационные электрические станции до 2–3 млн кВт с агрегатами до 1 млн кВт со сверхвысокими параметрами пара; мощные теплоэлектроцентрали с агрегатами 100–200 тыс. кВт; газотурбинные электрические станции, в том числе работающие в комплексе со станциями подземной газификации углей; электростанции с новыми методами комплексного использования топлива на энерготехнологической основе;
- сверхмощные гидроэлектростанции на сибирских реках с новыми типами гидротехнических сооружений, гидромеханического и электрического оборудования;
- дальние электропередачи сверхвысоких напряжений на постоянном и переменном токе пропускной способностью 2–3 млн кВт на одну цепь протяжённостью 2–2,5 тыс. км;
- комплексная автоматизация электростанций различных типов, автоматическое управление энергосистемами и ЕЭС с применением ЭВМ, с автоматическими операторами, установленными на электростанциях и подстанциях.

Последующее развитие ЕЭС во многом реализовало направления этого перспективного плана.

В течение 1960-х гг. продолжалось и было завершено формирование ЕЭС Европейской части страны. В 1970 г. был осуществлён переход к формированию ЕЭС СССР. В 1972 г. в состав ЕЭС СССР вошла ОЭС Казахстана. В 1978 г. с завершением строительства транзитной связи 500 кВ Сибирь — Казахстан — Урал на параллельную работу присоединилась ОЭС Сибири. В том же году было закончено строительство межгосударственной связи 750 кВ Западная Украина (СССР) — Альбертиша (ВНР). С 1979 г. началась параллельная работа ЕЭС СССР и ОЭС стран — членов СЭВ в составе Объединённой энергосистемы стран — членов СЭВ «Мир».

К концу 1980-х гг. на территории страны был создан хорошо организованный и весьма эффективно работающий электроэнергетический комплекс, высокая эффективность которого была достигнута благодаря реализации ряда основополагающих стратегических направлений, заложенных планом ГОЭЛРО и перспективным планом научных исследова-

ний по проблеме создания ЕЭС, к которым относились:

- формирование энергосистем, объединение энергосистем на параллельную работу и создание уникального энергообъединения — Единой энергосистемы страны, которая в конце 1980-х годов стала крупнейшим комплексным интегрированным централизованно управляемым энергообъединением в мире, обеспечивающим централизованное электро- и теплоснабжение экономики и населения страны; а также формирование Объединённой энергосистемы стран — членов СЭВ «Мир»;
- создание и ввод большого количества мощных и высокоэффективных агрегатов тепловых, гидравлических и атомных электростанций;
- взаимоувязанное развитие Единой энергосистемы страны и её системы управления как двух частей единого целого и создание на этой основе высокоэффективной иерархической системы планирования развития и управления функционированием Единой энергосистемы, позволяющей решать весь комплекс задач, связанных с её оптимальным развитием и функционированием, с использованием принципа оптимальности на каждом уровне временной и территориальной иерархии при обеспечении требуемого уровня надёжности [5].

Создание мощных территориальных энергообъединений и организация их параллельной работы в составе Единой энергосистемы страны позволили значительно повысить эффективность работы электроэнергетики, характеризуемой следующими индикаторами:

- удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию снизился с 590 г/кВт·ч в 1950 г. до 325,8 г/кВт·ч в 1990 г.;
- удельный расход электроэнергии на собственные нужды электростанций в % от выработки электроэнергии снизился с 6,55 в 1950 г. до 4,43 в 1990 г.;
- потери электроэнергии на её транспорт по электрическим сетям снизились с 8,78 в 1950 г. до 8,65 % в 1990 г.;
- удельная численность персонала на 1 МВт установленной мощности снизилась с 11 человек в 1950 г. до 2,85 в 1990 г.

Движущей силой интеграции энергосистем была реализация преимуществ совместной работы энергосистем и достигаемое при этом повышение эффективности и надёжности работы объединяемых энергосистем благодаря созданной эффективной иерархической системе оптимального управления.

