

Создание комплексных интегрированных систем энергоснабжения на базе инновационных технологий в условиях происходящих в мире процессов

АНДРЕЕВ В.М., БАРИНОВ В.А., ВАРФОЛОМЕЕВ С.Д., ГОДЖАЕВ З.А., ГРИШИН В.И., ДЬЯКОНОВ А.А., ЕСЯКОВ С.Я., ЛАЧУГА Ю.Ф., КАЛЯЕВ И.А., ЛУНИН К.А., МАТЮХИН В.Ф., ПАНЧЕНКО В.Я., РЕДЬКО И.Я., РОКЕЦКИЙ Л.Ю., СИГОВ А.С., СТЕННИКОВ В.А., ШЕСТАКОВ А.Л., ЦИВАДЗЕ А. Ю.

Рассматривается развитие систем электроснабжения в мире с начала XX в. и до трансформации этих систем в наши дни. Статья носит комплексный, аналитический характер, учитывающий социальные, экономические, институциональные, технологические аспекты проблемы. В ней дана большая фактология по указанным аспектам развития систем электроснабжения, особенности этих аспектов в разных странах и России. Отмечается, что по показателям эффективности и надежности отечественная электроэнергетика уступает показателям, достигнутым в конце прошлого столетия. Указываются необходимые для решения актуальные проблемы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: план ГОЭЛРО, системы электроснабжения, инновационные технологии, развитие электроэнергетики

В конце текущего года исполняется 100 лет Государственному плану электрификации России (ГОЭЛРО). Развивая идеи этого плана, электроэнергетика страны прошла в своем развитии громадный путь от предусмотренного планом ГОЭЛРО сооружения первых крупных электростанций и объединяющих их в энергосистемы электрических сетей до образования Единой энергосистемы страны – самого крупного в мире централизованно управляемого энергообъединения [1].

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 была 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 трехфазный – в основном 50 и 25 Гц). Электростанции работали изолированно, и случаи параллельной работы были исключительными.

Все электрические сети напряжением выше генераторного имели протяженность около 100 км. В 1914 г. вступила в строй первая линия электропередачи напряжением 70 кВ от подмосковной элек-

тростанции «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 пользовалось не более 20% населения.

Первая мировая война, интервенция и гражданская война привели к тяжелой хозяйственной разрухе. Производство электроэнергии в 1921 г. сократилось в 4 раза по сравнению с довоенным уровнем, было выработано всего 520 млн кВт·ч. Значительная часть электрических сетей была разрушена.

Коренное изменение положения в электроэнергетике страны началось после Октябрьской революции и связано с разработкой и реализацией Государственного плана электрификации России (ГОЭЛРО), разработанного по инициативе В.И. Ленина комиссией 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 развитии электрификации; рациональное размещение по стране промышленности с концентрацией производства путем создания энергопромышленных комбинатов; широкое распространение электроэнергии в промышленности и сельскохозяйственном производстве; всемерное развитие железнодорожного транспорта на основе электрификации.

План ГОЭЛРО, рассчитанный на 10–15 лет, предусматривал строительство 30 новых районных ТЭС и ГЭС общей мощностью 1750 МВт, сооружение электрических сетей 35 и 110 кВ для передачи электроэнергии к узлам нагрузки, соединением электростанций на параллельную работу, создание региональных энергосистем и их последующую интеграцию в объединенные энергосистемы.

Разработка плана ГОЭЛРО базировалась на предложенном Г.М. Кржижановским комплексном методе, предусматривающем органическую связь между развитием всего народного хозяйства и энергетикой [2]. В последующем этот метод был обобщен и развит соратниками Г.М. Кржижановского и их последователями в виде методологии системных исследований [2–6].

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

По завершении программы электрификации России в объеме плана ГОЭЛРО продолжалось дальнейшее строительство электростанций и сетей и развитие энергетических систем. Государство в эти и последующие годы особое внимание уделяло опережающему развитию электроэнергетики, о чем 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 единой энергетической системы (ЕЭС) СССР. В соответствии 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 [2]:

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 с пропускной способностью в 2–3 млн кВт на одну цепь протяженностью 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.

Будущее развитие ЕЭС во многом реализовало направления этого перспективного плана.

