



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.  
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**2020 Том 21 № 4**

Специальная тема номера:  
**100-ЛЕТИЕ ПЛАНА ГОЭЛРО**

**DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-4**

**<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>**

**Научный журнал**

**Издается с 2000 г.**

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)  
**Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.**

**Учредитель:** Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

---

**Главный редактор**

**Разумный Юрий Николаевич** – доктор технических наук, профессор, директор Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

**Заместитель главного редактора**

**Резник Сергей Васильевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» факультета «Специальное машиностроение», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Ответственный секретарь**

**Агасиева Светлана Викторовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

**Члены редакционной коллегии**

**Агравал Бридж** – профессор, Военно-морская школа, Монтерей, США

**Алифанов Олег Михайлович** – академик РАН, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

**Варатараджу Ренугант** – профессор, Университет Путра Малайзия, Серданг, Малайзия

**Василе Массимилиано Л.** – профессор, Университет Стратклайда, Глазго, Великобритания

**Вивiani Антонио** – профессор, Университет Кампани «Луиджи Ванвители», Неаполь, Италия

**Гасбарри Паоло** – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

**Гермаи Анна** – профессор, Университет Бейра Интериор, Ковилья, Португалия

**Гитас Иоаннис Зоис** – профессор, Университет Аристотеля в Салониках, Салоники, Греция

**Грациани Филиппо** – почетный профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

**Гурфил Пини** – профессор, Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль

**Джа Моррива** – доцент, Техасский университет в Остине, Остин, США

**Дженни Джанкарло** – профессор, Туринский политехнический институт, Турин, Италия

**Кавазути Дзюньитиро** – профессор, Японское агентство аэрокосмических исследований, Токио, Япония

**Кадугин Владимир Тимофеевич** – доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Капустин Владимир Михайлович** – доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, Россия

**Кузнецов Николай Борисович** – профессор, Геологический институт РАН, Москва, Россия

**Линарес Ричард** – профессор, Массачусетский технологический институт, Кембридж, США

**Матюшин Максим Михайлович** – доктор технических наук, Центр управления полетами АО «ЦНИИмаш» ГК «Роскосмос», Королев, Россия

**Медведев Андрей Всеволодович** – доктор физико-математических наук, член-корреспондент СО РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

**Мисра Арун** – профессор, Университет Макгилла, Монреаль, Канада

**Мортари Даниэле** – профессор, Техасский университет A&M, Колледж-Стейшн, США

**Мохаммед Сейду О.** – профессор, Национальное агентство по космическим исследованиям и развитию, Абуджа, Нигерия

**Палмерини Джованни** – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

**Петухов Вячеслав Георгиевич** – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

**Попков Юрий Соломонович** – академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт системного анализа ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

**Попов Гарри Алексеевич** – академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Москва, Россия

**Прадо Антонио** – профессор, Национальный институт космических исследований, Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия

**Редько Иван Яковлевич** – доктор технических наук, профессор, АО «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского», Москва, Россия

**Спенсер В. Дэвид** – профессор, Университет штата Пенсильвания, Университи-Парк, США

**Фурфаро Роберто** – профессор, Университет Аризоны, Тусон, США

**Челани Фабио** – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

**Челлетти Александра** – профессор, Римский университет «Тор Вергата», Рим, Италия

**Черн Рок Ченг-Шинг** – профессор, Университет Райерсона, Торонто, Канада

**Ясика Тэцуо** – почетный профессор, Университет Кюсю, Фукуока, Япония

**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.  
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)**

Периодичность 4 выпуска в год.

Сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (открытый доступ).

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, EBSCOhost.

**Цель и тематика**

Журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» – периодическое международное рецензируемое научное издание в области информатики, вычислительной техники и управления, авиационной и ракетно-космической техники, наук о земле. Журнал является международным по составу редакционной коллегии, авторам и тематике публикаций. В журнале публикуются результаты оригинальных научных исследований российских и зарубежных ученых.

Цели журнала:

– содействие развитию российских и зарубежных инженерных школ;

– продвижение и внедрение в практику современных перспективных разработок в указанных областях;

– научный обмен и сотрудничество между учеными.

Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам. Включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК при Минобрнауки России.

Выпуски журнала в полнотекстовом виде, правила оформления статей и дополнительная информация размещены на сайте <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>.

---

Редактор *Ю.А. Заикина*

Компьютерная верстка: *Ю.А. Заикина*

**Адрес редакции:**

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

**Адрес редакционной коллегии журнала «Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования»:**

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: [engj@rudn.ru](mailto:engj@rudn.ru)

---

Подписано в печать 24.05.2021. Выход в свет 31.05.2021. Формат 60×84/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 11,16. Тираж 500 экз. Заказ № 918. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет дружбы народов»

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)



## RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

2020 Volume 21 Number 4

Special theme of the issue:

100<sup>TH</sup> ANNIVERSARY OF THE GOELRO PLAN

DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-4

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia

---

### Editor-in-Chief

*Yury N. Razumny* – Professor, Director of the Academy of Engineering, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

### Associate Editor-in-Chief

*Sergey V. Reznik* – Professor, Head of the Department SM-13 “Composite Materials for Aerospace” of the Special Machinery Faculty, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

### Assistant to the Editor-in-Chief

*Svetlana V. Agasieva* – Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

### Editorial Board

*Brij Agrawal* – Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, USA

*Oleg M. Alifanov* – Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

*Fabio Celani* – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

*Alessandra Celletti* – Professor, Tor Vergata University of Rome, Rome, Italia

*Rock Jeng-Shing Chern* – Professor, Ryerson University, Toronto, Canada

*Roberto Furfaro* – Professor, University of Arizona, Tucson, USA

*Paolo Gasbarri* – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

*Giancarlo Genta* – Professor, Polytechnic University of Turin, Turin, Italia

*Ioannis Zois Gitas* – Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

*Filippo Graziani* – Full Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

*Anna Guerman* – Professor, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal

*Pini Gurfil* – Full Professor, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

*Moriba Jah* – Associate Professor, University of Texas at Austin, Austin, USA

*Vladimir T. Kalugin* – Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*Vladimir M. Kapustin* – Professor, National University of Oil and Gas “Gubkin University” (Gubkin University), Moscow, Russia

*Junichiro Kawaguchi* – Professor, Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, Japan

*Nikolay B. Kuznetsov* – Professor, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Richard Linares* – Professor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

*Maxim M. Matyushin* – Dr. (Technical Sciences), JSC “Central Research Institute for Machine Building” (JSC “TsNIIMash”), Korolev, Russia

*Andrey V. Medvedev* – Dr. (Physical and Mathematical Sciences), corresponding member of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, Russia

*Arun Misra* – Professor, McGill University, Montreal, Canada

*Seidu O. Mohammed* – Professor, National Space Research and Development Agency, Abuja, Nigeria

*Daniele Mortari* – Professor, Texas A&M University, College Station, USA

*Giovanni Palmerini* – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

*Vyacheslav G. Petukhov* – Dr. (Technical Sciences), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*Yury S. Popkov* – Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Harri A. Popov* – member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

*Antonio Prado* – Professor, National Institute for Space Research, Sao Jose dos Campos, Brazil

*Ivan Y. Redko* – Professor, JSC “Krzhozhanovsky Energy Institute”, Moscow, Russia

*David B. Spencer* – Professor, Pennsylvania State University, University Park, USA

*Renuganth Varatharajoo* – Professor, University Putra Malaysia, Seri Kembangan, Malaysia

*Massimiliano L. Vasile* – Professor, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

*Antonio Viviani* – Professor, University of Campania Luigi Vanvitelli, Naples, Italy

*Tetsuo Yasaka* – Professor Emeritus, Kyushu University, Fukuoka, Japan

**RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES**  
**Published by the Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)**

**ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)**

Published 4 times a year.

Journal homepage: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (Open Access).

Languages: Russian, English.

Indexed by Russian Index of Science Citation, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, EBSCOhost.

### **Aims and Scope**

The RUDN Journal of Engineering Researches – is a peer-reviewed international academic journal publishing research in the field of computer science, computer engineering and control, aviation and space technology, earth sciences. The journal is international in terms of the composition of the editorial board, authors and topics of publications. The journal publishes the results of original scientific research by Russian and foreign scientists.

The aims of the journal:

- assistance in the development of Russian and foreign engineering schools;
- promotion and implementation into practice of modern advanced technologies in these areas;
- scientific exchange and collaboration between scientists.

The journal is addressed to researchers, engineers, graduate students. Included in the List of the Leading Scientific Journals and Editions of the Highest Certification Committee of the Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral theses are to be published.

The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> and contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

---

Copy Editor *Iu.A. Zaikina*  
Layout Designer *Iu.A. Zaikina*

**Address of the editorial board:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

**Address of the editorial board of RUDN Journal of Engineering Researches:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: [engj@rudn.ru](mailto:engj@rudn.ru)

---

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia  
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

**Printed at RUDN Publishing House:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

Приветственное слово К.К. Долгова .....	221
Приветственное слово В.Г. Гусакова .....	222
<b>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.</b> Создание комплексных интегрированных систем энергоснабжения .....	224
<b>Воропай Н.И., Стенников В.А.</b> Системная методология исследований энергетики: к 100-летию плана ГОЭЛРО .....	238
<b>Редько И.Я., Малозёмов А.А., Малозёмов Г.А., Наумов А.В., Козьминых Д.В.</b> Эффективность использования инверторных энергоустановок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов .....	244
<b>Пирогов Ю.А., Казарян Г.М., Саввин В.Л.</b> Электронные циклотронные преобразователи микроволн в системах беспроводной передачи энергии .....	254
<b>Лачуга Ю.Ф., Стребков Д.С., Годжаев З.А., Редько И.Я.</b> Электрификация сельскохозяйственных мобильных энергосредств на основе тягово-энергетической концепции развития техники .....	260
<b>Андреев В.М.</b> Каскадные солнечные батареи космического и наземного применения .....	271
<b>Мельников В.М., Разумный Ю.Н.</b> Многообразные межорбитальные буксиры мегаваттного класса: проблемы и перспективы .....	281
<b>Воротницкий В.Э.</b> План ГОЭЛРО – образец системного подхода к долгосрочному развитию отечественной электроэнергетики .....	290
<b>Кирпичникова И.М.</b> Анализ становления большой и малой электрогенерации Южного Урала .....	302

## CONTENTS

Welcome speech of K.K. Dolgov .....	221
Welcome speech of V.G. Gusakov .....	222
<b>Andreev V.M., Barinov V.A., Varfolomeev S.D., Lachuga Yu.F., Matyukhin V.F., Panchenko V.Ya., Redko I.Ya., Sigov A.S., Stennikov V.A.</b> Creation of integrated energy supply systems .....	224
<b>Voropai N.I., Stennikov V.A.</b> System methodology of energy research: for the 100 <sup>th</sup> anniversary of the State Electrification Plan of Russia .....	238
<b>Redko I.Ya., Malozemov A.A., Malozemov G.A., Naumov A.V., Kozminykh D.V.</b> Efficiency of using inverter power plants as part of multifunctional energy technology complexes .....	244
<b>Pirogov Yu.A., Kazaryan G.M., Savvin V.L.</b> Electron cyclotron converters of microwaves in wireless power transmission systems .....	254
<b>Lachuga Yu.F., Strebkov D.S., Godzhaev Z.A., Redko I.Ya.</b> Electrification of agricultural mobile power facilities based on the traction and energy concept of technology development .....	260
<b>Andreev V.M.</b> Multijunction solar arrays for space and terrestrial applications .....	271
<b>Melnikov V.M., Razoumny Yu.N.</b> Reusable interorbital tugs of megawatt class: problems and prospects .....	281
<b>Vorotnitsky V.E.</b> State Electrification Plan of Russia – an example of a systematic approach to the long-term development of the national electric power industry .....	290
<b>Kirpichnikova I.M.</b> Analysis of the formation of large and small power generation in the Southern Urals .....	302



Уважаемые коллеги, представители научных и промышленных сообществ, авторский коллектив журнала «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования»!

Приветствую вас на страницах данного журнала, очередной номер которого посвящен 100-летию Государственного плана электрификации России (плана ГОЭЛРО), разработанного по инициативе В.И. Ленина Комиссией ГОЭЛРО во главе с Г.М. Кржижановским.

22 декабря 1920 года на VIII Всероссийском съезде Советов был принят план ГОЭЛРО. Начиная с 1966 года наша страна ежегодно 22 декабря отмечает этот замечательный праздник. План ГОЭЛРО – это первый генеральный государственный план развития народного хозяйства страны, в котором были определены основные направления развития государства: индустриализация всей страны при опережающем развитии ее электрификации; рациональное размещение промышленности, создание энерго-промышленных комбинатов; широкое распространение электроэнергии в промышленности и сельскохозяйственном производстве; развитие железнодорожного транспорта на основе электрификации. Электроэнергетика страны прошла большой путь от сооружения первых крупных электростанций и объединяющих их в энергосистемы электрических сетей до образования Единой энергосистемы СССР.

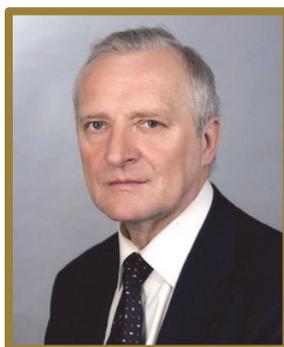
Опыт и методология разработки плана ГОЭЛРО заложили основы последующего государственного планирования развития экономики страны, в том числе пятилетних планов развития народного хозяйства. Основные разработчики плана ГОЭЛРО вошли в новый орган – Госплан, первым председателем которого стал Г.М. Кржижановский. Выдающийся академик возглавлял его с 1921 до конца 1930 года.

Ускоренные темпы роста производства электроэнергии, создание региональных энергосистем сыграли важную роль в период Великой Отечественной войны. Большое строительство электростанций в восточных районах, и в особенности на Урале, обеспечило возможность бесперебойного снабжения электроэнергией перенесенных на восток промышленных предприятий Советского Союза. План ГОЭЛРО способствовал Великой Победе над фашизмом.

На страницах журнала Вы найдете ответы на многие вопросы, стоящие сегодня перед энергетической отраслью.

Желаю скорейшей публикации актуального и востребованного материала, плодотворного обмена опытом, а также эффективных решений ключевых проблем в электроэнергетике!

*К.К. Долгов,  
заместитель председателя  
Комитета Совета Федерации по экономической политике*



Уважаемые коллеги! Дорогие друзья!

От имени Президиума Национальной академии наук Беларуси поздравляю редакционную коллегию и всех читателей журнала «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» со знаменательной датой – 100-летием образования Государственной комиссии по электрификации России и принятия Государственного плана электрификации России – плана ГОЭЛРО.

План ГОЭЛРО был отправной точкой формирования системы электроэнергетики и стремительной индустриализации, являлся первой научно обоснованной долгосрочной программой экономического развития Союза Советских Социалистических Республик.

Мы помним, что 100 лет назад народное хозяйство страны находилось в состоянии разрухи. Снабжение топливом промышленности, транспорта и населения было нарушено, из-за отсутствия топлива простаивали заводы и фабрики. Продовольственный кризис не позволял обеспечить рост производительности труда. Промышленное производство по сравнению с 1913 годом сократилось в 7 раз, выработка электроэнергии уменьшилась почти в 4 раза, объем продукции сельского хозяйства составлял 2/3 довоенного уровня. В таких условиях был крайне необходим жизнеспособный план восстановления народного хозяйства и дальнейшего социально-экономического развития страны.

Как показало время, план ГОЭЛРО был не только выполнен, но и в значительной степени перевыполнен – уже через 15 лет по производству электроэнергии СССР был на втором месте в Европе и на третьем месте в мире.

Историки, экономисты и энергетики справедливо считают план ГОЭЛРО символом новой эпохи экономического возрождения и ускоренного промышленного развития огромной державы. Сегодня, по прошествии многих лет, этот проект признан одним из немногих блестяще реализованных в Советском Союзе государственных перспективных планов восстановления и развития всего промышленно-хозяйственного комплекса. Через сквозную электрификацию, формирование новой системы производства и потребления энергии мощный импульс развития получили тысячи стратегически важных производств своего времени, были созданы принципиально новые отрасли народного хозяйства. И важную роль в этом сыграл Энергетический институт, созданный 90 лет назад Г.М. Кржижановским, чье имя он носит.

