



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-224-237

УДК 621.311

Научная статья

## Создание комплексных интегрированных систем энергоснабжения

В.М. Андреев<sup>а</sup>, В.А. Баринов<sup>б</sup>, С.Д. Варфоломеев<sup>с,д</sup>, Ю.Ф. Лачуга<sup>е</sup>, В.Ф. Матюхин<sup>ф</sup>,  
В.Я. Панченко<sup>г</sup>, И.Я. Редько<sup>б</sup>, А.С. Сигов<sup>ф</sup>, В.А. Стенников<sup>г</sup>

<sup>а</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН,

Российская Федерация, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26

<sup>б</sup>Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского, Российская Федерация, 119071, Москва, Ленинский пр-кт, д. 19

<sup>с</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

<sup>д</sup>Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Российская Федерация, 119334, Москва, ул. Косыгина, д. 4

<sup>е</sup>Отделение сельскохозяйственных наук РАН, Российская Федерация, 119334, Москва, Ленинский пр-кт, д. 32А

<sup>ф</sup>Московский институт радиоэлектроники и автоматики – Российский технологический университет,

Российская Федерация, 119454, Москва, пр-кт Вернадского, д. 78

<sup>г</sup>Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Российская Федерация, 140700, Шатура, ул. Святоозерская, д. 1

<sup>б</sup>Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН,

Российская Федерация, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130

### История статьи:

Поступила в редакцию: 15 ноября 2020 г.

Доработана: 12 декабря 2020 г.

Принята к публикации: 20 декабря 2020 г.

### Ключевые слова:

план ГОЭЛРО, энергетические системы, Единая энергетическая система, трансформация, интегрированные системы энергоснабжения, инновационные технологии, институциональная основа

**Аннотация.** 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 основы образования Единой энергосистемы – самого крупного в мире на конец 1980-х годов централизованно управляемого энергообъединения. Приведены показатели развития и эффективности работы электроэнергетики страны. Проанализированы сущностная часть проведенных в начале XXI века реформ в электроэнергетике России, их недостатки, приведшие к снижению эффективности функционирования отрасли и появлению различного рода узких мест и диспропорций. Сформулированы первоочередные задачи, стоящие перед российской электроэнергетикой в условиях идущих в мире процессов трансформации энергетических систем.

Андреев Вячеслав Михайлович, заведующий лабораторией ФТИ имени А.Ф. Иоффе, член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор; eLIBRARY SPIN-код: 8199-5248, Scopus Author ID: 7401665569.

Баринов Валентин Александрович, заведующий отделением АО «ЭНИИ», академик АЭН, д. т. н.; eLIBRARY SPIN-код: 3962-9264, Scopus Author ID: 8545973300; barinov@eninnet.ru.

Варфоломеев Сергей Дмитриевич, заведующий кафедрой химической энзимологии химического факультета МГУ, научный руководитель ИБХФ РАН, член-корреспондент РАН, д. х. н., профессор; eLIBRARY SPIN-код: 7873-3673, Scopus Author ID: 7005361446.

Лачуга Юрий Федорович, академик-секретарь ОСХН РАН, академик РАН, член Президиума РАН, д. т. н., профессор; eLIBRARY SPIN-код: 1128-3299, Scopus Author ID: 57213157355

Матюхин Владимир Федорович, директор РТУ МИРЭА, д. т. н.; eLIBRARY AuthorID: 171398.

Панченко Владислав Яковлевич, научный руководитель ИПЛИТ РАН, академик РАН, член Президиума РАН, д. ф-м. н., профессор; eLIBRARY AuthorID: 19683.

Редько Иван Яковлевич, заместитель генерального директора АО «ЭНИИ», д. т. н., профессор; eLIBRARY AuthorID: 420014, Scopus Author ID: 6603047041.

Сигов Александр Сергеевич, президент РТУ МИРЭА, член Совета по безопасности при Президенте Российской Федерации, академик РАН, д. ф-м. н., профессор; eLIBRARY SPIN-код: 2869-5663.

Стенников Валерий Алексеевич, директор ИСЭМ СО РАН, член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6219-0354>.

© Андреев В.М., Баринов В.А., Варфоломеев С.Д., Лачуга Ю.Ф., Матюхин В.Ф., Панченко В.Я., Редько И.Я., Сигов А.С., Стенников В.А., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Введение

В своей речи на Генеральной Ассамблее ООН 22 сентября 2020 года Президент Российской Федерации В.В. Путин озвучил идею качественного роста, «интеграции интеграций», которая заложена в российскую инициативу по формированию Большого Евразийского партнерства с участием всех без исключения стран Европы и Азии. Важной составляющей этого процесса является создание и развитие комплексных интегрированных систем энергоснабжения.

Особое значение в создании комплексных интегрированных систем энергоснабжения России имеет Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО), столетие которого отмечается в 2020 году. Развивая идеи плана ГОЭЛРО, электроэнергетика страны прошла громадный путь от предусмотренного планом ГОЭЛРО сооружения первых крупных электростанций и объединения их в энергосистемы электрических сетей до образования Единой энергосистемы страны (ЕЭС) – самого крупного в мире централизованно управляемого энергообъединения [1].

В статье кратко рассмотрен отечественный опыт создания комплексных интегрированных систем энергоснабжения, сформулированы первоочередные задачи, стоящие перед российской электроэнергетикой в условиях идущих в мире процессов трансформации энергетических систем.