К концу 1980-х годов на территории страны был создан хорошо организованный и весьма эффективно работавший электроэнергетический комплекс страны, высокая эффективность которого была достигнута благодаря реализации ряда основополагающих стратегических направлений:

формирование энергосистем, объединение энергосистем на параллельную работу и создание уникального энергообъединения – Единой энергосистемы страны, которая в конце 1980-х годов стала крупнейшим централизованно управляемым энергообъединением в мире;

создание и ввод множества мощных и высокоэффективных агрегатов тепловых, гидравлических и атомных электростанций;

взаимоувязанное развитие Единой энергосистемы страны и ее системы управления как двух частей единого целого и создание на этой основе высокоэффективной иерархической системы планирования развития и управления функционированием Единой энергосистемы. Это позволило решать весь комплекс задач, связанных с ее оптимальным развитием и функционированием, с использованием принципа оптимальности на каждом уровне временной и территориальной иерархии при обеспечении требуемого уровня надежности [4].

Создание мощных территориальных энергообъединений и организация их параллельной работы в составе Единой энергосистемы страны позволили значительно повысить эффективность работы электростанций.

троэнергетики, 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 от выработки электроэнергии снизился с 6,55% в 1950 г. до 4,43% в 1990 г.

потери электроэнергии на ее 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 чел. в 1950 г. до 2,85 в 1990 г.

Общий экономический эффект от создания Единой энергосистемы страны к концу 1980-х годов в сравнении с изолированной работой энергосистем оценивался снижением капитальных вложений в электроэнергетику более чем на 2 млрд руб. в ценах 1984 г. и уменьшением ежегодных эксплуатационных расходов на 1 млрд руб. Выигрыш в снижении суммарной установленной мощности электростанций ЕЭС в сравнении с изолированной работой энергосистем за счет снижения годового максимума нагрузки и сокращения необходимой резервной мощности составил свыше 15 млн кВт. Несмотря на то, что требования в отношении резервов мощности были ниже аналогичных требований в энергообъединениях западных стран, однако благодаря хорошо организованному управлению и широкому внедрению противоаварийной автоматики обеспечивалась высокая надежность работы энергосистем и электроснабжения потребителей. Не было крупных системных аварий с погашением большого числа потребителей, какие имели место в США и в других странах [4].

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

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

В результате проведенных в начале XXI в. 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 надежное и экономичное энергоснабжение регионов) была заменена рыночной структурой управления с образованием боль-

шого числа новых субъектов хозяйствования. Это нарушило фундаментальный принцип управления, а именно соответствие системы управления самой технологической системе (в политэкономии соответствие базиса и надстройки, производительных сил и производственных отношений) [7–8]. При этом для новой структуры управления отраслю 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 стало снижение эффективности функционирования отрасли, появление различного рода узких мест и диспропорций [9], что характеризуется:

- снижением эффективности использования установленной мощности электростанций;
- 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;
- ростом электросетевой составляющей тарифов до 60%, в то время как в передовых странах она составляет 40%;
- наличием существенных диспропорций в установлении цен на электросетевое строительство и строительство электростанций, при которых становится невыгодным сетевое строительство, в том числе развитие межсистемных связей в ЕЭС России;
- сокращением наиболее эффективного производства электроэнергии на ТЭЦ.

К дополнительным «узким местам» и проблемам в современном состоянии электроэнергетики России следует отнести:

- отсутствие целостной системы стратегического планирования развития электроэнергетики страны с учетом долгосрочной перспективы;
- 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 1980-х годах 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 ге-

нерации и компонентов энергосистем, включая развитие распределенной 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 регулярного финансирования НИОКР и создания инновационных технологий;

отсутствие освоенных отечественных современных инновационных технологий и оборудования – мощных газовых турбин, паросиловых технологий на твердом топливе с суперсверхкритическими параметрами пара, современной силовой электроники, систем накопления энергии и др.;

при общем значительном избытке генерирующих мощностей недостаточная мощность пиковых и полупиковых генерирующих мощностей.

Вместе с тем в настоящее время энергетика многих стран мира претерпевает коренные изменения [10–15], в результате которых создается 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 институциональной основы, определяющей регулирующие, технологические и экономические правила надёжного и эффективного развития и функционирования энергетических систем в новых условиях и отраженной в нормативных документах.

Расширение использования нетрадиционных возобновляемых источников электрической энергии (НВИЭ) 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 [13] 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% общего увеличения.

Происходящая в мире трансформация энергетических систем, связанная с появлением большого числа новых элементов с отличными от существующих характеристиками, значительно усложняет структуру систем, изменяет их функциональные свойства и обуславливает необходимость изменения существующей политической, рыночной и нормативной базы и ее адаптации к новому укладу энергетических систем [11–12].