Положительно сказалась реализация плана ГОЭЛРО на энергетической и экономической системах БССР. Созданная в первые годы реализации плана энергетика республики стремительно прошла путь от разрозненных электростанций небольшой мощности и локальных электрических сетей до мощной энергетической системы, располагающей современными технологиями и эффективной структурой производства электрической и тепловой энергии.

В годы первых пятилеток темпы роста генерирующих мощностей электростанций по сравнению с 1927 годом возросли более чем в 8 раз, а выработка электроэнергии – в 13 раз. В 1940 году БССР по производству электроэнергии занимала шестое место среди республик Советского Союза.

Инициированное планом ГОЭЛРО динамичное развитие энергетики Беларуси уже в середине прошлого столетия стало бесспорным локомотивом для развития экономики всего народного хозяйства республики, решения целого комплекса приоритетных социально-экономических задач.

Успех плана ГОЭЛРО – это научно обоснованное целеполагание, точное определение промежуточных задач, рациональная организация, интеллект и кропотливая работа энергетиков, экономистов, проектировщиков, строителей и, конечно, научных работников. Это пример нашей совместной успешной реализации долгосрочной программы развития.

С юбилеем, уважаемые коллеги! Желая новых открытий, блестящей реализации совместных проектов и уверенного движения вперед!

*В.Г. Гусаков,  
председатель Президиума Национальной академии наук Беларуси,  
академик, доктор экономических наук, профессор*



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 заложенным 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, характеризующейся 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).

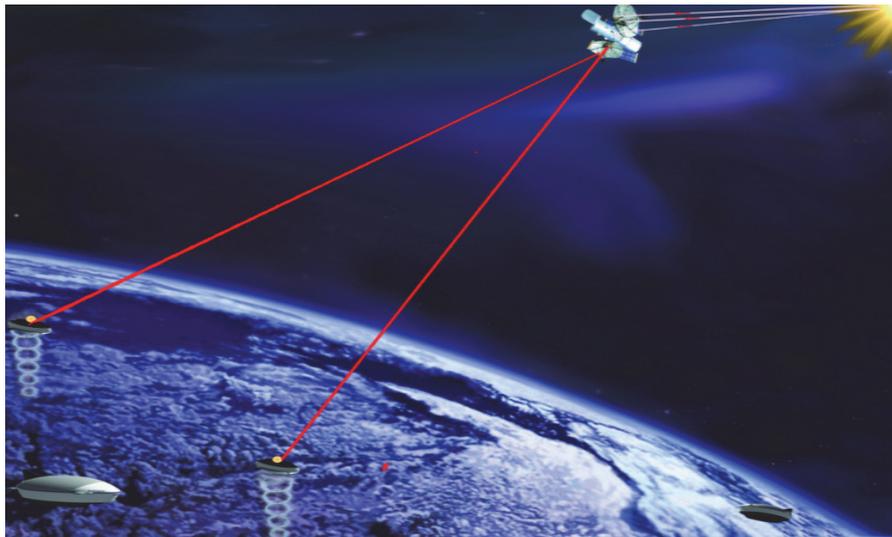
В составе солнечных аэрокосмических электростанций (САКЭ) предусматриваются:

- 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-

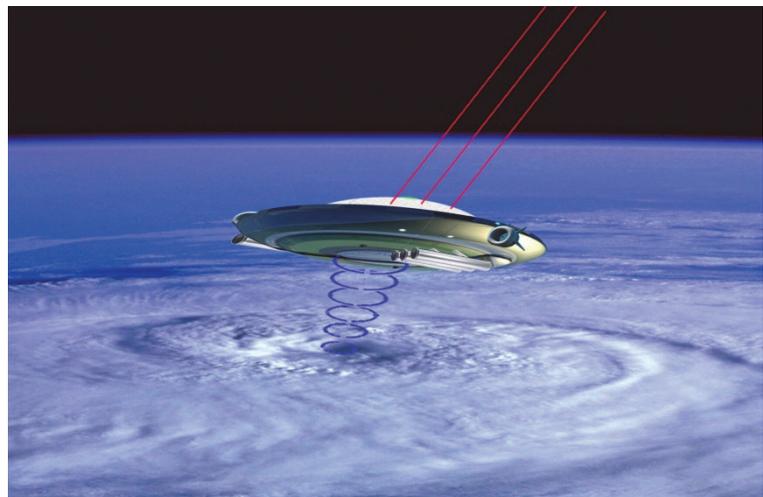
гии в СВЧ-диапазоне будет производиться ее передача по СВЧ-каналам на ректенны, размещенные на поверхности Земли;



**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 контролируемые 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 других 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 ЭЭС 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 zhivotnom 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>



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-238-243  
УДК 621.311.1

Научная статья

## Системная методология исследований энергетики: к 100-летию плана ГОЭЛРО

Н.И. Воропай, В.А. Стенников

Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН,  
Российская Федерация, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130

### История статьи:

Поступила в редакцию: 14 октября 2020 г.  
Доработана: 1 декабря 2020 г.  
Принята к публикации: 11 декабря 2020 г.

### Ключевые слова:

план ГОЭЛРО, комплексно-энергетический метод, системные исследования в энергетике

*Аннотация.* Анализируются условия разработки плана ГОЭЛРО – целостного, единого государственного хозяйственного плана. План был разработан в сжатые сроки (с февраля по декабрь 1920 года) Государственной комиссией ГОЭЛРО в составе двадцати высоко квалифицированных инженеров и ученых с привлечением по конкретным вопросам еще около двухсот специалистов. Обсуждаются преемственность плана ГОЭЛРО и развитие энергетической политики бывшего СССР и нынешней России. План ГОЭЛРО был комплексным техническим, финансовым и социально ориентированным планом качественного возрождения страны. Однако ее энергетическая политика со временем все меньше представлялась социально ориентированной государственной политикой, становясь все больше отраслевым набором документов. Между тем вследствие цифровизации и интеллектуализации экономики и социальной сферы социально ориентированный характер энергетики как инфраструктурной отрасли приобретает все большее значение. Приводятся основные положения комплексно-энергетического метода, который был методической основой разработки плана ГОЭЛРО. Рассматриваются предпосылки и ключевые аспекты методологии системных исследований в энергетике, а также основные вызовы современной энергетики.

### Введение

Государственная комиссия по электрификации России (ГОЭЛРО) начала свою работу в феврале 1920 года в труднейших условиях незаключившегося периода иностранной интервенции и гражданской войны в нашей стране. Как писал Г.М. Кржижановский, руководитель Государствен-

ной комиссии ГОЭЛРО, в предисловии ко второму изданию в 1955 году Доклада Государственной комиссии VIII Съезду Советов, «в этих условиях работники ГОЭЛРО создавали свой коллективный научный труд, содержащий в себе план возрождения и переустройства народного хозяйства Советской России на новых началах. Это был первый опыт разработки целостного, единого государственного хозяйственного плана, рассчитанного на перспективу в 10–15 лет. Программа электростроительства, разработанная в плане ГОЭЛРО на 10–15 лет, по масштабам 1955 года представляется, конечно, весьма скромной. Было запроектировано три десятка электрических станций общей мощностью в 1,5 млн кВт, что вместе с имею-

*Воропай Николай Иванович*, научный руководитель ИСЭМ СО РАН, член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор; Scopus Author ID: 57190430373; voropai@isem.irk.ru.

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

© Воропай Н.И., Стенников В.А., 2020

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



шейся тогда налицо мощностью электростанций в 250 тыс. кВт составило бы всего 1750 тыс. кВт. Но стоит только припомнить громадную хозяйственную разруху, в которой страна находилась в 1920 году, чтобы дать себе ясный отчет о том, насколько выдвинутый ГОЭЛРО план электростроительства по тогдашним ресурсам был дерзостно смелым. В самом деле, планом ГОЭЛРО предусмотрено было увеличение мощности районных электростанций почти в 10 раз против уровня 1913 года» [1].

«Единственный путь для выхода из хозяйственной разрухи, – подчеркивалось в плане ГОЭЛРО, – это подъем в возможно более короткий срок производительности народного труда с расходом минимума трудовых единиц и материальных ресурсов страны, что может быть обеспечено наиболее надежным способом на базе электрификации народного хозяйства» [1].

В предисловии к своему труду, трезво оценивая его, разработчики ГОЭЛРО писали: «За нами придут другие люди, которые в более спокойное время с более совершенным запасом сил и средств смогут продолжить наш научный анализ, исправить наши ошибки и развернуть более широкие перспективы». Между тем, несмотря на эту скромную самооценку, можно лишь поражаться высокому уровню организации детальной работы над планом, при которой Государственной Комиссии ГОЭЛРО в составе двадцати высококвалифицированных инженеров и ученых с привлечением по конкретным вопросам еще около двухсот специалистов удалось за период меньше года (с февраля по декабрь 1920 года) подготовить очень подробный план восстановления и комплексного развития народного хозяйства разоренной страны. На базе глубокой электрификации планировались коренная перестройка и развитие промышленности, транспорта, сельского хозяйства. Некоторые предложения казались фантастическими и оказались нереализованными (например, электрический плуг), но это никак не умаляет значение плана ГОЭЛРО в целом. В результате его реализации и интенсивного развития уже к середине 1930-х годов страна имела достаточно развитый индустриальный задел, продолжая ускоренное промышленное развитие [1; 2].

### 1. Значение и преемственность плана ГОЭЛРО

План ГОЭЛРО был одобрен в декабре 1920 года VIII Всероссийским съездом Советов. Но этот документ не был простой политической

декларацией. Вслед за политическим одобрением съездом Советов план ГОЭЛРО в октябре 1921 года был детально рассмотрен на VIII Электротехническом съезде, а в декабре 1921 года – принят постановлением Совета народных комиссаров и утвержден 9-м Всероссийским съездом Советов. Это придало плану необходимую силу закона.

Такое внимание руководства страны к плану ГОЭЛРО было обусловлено тем, что это был «первый государственный план восстановления и реконструкции народного хозяйства Советской России на высшей технической основе», писал позже Г.М. Кржижановский. В то время именно электрификация была принципиально новым фундаментом, обеспечивающим переход страны на рельсы индустриализации и коллективизации как основы передовой для того времени системы хозяйствования. В отличие от «плана» Троцкого (тезисы 1919 года) «хозяйственного возрождения России на основе массового применения к обломкам довоенной промышленности труда неквалифицированной крестьянско-рабочей массы (трудармии)» [2] план ГОЭЛРО был комплексным техническим, финансовым и социально ориентированным планом качественного возрождения России.

Сейчас важно проследить преемственность и развитие энергетической политики бывшего СССР и нынешней России, которая со временем все меньше представлялась социально ориентированной государственной политикой, становясь все больше отраслевым набором документов. Нет, энергетика не утратила свою фундаментальную роль в социально-экономическом развитии страны. Наоборот, за последние годы существенно возросла доля топливно-энергетического комплекса в формировании макроэкономических показателей – бюджета страны, экспорта и внутреннего валового продукта. Но при всем этом за «лесом» общегосударственных цифр перестали просматриваться «деревья» показателей, определяющих блага конкретному человеку. А между тем социально ориентированный характер энергетики как инфраструктурной отрасли экономики приобретает все большее значение в качестве современной парадигмы развития и функционирования топливно-энергетического комплекса и составляющих его систем энергетики. Актуализации этой парадигмы способствуют цифровизация и интеллектализация отраслей экономики и социальной сферы, существенно повышая требования к надежности энергоснабжения потребителей и каче-

ству поставляемой им энергии. Однако реально современные энергетические стратегии, утвержденные Правительством Российской Федерации, как и ранее принятые энергетические программы СССР, не стали общенациональным достоянием, как это было в отношении плана ГОЭЛРО [2; 3].

## 2. Комплексно-энергетический метод

Как известно, прогнозируемые показатели плана ГОЭЛРО были перевыполнены, причем за более короткий период времени. Немаловажным фактором этого успеха стал уникальный для того времени методический аппарат, основу которого составил комплексно-энергетический метод, разработанный Г.М. Кржижановским и его научной школой. Основные составляющие комплексно-энергетического метода заключаются в следующем [1–4]:

- из всего многообразия плановых задач внимание сконцентрировано на одной, решение которой обещало наибольший экономический эффект и позволяло объединить все звенья экономической цепи, а именно на задаче электрификации страны;

- в отношении конечной цели сформулированы конкретные уровни ее достижения – программы А и Б;

- введен критерий экономической эффективности при формировании и реализации названных программ: «...с минимумом затрат, с наиболее точным учетом расходуемой энергии... оплодотворять ею все подразделения народного хозяйства»;

- тщательно разработан комплекс мероприятий по реконструкции производства на базе электрификации, по развитию отраслей экономики и внешних экономических связей, требуемых для реализации намеченных программ.

Фактически суть этого метода состоит в рассмотрении энергетики как единого целого – «...от источников энергетических ресурсов до приемников энергии включительно» [4]. Для обеспечения пропорциональности развития энергетики использовалась достаточно сложная система таблиц, охватывающих основные звенья энергетического хозяйства и разные уровни иерархии – от энергетических балансов установок и предприятий до топливно-энергетических балансов регионов и страны в целом.

Вторым важным элементом комплексно-энергетического метода послужила разработанная в тот же период методика экономического сравнения вариантов решений, позволяющая обеспечить если не оптимальность, то по крайней мере

рациональность развития энергетики. Эта методика давала, во-первых, системные правила приведения вариантов к сопоставимому виду посредством применения категории замыкающего объекта. Во-вторых, она регламентировала соизмерение с экономических позиций единовременных (капитальных) и текущих издержек – посредством нормативов сначала срока окупаемости, а затем коэффициента эффективности капиталовложений. Позднее эта методика была развита в направлении учета разновременных затрат с введением нормативного коэффициента реновации (приведения затрат во времени) [5].

В описанном виде комплексно-энергетический подход на базе балансового метода и с использованием методов экономического сравнения вариантов служил мощным средством системного анализа развития и функционирования энергетики в течение всего периода некомпьютерной обработки информации. Для развития комплексно-энергетического подхода и координации комплексных исследований энергетики в 1930 году в Москве был создан Энергетический институт (ЭНИИ) Академии наук СССР, организатором и бессменным директором которого до середины 1950-х годов являлся Г.М. Кржижановский. С конца 1950-х годов – ЭНИИ имени Г.М. Кржижановского. Кроме того, для выполнения конкретных проектных работ по развитию энергетики начиная с 1930-х годов начала создаваться сеть проектных институтов – «Энергосетьпроект», «Теплоэнергопроект», «Гидроэнергопроект» и ряд других.

С 1942 года в ЭНИИ АН СССР работал последователь научной школы Г.М. Кржижановского Л.А. Мелентьев, до 1945 года – в Казани, занимаясь улучшением теплоснабжения ряда заводов, выпускавших вооружение. После войны, продолжая работу в Москве (в ЭНИИ АН СССР) и Ленинграде (в Ленинградской лаборатории ЭНИИ, которую Л.А. Мелентьев помогал создавать и возглавил в конце 1950-х годов), он принимал участие в разработке предложений по развитию энергетики Урала и Сибири, восстановлению энергетики Донбасса. Работая в команде Г.М. Кржижановского, Л.А. Мелентьев внес свой вклад в развитие комплексно-энергетического подхода [3–5].