Общий экономический эффект от создания Единой энергосистемы страны к концу 1980-х гг. в сравнении с изолированной работой энергосистем оценивался снижением капитальных вложений в электроэнергетику на величину свыше 2 млрд руб. в ценах 1984 г. и уменьшением ежегодных эксплуатационных расходов на величину 1 млрд руб. Выигрыш в снижении суммарной установленной мощности электростанций ЕЭС в сравнении с изолированной работой энергосистем за счёт снижения годового максимума нагрузки и сокращения необходимой резервной мощности оценивался величиной свыше 15 млн кВт. Несмотря на то, что требования в отношении резервов мощности были ниже аналогичных требований в энергообъединениях западных стран, благодаря хорошо организованному управлению и широкому внедрению и использованию противоаварийной автоматики обеспечивалась высокая надёжность работы энергосистем и электроснабжения потребителей. Не было крупных системных аварий с погашением большого числа потребителей, какие имели место в США и в других странах [5].

Установленная мощность электростанций по стране в целом увеличилась с 1916 по 1990 г. с 1,19 до 344 млн кВт, а ЕЭС страны — с 1970 по 1990 г. со 104,9 до 288,6 млн кВт.

Производство электроэнергии по стране в целом увеличилось с 1916 по 1990 г. с 2,575 до 1726 млрд кВт·ч, а ЕЭС страны — с 1970 по 1990 г. с 529,5 до 1528,7 млрд кВт·ч (рис. 1).

В результате проведённых в начале XXI века реформ в электроэнергетике России централизованная иерархическая система оптимального управления электроэнергетическим комплексом страны (которая соответствовала государственному устройству страны и основу которой составляли вертикально интегрированные региональные энергокомпании, отвечающие за надёжное и экономичное энергоснабжение регионов) была заменена рыночной структурой управления с образованием большого числа новых субъектов хозяйствования, что нарушило фундаментальный принцип управления, а именно соответствие системы управления самой технологической системе [8, 9]. При этом для новой структуры управления отраслью к настоящему времени не созданы эффективные механизмы совместной работы новых собственников и государственного управления, обеспечивающие оптимальное развитие и функционирование электроэнергетического комплекса страны как единого целого в новых условиях. Результатом этого стало снижение эффективности функционирования отрасли, появление различного рода узких мест и диспропорций [10], что характеризуется рядом показателей, в том числе:

- снижением эффективности использования установленной мощности электростанций (число часов использования установленной мощности снизилось с 5070 часов в 1990 г. до 4020 часов в 2017 г.; установленная мощность электростан-