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:

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 [11, 12].

В странах, где до сих пор преобладали вертикально интегрированные модели, наблюдается тенденция к внедрению механизмов повышения эффективности работы энергетических систем. В

странах, которые первыми начали либерализацию электроэнергетического рынка, наблюдается тенденция к внедрению дополнительных механизмов обеспечения надёжности электроснабжения. При совершенствовании электроэнергетических рынков центральной задачей является нахождение наилучшего сочетания принципов координации и конкуренции.

Для повышения гибкости энергетических систем с целью компенсации стохастичности выработки электроэнергии ветровыми и солнечными электростанциями развиваются [13]:

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 [11].

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:

технологически: обеспечение надёжной и эффективной работы энергосистемы в изменяющихся условиях приводит к новым приоритетам для энергокомпаний и регулирующих органов. Использование передовых информационных и коммуникационных технологий (цифровизация) позволяет улучшить наблюдаемость и управление энергетическими системами и открывает возможности для существенного расширения управления спросом;

экономически: рост распределённой генерации и повышение экономичности накопителей энергии требуют реформы розничного ценообразования и налогообложения поставок электрической энергии с учётом оплаты поставляемой ими электроэнергии и покрытием части стоимости общей инфраструктуры.

институционально: изменятся функции и обязанности субъектов управления. Приоритетным станет улучшение координации между операторами передающих и распределительных сетей. Кроме того, в управление включаются совершенно новые субъекты, такие как агрегаторы.

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;

в стандартах IEEE серии 1547;

в законе США «О политике регулирования энергокомпаний общего пользования (PURPA) от 1978 г.»;

в законе США «Об энергетической политике (EPA) от 2005 г.».

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

интеграцию распределённой генерации в централизованные энергосистемы, интеграцию централизованных и децентрализованных энергосистем [11];

интеграцию систем электроснабжения, теплоснабжения, топливоснабжения, охлаждения, возобновляемой энергетики, систем водоснабжения, транспорта, управления энергопотреблением [15];

создание крупных региональных энергообъединений и формирование глобальной энергосистемы мира [16–18].

Трансформация энергетических систем связана с развитием существующих и созданием новых технологий в электроэнергетике, рассмотренных в том числе в [19–20]. Для построения эффективной системы управления трансформируемыми энергетическими системами проводятся широкие исследования и накоплен большой опыт решения подобных задач, включая разработку «платформы» транзактивных 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. С платформой TE systems связаны другие развивающиеся применительно к энергетическим системам транзакционные платформы Блокчейн, Emergent, Faraday Grid.

В условиях наличия многих субъектов хозяйствования с различными интересами в процессе развития и управления функционированием и развитием энергетических систем создаются методы целостного (холистического) управления в этих условиях, предусматривающего решение задачи оптимального управления энергетической системой или их совокупностью как единым целым с распределением обязательств и выгод между субъектами хозяйствования (правилами их совместной работы),

обеспечивающего достижение оптимального решения для системы в целом.

Развиваются инновационные технологии в области распределенной энергетики, в том числе на базе:

солнечных аэрокосмических энергетических комплексов с СВЧ и лазерными магистралями передачи энергии, которые могут обеспечить энергетическую безопасность и надёжное энергоснабжение на отдалённых и труднодоступных территориях Сибири, Севера и Дальнего Востока, не охваченных централизованным энергоснабжением;

многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК), которые являются основой автономных систем энергоснабжения и используют всё многообразие местных энергетических ресурсов.

многофункционального энергобиотехнологического комплекса (биоМЭК), который позволит принципиально новым способом получить энергию и продукты питания на основе фитотронных технологий.

Создаются современные технологии электрификации мобильных процессов в различных отраслях экономики, прежде всего в АПК и транспорте.

Особую значимость в настоящее время приобретают вопросы выбора «архитектуры» будущей интегрированной системы энергоснабжения Арктического региона России. В этих условиях возникает необходимость в разработке:

целевого видения развития электроэнергетического комплекса страны с учетом долгосрочной перспективы, включая вопросы развития электро-транспортных систем, в том числе парка электро-тракторов и рабочих машин с электроприводами и различными силовыми приводами в отраслях сельского хозяйства, а также распределенной и аэрокосмической энергетики на территории Российской Федерации;

предложений по созданию институциональной основы, определяющей регулирующие, технологические и экономические правила оптимального развития и функционирования электроэнергетического комплекса;

научных основ формирования и принципов управления комплексных интегрированных систем энергоснабжения, включая развитие и разработку новых методов и отечественных программных средств интегрального планирования ресурсов в условиях происходящих процессов трансформации энергетических систем;

комплексных интегрированных систем энергоснабжения, включая создание комплексной интегрированной системы энергоснабжения Арктического региона России.