### 1. Краткая характеристика плана ГОЭЛРО

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 году вступила в строй первая линия электропередачи напряжением 70 кВ от подмосков-

ной 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 году всего 12,8 кВт·ч в год. Электроэнергией пользовались не более 20 % населения.

Первая мировая война, интервенция и гражданская война привели к тяжелой хозяйственной разрухе. Производство электроэнергии в 1921 году 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 Великой Октябрьской революции и связано с разработкой и реализацией Государственного плана электрификации России, разработанного по инициативе В.И. Ленина комиссией ГОЭЛРО во главе с Г.М. Кржижановским и принятого 22 декабря 1920 года 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 страны; 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, соединение электростанций на параллельную работу, создание региональных энергосистем и их последующую интеграцию в объединенные энергосистемы.

Программа плана ГОЭЛРО была выполнена уже в 1930 году. К концу 1935 года, то есть к 15-летию плана ГОЭЛРО, вместо 30 было построено 40 районных электростанций, на которых вместе с другими промышленными станциями было введено втрое больше мощностей, чем предусматривалось планом ГОЭЛРО.

Разработка плана ГОЭЛРО базировалась на разработанном 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 в 20-е и 30-е годы были созданы базовые научно-исследовательские и проектные институты, а также учебные институты для подготовки инженерных кадров.

Ускоренные темпы роста мощности электростанций и производства электроэнергии, создание региональных энергосистем сыграли особо важную роль в период Великой Отечественной войны.

Несмотря на колоссальный урон, причиненный войной, Советский Союз в послевоенные годы благодаря заложенному планом ГОЭЛРО производственным базисом и механизмами развития добился быстрого восстановления электроэнергетики до довоенного уровня и продолжил ее развитие более ускоренными темпами. Довоенная мощность электростанций была восстановлена и превзойдена уже в 1946 году. В 1954 году производство электроэнергии увеличилось по сравнению с 1913 годом более чем в 75 раз.

Значительное развитие получили три работающие раздельно ОЭС Европейской части страны: Центра, Урала и Юга. С вводом в работу в 1956 году первой электропередачи 400 кВ Куйбышев – Москва было положено начало объединению энергосистем различных регионов и созданию ЕЭС Европейской части СССР.

## **2. Ключевые направления перспективного плана научных исследований по проблеме создания Единой энергосистемы страны**

Государство в послевоенные годы особое внимание уделяло опережающему развитию электроэнергетики, о чем свидетельствуют директивы по

пятому (1951–1955) и шестому (1956–1960) пятилетним планам развития народного хозяйства страны.

Во исполнение этих директив комиссией под руководством Г.М. Кржижановского в 1957 году был разработан перспективный план научных исследований по проблеме создания ЕЭС СССР. В соответствии с этим 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 миллиона 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.

Последующее развитие ЕЭС во многом реализовало направления этого перспективного плана.

В течение 1960-х годов продолжалось и было завершено формирование ЕЭС Европейской части страны. В 1970 году был осуществлен переход к формированию ЕЭС СССР. В 1972 в состав ЕЭС СССР вошла ОЭС Казахстана. В 1978 году 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 года началась параллельная работа ЕЭС СССР и ОЭС стран – членов

СЭВ в составе Объединенной энергосистемы стран – членов СЭВ «МИР».

К концу 1980-х годов на территории страны был создан хорошо организованный и весьма эффективно работающий электроэнергетический комплекс. Его высокая эффективность достигалась благодаря реализации ряда основополагающих стратегических направлений, заложенных планом ГОЭЛРО и перспективным планом научных исследований 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 объединенной 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 ее 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 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 электроэнергетики, характеризуемой следующими индикаторами:

- удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию снизился с 590 г/кВт·ч в 1950 году до 325,8 г/кВт·ч в 1990 году;

- удельный расход электроэнергии на собственные нужды электростанций в процентах от выработки электроэнергии снизился с 6,55 % в 1950 году до 4,43 % в 1990 году;

- потери электроэнергии на ее транспорт по электрическим сетям снизились с 8,78 % в 1950 году до 8,65 % в 1990 году;

- удельная численность персонала на 1 МВт установленной мощности снизилась с 11 чел. в 1950 году до 2,85 в 1990 году.

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

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 на величину свыше 2 млрд руб. в ценах 1984 года 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 счет 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, широкому внедрению и использованию противоаварийной автоматики обеспечивалась высокая надежность работы энергосистем и электроснабжения потребителей. Не было крупных системных аварий с погашением большого числа потребителей, какие имели в США и в других странах [4].

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

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

### **3. Сущностная часть проведенных в начале XXI века реформ в электроэнергетике России**

В результате проведенных 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 энерго-

компания, отвечающие за надежное 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 (в политике 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 этого 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 %;
- 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 про-

шлого столетия СССР был впереди многих зарубежных стран и 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 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.

#### **4. Процессы трансформации энергетических систем в мире**

В настоящее время энергетика многих стран мира претерпевает коренные изменения [10–16], 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, распределенную генерацию, электротранспорт, системы управления спросом и накопления энергии);

- растущая электрификация экономики;
- стремление уменьшить экологические воздействия;

- расширение цифровизации и автоматизации энергетических систем;

- стремление повысить надежность 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 надежного и эффективного развития и функционирования энергетических систем в новых условиях и отраженной в нормативных документах.

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

- интеграцию распределенной 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].