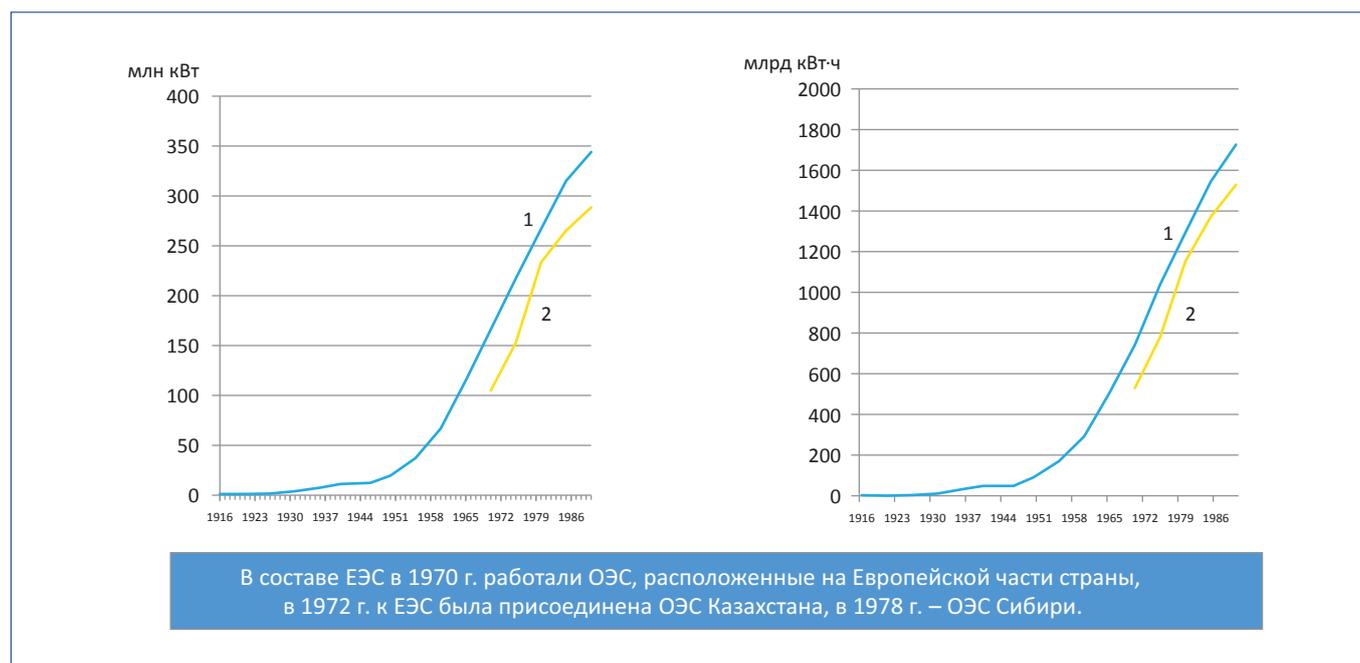


Рис. 1. Динамика установленной мощности электростанций и производство электроэнергии по стране в целом (1) и ЕЭС страны (2)

ций увеличилась с 213,3 ГВт в 1990 г. до 272,4 в 2017 г., в то время как выработка электроэнергии увеличилась с 1082 млрд кВт·ч в 1990 г. до 1094 млрд кВт·ч в 2017 г.);

- снижением эффективности использования топлива на ТЭС;
- увеличением штатного коэффициента;
- ростом уровня потерь электроэнергии в электрических сетях;
- ростом средних тарифов на электроэнергию для потребителей с темпами, превышающими рост уровня инфляции;
- сокращением наиболее эффективного производства электроэнергии на ТЭЦ.

К дополнительным «узким местам» в современном состоянии электроэнергетики России следует отнести ряд проблем [10], в том числе:

- отсутствие целевого видения и проектов долгосрочного развития электроэнергетики России, в том числе развития ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения постоянного и переменного тока (в создании которых в 80-х гг. прошлого столетия СССР был впереди многих зарубежных стран, которые получили значительное развитие за последние годы, в том числе в странах БРИКС — Китае, Бразилии, Индии и ЮАР);
- отсутствие целостной нормативно-правовой базы, которая должна учитывать идущие в стране процессы увеличения разнообразия источников генерации и компонентов энергосистем, включая развитие распределённой генерации на базе ГТУ, дизельных, газопоршневых, ветровых и солнечных электростанций, потребителей-производителей электроэнергии, систем управления спросом, накопителей энергии;
- отсутствие целостной системы планирования и проведения научных исследований;
- отсутствие освоенных отечественных современных инновационных технологий и оборудования — мощных газовых турбин, паросиловых технологий на твёрдом топливе с суперсверхкритическими параметрами, систем накопления энергии и др.;
- при общем значительном избытке генерирующих мощностей недостаточная мощность пиковых и полупиковых генерирующих мощностей.

В настоящее время энергетика многих стран мира претерпевает коренные изменения [12–16], в результате которых создаётся новая архитектура энергетических систем.

Основными факторами, способствующими трансформации энергетических систем в мире, являются:

- значительное уменьшение стоимости технологий производства и потребления электроэнергии (включая ветровые и солнечные электростанции, распределённую генерацию, электротранспорт, системы управления спросом и накопления энергии);
- растущая электрификация экономики;
- стремление уменьшить экологические воздействия;
- расширение цифровизации и автоматизации энергетических систем;
- стремление повысить надёжность и эффективность работы энергетических систем;
- расширение доступности энергии с использованием инновационных технологий.

Происходящие технологические изменения сопровождаются созданием соответствующей институциональной основы, определяющей регулирующие, технологические и экономические правила надёжного и эффективного развития и функционирования энергетических систем в новых условиях и отражённой в нормативных документах.