Для решения таких задач могут быть использованы созданные 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, в том числе тех, представители которых вошли в состав авторского коллектива настоящей статьи.

Заключение. Энергетика мира претерпевает коренные изменения, в результате которых создается новая «архитектура» энергетических систем. Электроэнергетика России находится в начале идущих в мире процессов трансформации энергетических систем и находится, по существу, в стагнации, а по показателям эффективности и надежности уступает показателям, достигнутым к концу 80-х годов прошлого столетия.

В этих условиях актуальным для нашей страны является решение следующих задач:

определение ключевых направлений и целевого видения развития электроэнергетического комплекса страны с учётом долгосрочной перспективы (на период до 2050 г.) подобно тому, как это было сделано комиссиями, возглавлявшимися Г.М. Кржижановским при разработке плана ГОЭЛРО, и определении плана перспективных исследований по проблеме создания ЕЭС страны в 1957 г.;

создание институциональной основы – целостной системы управления, определяющей регулирующие, технологические и экономические правила оптимального развития и функционирования электроэнергетического комплекса страны в условиях идущих в стране и мире процессов трансформации энергетических систем;

разработка научных основ формирования и принципов управления комплексных интегрированных систем энергоснабжения, включая развитие и разработку новых методов и отечественных программных средств интегрального планирования ресурсов в условиях происходящих процессов трансформации энергетических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электроэнергетика России.** История и перспективы развития/Под общей ред. А.Ф. Дьякова. М.: АО «Информэнерго», 1997, 568 с.
2. **Материалы** юбилейной сессии ученого совета, посвященные 40-й годовщине Великой Октябрьской Социалистической Революции и 25-летию Энергетического института АН СССР. М., 1958.
3. **Мелентьев Л.А.** Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития. М.: Наука, 1979.
4. **Баринов В.А., Совалов С.А.** Режимы энергосистем. Методы анализа и управления. М.: Энергоатомиздат, 1990, 440 с.
5. **Системные** исследования в энергетике. Ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ/Отв. ред. Н.И. Воропай.

6. Волков Э.П., Баринов В.А., Маневич А.С. Методология обоснования и перспективы развития электроэнергетики России. М.: Энергоатомиздат, 2010, 556 с.

7. Богданов А.А. Тектология. Всеобщая организационная наука. Петербург-Москва-Берлин: Изд-во З.И. Гржебина, 1913.

8. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. М.: Советское радио, 1968.

9. Есяков С.Я., Сигов А.С., Воропай Н.И., Варфоломеев С.Д., Стенников В.А., Редько И.Я., Баринов В.А., Матюхин В.Ф. Предложения по созданию целостной системы управления функционированием и развитием электроэнергетики России. — Электроэнергия. Передача и распределение, 2019, № 1, с. 31–33.

10. Есяков С.Я., Лунин К.А., Стенников В.А., Воропай Н.И., Редько И.Я., Баринов В.А. Трансформация электроэнергетических систем. — Электроэнергия. Передача и распределение, 2019, № 4, с. 134–141.

11. Status of Power System Transformation. System integration and local grids. IEA, 2017.

12. Status of Power System Transformation. Advanced Power Plant Flexibility. IEA, 2018

13. World Energy Outlook 2018. OECD/IEA, 2018.

14. Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050. IRENA, 2018.

15. European ENERGY Research Alliance (EERA) Description of Work. Joint Programme of Energy System Integration (ESI). EERA. 2015.

16. Волков Э.П., Баринов В.А., Исаев В.А., Лисицын Н.В., Маневич А.С., Мурачев А.С., Усачев Ю.В. Направления развития энергетического хозяйства и ЕНЭС России и её интеграция в глобальную электрическую сеть. — Изв. Российской академии наук. Энергетика, 2016, № 5, с. 1–11.

17. Voropai N.I., Podkovalnikov S.V., Osintsev K.A. From interconnections of local electric power systems to Global Energy Interconnection. — Global Energy Interconnection, 2018, vol.1, № 1, pp. 4–10.