## 3. Системные исследования в энергетике

В 1960 году Л.А. Мелентьев назначен организатором и первым директором Сибирского энергетического института Сибирского отделения

АН СССР (с 1997 года – Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева – ИСЭМ – СО РАН) в Иркутске. Институт был создан как комплексный и междисциплинарный. С учетом развития комплексно-энергетического подхода Г.М. Кржижановского и на базе исследований института к концу 1970-х годов Л.А. Мелентьев сформулировал новое научное направление – системные исследования в энергетике, основные положения которого сформулированы в его одноименной книге, претерпевшей два издания – в 1979 и 1983 годах. Объективными предпосылками системных исследований в энергетике являются [6; 7]:

– развитие энергетики и создание к последней четверти 20-го столетия территориально распределенных больших систем энергетики (электроэнергетических, газоснабжающих, нефте- и нефтепродуктоснабжающих, теплоснабжающих и др.) и топливно-энергетического комплекса страны;

– разработка и развитие Г.М. Кржижановским и его учениками комплексно-энергетического метода и его использование, начиная с плана ГОЭЛРО;

– применение в качестве методической основы системных исследований в энергетике фундаментальных понятий материалистической диалектики и прежде всего понятий единства, целостности и развития;

– использование базовых положений и принципов общих системных исследований и системного анализа;

– бурное развитие вычислительной техники, методов математического моделирования и оптимизации во второй половине 20-го столетия.

Таким образом, сложились объективные предпосылки формирования методологии системных исследований в энергетике, однако только Л.А. Мелентьеву на основе его громадного опыта и интуиции суждено было их теоретически обобщить и существенно развить до цельной методологии, открывшей новую страницу в энергетической науке.

В конце 1970-х годов по инициативе Л.А. Мелентьева в Институте высоких температур АН СССР создан Отдел комплексных проблем энергетики, в последующем послуживший базой для организации Института энергетических исследований (ИНЭИ) АН СССР, сейчас – ИНЭИ РАН, занявшего свою нишу в разработке методологии системных исследований в энергетике. В расширяющихся системных исследованиях в энергетике участвовали и продолжают работать другие

институты АН СССР, в последующем Российской академии наук, а также отраслевые научно-исследовательские организации и вузы.

Методологические основы системных исследований в энергетике, сформулированные Л.А. Мелентьевым в его книге, включают следующие базовые положения:

1) непосредственное описание (в виде соответствующих математических моделей) и учет в исследованиях известных (познанных) причинно-следственных связей (свойств) рассматриваемой системы или явления;

2) структуризация исследуемой проблемы в виде иерархии подпроблем и соответствующей иерархии моделей с установлением четких взаимосвязей между ними;

3) необходимость создания достаточно полной и унифицированной (методически совместимой) информационной базы, также упорядоченной по иерархическому принципу;

4) разработка соответствующих методов обоснования решений в условиях неопределенности;

5) возможность благодаря «проигрыванию» на компьютере вариантов принимаемого решения органичной интеграции опыта специалиста и возможностей компьютера.

Конечно, за время, прошедшее с конца 1970-х годов, приведенные базовые положения методологии системных исследований в энергетике несколько видоизменились в некоторых деталях, были развиты и дополнены с учетом новых факторов и условий, но принципиально их квинт-эссенция осталась прежней.

В США и других странах для обоснования развития электроэнергетики был разработан и активно использовался во второй половине XX века подход, аналогичный системным исследованиям в энергетике и названный интегрированным планированием ресурсов [8].

#### 4. Современные вызовы в энергетике

Прошло 100 лет после принятия плана ГОЭЛРО. Что же мы имеем в настоящее время? Масштабы энергетики страны несоизмеримо увеличились по сравнению с той энергетикой, о которой мечтали разработчики плана ГОЭЛРО. Сейчас немисливо себе представить, что где-то есть уголки, где люди живут при свечах и керосиновых лампах. Мы привыкли и принимаем как должное то, что у нас в розетке всегда есть электро-

энергия, отопительные батареи умеренно горячие и их даже можно регулировать. За прошедшие 100 лет энергетика изменилась совершенно радикальным образом. Сформированы крупные государственные, межгосударственные и межконтинентальные электроэнергетические, газоснабжающие и нефтеснабжающие системы, более локальные, но не менее масштабные системы теплоснабжения городов и городских агломераций. Радикально изменились и стали более эффективными и разнообразными технологии производства, передачи, распределения, хранения и потребления энергии.

В результате либерализации и дерегулирования систем энергетики методология системных исследований в энергетике была незаслуженно забыта лицами, принимающими решения. И на уровне энергетических компаний, и при рассмотрении отраслевых и межотраслевых проблем развития энергетики достаточно часто у нас в стране выпускаемые материалы включают бессистемный набор предлагаемых мероприятий. Между тем методические принципы системных исследований в энергетике оказались достаточно гибкими и применимыми к современным либерализованным и дерегулированным системам энергетики, а также к будущим системам энергетики, претерпевающим радикальные изменения их структуры и свойств под влиянием инновационных энергетических и информационно-коммуникационных технологий, цифровизации и интеллектуализации этих систем [9].

## Заключение

Учиться у наших предшественников-энергетиков, разработавших и осуществивших план ГОЭЛРО, нужно, но не букве и цифре долгосрочного планирования, а органичной комплексности и сбалансированности всех аспектов подхода к той или иной проблеме прогнозирования. Системный подход и системный анализ долгосрочного развития энергетики, трансформируясь в деталях под влиянием новых факторов структурного, технологического, институционального характера, на всех этапах формирования и развития систем энергетики оставался эффективной методологией обоснования развития этой важной инфраструктурной

отрасли экономики. В настоящее время с учетом отмеченной трансформации систем энергетики назрела необходимость систематического применения модернизированной системной методологии обоснования соответствующих перспективных решений и использования такого обновленного комплексного подхода при формировании документов, определяющих облик будущей энергетики.

## Список литературы

1. Энергетика России: 1920–2020 гг.: в 4 т. Т. 1. План ГОЭЛРО. М.: Энергия, 2006. 1067 с.
2. Бушуев В.В. От плана ГОЭЛРО – к Энергетической стратегии России // Инновационная электроэнергетика – 2.0 / отв. ред. В.М. Батенин, В.В. Бушуев, Н.И. Воропай. М.: Энергия, 2017. С. 11–18.
3. Бушуев В.В., Воропай Н.И. План ГОЭЛРО: итоги и уроки // Энергетическая политика. 2019. № 4 (142). С. 30–39.
4. Кржижановский Г.М., Вейц В.И., Русаковский В.А. Топливо-энергетический баланс // Вестник статистики. 1932. № 7. С. 1–8.
5. Макаров А.А., Мелентьев Л.А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. М.: Наука, 1973. 256 с.
6. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития. М.: Наука, 1979. 456 с.
7. Мелентьев Л.А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. М.: Высшая школа, 1982. 338 с.
8. Neelakanta P.S., Arsali M.H. Integrated resource planning using segmentation method based on dynamic programming // IEEE Transactions on Power System. 1999. Vol. 14. No. 1. Pp. 375–385.
9. Voropai N.I. Electric power system transformations: a review of main prospects and challenges // Energies. 2020. Vol. 13. No. 21. 5639. <https://doi.org/10.3390/en13215639>

## Для цитирования

Воропай Н.И., Стенников В.А. Системная методология исследований энергетики: к 100-летию плана ГОЭЛРО // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 238–243. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-238-243>

## System methodology of energy research: for the 100<sup>th</sup> anniversary of the State Electrification Plan of Russia

Nikolai I. Voropai, Valery A. Stennikov

Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
130 Lermontova St, Irkutsk, 664033, Russian Federation

### Article history:

Received: October 14, 2020

Revised: December 1, 2020

Accepted: December 11, 2020

### Keywords:

State Electrification Plan of Russia, GOELRO plan, comprehensive energy method, energy system research methodology

*Abstract.* The conditions of State Electrification Plan of Russia (GOELRO plan) preparation as common unified state economic plan are under consideration. Plan was prepared during the pressed period less one year since February to December of the 1920 by State Commission GOELRO including twenty very qualified engineers and scientists and involving time by time additionally about two hundred specialists. A relation of GOELRO plan and development of energy policy of former USSR and current Russia is discussed. GOELRO plan was the comprehensive technical, financial and social oriented plan for qualitative restoration of Russia. But later state energy policy lost social oriented sense and now it is formal set of documents inside energy industry. Taking into account digitalization and intellectualization of economics and social sphere the social oriented role of energy sector as infrastructural industry is growing. Basic points of comprehensive energy method are presented. It was the main methodological instrument for preparation of GOELRO plan. Prerequisites and key aspects of energy system research methodology are explained. Modern challenges in current power sector are formulated.

### References

1. Plan GOELRO [GOELRO Plan]. In: *Energetika Rossii: 1920–2020 gg.* [Energetics of Russia: 1920–2020] (vol. 1). Moscow: Energiya Publ.; 2006. (In Russ.)
2. Bushuev VV. From GOELRO Plan – to Energy Strategy of Russia. In: Batenin VM, Bushuev VV, Voropai NI. (eds.) *Innovative Power Industry – 2.0*. Moscow: Energija Publ., 2017. p. 11–18. (In Russ.)
3. Bushuev VV, Voropai NI. GOELRO plan: results and lessons. *Energy Policy*. 2019;4(142):30–39. (In Russ.)
4. Krzizanovsky GM, Veiz VI, Rusakovskiy VA. Fuel and energy balance. *Vestnik Statistiki*. 1932;(7):1–8. (In Russ.)
5. Makarov AA, Melentiev LA. *Methods of study and optimization of energy industry* [Metody issledovaniya i optimizacii energeticheskogo hozyajstva]. Moscow: Nauka Publ.; 1973. (In Russ.)
6. Melentiev LA. *Energy system research. Elements of theory, ways for development* [Sistemnye issledovaniya v energetike. Elementy teorii, napravleniya razvitiya]. Moscow: Nauka Publ.; 1979. (In Russ.)

7. Melentiev LA. *Optimization of development and control of large energy systems* [Optimizaciya razvitiya i upravleniya bol'shikh sistem energetiki]. Moscow: Vysshaja Shkola Publ.; 1982. (In Russ.)

8. Neelakanta PS, Arsali MH. Integrated resource planning using segmentation method based on dynamic programming. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1999; 14(1):375–385.

9. Voropai NI. Electric power system transformations: a review of main prospects and challenges. *Energies*. 2020;13(21):5639. <https://doi.org/10.3390/en13215639>

### For citation

Voropai NI, Stennikov VA. System methodology of energy research: for the 100<sup>th</sup> anniversary of the State Electrification Plan of Russia. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):238–243. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-238-243>

*Nikolai I. Voropai*, academic adviser of the ESI SB RAS, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor; [voropai@isem.irk.ru](mailto:voropai@isem.irk.ru).

*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>.



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-244-253

УДК 620.424.1

Научная статья

## Эффективность использования инверторных энергоустановок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов

И.Я. Редько<sup>а</sup>, А.А. Малозёмов<sup>б</sup>, Г.А. Малозёмов<sup>б</sup>, А.В. Наумов<sup>б</sup>, Д.В. Козьминых<sup>б</sup>

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

<sup>б</sup>Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 454080, Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76

### История статьи:

Поступила в редакцию: 10 декабря 2020 г.

Доработана: 22 января 2021 г.

Принята к публикации: 27 января 2021 г.

### Ключевые слова:

многофункциональный энерготехнологический комплекс, инверторная энергоустановка, двигатель внутреннего сгорания, эффективность, расход топлива, ресурс, выбросы вредных веществ

**Аннотация.** Разработана методика комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторных энергоустановок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов с техническими решениями, направленными на уменьшение негативных последствий функционирования двигателя внутреннего сгорания с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения. Методика включает: синтез оптимального алгоритма управления частотой вращения двигателя, определение режимов функционирования комплекса в условиях эксплуатации, оценку изменения величины расхода топлива и выбросов вредных веществ с отработавшими газами, скорости расходования ресурса при переводе двигателя на режим работы с оптимальной частотой вращения, комплексную технико-экономическую оценку эффективности использования инверторных энергоустановок. На примере инверторной энергоустановки мощностью 100 кВт доказана необходимость применения методики. Выявлено, что работа двигателя с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения и без дополнительных конструктивных мероприятий влечет увеличение скорости накопления повреждений в 1,7–2,1 раза и поэтому экономически нецелесообразна, несмотря на снижение расхода топлива на 1 % и более. Установлено, что снижение степени сжатия при одновременном повышении давления наддува позволяет повысить ресурс двигателя до функционального отказа вследствие накопления повреждений на 43 % и до параметрического отказа вследствие изнашивания на 32 %, при этом затраты на эксплуатацию инверторной энергоустановки снизятся на 3,7 % относительно базовой (без изменений) энергоустановки. Показатели выбросов сажевых частиц уменьшатся примерно в 2 раза, оксидов азота – на 2 %, углеводородов – практически до нуля.

**Редько Иван Яковлевич**, заместитель генерального директора АО «ЭНИИ», д. т. н., профессор; eLIBRARY AuthorID: 420014, Scopus Author ID: 6603047041; redko\_iva@mail.ru.

**Малозёмов Андрей Адиевич**, профессор кафедры колесных и гусеничных машин ЮУрГУ (НИУ); д. т. н., доцент; WOS Research ID: M-5743-2018, Scopus Author ID: 57170613800, eLIBRARY SPIN-код: 6622-7711.

**Малозёмов Георгий Андреевич**, студент факультета математики, механики и компьютерных технологий ЮУрГУ (НИУ); Scopus Author ID: 57170613800.

**Наумов Алексей Владимирович**, начальник учебной части, заместитель начальника кафедры танковых войск ЮУрГУ (НИУ).

**Козьминых Дмитрий Владимирович**, соискатель кафедры колесных и гусеничных машин ЮУрГУ (НИУ).

© Редько И.Я., Малозёмов А.А., Малозёмов Г.А., Наумов А.В., Козьминых Д.В., 2020

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

## Введение

В 2020 году исполняется 100 лет плану ГОЭЛРО, ставшему первым масштабным планом развития экономики СССР. Возглавлял Государственную комиссию по электрификации Г.М. Кржижановский, чьи научные труды легли в основу принципов электрификации страны и чье имя носит Энергетический институт, которому в 2020 году исполнилось 90 лет. План ГОЭЛРО предусматривал постройку 30 электростанций, приближенных к залежам топлива (торф, уголь, горючий сланец) и возобновляемым источникам энергии (реки), для снабжения промышленности электроэнергией в радиусе до 70 км. В настоящее время, несмотря на существование единой энергетической системы, принцип размещения генерирующих мощностей вблизи запасов топлива и местах наличия возобновляемых энергоресурсов остается одним из основополагающих, так как позволяет существенно снизить потери энергии при ее транспортировке к потребителю, особенно это актуально для децентрализованных систем, обеспечивающих энергией около 70 % территории РФ.

В Энергетической стратегии России на период до 2035 года [1] указано, что одним из приоритетов является развитие региональной энергетики с увеличением уровня надежности обеспечения энергоресурсами территорий при опережающем развитии распределенной генерации, экономически эффективном использовании местных источников топлива и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Доктрина энергетической безопасности (утверждена Президентом РФ 29 ноября 2012 года) [2] предусматривает повышение степени самообеспечения энергетическими ресурсами регионов РФ и отдельных потребителей посредством освоения местных видов топлив и развития малой энергетики (в том числе на основе ВИЭ).

Одним из способов решения проблем энергообеспечения удаленных от единой энергосистемы территорий является создание и внедрение многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК) на основе инверторных гибридных энергоустановок, объединяющих двигатель-генератор (ДГ), работающий с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения, зависящей от нагрузки, и ВИЭ [3]. Наличие ВИЭ и работа ДГ с переменной частотой вращения определяют использование преобразователя частоты тока (инвертора) [4], ко-

торый обеспечивает показатели качества электрической энергии, соответствующие требованиям к сетям общего назначения. Внешний вид опытного образца МЭК показан на рис. 1.