В условиях наличия многих субъектов хозяйствования с различными интересами в процессе развития и управления функционированием и развитием энергетических систем создаются методы целостного (холистического) управления, 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 [22; 23]:

- солнечных аэрокосмических энергетических комплексов с СВЧ и лазерными магистралями передачи энергии, которые могут обеспечить энергетическую безопасность и надежное энергообеспечение на отдаленных и труднодоступных территориях Сибири, Севера и Дальнего Востока, не охваченных централизованным энергообеспечением;

- многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК), которые являются

основой автономных систем энергоснабжения и используют все многообразие местных энергетических ресурсов;

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

## **5. Развитие новых энергетических направлений на базе солнечных аэрокосмических электростанций**

В Российской Федерации развитие новых энергетических направлений, помимо большого энергетического, экономического, экологического эффекта, связано с возрождением и дальнейшим развитием технологического и индустриального уровня страны, созданием рабочих мест, развитием образовательного и интеллектуального уровня населения, а также имеет большое оборонное значение. Создание аэрокосмических комплексов мощностью 0,1–10,0 ГВт с беспроводной передачей электроэнергии наземным потребителям может стать эффективным путем решения указанных выше проблем и развития критических технологий в Российской Федерации.

В Российском технологическом университете (РТУ МИРЭА) разработана концепция распределенной солнечной аэрокосмической энергетической системы. В ее состав войдет и комплекс беспроводной доставки электроэнергии потребителям в труднодоступных районах Сибири, Крайнего Севера, Дальнего Востока с населением в 20 млн чел., не охваченных централизованным энергообеспечением (рис. 1).

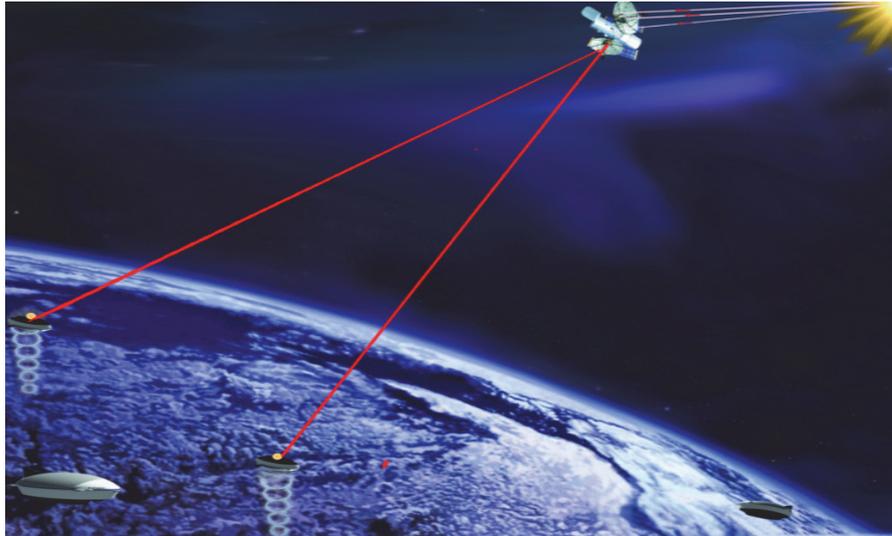
В составе солнечных аэрокосмических электростанций (САКЭ) предусматриваются:

- космический сегмент (КС) с системами приема солнечной энергии, преобразования в лазерное излучение и направленной передачи на одну из стратосферных платформ, который предлагается построить по модульному принципу. Каждый из модулей будет аккумулировать от 100 до 300 МВт солнечной энергии (рис. 2);

- стратосферный сегмент (СтС) на платформах (аэростатах, дирижаблях и др.) в составе одной или нескольких платформ, способный выполнять перемещения, стабилизацию платформ на высотах 16–30 км в заданных областях пространства для формирования зон эффективного приема энер-

гии, принимать энергию с КС и передавать на СВЧ-генераторы (магнетроны, клистроны) с КПД выше 75–80 % (рис. 3). После формирования энер-

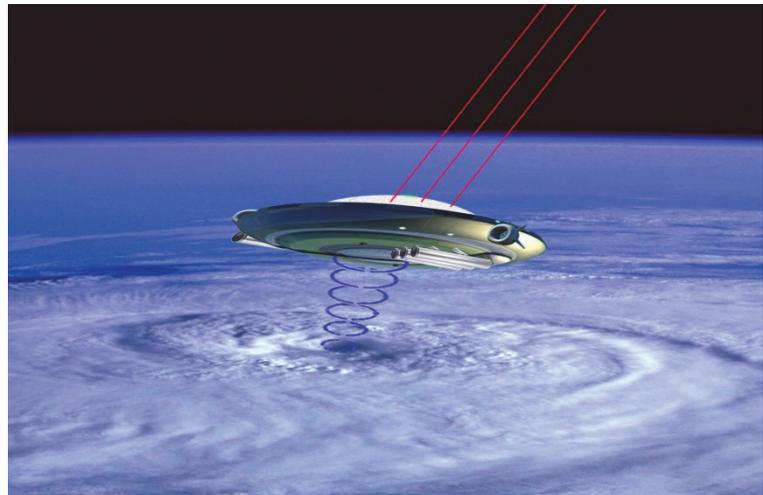
гии в СВЧ-диапазоне будет производиться ее передача по СВЧ-каналам на ректенны, размещенные на поверхности Земли;