18. Global electricity network Feasibility study. CIGRE, WG C1.35, September 2019, Reference: 775.

19. Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations. OECD/IEA, 2017.

20. Grid Wise Transactive Energy Frame. Draft version. October 2013.

[24.01.2020]

А в т о р ы: Андреев Вячеслав Михайлович — член-корреспондент РАН, Физический институт

имени А.Ф. Иоффе РАН; Баринов Валентин Александрович — доктор техн. наук, Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского; Варфоломеев Сергей Дмитриевич — член-корреспондент РАН, Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН; Годжаев Захид Адыгезалович — член-корреспондент РАН, Ведущий научный центр России в области технико-технологического обеспечения с/х производства; Гришин Виктор Иванович — доктор техн. наук, проф., Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова; Дьяконов Александр Анатольевич — доктор техн. наук, проф., Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет); Есяков Сергей Яковлевич — первый заместитель председателя Комитета Государственной Думы по энергетике Федерального Собрания РФ; Лачуга Юрий Федорович — академик РАН, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН; Каляев Игорь Анатольевич — академик РАН, Южный федеральный университет; Лунин Кирилл Александрович — кандидат техн. наук, Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского; Матюхин Владимир Федорович — доктор техн. наук, Московский институт радиоэлектроники и автоматики — Российский технологический университет; Панченко Владислав Яковлевич — доктор физ.-мат. наук, проф., Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН; Редько Иван Яковлевич — доктор техн. наук, Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского; Рокецкий Леонид Юлианович — председатель Совета при рабочей группе Федерации по мониторингу реализации законодательства в области энергетики, энергосбережения и повышения энергетической эффективности; Сигов Александр Сергеевич — академик РАН, Московский институт радиоэлектроники и автоматики — Российский технологический университет; Стенников Валерий Алексеевич — член-корреспондент РАН, Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН; Шестаков Александр Леонидович — доктор техн. наук, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет); Цивадзе Аслан Юсупович — академик РАН.

Electrichestvo, 2020, No. 3, pp. 4–12

DOI:10.24160/0013-5380-2020-3-4-12

Development of Comprehensive Integrated Power Supply Systems with the Use of Innovation Technologies under the Conditions of Processes Occurring around the World

ANDREYEV Vyacheslav M. — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, A.F. Ioffe RAS; BARINOV Valentin A. Dr. Sci. (Eng.) Energy Institute of G.M. Krzhizhanovsky; VARFOLOMEYEV Sergey D. — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Institute Biochemical Physics of N.M. Emanuel RAS; GODZHAEV Zahid A. — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Leading Scientific Center of Russia in the field of technical and technological support for agricultural production; GRISHIN Viktor I. — Dr. Sci. (Eng.), professor, Russian University of Economics of G.V. Plekhanov; DYAKONOV Alexander A. — Dr. Sci. (Eng.), professor, South Ural State University (national research university); YESYAKOV Sergey Ya. — First Deputy Chairman

of the State Duma Committee on Energy of the Federal Assembly of the Russian Federation; **LACHUGA Yury F.** – Academician of the Russian Academy of Sciences, academician-secretary of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences; **KALYAYEV Igor' A.** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Southern Federal University; **LUNIN Kirill A.** – Ph.D. Sciences, Energy Institute of G.M. Krzhizhanovsky; **MATYUKHIN Vladimir F.** Dr. Sci. (Eng.), Moscow Institute of Radio Electronics and Automation – Russian University of Technology; **PANCHENKO Vladislav Ya.** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, Institute for Laser and Information Technology Problems, Russian Academy of Sciences; **RED'KO Ivan Ya.** – Dr. Sci. (Eng.), Energy Institute of G.M. Krzhizhanovsky; **ROKETSKIY Leonid Yu.** – Chairman of the Council under the Federation working group on monitoring the implementation of legislation in the field of energy, energy conservation and energy efficiency; **SIGOV Alexander S.** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Moscow Institute of Radioelectronics and Automation – Russian Technological University; **STENNIKOV Valery A.** – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Energy Systems of L.A. Melent'yev, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; **SHESTAKOV Alexander L.** – Dr. Sci. (Eng.), South Ural State University (National Research University); **TSIVADZE Aslan Yu.** – Academician of the Russian Academy of Sciences

The development of electric power supply systems around the world from the early 20th century to their transformation nowadays is considered. The article contains a comprehensive analysis that takes into account the social, economic, institutional, and technological aspects of the problem. The analysis is supported by an extensive body of actual data on the above-mentioned development aspects of electric power supply systems along with the specific features of these aspects in different countries and in Russia. It is pointed out that in regard of efficiency and reliability indicators, the domestic electric power industry is inferior to the same indicators achieved by the late 20th century. The matters relevant for solving the problem are pointed out.