**Рис. 1.** Опытный образец МЭК на базе ВЭС «Заполярная» (из архива авторов)

**[Figure 1.** A prototype of a multifunctional energy complex based on the “Zapolyarnaya” wind farm (from the authors' archive)]

Инверторные энергоустановки относительно новое направление в сфере малой энергетики, которое появилось в 90-х годах XX века и начало интенсивно развиваться только в XXI веке [5; 6]. Исследованиями в этой области занимались многие зарубежные (D. Cherus, J.F. Manwell [5], R. Bram, J. Leuchter [4]) и отечественные (С.Г. Обухов, И.А. Плотников [7], Б.В. Лукутин, О.С. Хватов [8]) ученые. При реализации оптимального с точки зрения топливной экономичности алгоритма управления первичным ДВС существенно увеличивается тепловая и механическая нагрузка на детали двигателя, следовательно, снижаются показатели его надежности, изменяются показатели выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Однако при создании инверторных ДГ эти негативные последствия практически не

учитываются. В существующих математических моделях инверторных ДГ, используемых при их создании и конструктивной доводке, ДВС представлен в крайне упрощенном виде (например, описан эмпирическими регрессионными зависимостями), не позволяющим учесть особенности его функционирования и необходимость ограничения тепловой и механической нагруженности двигателя при реализации оптимального алгоритма управления частотой вращения коленчатого вала, обеспечения нормативных значений выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Отсутствует методика комплексной технико-экономической оценки затрат на эксплуатацию инверторных ДГ и МЭК в реальных условиях.

Таким образом, целью исследования является разработка и апробация методики комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторных ДГ в составе МЭК с техническими решениями, направленными на уменьшение негативных последствий функционирования ДВС с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения.

## 1. Методы

Методика комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторных ДГ в составе МЭК основана на математических методах их имитационного моделирования и включает:

- синтез оптимального алгоритма управления частотой вращения первичного ДВС;
- определение режимов функционирования МЭК в условиях эксплуатации;
- оценку изменения величины расхода топлива при переводе инверторной ДГ на режим работы с оптимальной частотой вращения;
- определение изменения скорости расходования ресурса при переводе инверторной ДГ на режим работы с оптимальной частотой вращения;
- оценку изменения величины выбросов вредных веществ с отработавшими газами первичного ДВС при работе с оптимальной частотой вращения;
- комплексную технико-экономическую оценку эффективности использования инверторных ДГ в составе МЭК.

Критериями эффективности и целесообразности использования инверторных ДГ с теми или иными техническими решениями в составе МЭК являются удельный расход топлива и, в отличие

от существующих подходов, ресурс и суммарная стоимость эксплуатации ДГ. Ограничивающие параметры – выбросы вредных веществ с отработавшими газами.

Проиллюстрируем методику на примере инверторного ДГ максимальной мощностью 100 кВт с первичным двигателем – 4ЧН15/20.5. Для минимизации негативных последствий снижения частоты вращения ДГ при уменьшении нагрузки было предложено техническое решение, заключающееся в уменьшении степени сжатия при одновременном увеличении давления наддува. Все расчеты выполнялись для четырех вариантов конструкции ДВС:

- 1) с постоянной частотой вращения и степенью сжатия 14,5 (базовый);
- 2) с постоянной частотой вращения и степенью сжатия 13,5;
- 3) с переменной частотой вращения и степенью сжатия 14,5;
- 4) с переменной частотой вращения и степенью сжатия 13,5.

Для определения изменения скорости расходования ресурса ДВС в зависимости от режима нагружения была использована ранее разработанная методика А.А. Малоземова и А.С. Шикина [9]. Данная методика была упрощена, поскольку:

- накоплением от воздействия переменной частоты вращения коленчатого вала ДВС (ускорений) и высокочастотными теплосменами и базового, и инверторного ДГ можно пренебречь, так как в автономных системах энергообеспечения изменение нагрузки происходит постепенно;
- базовая энергоустановка работает при постоянной частоте вращения, а в случае инверторного ДГ каждой нагрузке соответствует одна оптимальная частота вращения.

Согласно методике, относительная скорость накопления повреждений от  $j$ -го фактора ДВС (по отношению к базовому) [10]

$$K_j = \frac{c_j}{c_j^0}, \quad (1)$$

где символ ' относится к базовому двигателю;  $C$  – условная скорость накопления повреждений:

- от инерционных нагрузок

$$C_n = \sum_1^i (n_i^{2m+1} \cdot f_i), \quad (2)$$

где  $m$  – показатель степени ( $m = 6$  [11]);  $f_i$  – частоты возникновения  $i$ -го режима;  $n_i$  – частота вращения коленчатого вала на  $i$ -ом режиме;

– от газовых сил

$$C_{Pz} = \sum_1^i (P_{zi}^m \cdot n_i \cdot f_i); \quad (3)$$

– от воздействия низкочастотных макротеплосмен

$$C_T = \sum_1^i (C_{Ti}^m \cdot f_i \cdot n_i), \quad (4)$$

$$C_{Ti} = \left( \frac{G_{mi}}{G_{mi \text{ nom}}} \right)^a \cdot \left( \frac{n_{\text{nom}}}{n_i} \cdot \left( \frac{P_{k \text{ nom}}}{P_{ki}} \right)^{0.61} \right)^b, \quad (5)$$

где  $G_m$  – часовой массовый расход топлива;  $a$  и  $b$  – показатели степени, зависящие от рассматриваемой поверхности;  $P_k$  – давление воздуха перед органами впуска;  $\text{nom}$  – номинальный режим;  $P_z$  – максимальное давление газов в цилиндре.

Условная скорость изнашивания [12]

$$C_{\text{изн}} = \sum_1^i (P_m \cdot f_i \cdot n_i), \quad (6)$$

где  $P_m$  – давление механических потерь.

Показатель ресурса ДВС определяется исходя из известного значения ресурса базового двигателя  $R'$ :

$$R = R' / K_{\Sigma}, \quad (7)$$

где  $K_{\Sigma}$  – суммарная относительная скорость накопления повреждений исследуемого ДВС (по отношению к базовому).

В выражении (7) используется значение ресурса ДВС, а не ДГ, так как, согласно действующим нормативно-техническим документам, двигатель определяет ресурс энергоустановки.

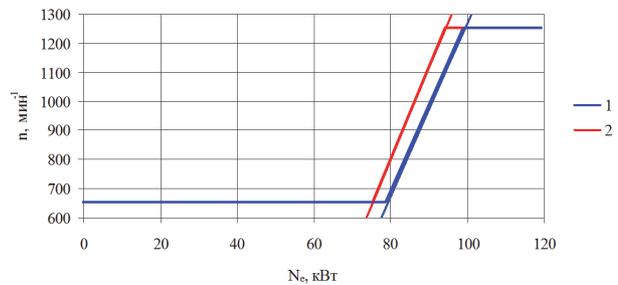
Для расчета остальных показателей ДВС использовалось программное обеспечение Internal Combustion Engine Research and Development (ICE RnD), разработанное А.А. и Г.А. Малоземовыми. Подробное описание программы и математических моделей приведено в [13]. Функциональные возможности программы идентичны коммерческим AVL Boost/Cruise, Ricardo Wave, GT-Suite, LMS Amesim и т. д.

## 2. Результаты и обсуждение

Предполагалось, что мощность инверторного ДГ составляет 100 % от установленной мощности МЭК. Максимальная мощность ДВС определялась с учетом КПД электротехнической части ДГ (принят равным 0,95), нормативного коэффициента реактивной нагрузки  $\cos \varphi = 0,8$ , но без учета возможности 10 %-ной перегрузки. Оптимальный алгоритм управления ДВС, синтезированный с применением методики [14], основан-

ной на поиске минимума функциональной зависимости удельного эффективного расхода топлива инверторного ДГ от нагрузки и частоты вращения первичного ДВС приведен на рис. 2. Из рисунка видно, что в диапазоне нагрузок от 0 до 95–100 кВт целесообразно снижать частоту вращения коленчатого вала ДВС и только при нагрузках, близких к максимальным, частота вращения должна быть номинальной.

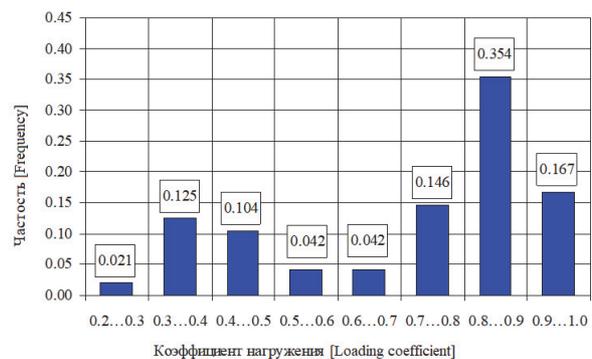
С использованием графика характерных суточных электрических нагрузок «типичной» автономной системы энергоснабжения [15] была построена гистограмма частоты возникновения режимов нагружения энергоустановки без учета ВИЭ (предполагаем предельный случай – энергия ВИЭ отсутствует, рис. 3).



**Рис. 2.** Алгоритм оптимального регулирования частоты вращения дизеля 4CHN15/20.5:

1 – без учета;  
2 – с учетом КПД электротехнической части инверторного ДГ  
**Figure 2.** Algorithm for the diesel engine 4CHN15/20.5 speed optimal control:

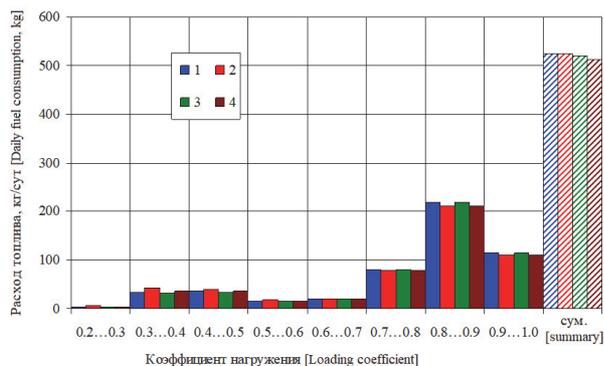
1 – not taking into account; 2 – taking into account the inverter generator set electrical parts efficiency]



**Рис. 3.** Частота возникновения режимов нагружения ДГ  
**Figure 3.** Frequency of generator set loading modes occurrence]

На основании гистограммы частоты и алгоритма оптимального регулирования получены средние частоты вращения коленчатого вала ДВС инверторного ДГ (варианты 3 и 4) в каждом из

диапазонов нагрузки. Для каждого режима определены значения удельного расхода топлива (рис. 4) и рассчитаны интегральные показатели среднесуточных и среднегодовых затрат на дизельное топливо в различных вариантах исполнения (средняя оптовая стоимость в Республике Саха (Якутия) в 2019 году – 55 руб./кг).



**Рис. 4.** Среднесуточный расход топлива ДГ в различных вариантах конструктивного исполнения (1–4)  
**[Figure 4.** Average generator set daily fuel consumption in various design options (1–4)]

Годовые затраты на приобретение топлива для базового варианта ДГ составляют 10,5 млн руб. Снижение степени сжатия с 14,5 до 13,5 единиц при постоянной частоте вращения коленчатого вала не влечет какое-либо заметное изменение суточного и годового расходов топлива. Увеличение расхода на режимах малых и средних нагрузок (менее 80 кВт) компенсируется его уменьшением на режимах, близких к номинальным (до момента стабилизации частоты вращения и включения байпаса инвертора).

Затраты на приобретение топлива для инверторного ДГ с оптимальной частотой вращения коленчатого вала и степенью сжатия 14,5 снизятся по сравнению с базовым вариантом на 103 тыс. руб., или 1 %. Так как мы выполняли расчет для предельного случая – отсутствие ВИЭ, в условиях реального МЭК эффект будет выше. Например, если генерация ВИЭ будет составлять 50 % от установленной мощности МЭК, максимально возможная годовая экономия топлива составит 2,2 %, или 226 тыс. руб.

Снижение степени сжатия до 13,5 при переменной частоте вращения ДГ дополнительно позволяет уменьшить затраты на топливо на 1,5 %. Экономический эффект по сравнению с базовым

вариантом составит 268 тыс. руб., или 2,5 %. Если ВИЭ будет генерировать 50 % мощности от установленной, максимально возможная годовая экономия топлива уменьшится до 1,3 %, или 115 тыс. руб. Обратный эффект влияния мощности ВИЭ по сравнению с базовым вариантом с переменной частотой вращения объясняется тем, что удельный эффективный расход топлива варианта 4 в диапазоне значений коэффициента нагружения 0,3–0,5 выше, чем для варианта 1. Таким образом, снижение степени сжатия при одновременном увеличении давления наддува позволяет снизить затраты на топливо для МЭК на 1–2,5 %.

Заявленный ресурс дизеля 4ЧН15/20.5 – 12 000 ч. Средняя стоимость отечественной энергоустановки бескапотного исполнения 1-й степени автоматизации мощностью 100 кВт в 2019 году – 800 тыс. руб., соответственно, скорость расходования ресурса в стоимостном выражении составит 584 тыс. руб./год при непрерывной эксплуатации и 292 тыс. руб./год при работе совместно с ВИЭ мощностью 100 кВт.

С использованием гистограммы (рис. 3) были определены значения суммарной относительной скорости накопления повреждений и относительной скорости изнашивания дизеля 4ЧН15/20.5 в составе ДГ (без учета ВИЭ) с постоянной и переменной частотами вращения коленчатого вала, степенью сжатия 14,5 и 13,5. Основные результаты расчета представлены в табл. 1 и на рис. 5.

При одновременном уменьшении степени сжатия и работе с оптимальной частотой вращения происходит снижение суммарной скорости накопления повреждений на 30 %. Только при снижении степени сжатия либо только при работе с переменной частотой вращения скорость накопления повреждений увеличивается на 9 и 47 % соответственно. Это вызвано тем, что оба мероприятия влекут рост скорости накопления повреждений в 1,7–2,1 раза вследствие увеличения амплитуды низкочастотных макротеплосмен из-за: а) изменения частоты вращения; б) увеличения диапазона изменения средних температур и давлений рабочего тела в камере сгорания. В варианте 2 это частично компенсируется снижением газовых нагрузок, а в варианте 3 – уменьшением инерционных нагрузок, что является недостаточным. В варианте 4 одновременно снижаются как инерционные нагрузки, так и газовые силы, что компенсирует рост скорости накопления повреждений из-за макротеплосмен.

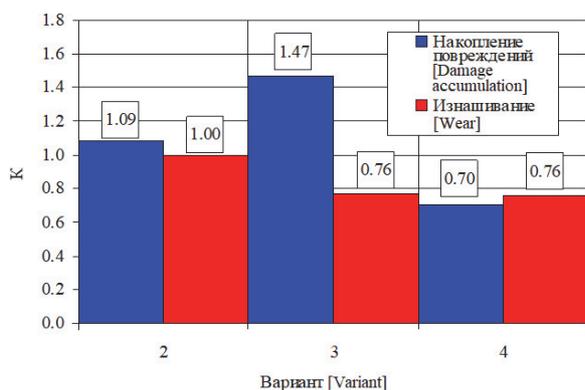
Расчет относительной скорости накопления повреждений был выполнен для трех основных деталей: гильзы и головки цилиндра и поршня. В наибольшей степени (на 42 %) уменьшается суммарная скорость накопления повреждений поршня, для головки цилиндра эта ве-

личина составляет 40 %, для гильзы – 30 %. Значит, лимитирующей ресурс деталью является гильза. В случае совместной работы с ВИЭ такой же мощности (100 кВт) в составе МЭК суммарная скорость накопления повреждений снижается на 38 %.

Таблица 1

**Относительная скорость накопления повреждений и изнашивания дизеля 4СН15/20.5 в составе энергоустановки**  
[Table 1. Relative rate of damage accumulation and wear of a 4СН15/20.5 diesel engine as part of a generator set]

Влияющий фактор [Influencing factor]	Вариант [Variant]			
	1	2	3	4
Инерционные нагрузки [Inertial loads]	1,000	1,000	0,607	0,607
Газовые силы [Gas forces]	1,000	0,518	1,171	0,567
Макротеплосмены [Macro heat shifts]:				
– гильза [liner]	1,000	2,095	2,066	2,033
– головка цилиндра [cylinder head]	1,000	1,885	1,770	1,757
– поршень [piston]	1,000	1,822	1,689	1,679
Суммарные повреждающие нагрузки [Total damaging loads]:				
– без ВЭУ [without wind turbine]	1,000	1,086	1,468	0,700
– с ВЭУ [with wind turbine]	1,000	1,853	1,333	0,619
Изнашивание [Wear]	1,000	0,996	0,763	0,759



**Рис. 5.** Суммарная относительная скорость накопления повреждений и относительная скорость изнашивания дизеля 4СН15/20.5 в составе ДГ в различных вариантах конструктивного исполнения (2–4)  
[Figure 5. Total relative rate of damage accumulation and relative wear rate of the 4СН15/20.5 diesel as part of generator set in various design options (2–4)]

Скорость изнашивания уменьшается во всех рассмотренных вариантах из-за снижения частоты вращения и/или уменьшения газовых сил. Для ва-

рианта 4 ее снижение составляет 24 %. То есть параметрический отказ наступит раньше, чем функциональный, поэтому он является лимитирующим при расчете эффективности использования инверторного ДГ. Таким образом, ожидаемое увеличение ресурса дизеля 4СН15/20.5 (с пониженной до 13,5 степенью сжатия) в составе инверторного ДГ составит 32 %.