**Рис. 1.** Концепция построения аэрокосмического энергетического комплекса (иллюстрация А.С. Сигова, В.Ф. Матюхина)  
**[Figure 1.** The concept of building an aerospace energy complex (illustration by Alexander S. Sigov, Vladimir F. Matyukhin)]



**Рис. 2.** Функционально автономный модуль космического сегмента САКЭ (иллюстрация А.С. Сигова, В.Ф. Матюхина)  
**[Figure 2.** Functionally autonomous module of the space segment solar aerospace power plants (illustration by Alexander S. Sigov, Vladimir F. Matyukhin)]



**Рис. 3.** Стратосферный сегмент САКЭ (иллюстрация А.С. Сигова, В.Ф. Матюхина)  
**[Figure 3.** Stratospheric solar aerospace power plants segment (illustration by Alexander S. Sigov, Vladimir F. Matyukhin)]

– наземный сегмент (НС) – объекты, располагаемые в заданных районах для обеспечения потребителей энергией, осуществляющие прием излучений с СтС, преобразование ее в электрический ток с промышленными параметрами в

соответствии с установленными требованиями и передачу в наземные сети энергоснабжения;

– система информации, навигации, управления САКЭ и его сегментами, отдельными элементами, средствами обеспечения безопасности,

сбора данных о состоянии атмосферы по направлениям передачи энергии и в местах расположения наземных ректенн, выполнения точных навигационных измерений и расчетов в целях управления и координации функционированием космического, стратосферного и наземного сегментов системы, поддержания заданных параметров излучений и токов в соответствии с перечнем и установленными режимами работы потребителей энергии.

Использование передающих телескопов космического сегмента диаметром 10 м позволит при передаче энергии с геостационарной орбиты, высота которой порядка 36 тыс. км, концентрировать лазерные лучи на поверхности Земли в пространственную область 10,0–25,0 м. Комбинированный вариант построения САКЭ, использующий лазерную магистраль для доставки энергии на заатмосферную платформу, преобразование ее в ток, питающий микроволновые генераторы, и транспортировки излучения микроволн на Землю наиболее целесообразен для создания распределенной энергетики России и гибкого энергообеспечения труднодоступных объектов территории страны. Диаметр СВЧ-ректенн на передачу составит порядка 25–50 м, а на прием – до 50 м. Высокоэффективный и надежный прием и преобразование СВЧ-излучения в электрический ток (с КПД до 75 %) могут осуществить электронные циклотронные преобразователи СВЧ-излучения в по-

стоянный ток, нечувствительные к перегрузкам, что особенно важно для мощных систем беспроводной передачи энергии.

Развитие технологий транспортировки мощных лазерных пучков по стратосферным магистралям позволит также внести серьезный вклад в решение проблемы энергообеспечения северных регионов страны. Предлагаемая технология может быть реализована с использованием морских атомных электростанций и стратосферных средств беспроводной передачи энергии.

Вместе с тем следует отметить, что сегодня уровень инициативных работ по тематике солнечных аэрокосмических электростанций в России уже не обеспечивает решения всего объема задач, стоящих перед исследовательскими и промышленными организациями. Для концентрации усилий различных научно-исследовательских учреждений, гарантирующих достижение требуемых результатов в приемлемые сроки, исследования и работы должны получить статус и финансирование в рамках национальных государственных программ, что обусловит прорыв в создании многих важных для экономики России критических технологий для развития различных отраслей экономики. Среди них высокие космические, авиационные, воздухоплавательные технологии, средства лазерной и СВЧ-передачи энергии, энергетика, материалы, наноантенная техника.



**Рис. 4.** Комплексный стенд по отработке и демонстрации эффективности технологий САКЭ (Крым, КрАО, Семииз) (иллюстрация А.С. Сигова, В.Ф. Матюхина)

[**Figure 4.** Integrated stand for testing and demonstrating the effectiveness of solar aerospace power plants technologies (Crimea, KrAO, Semiz) (illustration by Alexander S. Sigov, Vladimir F. Matyukhin)]

Солнечные аэрокосмические электростанции с лазерными и СВЧ-магистралями могут стать наиболее предпочтительным вариантом для построения распределенной энергетической системы РФ (в том числе информационно-энергетического обеспечения объектов в районах Крайнего Севера). Как первый шаг решения проблемы создания в России САКЭ предлагается в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла (КНТП) поставить НИЭР «Разработка научно-технологических основ и конструкторско-технологических решений в интересах обоснования принципов построения и демонстрации эффективности ключевых технологий солнечных аэрокосмических электростанций (САКЭ) с дистанционной передачей энергии по лазерным и СВЧ-каналам» (шифр «Магистраль») и создание наземной инфраструктуры для демонстрации эффективности технологий САКЭ в наземных условиях на базе КраО (Крым, Семииз) (рис. 4).

## 6. Анализ мирового тренда развития мобильных технологических агрегатов

В зависимости от уровня развития и конкретных условий их эксплуатации возможны тяговые, тягово-энергетические и энергетические мобильные технологические агрегаты (МТА). Тяговые МТА трансформируются в мобильные МЭК с многоканальным распределением мощности различной физической природы между их потребителями с активными рабочими органами и электронно-ионными устройствами. Разработанный дифференцированный метод оценки энергетической эффективности использования топлива в МТА позволяет обеспечить рациональное развитие системы «топливо – ДВС – конструктивно-компоновочная схема – трансмиссия – движитель – технологическое средство – почва».