Расширение использования нетрадиционных возобновляемых источников электрической энергии стало возможным благодаря техническому прогрессу в этой области, позволившему, прежде всего, значительно снизить себестоимость производства электроэнергии ветровыми (ВЭС) и солнечными (СЭС) электростанциями различных типов. Стоимость новых СЭС в мире с 2010 г. снизилась на 70 %, ВЭС — на 25 %.

Если первоначально ВЭС и СЭС сооружались для ограниченных местных потребителей и относились к категории распределённой генерации, то в настоящее время мощность ветропарков и солнечных фотоэлектрических электростанций достигает сотен и тысяч мегаватт, что переводит их в разряд основных источников централизованного электроснабжения.

По прогнозам Мирового энергетического агентства [14], доля электроэнергии в конечном потреблении энергии может увеличиться к 2040 г. в 2 раза, при этом доля прироста мощности электростанций, использующих возобновляемые источники энергии, может составить более 60 % от общего увеличения.

Происходящая в мире трансформация энергетических систем связана с появлением большого числа новых элементов с отличными от существующих характеристиками, что значительно усложняет структуру систем и изменяет их функциональные свойства и обуславливает необходимость изменения существующей политической, рыночной и норма-

тивной базы и её адаптации к новому технологическому укладу энергетических систем [12, 13].

Интеграция переменных возобновляемых источников энергии (ПВИЭ) — солнечных и ветровых электростанций — требует введения определённых мер по обеспечению экономической эффективности и надёжности энергетических систем по мере развития ПВИЭ. В [13] определены шесть фаз интеграции ПВИЭ и связанные с ними проблемы, дифференцированные по возрастающему воздействию растущей доли генерации ПВИЭ на энергетические системы.

Для обеспечения согласованной работы различных типов генерирующих источников, систем передачи и распределения энергии, систем управления спросом, накопителей энергии и других систем развиваются технологии интегрального планирования, которые в новых условиях должны включать следующие элементы:

- учёт стохастичности выработки электроэнергии ветровыми и солнечными электростанциями;
- управление со стороны спроса;
- интегральное планирование системы генерации, передачи и распределения электроэнергии;
- планирование и функционирование сетей низкого и среднего напряжения с учётом развития распределённой генерации;
- межотраслевое планирование между электроэнергетикой и другими секторами, в том числе теплоснабжения, охлаждения, транспорта;
- планирование с учётом различных регионов, юрисдикций, балансирующих зон.

Происходит адаптация к новым условиям моделей управления в электроэнергетике. Требуемые адаптации моделей управления различны в каждом конкретном случае. В глобальном масштабе наблюдается определённая степень конвергенции требуемой адаптации между различными моделями [12, 13].

Для повышения гибкости энергетических систем с целью компенсации стохастичности выработки электроэнергии ветровыми и солнечными электростанциями развиваются [14]:

- технологии накопления энергии различных типов;
- технологии генерации с высоким быстродействием, в том числе газотурбинные станции;
- технологии управляемого спроса;
- технологии развития межсистемных связей.

Происходящая трансформация энергетических систем приводит к коренному изменению интерфейса между передающей и распределительной электрическими сетями [12], что показано на рис. 2.

Электрические сети низкого и среднего напряжения меняются от парадигмы пассивно распределённой электроэнергии для потребителей к интеллектуальным, активно управляемым системам с двунаправленными потоками электроэнергии и информации. Успешный переход требует рассмотрения трёх ключевых аспектов: технологического, экономического и институционального [12]. Кроме того, в управление включаются совершенно новые субъекты, такие как агрегаторы.



Рис. 2. Изменения в интерфейсе между передающей и распределительной сетями

Происходящий процесс трансформации энергетических систем в мире сопровождается созданием соответствующей нормативной базы, отражённой, в частности:

- в сетевых кодексах различных стран;
- в материалах рабочих групп CIGRE;
- в материалах ENTSO-E;
- в Директиве ЕС 2016/631 от 14.04.2016 г.;
- в стандартах IEEE серии 1547;
- в законе США «О политике регулирования энергокомпаний общего пользования (PURPA) от 1978 года»;
- в законе США «Об энергетической политике (ЕРАСТ) от 2005 г.».