Снижение степени сжатия позволяет на режиме номинальной мощности уменьшить концентрацию сажевых частиц в момент открытия выпускного клапана примерно в 2 раза, оксидов азота – на 2 %. Масса несгоревших углеводородов при снижении степени сжатия с 14,5 до 13,5 единиц близка к нулю, в то же время при степени сжатия 14,5 масса оксидов углерода составляет 30 мг (примерно 8 г/(кВт·ч)), что соответствует действующим нормам (6–10 г/(кВт·ч)). Выбросы вредных веществ, в отличие от показателей назначения – расхода топлива и ресурса, являются показателями безопасности, то есть ограничениями. В данном случае мы убедились, что эти ограничения соблюдены.

Таблица 2

**Результаты комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторного ДГ в составе МЭК различного конструктивного исполнения (без учета ВИЭ)**  
 [Table 2. Results of a comprehensive multi-criteria assessment of the inverter generator set efficiency as part of an multifunctional energy technology complex of various designs (excluding renewable energy sources)]

Экономический показатель, тыс. руб./год [Economic indicator, thousand rubles/year]	Вариант ( $\varepsilon$ – степень сжатия, $n$ – частота вращения) [Variant ( $\varepsilon$ – compression ratio, $n$ – engine speed)]			
	1 – базовый [base] ( $\varepsilon = 14,5$ , $n = \text{const}$ )	2 ( $\varepsilon = 13,5$ , $n = \text{const}$ )	3 ( $\varepsilon = 14,5$ , $n = \text{var}$ )	4 ( $\varepsilon = 13,5$ , $n = \text{var}$ )
Затраты на топливо [Fuel costs]	10 531	10 536	10 428	10 263
Изменение (относительно базового варианта) [Change (relative to base variant)]:				
– абсолютное [absolute]	–	+5	–103	–268
– относительное [relative], %	–	+0,05	–0,98	–2,54
Расходование ресурса [Resource consumption]	584	634	857	444
Изменение (относительно базового варианта) [Change (relative to base variant)]:				
– абсолютное [absolute]	–	+50	+273	–140
– относительное [relative], %	–	+8,56	+46,75	–23,97
Итого [Total]	11 115	11 170	11 285	10 707
Изменение «Итого» (относительно базового варианта) [“Total” change (relative to base variant)]:				
– абсолютное [absolute]	–	+55	+170	–408
– относительное [relative], %	–	+0,49	+1,53	+3,67

Необходимо отметить, что для каждого конкретного технического решения может понадобиться проведение дополнительных исследований, выходящих за рамки методики, излагаемой в статье. Например, снижение степени сжатия влечет ухудшение пусковых качеств ДВС, поэтому нужно подтверждение их соответствия требованиям нормативно-технических документов. В табл. 2 представлены основные результаты комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторного ДГ в составе МЭК различного конструктивного исполнения (без учета изменения затрат на текущий ремонт ДВС и других эксплуатационных затрат).

## Заключение

В ходе проведенного исследования разработана и апробирована методика комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторных ДГ в составе МЭК с техническими решениями, направленными на уменьшение негативных последствий функцио-

нирования ДВС с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения

На примере инверторной энергоустановки мощностью 100 кВт с первичным дизелем 4ЧН15/20.5 с применением разработанной методики:

– выявлено, что работа двигателя с оптимальной с точки зрения топливной экономичности частотой вращения и без дополнительных конструктивных мероприятий влечет увеличение скорости накопления повреждений в 1,7–2,1 раза и поэтому экономически нецелесообразна, несмотря на снижение расхода топлива на 1 % и более;

– установлено, что снижение степени сжатия при одновременном повышении давления наддува позволяет повысить ресурс двигателя до функционального отказа вследствие накопления повреждений на 43 % и до параметрического отказа вследствие изнашивания на 32 %, при этом затраты на эксплуатацию инверторного двигатель-генератора снизятся на 3,7 % относительно базовой (без изменений) энергоустановки. Показатели выбросов сажевых частиц

уменьшаться примерно в 2 раза, оксидов азота – на 2 %, углеводов – практически до нуля.

Таким образом, доказана необходимость применения разработанной методики комплексной многокритериальной оценки эффективности использования инверторных ДГ в составе МЭК, позволяющей оценить влияние тех или иных конструктивных изменений на суммарную экономическую и техническую эффективность эксплуатации МЭК.

#### Информация о конфликте интересов

Конфликт интересов отсутствует.

#### Участие авторов

*И.Я. Редько* – автор концепции многофункционального энерготехнологического комплекса. *А.А. Малоземов* – научный руководитель работы. *Г.А. Малоземов* – разработка имитационных моделей и программного обеспечения. *А.В. Наумов* – разработка математических моделей процессов в системах двигателя, проведение расчетов. *Д.В. Козьминых* – разработка математических моделей процессов изнашивания и накопления повреждений.

#### Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года / Министерство энергетики РФ. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 14.12.2020).

2. *Бушуев В.В., Воронай Н.И., Сендеров С.М., Саенко В.В.* О доктрине энергетической безопасности России // Экономика региона. 2012. № 2 (30). С. 40–50. DOI: 10.17059/2012-2-3.

3. *Malozemov A.A., Kukis V.S., Naumov A.V.* Hybrid power system with variable speed diesel engine // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, 2018. Pp. 63–68. <http://dx.doi.org/10.1109/URALCON.2018.8544335>.

4. *Leuchter J., Bauer P., Kurka O.* Configuration for mobile electrical power source // The International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM EUROPE 2004). Nuremberg: PCIM Press, 2004. Vol. 1. Pp. 916–919.

5. *Manwell J.F., Stein W.A., Rogers A., McGowan J.G.* An investigation of variable speed operation of diesel generators in hybrid energy systems // Renewable Energy. 1992. No. 6. Pp. 563–571. [http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481\(92\)90019-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481(92)90019-Y).

6. *Lee J.H., Lee S.H., Sul S.K.* Variable-speed engine generator with supercapacitor: isolated power gene-

ration system and fuel efficiency // IEEE transactions on industry applications. 2009. No. 6. Pp. 2130–2135.

7. *Обухов С.Г., Плотников И.А.* Экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. С. 95–102.

8. *Хватов О.С., Самоявцев И.С., Дарьенков А.Б.* Имитационная модель единой судовой электростанции на базе системы «двигатель внутреннего сгорания – генератор» переменной скорости вращения // Вестник ИГЭУ. 2012. № 2. С. 1–5.

9. *Малоземов А.А., Шикин А.С.* Расчетно-экспериментальная оценка влияния уровня дефорсирования на ресурс дизеля типа В-2 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. 2009. № 24. С. 89–96.

10. *Malozemov A.A., Dooun V.I., Kozminykh D.V.* Theoretical and experimental evaluation of diesel engine derating effect on its life time // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Springer Nature Switzerland AG, 2020. Pp. 55–63. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9\\_7](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_7)

11. *Кудряш А.П.* Надежность и рабочий процесс транспортного дизеля. Киев: Наукова думка, 1981. 136 с.

12. *Sreenath A.K., Venkatesh S.* Experimental studies on the wear of engine components // Wear. 1970. No. 16. Pp. 245–254. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(70\)90248-6](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(70)90248-6).

13. *Malozemov A.A., Bondar V.N., Egorov V.V., Malozemov G.A.* Digital twins technology for internal combustion engines development // Global Smart Industry Conference 2018. Chelyabinsk: IEEE Xplore Digital Library, 2018.

14. *Алешков О.А., Малоземов А.А.* Повышение топливной экономичности многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима первичного дизельного двигателя в его составе // Ползуновский вестник. 2009. № 1/2. С. 199–209.

15. Электротехнический справочник: в 3 т. Т. 3. Производство и распределение электрической энергии / под ред. И.Н. Орлова и др. М.: Энергоатомиздат, 1988.

#### Для цитирования

*Редько И.Я., Малозёмов А.А., Малозёмов Г.А., Наумов А.В., Козьминых Д.В.* Эффективность использования инверторных энергоустановок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 244–253. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-244-253>

## Efficiency of using inverter power plants as part of multifunctional energy technology complexes

Ivan Ya. Redko<sup>a</sup>, Andrey A. Malozemov<sup>b</sup>,  
Georgiy A. Malozemov<sup>b</sup>, Alexey V. Naumov<sup>b</sup>, Dmitry V. Kozminykh<sup>b</sup>

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

<sup>b</sup>South Ural State University (National Research University), 76 Lenina Ave, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

### Article history:

Received: December 10, 2020

Revised: January 22, 2021

Accepted: January 27, 2021

### Keywords:

multifunctional energy technology complex, inverter power plant, internal combustion engine, efficiency, fuel consumption, resource, emissions of harmful substances

**Abstract.** A method has been developed for a comprehensive multi-criteria assessment of the efficiency of using inverter power plants as part of multifunctional energy-technological complexes with technical solutions aimed at reducing the negative consequences of the internal combustion engine operation with an optimal from the point of view of fuel efficiency speed. The method includes: synthesis of the optimal engine speed control algorithm, determination of the complex operating modes under operating conditions, assessment of changes in fuel consumption and harmful substances emissions with exhaust gases and resource consumption rate when the engine is switched to the operating mode with the optimal speed, complex technical and economic assessment of the inverter power plants efficiency. On the example of an inverter power plant with a capacity of 100 kW, the need to apply the method is proved. It was found that the engine operation with the optimal from the point of view of fuel efficiency speed and without additional design measures entails an increase in the damage accumulation rate by 1.7–2.1 times and therefore is economically inexpedient, despite a decrease in fuel consumption by 1% or more. It was found that a decrease in the compression ratio with a simultaneous increase in the boost pressure makes it possible to increase the engine resource up to a functional failure due to damage accumulation by 43% and to a parametric failure due to wear by 32%, while the operating costs of the inverter power plant will decrease by 3.7% relative to the base (no changes) power plants. The emission of soot particles will decrease by about 2 times, nitrogen oxides – by 2%, hydrocarbons – almost to zero.

### Conflict of interest information

No conflict of interest.

### Contribution of authors

*Ivan Ya. Redko* – author of the multifunctional energy technological complex concept. *Andrey A. Malozemov* – scientific supervisor of the work. *Georgiy A. Malozemov* – development of simulation models and software. *Alexey V.*

*Naumov* – development of mathematical models of processes in engine systems, calculations. *Dmitry V. Kozminykh* – development of wear and damage accumulation processes mathematical models.

### References

1. Ministry of Energy of the Russian Federation. *Energy Strategy of Russia for the period up to 2035*. (In Russ.) Available from: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed: 14.12.2020).
2. Bushuev VV, Voropay NI, Senderov SM, Saenko VV. About the energy security doctrine of Russia. *Economy of Region*. 2012;2(30):40–50. <http://dx.doi.org/10.17059/2012-2-3>.
3. Malozemov AA, Kukis VS, Naumov AV. Hybrid power system with variable speed diesel engine. *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*.

*Ivan Ya. Redko*, Deputy General Director of JSC “ENIN”, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY AuthorID: 420014, Scopus Author ID: 6603047041; [redko\\_iya@mail.ru](mailto:redko_iya@mail.ru).

*Andrey A. Malozemov*, Professor of the Wheeled and Tracked Vehicles Department of the SUSU (NRU), Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; WOS Research ID: M-5743-2018, Scopus Author ID: 57170613800, eLIBRARY SPIN-code: 6622-7711.

*Georgiy A. Malozemov*, student of the Mathematics, Mechanics and Computer Technologies Faculty of SUSU (NRU); Scopus Author ID: 57170613800.

*Alexey V. Naumov*, Head of the Educational Unit, Deputy Head of the Tank Troops Department of the SUSU (NRU).

*Dmitry V. Kozminykh*, applicant of the Department of Wheeled and Tracked Vehicles of the SUSU (NRU).

Chelyabinsk; 2018. p. 63–68. <http://dx.doi.org/10.1109/URALCON.2018.8544335>.

4. Leuchter J, Bauer P, Kurka O. Configuration for mobile electrical power source. *The International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM EUROPE 2004)*. 2004;(1):916–919.

5. Manwell JF, Stein WA, Rogers A, McGowan JG. An investigation of variable speed operation of diesel generators in hybrid energy systems. *Renewable Energy*. 1992;(6):563–571. [http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481\(92\)90019-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481(92)90019-Y).

6. Lee JH, Lee SH, Sul SK. Variable-speed engine generator with supercapacitor: isolated power generation system and fuel efficiency. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009;(6):2130–2135.

7. Obukhov SG, Plotnikov IA. Experimental studies of a diesel generator set at variable speed. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2015;326:95–102.

8. Khvatov OS, Samoyavchev IS, Darienkov AB. Simulation model of a unified ship power plant based on the system “internal combustion engine – generator” of variable rotation speed. *Vestnik IGAU*. 2012;(2):1–5.

9. Malozemov AA, Shikin AS. Experiment-calculated estimation of derating level influence upon resource of converted B-2 type diesel engine. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry*. 2009;(24):89–96.

10. Malozemov AA, Dooun VI, Kozminykh DV. Theoretical and experimental evaluation of diesel engine derating effect on its life time. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Springer Nature Switzerland AG; 2020. p. 55–63. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9\\_7](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_7).

11. Kudryash AP. *Nadezhnost i rabochiy protsess transportnogo dizelya [Reliability and working process of transport diesel engine]*. Kiev: Naukova Dumka Publ.; 1981.

12. Sreenath AK, Venkatesh S. Experimental studies on the wear of engine components. *Wear*. 1970;(16):245–254. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(70\)90248-6](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(70)90248-6).

13. Malozemov AA, Bondar VN, Egorov VV, Malozemov GA. Digital twins technology for internal combustion engines development. *Global Smart Industry Conference 2018*. Chelyabinsk: IEEE Xplore Digital Library; 2018.

14. Aleshkov OA, Malozemov AA. Povysheniye toplivnoy ekonomichnosti mnogofunktsional'nogo energo-tekhnologicheskogo kompleksa optimizatsiyey skorostnogo rezhima pervichnogo dizel'nogo dvigatelya v yego sostave [Improving the fuel efficiency of a multifunctional energy technology complex by optimizing the speed mode of the primary diesel engine in its composition]. *Polzunovskiy Vestnik*. 2009;(1/2):199–209.

15. Orlov IN, et al. (eds.) *Elektrotekhnicheskiy spravochnik. T. 3. Proizvodstvo i raspredeleniye elektricheskoy energii [Electrotechnical reference book. Vol. 3. Production and distribution of electrical energy]*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1988.

#### For citation

Redko IYa, Malozemov AA, Malozemov GA, Naumov AV, Kozminykh DV. Efficiency of using inverter power plants as part of multifunctional energy technology complexes *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):244–253. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-244-253>



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-254-259

УДК 537.533:621.314

Научная статья

## Электронные циклотронные преобразователи микроволн в системах беспроводной передачи энергии

Ю.А. Пирогов, Г.М. Казарян, В.Л. Саввин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

### История статьи:

Поступила в редакцию: 12 декабря 2020 г.

Доработана: 23 января 2021 г.

Принята к публикации: 29 января 2021 г.