С целью технико-технологического обеспечения сельскохозяйственного производства рассматривается возможность внедрения интеллектуальных машинных технологий, создание интеллектуальных мобильных МЭК для агропромышленного производства, в том числе из-за сокращения населения в сельской местности и возрастающего значения продовольственной безопасности страны.

Включение интеллектуальных мобильных МЭК в технологический цикл производства продукции в полеводстве позволит перейти на высоко-

интенсивные технологии в сельскохозяйственном производстве в полной мере реализуя концепцию интеллектуализации и электрификации земледелия.

Это подтверждается и анализом мировых тенденции развития инновационных машин и оборудования для аграрно-промышленного комплекса, который показывает, что в ближайшие 5–10 лет будет наблюдаться интенсивное применение автоматизированных электро- и гибридных приводов на сельскохозяйственных машинах, в том числе и в роботизированных сельскохозяйственных комплексах. Данное направление имеет большие перспективы, связанные с технико-экономической эффективностью, экологической безопасностью, управляемостью, улучшением условий труда, а также повышением технического уровня и качества создаваемых машинных технологий сельскохозяйственного производства

В настоящее время энергетическая эффективность преобразования веществ и энергии характеризуется относительно невысоким КПД. Например, КПД трансформации энергии топлива в электричество оценивается в 20–30 %, при этом значительная доля энергии рассеивается в окружающую среду в форме низкопотенциального тепла.

Существенно более сложные энергетические проблемы современное общество имеет при производстве продуктов питания. Общий коэффициент преобразования энергии от фотосинтеза до потребительского продукта в высшей степени низок. С учетом затрат на транспортировку, распределение продуктов, выкармливание сельскохозяйственных животных общий коэффициент преобразования энергии можно оценить в 0,001 %. Очевидно, что эта величина представляется абсолютно неприемлемой. Глобальным вызовом современности является повышение энергетической эффективности производства пищевых продуктов. Принципиально новым способом повышения этой эффективности видится сопряжение в одном технологическом цикле процессов получения энергии и фотосинтеза на основе сельскохозяйственных и технических растений.

## 7. Многофункциональный энергобиотехнологический комплекс

БиоМЭК позволит принципиально новым способом получить энергию и продукты питания на основе фитотронных технологий. Их ключевым элементом является климат-контроль и фитотронный способ культивирования растений. Избы-

точное низкопотенциальное тепло электрогенерирующих станций (около 70 % производимой энергии) может быть использовано для климат-контроля фитотронного блока. Фитотрон представляет собой замкнутое полностью автоматическое устройство с полностью контролируемыеми параметрами, оптимизированными под выращивание продуктивной культуры.

Принципиальным является то, что современные достижения биотехнологии и биохимической физики позволяют выращивать сельскохозяйственные растения в предельно оптимальных условиях без использования почвы (технология аэропоники).

Основное экономическое преимущество аэропоники заключается в том, что для ее производства не требуется земли, а как следствие возможно создание многоярусных теплиц для производства экологически чистой продукции. Такой подход поможет решить проблемы ограниченного количества площади для культивирования растений, а также позволит выращивать овощи и зеленые культуры в пустынях, тундре и других не пригодных для сельского хозяйства районах Земли.

Современные сенсорные технологии, средства автоматизации и контроля обеспечивают возможности программирования роста растений с предельной эффективностью использования световой энергии, приближающейся к теоретически возможной. Создание оптимальных условий роста по температуре, влажности, составу минеральных компонентов питания, освещенности позволяет получать высокие показатели урожайности для большинства сельскохозяйственных культур.

Источниками света могут служить светодиоды, эффективно конвертирующие электроэнергию в световое излучение. Значимым является регулируемое использование  $\text{CO}_2$  – базового углеродсодержащего соединения для фотосинтетического процесса. Контроль повышенного уровня  $\text{CO}_2$  позволяет в несколько раз увеличить продуктивность растений.

Оценки показывают, что с учетом внесезонности культивирования растений, оптимального уровня  $\text{CO}_2$ , температуры, влажности, минерального питания, безвирусности исходного посевного материала и отсутствия проблем с сельскохозяйственными вредителями средняя годовая урожайность фитотронного культивирования с единицы поверхности в 50–500 раз выше традиционного сельскохозяйственного производства.

Широкомасштабное внедрение многофункциональных биоэнерготехнологических комплексов на базе гибридных энергоустановок (СЭС, ВЭС, ГЭС и т. п.) позволит до 2025 года снизить уровень импортозависимости в российском производстве семян высших категорий не менее чем на 30 %.

Основное производство направлено на получение энергии в виде продуктов питания на базе автоматического фитотронного производства (аэропоники) без использования почвы, прежде всего востребованных углеводных и белковых продуктов; все отходы возвращаются в технические циклы после конверсии под действием метаногенеза.