Трансформация энергетических систем сопровождается интеграцией энергетических систем в комплексные энергетические системы, которая включает:

- интеграцию распределённой генерации в централизованные энергосистемы, интеграцию централизованных и децентрализованных энергосистем [12];
- интеграцию систем электроснабжения, теплоснабжения, топливоснабжения, охлаждения, возобновляемой энергетики, систем водоснабжения, транспорта, управления энергопотреблением [16];
- создание крупных региональных энергообъединений и формирование глобальной энергосистемы мира [17–19].

Трансформация энергетических систем связана с развитием существующих и созданием новых технологий в электроэнергетике, рассмотренных в том числе в [20, 21]. Для построения эффективной системы управления трансформируемыми энерге-

тическими системами проводятся широкие исследования и накоплен значительный опыт решения подобных задач, включая разработку «платформы» трансактивных энергетических систем (Transactive Energy Systems — TE systems), которая представляет систему экономических и управляющих механизмов, позволяющую обеспечить динамический баланс спроса и поставок электроэнергии во всей электроэнергетической инфраструктуре, используя стоимость как ключевой операционный параметр.

Для решения задач управления развитием и функционированием энергетическими системами в условиях наличия многих субъектов хозяйствования с различными интересами разрабатываются современные методы целостного (холистического) управления, предусматривающие решение задачи оптимального управления энергетической системой как единого целого с распределением обязательств и выгод между субъектами хозяйствования (правилами их совместной работы) и обеспечивающие достижение оптимального решения для системы в целом (рис. 3).

В этих условиях возникает необходимость [22]:

- в создании целевого видения развития электро-энергетического комплекса страны с учётом долгосрочной перспективы;
- в разработке предложений по созданию институциональной основы, определяющей регулирующие, технологические и экономические правила оптимального развития и функционирования электроэнергетического комплекса;
- в создании научных основ формирования и принципов управления комплексными интегрированными системами энергоснабжения, включая развитие и разработку новых мето-



Рис. 3. Идеология целостного (холистического) управления функционированием и развитием энергосистем

дов и отечественных программных средств интегрального планирования ресурсов в условиях происходящих процессов трансформации энергетических систем.

Для решения таких задач могут быть использованы разработанная в стране методология системных исследований, методы оптимального управления функционированием и развитием энергосистем и их объединений, имеющиеся разработки институтов РАН, отраслевых научно-исследовательских институтов, вузов и других организаций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В 2020 г. исполняется 100 лет государственному плану электрификации России (плану ГОЭЛРО). План ГОЭЛРО — это первый единый государственный план развития народного хозяйства страны, в котором были определены основные направления хозяйственного строительства: индустриализация страны при опережающем развитии электрификации; рациональное размещение по стране промышленности с концентрацией производства путём создания энергопромышленных комбинатов; широкое распространение электроэнергии в промышленности и сельскохозяйственном производстве; всемерное развитие железнодорожного транспорта на основе электрификации.

2. План ГОЭЛРО и план перспективных исследований по проблеме создания ЕЭС страны, разработанные комиссиями под руководством Г.М. Кржижановского, заложили основы создания комплексных интегрированных систем энергоснабжения, результатом реализации которых стало создание уникального энергообъединения — Единой энергосистемы страны, которая в конце 1980-х гг. стала крупнейшим комплексным интегрированным централизованно управляемым энергообъединением в мире, обеспечивающим централизованное электро- и теплоснабжение экономики и населения страны; а также формирование Объединённой энергосистемы стран — членов СЭВ «Мир».

3. Этот опыт может быть использован для решения задач выбора путей развития энергетики страны в современных условиях.