### Ключевые слова:

микроволны, электронный циклотронный преобразователь, беспроводная передача энергии, солнечные космические электростанции, ректенны

*Аннотация.* Рассмотрена возможность использования специальных электронных циклотронных приборов в качестве эффективных преобразователей электромагнитных волн в постоянный ток в современных СВЧ-системах беспроводной передачи на Землю электрической энергии по микроволновому каналу от солнечных космических электростанций, расположенных на борту геостационарных спутников. Такие преобразователи являются продуктом отечественной разработки, могут иметь КПД преобразования выше 80 %, нечувствительны к перегрузкам и гораздо экономичнее известных полупроводниковых ректенн (выпрямляющих антенн – rectifying antennas). Собираемые из множества отдельных полупроводниковых диодов с барьером Шоттки полупроводниковые ректенны в процессе нелинейного преобразования микроволн генерируют паразитные излучения, формирующие мощный электромагнитный фон, представляющий серьезную помеху устойчивой работе информационных систем специальной и общегражданской связи. К тому же стоимость полупроводниковых ректенн значительно выше, нежели электронно-циклотронных преобразователей при одинаковой входной микроволновой мощности. Ввиду высокой компактности электронных преобразователей они могут устанавливаться на промежуточной спутниковой платформе в стратосфере, принимая энергию Солнца по лазерному лучу с геостационарной орбиты и передавая ее на Землю практически без потерь по СВЧ-каналу. Также перспективны возможности применения электронных циклотронных преобразователей в наземных системах беспроводной передачи энергии. Уже первые электронные циклотронные преобразователи, созданные на предприятии «Торий» по проекту МГУ имени М.В. Ломоносова, имели КПД выше 60 % при входной СВЧ-мощности 10 кВт.

**Пирогов Юрий Андреевич**, профессор кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. ф.-м. н., профессор; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8518-6323>, IstinaresearchID (IRID): 426232; [yuri937@gmail.com](mailto:yuri937@gmail.com).

**Казарян Гоар Мартиросовна**, доцент кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к. ф.-м. н.; IstinaresearchID (IRID): 3656311.

**Саввин Владимир Леонидович**, доцент кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к. ф.-м. н.; IstinaresearchID (IRID): 2523100.

© Пирогов Ю.А., Казарян Г.М., Саввин В.Л., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## Введение

Идея передачи энергии с помощью электромагнитного излучения была впервые высказана выдающимся электротехником Николой Тесла в начале XX века. Развитие радиолокации и интенсивные работы по освоению дециметровых и сантиметровых диапазонов микроволн заложили основу для широкого использования СВЧ-энергетики и вызвали растущий интерес к беспроводной передаче энергии с помощью направленного микроволнового излучения [1–9]. Микроволновый диапазон (2,4–5,8 ГГц) дает возможность существенно уменьшить размеры передающих и приемных антенн и отличается высоким уровнем эффективности устройств генерации и преобразования энергии электромагнитного излучения.

Предложение широкомасштабной микроволновой передачи энергии, вырабатываемой космическими солнечными электростанциями, наземным потребителям принадлежит П. Глезеру [3] и интенсивно прорабатывалось в 70-х годах прошлого столетия. Проблемам солнечных космических электростанций и микроволновой передачи энергии посвящен ряд публикаций в отечественной научной печати [2; 4–7]. В последние годы ряд перспективных проектов микроволновой передачи энергии наземного и космического базирования, рассчитанных на меньшую мощность, разрабатываются в США, Японии и ЕС [8–10].

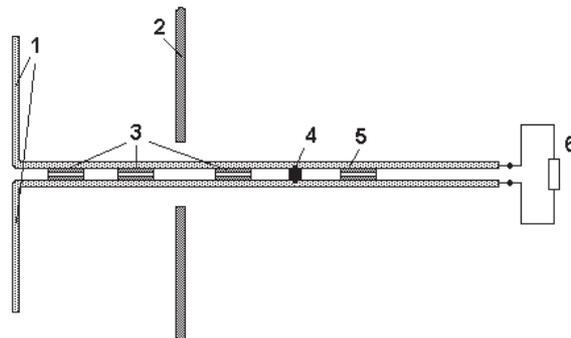
Среди главных проблем создания такого рода микроволновых систем одной из важнейших является разработка наиболее эффективных преобразователей микроволн в постоянный ток на приемном (ректенном) окончании линии передачи энергии. Все зарубежные варианты микроволновых ректенн основаны на применении полупроводниковых выпрямляющих элементов [9], обладающих целым рядом физических и технологических недостатков.

В статье обсуждаются исключаящие такие недостатки предложение российских исследователей использовать в наземных и космических системах передачи энергии специальные отечественной разработки электронные преобразователи микроволн в постоянный ток.

### 1. Обратное преобразование микроволн в постоянный ток

Наиболее распространенным типом преобразователя микроволн в постоянный электрический ток является ректенна с полупроводниковым диодом Шоттки (рис. 1).

Наивысшее значение КПД преобразования ректенны – 91,4 % – было достигнуто в лабораторных условиях при входной мощности микроволн до 10 Вт на единичном экземпляре диода Шоттки для рабочей частоты 2,45 ГГц [7].



**Рис. 1.** Ректенный элемент с диодом Шоттки:  
1 – полуволновой диполь; 2 – отражающая поверхность;  
3 – фильтр нижних частот; 4 – диод Шоттки;  
5 – выходной фильтр; 6 – нагрузка

**Figure 1.** Rectenna element with Schottky diode:  
1 – half-wave dipole; 2 – reflective surface; 3 – low-pass filter;  
4 – Schottky diode; 5 – output filter; 6 – load

На частоте 5,8 ГГц КПД преобразования ректенн с диодами Шоттки достигает 80 % при входной мощности 50 мВт [8].

Плотность мощности падающего излучения может заметно изменяться на апертуре приемного комплекса микроволновой линии передачи (до 10 дБ). Для крупномасштабных проектов солнечной энергетики плотность мощности уменьшается от 230 Вт/м<sup>2</sup> в центре приемного комплекса до 23 Вт/м<sup>2</sup> на краю ректенны (для проекта NASA). При оптимальных значениях плотности диполей (150–200 диполей/м<sup>2</sup>) нагрузка на один диод в центре приемной ректенны будет близка к номинальной мощности диодов Шоттки (1–2 Вт), при которой реализуется максимальный КПД преобразования микроволн в постоянный ток.

Вместе с тем полупроводниковые ректенны обладают целым рядом существенных недостатков. Они не выдерживают высоких уровней СВЧ-мощности и выгорают, из-за низких значений выходного напряжения требуют создания сложных последовательно-параллельных способов формирования ректенных систем для их включения в магистральные электрические цепи. Кроме того, нелинейные характеристики полупроводниковых диодов приводят к получению не только выпрямленного постоянного напряжения, но и паразитных высокочастотных гармоник.

ник, создающих в интеграле мощный фон в окружающей среде, нарушающий работу связных, навигационных и разнообразных диагностических приборов. Альтернативным типом устройства для обратного преобразования микроволн в постоянный ток могут быть различные вакуумные приборы, работающие в обращенном режиме (клистроны, магнетроны и др.). Следует особо выделить циклотронный преобразователь энергии (ЦПЭ) с эффективностью до 83 %, входной мощностью микроволн 10 кВт на частоте 2,45 ГГц и выходным напряжением 15–20 кВ [11–15].

Мощные вакуумные преобразователи с высоким выходным напряжением легче могут быть интегрированы в существующие энергосистемы по сравнению с низковольтными ректеннами, которые придется коммутировать в большое число последовательно-параллельных цепочек.

## 2. Циклотронные преобразователи энергии

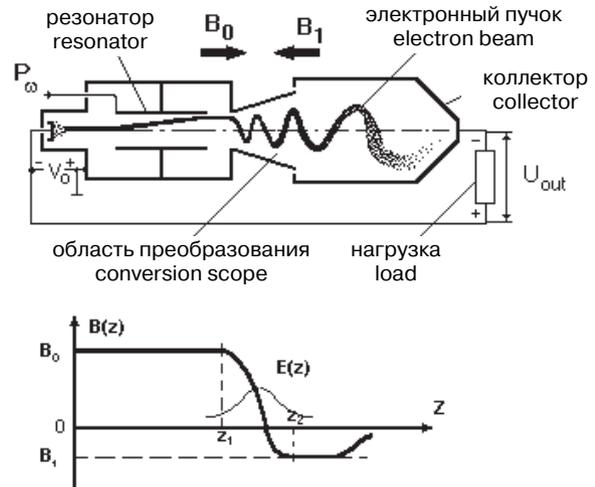
Принцип действия циклотронного преобразователя энергии основан на поперечной модуляции электронного потока. Помимо электронной пушки и внешней магнитной системы, циклотронный преобразователь имеет три основных узла: резонатор, область реверсивного изменения продольного магнитного поля (область преобразования) и коллектор (рис. 2).

Сформированный пушкой электронный поток пронизывает емкостной промежуток резонатора с поперечным высокочастотным ( $\Omega$  – частота микроволн на входе) электрическим полем, где приобретает дополнительную поперечную кинетическую энергию в виде вращательного (циклотронного) движения пучка около оси системы. На выходе резонатора поперечная кинетическая энергия электронного потока значительно превышает величину энергии продольного движения потока в  $W = P_{\omega} / P_0$  раз, где  $P_{\omega}$  – входная СВЧ-мощность,  $P_0$  – начальная мощность пучка.

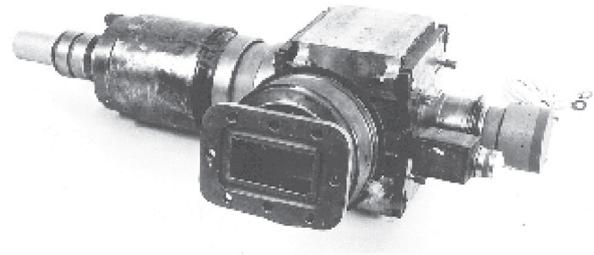
В области реверсивного изменения магнитного поля энергия вращения электронов преобразуется в энергию их поступательного движения. Далее сильно ускоренный электронный поток испытывает торможение, попадая в поле коллектора, где происходит рекуперация энергии электронов. Таким образом, мощность микроволн  $P_{\text{вх}}$ , поступающих в резонатор, преобразуется в мощность постоянного тока в нагрузке.

Создание ЦПЭ было успешно реализовано практически. Уже первый образец преобразова-

теля, сконструированный по проекту МГУ и изготовленный на предприятии НПО «Торий» [11], имел 60%-й КПД преобразования при 10 кВт СВЧ-мощности на входе (рис. 3) с перспективой существенного улучшения достигнутых характеристик.



**Рис. 2.** Схема циклотронного преобразователя энергии и диаграмма распределения магнитного поля на его оси:  $P_{\omega}$  – входная микроволновая мощность;  $V_0$  – ускоряющее напряжение электронной пушки;  $B_0, B_1$  – фокусирующее и реверсивное значение магнитного поля на оси прибора;  $z_2 - z_1$  – протяженность области преобразования;  $E(z)$  – проникающее электростатическое поле коллектора;  $B(z)$  – магнитное поле в сечении  $z$ ;  $U_{\text{out}}$  – выходное напряжение на нагрузке  
**[Figure 2.** Diagram of a cyclotron energy converter and a diagram of the magnetic field distribution on its axis:  $P_{\omega}$  – input microwave power;  $V_0$  – the accelerating voltage of the electron gun;  $B_0, B_1$  – focusing and reversible value of the magnetic field on the axis of the device;  $z_2 - z_1$  – length of the transformation area;  $E(z)$  – the penetrating electrostatic field of the collector;  $B(z)$  – magnetic field in the section  $z$ ;  $U_{\text{out}}$  – output voltage across the load]



**Рис. 3.** Опытный образец циклотронного преобразователя, входная мощность – 10 кВт, КПД – 60 % [11]  
**[Figure 3.** A prototype of a cyclotron converter, input power – 10 kW, efficiency – 60% [11]

Интересно сравнить возможную стоимость эквивалентных по мощности полупроводниковой 10-киловаттной ректенны, которая должна содер-

жать не менее тысячи стодолларовых диодов с барьером Шоттки, с ректенной на одном 10-киловаттном элементе ЦПЭ. Конструктивно такой ЦПЭ при серийном производстве будет стоить примерно столько же, сколько обычный магнетрон сантиметрового диапазона, то есть не более одной тысячи долларов США, что обеспечит стократный выигрыш по стоимости по сравнению с полупроводниковой ректенной. К тому же в отличие от полупроводниковых ректенн использование ЦПЭ полностью исключает возможность выхода преобразователя из строя при любой мощности принимаемого сигнала и генерирования мощной фоновой помехи. С учетом отечественного приоритета в разработках ЦПЭ появляется реальная возможность выгодных поставок российских преобразователей для укомплектования зарубежных космических и наземных систем беспроводной передачи энергии по микроволновому каналу.

## Заключение

Успешной альтернативой полупроводниковым ректеннам в системах беспроводной передачи энергии являются циклотронные преобразователи энергии, заметно превосходящие полупроводниковые ректенны по удельной мощности (до 10–20 кВт) и величине выходного напряжения (до 10–20 кВ), а также по устойчивости к электромагнитным и радиационным воздействиям и перегрузкам.

## Благодарности

Исследования выполнены при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

## Список литературы

1. *Mankins J.* Special report: space-based solar power. Inexhaustible energy from orbit // *Ad Astra*. 2008. Vol. 20. No. 1. Pp. 20–36.
2. *Диденко А.Н.* СВЧ-энергетика: теория и практика. М.: Наука, 2003. 446 с.
3. *Glaser P.E.* Power from the Sun: its future // *Science*. 1968. Vol. 162. No. 3856. Pp. 857–861.

4. *Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л.* Сверхмалошумящие усилители циклотронных волн // *Успехи физических наук*. 1969. Т. 99. Вып. 4. С. 545–572.

5. *Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л.* Проблемы солнечных космических электростанций // *Успехи физических наук*. 1977. Т. 123. Вып. 4. С. 633–655.

6. *Ванке В.А.* Поперечные волны электронного потока в микроволновой электронике // *Успехи физических наук*. 2005. Т. 175. № 9. С. 957–978.

7. *Грихилес В.А., Орлов П.П., Попов Л.Б.* Солнечная космическая энергетика. М.: Наука, 1984. 216 с.

8. *Brown W.* History of power transmission by radio waves // *IEEE Transactions on microwave theory and technique*. 1984. Vol. MTT-32. No. 9. Pp. 1230–1242.

9. *McSpadden J., Fan L., Chang K.* A high conversion efficiency 5.8 GHz rectenna // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 1997. Vol. 2. Pp. 547–550.

10. *Nagatomo M., Sasaki S., Naruo Y., Vanke V.A.* Solar power systems (SPS) investigations at the Institute of Space and Astronautical Science of Japan // *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 1994. Vol. 164. No. 6. Pp. 631–641.

11. *Vanke V., Savvin V.* Cyclotron-wave converter for SPS energy transmission system // *Proc. SPS-91*. Paris, 1991. Pp. 515–520.

12. *Vanke V.A., Matsumoto H., Shinohara N.* High power converter of microwaves into DC // *Journal of Radio Electronics*. 1999. No. 9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep99/1/text.html> (accessed: 11.09. 2020).

13. *Vanke V.A.* Cyclotron and synchronous oscillations and waves of the electron beam. General relations // *Journal of Radio Electronics*. 2002. No. 1. URL: [http://jre.cplire.ru/jre/jan02/2/text\\_e.html](http://jre.cplire.ru/jre/jan02/2/text_e.html) (accessed: 11.09. 2020).

14. Патент России № 2119691. Циклотронный преобразователь СВЧ-энергии / С.В. Быковский и др. 27.10.1999.

15. US. Patent, No. 6,507,152 B2. Microwave / D.C. cyclotron wave converter having decreased magnetic field / H. Matsumoto, V.A. Vanke, N. Shinohara. 14.01.2003.