Использование комплексной технологии производства энергии и сельскохозяйственной продукции требует соответствующей разработки общих технических требований к многофункциональным энергобиотехнологическим комплексам, которые заключаются в следующем:

- многофункциональность, многотопливность, модульное построение автономных систем энергоснабжения в использовании местных энергоресурсов и ВИЭ;

- возможность реализации единого обобщенного универсального унифицированного типового проекта, который отвечал бы современным техническим требованиям, предъявляемым к биоМЭК;

- нулевое загрязнение окружающей среды вредными веществами, содержащимися в отработавших газах первичных поршневых двигателей за счет обеспечения замкнутости цикла конверсии углекислоты в продукты питания, прежде всего, путем эффективного использования энергии сжигаемого топлива и продуктов его сгорания ( $\text{CO}_2$ );

- согласованность характеристик энергетических модулей, в том числе ДВС, силовых генераторов, ВИЭ-модулей, потребителя нагрузок и др. модулей;

- значительное повышение КПД преобразования энергии;

- наличие фитотронного культивирования растений без почвы в условиях аэропоники, позволяющее более эффективно использовать энергию, повышать урожайность в 4–5 раз, обеспечивать независимость от климатических условий, непрерывность культивирования круглый год (6–12 урожаев в год), безвирусное растениеводство и экологически чистые продукты, исключить пестициды и болезни растений;

- обеспечение полной автономной энерго-независимости;
- производство экологически чистых сельскохозяйственных продуктов
- экономия топлива только за счет оптимизации режимов работы многотопливной электростанции и использования потенциала ВИЭ;
- повышение коэффициента использования топлива за счет комплексной утилизации сбросового тепла ДВС и повышения его энергетической эффективности;
- согласованность энергетических и биологических характеристик биоМЭК и его модулей, в том числе фитотронных модулей, ДВС, генератора и потребителя нагрузок;
- объем производства ДВС выбросов CO<sub>2</sub> не должен превышать потребление углекислоты, необходимой для оптимального прироста биомассы;
- возможность совместной работы ДВС-электростанции с возобновляемыми источниками энергии (гибридная электростанция) при любом соотношении мощности за счет применения всережимного генератора, преобразователя частоты и САУ, а также с энергосистемой;
- обеспечение высокого качества электрической и тепловой энергии независимо от колебаний нагрузки и потенциала возобновляемых видов энергии;
- создание интеллектуальной системы автоматического управления биоМЭК;
- высокий коэффициент загрузки ДВС (~ 1).

Подобные комплексные технические решения нигде в мире не применяются, что позволяет говорить об их новизне, возможности технологического лидерства и выхода на целевые зарубежные рынки.

В целом создание комплексных интегрированных систем энергоснабжения на базе предложенных инновационных технологий в условиях происходящих в мире процессов трансформации энергетических систем позволит повысить эффективность, надежность и безопасность функционирования систем энергоснабжения России и тем самым поспособствует повышению конкурентоспособности ее экономики.

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, решающего задачи электроэнергетического обеспечения пространственного развития экономики страны, включая вопросы развития электротранспортных систем, в том числе парка электротракторов и рабочих машин с электроприводами и различными силовыми приводами в отраслях сельского хозяйства, распределенной и аэрокосмической энергетики на территории Российской Федерации, а также развития интеграционных процессов ЕЭС России с энергосистемами и энергообъединениями стран ближнего и дальнего зарубежья в рамках процесса формирования Большого евразийского партнерства;
- предложений по созданию институциональной основы, определяющей регулирующие, технологические и экономические правила оптимального развития и функционирования электроэнергетического комплекса;
- научных основ формирования и принципов управления комплексными интегрированными системами энергоснабжения, включая развитие и разработку новых методов и отечественных программных средств интегрального планирования ресурсов в условиях происходящих процессов трансформации энергетических систем;
- выполнении работ по созданию комплексных интегрированных систем энергоснабжения, включая создание комплексной интегрированной системы энергоснабжения Арктического региона России.

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

В настоящее время энергетика мира претерпевает коренные изменения, в результате которых создается новая архитектура энергетических систем. Электроэнергетика России потеряла темпы развития, а по эффективности и надежности уступает показателям, достигнутым к концу 80-х годов прошлого столетия.

В этих условиях актуальным является решение следующих задач:

– определения ключевых направлений и целевого видения развития электроэнергетического комплекса страны с учетом долгосрочной перспективы 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 году;

– создания институциональной основы, а в целом – единой 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;

– разработки 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;

– развития распределенной энергетики на базе солнечных аэрокосмических энергетических комплексов, многофункциональных энерготехнологических и энергобиотехнологических комплексов и их интеграции в энергетические системы страны.

### 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. 125 с.
3. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития. М.: Наука, 1979. 416 с.
4. Баринов В.А., Савалов 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. Новосибирск: Наука, 2010. 686 с.
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. 326 с.

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(52). С. 30–33.

10. Андреев В.М., Баринов В.А., Варфоломеев С.Д. и др. Создание комплексных интегрированных систем энергоснабжения на базе инновационных технологий в условиях происходящих в мире процессов // Электричество. 2020. № 3. С. 4–12.

11. 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 (55). С. 134–141.

12. Status of power system transformation. System integration and local grids / IEA. 2017. 158 p.

13. Status of power system transformation 2019. Power system flexibility / IEA. 2019. 32 p.

14. World energy outlook 2018 / OECD/IEA. 2018. 661 p.

15. Global energy transformation. A roadmap to 2050 / IRENA. 2018. 76 p.

16. European ENERGY Research Alliance (EERA) description of work. Joint programme of Energy System Integration (ESI) / EERA. 2015. 86 p.

17. Волков Э.П., Баринов В.А., Исаев В.А., Луицын Н.В., Маневич А.С., Мурачев А.С., Усачев Ю.В. Направления развития энергетического хозяйства и ЕНЭС России и ее интеграция в глобальную электрическую сеть // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 5. С. 3–14.