4. В условиях идущих процессов интеграции энергетических систем в мире актуальным для страны является решение следующих задач:

- определение ключевых направлений развития электроэнергетического комплекса страны подобно тому, как это было сделано комиссиями, возглавляемыми Г.М. Кржижановским при разработке плана ГОЭЛРО и определении плана

перспективных исследований по проблеме создания ЕЭС в 1957 г.;

- создание институциональной основы, определяющей регулирующие, технологические и экономические правила оптимального развития и функционирования электроэнергетического комплекса, реализующие идеологию оптимального целостного (холистического) управления;
- разработка научных основ формирования и принципов управления комплексными интегрированными системами энергоснабжения, включая развитие и разработку новых методов и отечественных программных средств интегрального планирования ресурсов. Для решения этих задач могут быть использованы разработанная в стране методология системных исследований, методы оптимального управления функционированием и развитием энергосистем и их объединений, имеющиеся разработки институтов РАН, отраслевых научно-исследовательских институтов, вузов и других организаций;
- создание комплексных интегрированных систем энергоснабжения, включая создание комплексной интегрированной системы энергоснабжения Арктического региона России.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *План электрификации РСФСР. Доклад VIII съезду Советов Государственной Комиссии по электрификации России. Второе издание. М.: Государственное издательство политической литературы, 1955.*
2. *Электроэнергетика России. История и перспективы развития / под общей ред. А.Ф. Дьякова. М.: АО «Информэнерго», 1997.*
3. *Материалы юбилейной сессии учёного совета, посвящённые 40-й годовщине Великой Октябрьской Социалистической Революции и 25-летию Энергетического института АН СССР. М., 1958.*
4. *Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития. М.: Наука, 1979.*
5. *Баринов В.А., Совалов С.А. Режимы энергосистем. Методы анализа и управления. М.: Энергоатомиздат, 1990.*
6. *Системные исследования в энергетике. Ретроспектива научных направлений СЭИ — ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2010.*
7. *Волков Э.П., Баринов В.А., Маневич А.С. Методология обоснования и перспективы развития*

- электроэнергетики России. М.: Энергоатомиздат, 2010.
8. Богданов А.А. Тектология. Всеобщая организационная наука. Петербург; Москва; Берлин: Изд-во З.И. Гржебина, 1913.
  9. Винер Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. М.: Советское радио, 1968. 326 с.
  10. Есяков С.Я., Сизов А.С., Воронай Н.И. и др. Предложения по созданию целостной системы управления функционированием и развитием электроэнергетики России. // Электроэнергия. Передача и распределение, 2019, № 1. С. 31–33.
  11. Есяков С.Я., Лукин К.А., Стенников В.А. и др. Трансформация электроэнергетических систем. // Электроэнергия. Передача и распределение, 2019, № 4. С. 134–141.
  12. Status of Power System Transformation. System integration and local grids. IEA, 2017.
  13. Status of Power System Transformation 2019. Power system flexibility. IEA, 2019.
  14. World Energy Outlook 2018. OECD/IEA, 2018.
  15. Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050. IRENA, 2018.
  16. European ENERGY Research Alliance (EERA) Description of Work. Joint Programme of Energy System Integration (ESI). EERA, 2015.
  17. Волков Э.П., Баринов В.А., Исаев В.А. и др. Направления развития энергетического хозяйства и ЕНЭС России и её интеграция в глобальную электрическую сеть. // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2016, № 5. С. 1–11.
  18. Voropai N.I., Podkovaalnikov S.V., Osintsev K.A. From interconnections of local electric power systems to Global Energy Interconnection. // Global Energy Interconnection, 2018, vol.1, no.1, pp. 4–10.
  19. Global electricity network Feasibility study. CIGRE, WG C1.35, September 2019, Reference: 775.
  20. Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations. OECD/IEA, 2017.
  21. Transactive Energy Systems Research, Development and Deployment Roadmap. GridWise Architecture Council. December, 2018.
  22. Андреев В.М., Баринов В.А., Варфоломеев С.Д. и др. Создание комплексных интегрированных систем энергоснабжения. // Вести в электроэнергетике, 2020, № 3. С. 16–28.



## ГРУППА «РУСЭЛТ»

- ПРОЕКТИРОВАНИЕ
- ПРОИЗВОДСТВО
- СЕРВИС

- ПУНКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ
- СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫМ ТОКОМ
- ИСТОЧНИКИ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ
- СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ
- СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

ПРОСТО И НАДЕЖНО  
УПРАВЛЯЕМ ЭНЕРГИЕЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА



EAC



WWW.RUSELT.RU  
8-800-555-52-12