Key words: GOELRO plan, electric power supply systems, innovation technologies, development of electric power industry

REFERENCES

- 1. Elektroenergetika Rossii. Istoriya i perspektivy razvitiya/Pod obshchey red. A.F. D'yakova** (The power industry of Russia. History and development prospects/The general ed. A.F. Dyakov. M., JSC «Informenergo», 1997, 568 p.
- 2. Materialy yubileynoy sessii uchenogo soveta, posvyashchennyye 40-y godovshchine Velikoy Oktyabr'skoy Sotsialisticheskoy Revolyutsii i 25-letiyu Energeticheskogo instituta AN SSSR** (Materials of the jubilee session of the scientific council dedicated to the 40th anniversary of the Great October Socialist Revolution and the 25th anniversary of the Energy Institute of the USSR Academy of Sciences), Moscow, 1958.
- 3. Melent'yev L.A. Sistemye issledovaniya v energetike. Elementy teorii, napravleniya razvitiya** (System studies in the energy sector. Elements of the theory, directions of development). M., Nauka, 1979.
- 4. Barinov V.A., Sovalov S.A. Rezhimy energosistem. Metody analiza i upravleniya** (Power System Modes. Methods of analysis and management). Moscow, Energoatomizdat, 1990, 440 p.
- 5. Sistemye issledovaniya v energetike. Retrospektiva nauchnykh napravleniy SEI-ISEM/Otv. red. N.I. Voropay** (Systemic research in the energy sector. Retrospective of scientific directions SEI-ISEM/Otv. ed. N.I. Voropay).
- 6. Volkov E.P., Barinov V.A., Manevich A.S. Metodologiya obosnovaniya i perspektivy razvitiya elektroenergetiki Rossii** (Justification methodology and prospects for the development of the electric power industry in Russia). Moscow, Energoatomizdat, 2010, 556 p.
- 7. Bogdanov A.A. Tektologiya. Vseobshchaya organizatsionnaya nauka** (Tectology. General organizational science). Petersburg-Moscow-Berline, Publ. House of Z.I. Grzhebina), 1913.
- 8. Viner N. Kiberenetika, ili upravleniye i svyaz' v zhivotnom i mashine** (Cybernetics, or control and communication in the animal and machine). Moscow, Soviet Radio, 1968.
- 9. Yesyakov S.YA., Sigov A.S., Voropay N.I., Varfolomeyev S.D., Stennikov V.A., Red'ko I.YA., Barinov V.A., Matyukhin V.F. Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye – in Russ. (Electricity. Transmission and Distribution), 2019, № 1, pp. 31–33.**
- 10. Yesyakov S.YA., Lunin K.A., Stennikov V.A., Voropay N.I., Red'ko I.YA., Barinov V.A. Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye – in Russ. (Electricity. Transmission and Distribution), 2019, № 4, pp. 134–141.**
- 11. Status of Power System Transformation. System integration and local grids.** IEA, 2017.
- 12. Status of Power System Transformation. Advanced Power Plant Flexibility.** IEA, 2018
- 13. World Energy Outlook 2018.** OECD/IEA, 2018.
- 14. Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050.** IRENA, 2018.
- 15. European ENERGY Research Alliance (EERA) Description of Work. Joint Programme of Energy System Integration (ESI).** EERA, 2015.
- 16. Volkov E.P., Barinov V.A., Isayev V.A., Lisitsyn N.V., Manevich A.S., Murachev A.S., Usachev Yu.V. Izv. Rossiyskoy akademii nauk. Energetika – in Russ. (Izv. Russian Academy of Sciences. Energy), 2016, № 5, pp. 1–11.**
- 17. Voropay N.I., Podkovalnikov S.V., Osintsev K.A.** From interconnections of local electric power systems to Global Energy Interconnection. – Global Energy Interconnection, 2018, vol. 1, № 1, pp. 4–10.
- 18. Global electricity network Feasibility study.** CIGRE, WG C1.35, September 2019, Reference: 775.
- 19. Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations.** OECD/IEA, 2017.
- 20. Grid Wise Transactive Energy Frame. Draft version.** October 2013.