18. Voropai N.I., Podkvalnikov 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. 139 p.

20. Energy technology perspectives 2017. Catalysing energy technology transformations / OECD/IEA. 2017. 443 p.

21. Grid wise transactive energy framework. Draft version. October 2013. 65 p.

22. Годжаев З.А., Измайлов А.Ю., Лачуга Ю.Ф., Шогенов Ю.Ю. Перспективы применения автоматизированных и роботизированных электроприводов на мобильных энергосредствах и рабочих органах сельхозмашин // Известия МГТУ МАМИ. 2018. № 2. С. 41–47.

23. Сигов А.С., Матюхин В.Ф., Редько И.Я., Абрамов П. Аэрокосмическая энергетика России (цели

создания, концептуальные подходы, перспективы) // Радиоэлектронные технологии. 2019. № 1. С. 79–84.

#### Для цитирования

Андреев В.М., Баринов В.А., Варфоломеев С.Д., Лачуга Ю.Ф., Матюхин В.Ф., Панченко В.Я., Редько И.Я.,

Сигов А.С., Стенников В.А. Создание комплексных интегрированных систем энергоснабжения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 224–237. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-224-237>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-224-237

Research article

## Creation of integrated energy supply systems

Vyacheslav M. Andreev<sup>a</sup>, Valentin A. Barinov<sup>b</sup>, Sergei D. Varfolomeev<sup>c,d</sup>,  
Yurii F. Lachuga<sup>e</sup>, Vladimir F. Matyukhin<sup>f</sup>, Vladislav Ya. Panchenko<sup>g</sup>,  
Ivan Ya. Redko<sup>b</sup>, Alexander S. Sigov<sup>f</sup>, Valery A. Stennikov<sup>h</sup>

<sup>a</sup>Ioffe Institute, 26 Politekhnikeskaya St, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

<sup>b</sup>G.M. Krzhizhanovsky Power Engineering Institute, 19 Leninskii Ave, Moscow, 119071, Russian Federation

<sup>c</sup>Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

<sup>d</sup>Institute of Biochemical Physics named after N.M. Emanuel of the Russian Academy of Sciences,  
4 Kosygina St, Moscow, 119334, Russian Federation

<sup>e</sup>Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, 32A Leninskii Ave, Moscow, 119334, Russian Federation

<sup>f</sup>MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadskogo Ave, Moscow, 119454, Russian Federation

<sup>g</sup>Institute on Laser and Information Technologies of Russian Academy of Sciences,  
1 Svyatoozerskaya St, Shatura, 140700, Russian Federation

<sup>h</sup>Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
130 Lermontova St, Irkutsk, 664033, Russian Federation

#### Article history:

Received: November 15, 2020

Revised: December 12, 2020

Accepted: December 20, 2020

#### Keywords:

State Electrification Plan of Russia, GOELRO plan, energy systems, Unified Power System, transformation, integrated energy supply systems, innovative technologies, institutional framework

**Abstract.** A brief description of the State Electrification Plan of Russia (GOELRO plan), developed on the initiative of V.I. Lenin by the GOELRO commission headed by G.M. Krzhizhanovsky and adopted on December 22, 1920 by the 8<sup>th</sup> All-Russian Congress of Soviets, as well as key directions of a long-term plan for research on the problem of the creation of the Unified Power System of the Country (UPS), developed by the commission under the leadership of G.M. Krzhizhanovsky in 1957, which laid the foundation for the formation of the UPS – the largest in the world at the end of the 80s centrally managed interconnected power system, is presented. The indicators of development and efficiency of the country's electric power industry are given. The essential part of the reforms in the electric power industry of Russia carried out at the beginning of the 21<sup>st</sup> century, their shortcomings that led to a decrease in the efficiency of the industry and the emergence of various kinds of bottlenecks and imbalances are analyzed. The processes of transformation of energy systems in the world are considered, as a result of which a new architecture of energy systems is created. The primary tasks facing the Russian power industry in these conditions are formulated.

**Vyacheslav M. Andreev**, Head of the Laboratory of the Ioffe Institute, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY SPIN-code: 8199-5248, Scopus Author ID: 7401665569.

**Valentin A. Barinov**, Head of the Department of JSC “ENIN”, Academician of the AES, Doctor of Technical Sciences; eLIBRARY SPIN-code: 3962-9264, Scopus Author ID: 8545973300; barinov@eninet.ru.

**Sergei D. Varfolomeev**, Head of the Department of Chemical Enzymology of the Faculty of Chemistry of MSU, Scientific Director of the IBCP RAS, corresponding member of the RAS, PhD in Chemistry, Professor; eLIBRARY SPIN-code: 7873-3673, Scopus Author ID: 7005361446.

**Yurii F. Lachuga**, Academician-Secretary of the DAS of the RAS, Academician of the RAS, member of the Presidium of the RAS, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY SPIN-code: 1128-3299, Scopus Author ID: 57213157355.

**Vladimir F. Matyukhin**, Director of the Research and Development Center of the RTU MIREA, Doctor of Technical Sciences; eLIBRARY AuthorID: 171398.

**Vladislav Ya. Panchenko**, Scientific Director of the IPLIT RAS, Academician of the RAS, member of the Presidium of the RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; eLIBRARY AuthorID: 19683.