## Для цитирования

Пирогов Ю.А., Казарян Г.М., Саввин В.Л. Электронные циклотронные преобразователи микроволн в системах беспроводной передачи энергии // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2020. Т. 21. № 4. С. 254–259. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-254-259>

## Electron cyclotron converters of microwaves in wireless power transmission systems

Yury A. Pirogov, Gohar M. Kazaryan, Vladimir L. Savvin

Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

### Article history:

Received: December 12, 2020

Revised: January 23, 2021

Accepted: January 29, 2021

### Keywords:

microwaves, electron cyclotron converter, wireless power transmission, solar space power plants, rectennas

**Abstract.** A proposal to use special electron cyclotron devices as effective converters of electromagnetic waves into direct current in modern microwave systems for wireless transmission of electrical energy to the Earth via a microwave channel from solar space power plants located on board geostationary satellites is considered. Such converters are a product of domestic development, they can have a conversion efficiency of more than 80%, they are insensitive to overloads and are several orders of magnitude more economical than the well-known semiconductor rectennas (rectifying antennas). Semiconductor rectennas, assembled from a multitude of individual semiconductor diodes with a Schottky barrier, in the process of nonlinear conversion of microwaves, generate parasitic radiation that forms a powerful electromagnetic background, which seriously interferes with the stable operation of information systems of special and general civil communications. In addition, the cost of semiconductor rectennas is several orders of magnitude higher than that of electron-cyclotron converters with the same input microwave power. Due to the high compactness of the electronic converters, they can also be installed on an intermediate satellite platform in the stratosphere, receiving the energy of the Sun through a laser beam from a geostationary orbit and transmitting it to the Earth with practically no loss through the microwave channel. The possibilities of using electron cyclotron converters in ground-based systems for wireless energy transmission are also promising. Already the first electron cyclotron converters, created at the “Torii” enterprise according to the project of the Lomonosov Moscow State University, had an efficiency of over 60% at an input microwave power of 10 kW.

### Acknowledgements

This research has been supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow University “Photonic and Quantum Technologies. Digital Medicine”.

### References

1. Mankins J. Special report: Space-based solar power. Inexhaustible energy from orbit. *Ad Astra*. 2008; 20(1):20–36.

2. Didenko AN. *SVCH-energetika: teoriya i praktika [Microwave energetics: theory and practice]*. Moscow: Nauka Publ.; 2003. (In Russ.)

3. Glaser PE. Power from the Sun: its future. *Science*. 1968;162(3856):857–861.

4. Vanke VA, Lopukhin VM, Savvin VL. Sverhmaloshumyashchie usiliteli ciklotronnyh voln [Super-low noise amplifiers of cyclotron waves]. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 1969;99(4):545–572. (In Russ.)

5. Vanke VA, Lopukhin VM, Savvin VL. Problems of the Sun Space Electrical Plants. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 1977;123(4):633–655. (In Russ.)

6. Vanke VA. Transverse electron-beam waves for microwave electronics. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 2005;48(9):917–937.

**Yury A. Pirogov**, Professor of the Photonics and Microwave Physics Department of the Faculty of Physics of the MSU, Dr.Sci.(Phys. & Math.); ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8518-6323>, IstinaresearchID (IRID): 426232; [yupi937@gmail.com](mailto:yupi937@gmail.com).

**Gohar M. Kazaryan**, Associate Professor of the Photonics and Microwave Physics Department of the Faculty of Physics of the MSU, PhD (Phys. & Math.); IstinaresearchID (IRID): 3656311.

**Vladimir L. Savvin**, Associate Professor of the Photonics and Microwave Physics Department of the Faculty of Physics of the MSU, PhD (Phys. & Math.); IstinaresearchID (IRID): 2523100.

7. Grikhiles VA, Orlov PP, Popov LB. *Solnechnaya kosmicheskaya energetika [Sun space energetics]*. Moscow: Nauka Publ.; 1984. (In Russ.)

8. Brown W. History of power transmission by radio waves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*. 1984;MTT-32(9):1230–1242.

9. McSpadden J, Fan L, Chang K. A high conversion efficiency 5.8 GHz rectenna. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 1997;2:547–550.

10. Nagatomo M, Sasaki S, Naruo Y, Vanke VA. Solar power systems (SPS) – investigations at the Institute of Space and Astronautical Science of Japan. *Physics-Uspokhi (Advances in Physical Sciences)*. 1994;164(6):631–641.

11. Vanke V, Savvin V. Cyclotron-wave converter for SPS energy transmission system. *Proc. SPS-91*. Paris; 1991. p. 515–520.

12. Vanke VA, Matsumoto H, Shinohara N. High power converter of microwaves into DC. *Journal of Radioelectronics*. 1999;9. Available from: <http://jre.cplire.ru/jre/sep99/1/text.html> (accessed: 11.09.2020).

13. Vanke VA. Cyclotron and synchronous oscillations and waves of the electron beam. General relations. *Journal of Radio Electronics*. 2002;1. Available from: [http://jre.cplire.ru/jre/jan02/2/text\\_e.html](http://jre.cplire.ru/jre/jan02/2/text_e.html) (accessed: 11.09.2020).

14. Bykovskiy SV, et al. Tsiklotronnyi preobrazovatel' SVCh-energii [*Cyclotron converter of microwave energy*]. Russian Patent No. 119691. 1999, October 27. (In Russ.)

15. Matsumoto H, Vanke VA, Shinohara N. *Micro-wave/D.C. cyclotron wave converter having decreased magnetic field*. US Patent No. 6,507,152 B2. 2003, January 14.

#### For citation

Pirogov YuA, Kazaryan GM, Savvin VL. Electron cyclotron converters of microwaves in wireless power transmission systems *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):254–259. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-254-259>



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270

УДК 631.171

Научная статья

## Электрификация сельскохозяйственных мобильных энергосредств на основе тягово-энергетической концепции развития техники

Ю.Ф. Лачуга<sup>а</sup>, Д.С. Стребков<sup>б</sup>, З.А. Годжаев<sup>б</sup>, И.Я. Редько<sup>с</sup><sup>а</sup>Отделение сельскохозяйственных наук РАН, Российская Федерация, 119334, Москва, Ленинский пр-кт, д. 32А<sup>б</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Российская Федерация, 109428, Москва, 1-й Институтский пр-д, д. 5<sup>с</sup>АО «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского», Российская Федерация, 119071, Москва, Ленинский пр-кт, д. 19

### История статьи:

Поступила в редакцию: 12 декабря 2020 г.

Доработана: 27 января 2021 г.

Принята к публикации: 30 января 2021 г.

### Ключевые слова:

многофункциональные энерготехнологические комплексы, МЭК, тягово-энергетическая концепция, дифференцированный метод, оценка энергетической эффективности, использование альтернативных топлив, конструктивно-компоновочные решения, мобильные МЭК, электропривод рабочих органов, электротрансмиссия ходовой системы, мобильные энергетические средства, МЭС

**Аннотация.** Важной составляющей комплексных интегрированных систем энергоснабжения является электрификация мобильных энергосредств АПК, которая в значительной мере будет влиять на синтез энергетических систем. Основой мобильных энергосредств выступают многофункциональные энерготехнологические комплексы (МЭК) тягово-энергетической концепции с многоканальным распределением энергетических потоков различной физической природы. На основе логического анализа мобильного МЭК построена технологическая схема, состоящая из трех подсистем: 1) факторов внешних условий; 2) общих конструктивно-компоновочных решений; 3) энергетических и эксплуатационных свойств мобильного МЭК. Между этими подсистемами и элементами системы установлены энергетические связи. Разработаны дифференцированный метод оценки энергетической эффективности использования альтернативных топлив и оригинальная математическая модель обобщенного мобильного МЭК, которые позволят уже на этапе проектирования определить тип МЭК, оптимальные конструктивно-компоновочные решения, режимы работы и параметры.

## Введение

Идея электрификации полеводства получила свое развитие в первые годы существования советской власти. Вначале это был электропахот-

ный агрегат канатной тяги. Председатель правительства В.И. Ленин присутствовал на испытаниях электроплуга на Бутырском хуторе в Москве 22 октября 1921 года. В ВИЭСХе эти работы получили развитие под руководством академика П.Н. Листова и В.Г. Стеценко. За 1937–1956 годы был создан ряд электротракторов, зерноуборочных комбайнов, самоходных электрокосилок, передвижных трансформаторных подстанций, мобильных электроагрегатов автономного питания. В 1970–1990 годах проведены работы по оптимизации полевых электрических сетей, созданию электрооборудования для них. Разработаны мобильная малогабаритная электрифицированная техника, мостовые электрифицированные системы, системы централизованного электроснабжения дождевальных машин, электрофизические уста-

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

**Стребков Дмитрий Семенович**, главный научный сотрудник ФНАЦ ВИМ, академик РАН, д. т. н., профессор; eLIBRARY SPIN-код: 2864-5630, Scopus Author ID: 7004652438.

**Годжаев Захид Адыгезалович**, заместитель директора ФНАЦ ВИМ, член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор; eLIBRARY SPIN-код: 1892-8405, Scopus Author ID: 57115314500, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>; fic51@mail.ru.

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

© Лачуга Ю.Ф., Стребков Д.С., Годжаев З.А., Редько И.Я., 2020

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

новки для предпосевной и послеуборочной обработки семян, борьбы с сорняками, стационарные и передвижные комплексы для обмолота и переработки урожая зерновых культур и трав, широкозахватные, многофункциональные мобильные электроагрегаты, освоено их производство. Здесь нужно отметить плодотворное сотрудничество ВИЭСХа с ВИМом [1].

В настоящее время в мире идут процессы трансформации энергетических систем, в результате которых создается их новая архитектура. К основным факторам, обуславливающим трансформацию энергетических систем, относятся значительное уменьшение стоимости генерации энергии и увеличение потребления электроэнергии, включая ветро-солнечные электростанции, распределенную генерацию, электротранспорт, электрификацию мобильных энергосредств АПК, систему управления накоплением энергией, энергообеспечение цифровизации производства. Важным направлением этой трансформации является развитие распределенной генерации на базе различных источников энергии и их интеграция в энергетические системы, в том числе: на базе многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК), использующих все многообразие местных энергетических ресурсов; на основе аэрокосмических МЭК; мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов для АПК.

Для достижения высокого качества и надежности функционирования мобильных МЭК необходимо решить проблемы, связанные, прежде всего, с производительностью, многофункциональностью, энергонасыщенностью, металлоемкостью, многотопливностью, экологической безопасностью, снижением эксплуатационных расходов, оптимизацией выбора состава оборудования на стадии проектирования мобильной техники, режимов работы и конструктивно-компоновочных решений мобильной техники по критериям энергетической, функциональной и экономической эффективности [2; 3].

На основе существующей тяговой концепции создания мобильной техники эти проблемы адекватно решить невозможно. Новая тягово-энергетическая концепция развития мобильной техники позволит полноценно решить проблему разработки и внедрения мобильных МЭК. Применение мобильных МЭК даст возможность не только оптимально распределить сцепную массу и тяговое усилие по полю, но и снять ограничение на мощность и массу комплекса, которые

будут зависеть от его планируемой производительности и размеров поля. Большую роль будут играть активные рабочие органы, имеющие электропривод на базе автономных источников энергии. Это позволит максимально повысить энергонасыщенность комплекса, которая напрямую связана с его производительностью, тягово-сцепными свойствами, металлоемкостью и потерями мощности на самопередвижение [4].

Энергетическая и экологическая эффективность МЭК во многом зависит от показателей ДВС, режимы функционирования которого в составе МЭК имеют эксплуатационные особенности. В отношении оптимизации традиционного рабочего цикла и процессов, его составляющих, при использовании альтернативных, в том числе водородных и смесевых, топлив повышение эффективности научных исследований при создании модификаций поршневых ДВС для МЭК возможно посредством применения имитационного моделирования и цифровых двойников, позволяющих существенно сократить затраты времени и средств на проектирование, проведение натурных испытаний и конструктивно-доводочных работ. Увеличение производительности МЭК достигается за счет реализации их эффективной работы в составе энергетических систем или в автономных режимах [5–9].

Китай и Великобритания объявили о решении ввести запрет на продажу бензиновых и дизельных автомобилей с 2035 года, Исландия, Ирландия, Израиль, Словения и Нидерланды – с 2030 года, Норвегия – с 2025 года. Развитие электротранспорта сдерживается отсутствием инфраструктуры для зарядки и высокоэффективных дешевых аккумуляторов с большим сроком службы.

По прогнозам российских ученых, стоимость аккумуляторных батарей для электротранспорта уменьшится со 165 долл./кВт в 2019 году до 100 долл./кВт в 2024 году.

По прогнозу МЭА, в 2030 году в мире появится 120 млн электротранспортных средств, для которых потребуется более одного миллиона зарядных станций. Для зарядных станций на переменном токе используется силовое оборудование, установленное на электротранспортном средстве. Электрическая мощность оборудования для зарядки электробуса или электротрактора – 30–50 кВт.

Известные бесконтактные методы передачи электрической энергии на транспортное средство с помощью электромагнитной индукции

сопровожаются значительными потерями в линии из-за большого индуктивного сопротивления проводов токам высокой частоты. При высокой частоте в витках обмотки приемника и в кабельной линии возникает ЭДС самоиндукции, направленная встречно по отношению к напряжению питающей тяговой подстанции, что существенно снижает КПД передачи, а применяемые методы борьбы с этими явлениями усложняют и удорожают всю систему передачи электрической энергии. В настоящее время разработаны методы электроснабжения электротранспорта по однопроводниковой волноводной линии на повышенной частоте с использованием однопроводниковой изолированной линии с бесконтактным троллеем.

Резонансный бестроллейный метод электроснабжения электротранспорта основан на физическом принципе, который до настоящего времени не использовался при передаче электрической энергии. В предлагаемом бесконтактном троллее вместо явления электромагнитной индукции и передачи электроэнергии через воздушный трансформатор используется явление электростатической индукции с передачей электроэнергии через воздушный конденсатор. Разработаны экспериментальные модели электромобиля, которые получают энергию от однопроводниковой изолированной кабельной линии, проложенной в дорожном покрытии [10; 11].

Использование однопроводниковой линии с бесконтактным троллеем для электроснабжения электротранспорта не имеет принципиальных ограничений по протяженности линии. Разрабатываемые техника и технология могут быть использованы для электроснабжения любых наземных транспортных средств: электромобилей, электрогрузовиков, электробусов, тракторов, железнодорожного электротранспорта и т. д. Однопроводниковая линия выполняется изолированной, она безопасна в отличие от голого контактного провода при троллейном способе электроснабжения и более надежна благодаря отсутствию коротких замыканий, износа и искрения.

Беспроводное электроснабжение во время движения позволяет снизить в 5–10 раз емкость аккумуляторов и в 2 раза стоимость электромобилей [10; 11].

## Результаты и обсуждение

Широкомасштабное внедрение мобильных multifunctional энерготехнологических комплексов для нужд АПК на основе тягово-энерге-

тической концепции позволит обеспечить надежность, экологическую, энергетическую и экономическую эффективность, конкурентоспособность на мировом уровне, в разы увеличить производительность труда в АПК, создать рабочие места в сельском хозяйстве, повысить плодородие почвы, топливную экономичность, снизить негативное воздействие на окружающую среду, себестоимость сельхозпроизводства, значительно уменьшить металлоемкость мобильных комплексов, снабдить население качественной и безопасной пищевой продукцией. Это позволит совершить прорыв в экономике АПК и создать предпосылки для освоения более 30,0 млн га пахотной земли.