**Ivan Ya. Redko**, Deputy General Director of JSC “ENIN”, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY AuthorID: 420014, Scopus Author ID: 6603047041.

**Alexander S. Sigov**, President of the RTU MIREA, member of the Security Council under the President of the Russian Federation, Academician of the RAS, Professor; eLIBRARY SPIN-code: 2869-5663.

**Valery A. Stennikov**, Director of the ESI SB RAS, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6219-0354>.

## References

1. Dyakov AF. (ed.) *Elektroenergetika Rossii. Istoriya i perspektivy razvitiya* [Electric power industry of Russia. History and development prospects]. Moscow; Informenergo Publ.; 1997. (In Russ.)
2. *Materialy yubilejnoj sessii uchenogo soveta, povyashchennye 40-j godovshchine Velikoj Oktyabr'skoj Socialisticheskoy Revolyucii i 25-letiyu Energeticheskogo instituta AN SSSR* [Materials of the jubilee session of the Scientific Council dedicated to the 40<sup>th</sup> anniversary of the Great October Socialist Revolution and the 25<sup>th</sup> anniversary of the Energy Institute of the USSR Academy of Sciences]. Moscow; 1958. (In Russ.)
3. Melentyev LA. *Sistemnye issledovaniya v energetike. Elementy teorii, napravleniya razvitiya* [System studies in the energy sector. Elements of the theory, directions of development]. Moscow: Nauka Publ.; 1979. (In Russ.)
4. Barinov VA, Sovalov SA. *Rezhimy energosistem. Metody analiza i upravleniya* [Power system modes. Methods of analysis and management]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1990. (In Russ.)
5. Voropay NI. (ed.) *Sistemnye issledovaniya v energetike. Retrospektiva nauchnyh napravlenij SEI-ISEM* [Systemic research in the energy sector. Retrospective of scientific directions SEI-ISEM]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 2010. (In Russ.)
6. Volkov EP, Barinov VA, Manevich AS. *Metodologiya obosnovaniya i perspektivy razvitiya elektroenergetiki Rossii* [Justification methodology and prospects for the development of the electric power industry in Russia]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2010. (In Russ.)
7. Bogdanov AA. *Tektologiya: Universal Organization Science*. Petersburg, Moscow, Berlin: Izd-vo Z.I. Grzhebina Publ.; 1913. (In Russ.)
8. Wiener N. *Kibernetika, ili upravlenie i svyaz' v zivotnom i mashine* [Cybernetics, or control and communication in the animal and machine]. Moscow: Sovetskoe radio Publ.; 1968. (In Russ.)
9. Esyakov SYa, Sigov AS, Voropay NI, Varfolomeev SD, Stennikov VA, Redko IYa, Barinov VA, Matjukhin VF. Proposals for creating an integrated system aimed to manage the operation and development of power industry in Russia. *Electric power. Transmission and distribution*. 2019;1(52):30–33. (In Russ.)
10. Andreev VM, Barinov VA, Varfolomeev SD, et al. Creation of integrated energy supply systems based on innovative technologies in the context of the transformation of energy systems. *Electricity*. 2020;(3):4–12. (In Russ.)
11. Esyakov SYa, Lunin KA, Stennikov VA, Voropay NI, Redko IYa, Barinov VA. Transformation of electric power systems. *Electric power. Transmission and distribution*. 2019;4(55):134–141. (In Russ.)
12. IEA. *Status of power system transformation. System integration and local grids*. 2017.
13. IEA. *Status of power system transformation 2019. Power system flexibility*. 2019.
14. OECD/IEA. *World energy outlook 2018*. 2018.
15. IRENA. *Global energy transformation. A roadmap to 2050*. 2018.
16. EERA. *European Energy Research Alliance (EERA) description of work. Joint programme of Energy System Integration (ESI)*. 2015.
17. Volkov EP, Barinov VA, Isaev VA, Lisitsyn NV, Manevich AS, Murachev AS, Usachev YuV. Development trends of energy industry and UNPG of Russia and its integration into the global power grid. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2016;(5):3–14. (In Russ.)
18. Voropay NI, Podkovalnikov SV, Osintsev KA. From interconnections of local electric power systems to Global Energy Interconnection. *Global Energy Interconnection*, 2018;1(1):4–10.
19. *Global electricity network feasibility study*. CIGRE, WG C1.35, September 2019, Reference: 775.
20. OECD/IEA. *Energy technology perspectives 2017. Catalysing energy technology transformations*. 2017.
21. *Grid wise transactive energy framework. Draft version*. 2013, October.
22. Godzhaev ZA, Izmajlov AYu, Lachuga YuF, Shogenov YuH. Prospects for the use of automated and robotized electric drives on mobile energy equipment and agricultural machinery working bodies. *Izvestiya MGTU MAMI [News of the MGTU MAMI]*. 2018;(2):41–47. (In Russ.)
23. Sigov AS, Matyukhin VF, Redko IYa, Abramov P. Aerospace energy of Russia (goals of creation, conceptual approaches, perspectives). *Journal of Radio-electronic Technologies*. 2019;(1):79–84. (In Russ.)

## For citation

Andreev VM, Barinov VA, Varfolomeev SD, Lachuga YuF, Matyukhin VF, Panchenko VYa, Redko IYa, Sigov AS, Stennikov VA. Creation of integrated energy supply systems. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020; 21(4):224–237. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-224-237>