Для достижения данных целей необходимо решить следующие задачи:

1) создать условия для повышения эффективности производства, максимальной занятости населения в сельском хозяйстве за счет:

- вовлечения в оборот в ближайшее десятилетие десятков миллионов га неиспользуемых сельхозугодий;

- конструирования энергетических установок нового поколения;

- создания и реализации тягово-энергетической концепции развития средств механизации, электрификации и цифровизации сельского хозяйства;

- разработки принципиально новых общих конструктивно-компоновочных решений мобильных комплексов, применяемых в АПК;

2) разработать математическую модель обобщенного МЭК, в том числе тягово-энергетической концепции, с множеством каналов передачи энергии к потребителям различной физической природы ( $n$ -каналов на тяговые модули,  $m$ -каналов на активные рабочие органы и  $k$ -каналов на технологии преобразования энергии), которая станет основой для интеллектуализации технологических (производственных) процессов в сельском хозяйстве;

3) обосновать и оптимизировать общие конструктивно-компоновочные решения мобильных МЭК различных типов с использованием водородных и многотопливных поршневых ДВС в зависимости от конкретных условий их эксплуатации по критериям энергетической, технико-экономической эффективности и экологической безопасности. Применение водородных и многотопливных поршневых ДВС даст возможность сформировать новые источники и способы хранения энергии;

4) обеспечить многофункциональность и многоготовливность ДВС, что позволит перейти к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике;

5) усовершенствовать структуру и распределение мощностных потоков и сцепной массы в мобильном МЭК на основе использования его математической модели;

6) разработать комплексную имитационную сопряженную мультидоменную математическую модель поршневого ДВС для МЭК, включающую все его основные механизмы и системы, на основе метода энергетического и массового баланса;

7) определить методы оптимизации функционирования МЭК с поршневым ДВС в его составе для повышения топливной экономичности, снижения тепломеханической нагруженности и выбросов вредных веществ с отработавшими газами в окружающую среду;

8) сформулировать принципы управления и интеллектуализации МЭК;

9) установить основания и способы интеграции МЭК в состав энергетических систем и изолированных энергорайонов для повышения надежности и эффективности их функционирования в интегрированных энергетических системах, в том числе посредством полноценного использования функционала «активного потребителя».

В результате реализации поставленных задач планируется создание и внедрение интеллектуальных мобильных МЭК с применением новей-

ших инновационных технологий и систем интеллектуального управления. Разработанный дифференцированный метод оценки энергетической эффективности использования альтернативных топлив и оригинальная математическая модель обобщенного мобильного МЭК с множеством каналов передачи энергии различной физической природы позволят уже на этапе проектирования определить тип МЭК, оптимальные конструктивно-компоновочные решения (рис. 1 и 2), режимы работы и параметры. Новые технические (конструктивно-компоновочные) решения позволят оптимизировать распределение сцепной массы комплекса между мобильным энергетическим средством и тяговыми модулями, что обеспечит минимальное воздействие двигателей МЭК на почву [6].

Оптимизация рабочего цикла поршневого ДВС, работающего на альтернативных, в том числе водородных, и смесевых топливах, обеспечит повышение его управляемости, топливной экономичности при сохранении мощностных и ресурсных показателей, а также снизит выбросы вредных веществ в окружающую среду. Применение методов имитационного моделирования рабочего цикла и работы систем поршневых ДВС существенно повысит эффективность НИР и ОКР по созданию МЭК за счет использования процедуры оптимизации, повышения точности расчетов, многократного снижения затрат на проведение натурных испытаний.



Рис. 1. Схема возможных вариантов компоновки базовых мобильных платформ на автоматизированном электроприводе

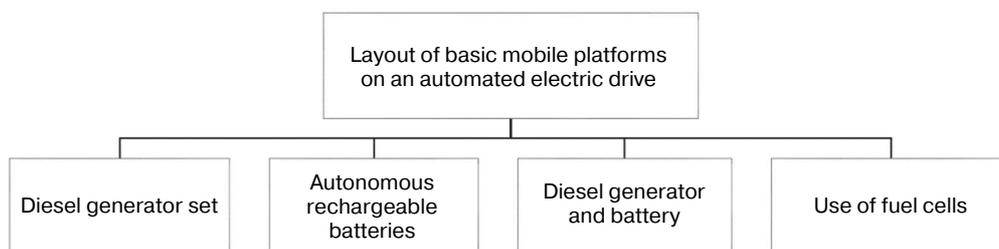
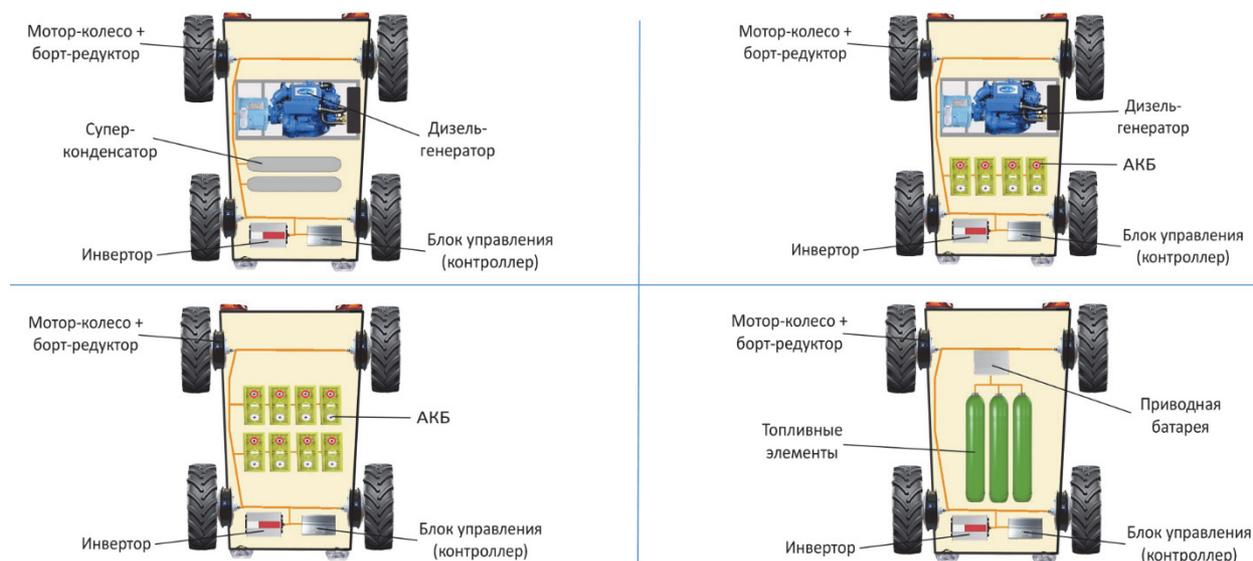
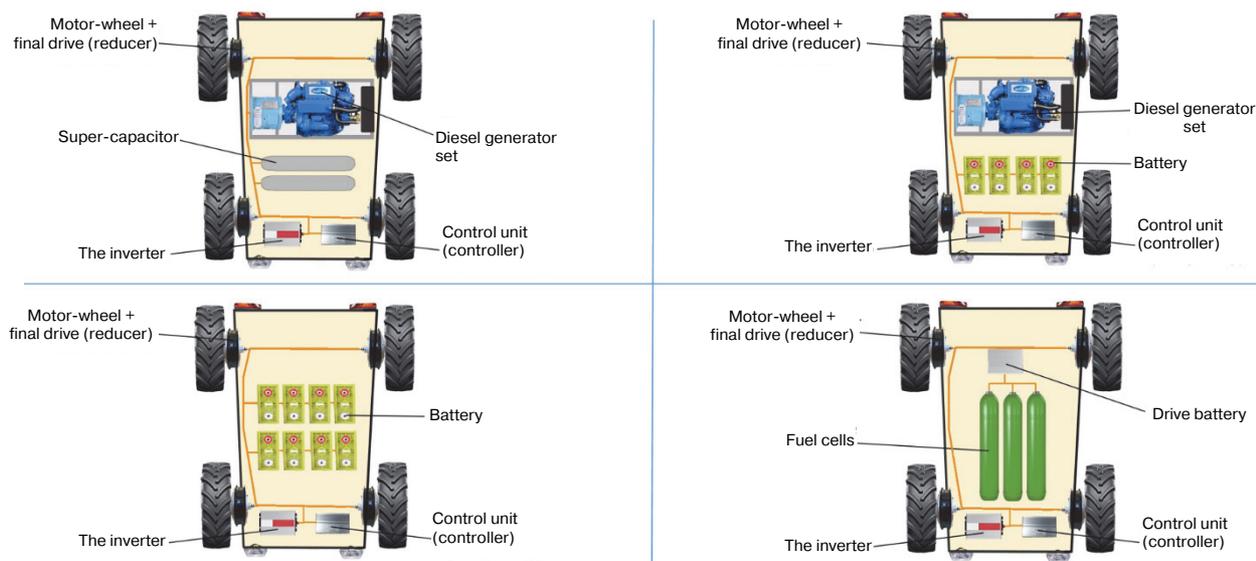


Figure 1. Diagram of possible layout options for basic mobile platforms on an automated electric drive



**Рис. 2.** Характерные компоновки роботизированной базовой мобильной платформы на автоматизированном электроприводе



**Figure 2.** Typical layouts of a robotic base mobile platform on an automated electric drive

Повсеместное внедрение интеллектуальных МЭК в растениеводстве позволит в кратчайшие сроки освоить и ввести в севооборот десятки миллионов пашен в сельском хозяйстве с минимальными энергетическими и экологическими затратами [12; 13]. Разработка эффективных принципов и способов интеграции МЭК даст возможность повысить эффективность и надежность интегрированных энергетических систем и изолированных энергорайонов, а также в полном объеме реа-

лизовать функционал «активного потребителя». Это выражается в следующем:

- значительное повышение производительности и топливной экономичности МЭК;
- снижение экологического воздействия МЭК на окружающую среду за счет утилизации отходов сельхозпроизводства, уменьшения уплотнения почвы и выбросов вредных веществ с обработанными газами;

– повышение энергетической эффективности МЭК в результате оптимизации и совершенствования управления распределением мощности между потребителями (тяга, активные рабочие органы и др.) с целью обеспечения возможности осуществления за один проход нескольких технологических операций;

– с точки зрения топливной экономичности оптимизация режимов функционирования ДВС путем применения автоматизированного электропривода и экологически безопасной ходовой системы;

– повышение энергетической эффективности МЭК за счет реализации возможности их надежной и эффективной работы в составе энергетических систем и изолированных энергорайонов, а том числе посредством полноценного использования функционала «активного потребителя»;

– создание стационарных и мобильных агропонно-фитотронных биотехнологических комплексов вокруг и внутри мегаполисов, которые позволяют круглогодично, не зависимо от сезонности и климатических условий, функционировать и производить высококачественные, экологически безопасные свежие овощи и зеленные культуры.

Для достижения поставленных задач в ближайшее время необходимо разработать:

1) тягово-энергетическую концепцию развития средств электрификации и интеллектуализации для сельского хозяйства, реализация которой обеспечит значительное повышение урожайности сельскохозяйственных культур и производительности труда, снижение уплотнения почвы и удельного расхода топлива, расширение многофункциональности и многотопливности;

2) оригинальную математическую модель на основе дифференцированного метода оценки энергетической эффективности использования различных видов топлив, которая позволит определить тип МЭК, оптимизировать основные конструктивно-компоновочные решения (мощность, эксплуатационная масса, энергонасыщенность, скорость и ширина захвата МЭК), КПД звеньев, каналов передачи энергии в МЭК, оптимальные режимы и параметры МЭК и любого его звена, эксплуатационные свойства, в том числе на этапе проектирования МЭК;

3) систему критериев энергетической эффективности обобщенного МЭК на основе его математической модели, которая позволит обосновать область его эффективного применения;

4) принципы управления, а также принципы и способы интеграции МЭК в состав энергетических систем и изолированных энергорайонов для повышения надежности и эффективности их функционирования;

5) оригинальную комплексную имитационную сопряженную мультидоменную математическую модель поршневого ДВС для МЭК, включающую все его основные механизмы и системы, а при возможности – цифровой двойник ДВС;

6) методы оптимизации рабочих циклов в камере сгорания поршневых ДВС, работающих на альтернативных топливах, с применением трехмерных CFD-моделей, кинетических механизмов окисления альтернативных топлив и методы оптимизации режимов функционирования поршневого ДВС в составе МЭК для повышения топливной экономичности, снижения тепломеханической нагруженности и выбросов вредных веществ с отработавшими газами в окружающую среду.

Научная новизна этой работы будет заключаться в разработке:

– технологической схемы обобщенного МЭК, в том числе тягово-энергетической концепции развития средств механизации и электрификации растениеводства с множеством каналов передачи энергии к потребителям различной физической природы;

– дифференцированного метода оценки энергетической эффективности использования различных видов топлив в многофункциональных энерготехнологических комплексах;

– технологии имитационного моделирования поршневых двигателей внутреннего сгорания в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов, включающей рациональные (с позиции соответствия имитационной модели решаемым практическим задачам) универсальные методы создания имитационных моделей с учетом особенностей конструкции, эксплуатации и целей создания;

– принципов и способов интеграции МЭК в состав энергетических систем и изолированных энергорайонов.

Реализация тягово-энергетической концепции развития мобильной техники предполагает ее переход на более высокий технический уровень. К наиболее высокому уровню развития такой техники можно отнести мобильные МЭК модульного типа. Под многофункциональностью следует понимать возможность подобного комплекса произво-

дить из местных топливно-энергетических ресурсов моторные топлива, электрическую и тепловую энергию. Использование местных энергоресурсов позволит решить многие вопросы энергоснабжения сельских поселений, обеспечения топливной независимости, улучшения социально-экономической и экологической обстановки среды обитания.

Суть новой концепции развития мобильной техники заключается:

- в разнесении сцепной массы по контактной поверхности взаимодействия машины с почвой;
- реализации многофункциональности, много-топливности, модульного построения МЭК;
- разработке и реализации единого обобщенного универсального унифицированного типового проекта, который отвечал бы современным техническим требованиям, предъявляемым к мобильным МЭК;
- согласованности характеристик энергетических, технологических и тяговых модулей, в том числе ДВС, силовых генераторов, активных рабочих органов и электрических трансмиссий ходовых систем модулей, потребителя нагрузок и других модулей.

Применение мобильных МЭК тягово-энергетической концепции обуславливает использование новой конструктивно-компоновочной схемы с многоканальным распределением энергетических потоков различной физической природы. Мобильный МЭК является той основой, которая позволит объединить все типы мобильных энергетических средств (МЭС), предназначенных для производства прежде всего электрической энергии и создания тяги. Это объединение должно выполняться в соответствии с мощностным рядом МЭС с использованием серийно выпускаемых энергоустановок и на основе оптимального согласования технических характеристик всех элементов МЭК по максимуму его полного КПД.

В основу разработки предлагаемой концепции была положена математическая модель обобщенной автономной системы энергоснабжения с множеством каналов передачи энергии различной физической природы к потребителю, что позволит решить следующие задачи:

1) объединить на основе технологической схемы системы генерации и каналы передачи электрической энергии, тепла и механической мощности, а также потребителей электроэнергии, тепла и тяговой мощности в единую автоматизированную систему.

2) количественно и качественно оценить энергетический процесс производства, передачи и потребления электроэнергии, тепла и тяговой мощности в реальном масштабе времени на основе сквозного энергетического анализа;

3) управлять и оптимизировать режимы работы и показатели качества всех элементов мобильного МЭК, работающих на различных видах топлива: системы генерации электроэнергии и тепла; системы передачи и распределения электрической, тепловой и механической энергии; системы потребления электроэнергии, тепла и тяговой мощности в соответствии с критериями энергетической эффективности функционирования мобильного комплекса.

4) совершенствовать структуры и распределение мощностных потоков различной физической природы в распределенных системах генерации на основе использования математических моделей функционирования мобильного МЭК;

5) мониторить, контролировать и улучшать параметры и режимы работы мобильных МЭК в сельских поселениях России, принимая на этой основе оптимальные управленческие решения по повышению эффективности их функционирования, а также обосновывать их выбор на стадии проектирования в зависимости от местных условий эксплуатации энергоустановок.

При разработке математической модели был применен разработанный нами дифференцированный метод оценки энергетической эффективности использования моторных топлив в мобильных МЭК. Его суть заключается в том, что мобильный МЭК может быть представлен в виде технологической схемы обобщенного многофункционального энерготехнологического комплекса со множеством каналов поступления и потребления энергии различной физической природы. В свою очередь, мобильный МЭК – это комплекс, состоящий из:

- МЭС на базе многотопливной электростанции и электротрансмиссии с мотор-колесами;
- технологического средства с набором активных рабочих органов и электронно-ионных технологий;
- тяговых модулей, участвующих в создании тяги МЭК.

При этом технологическая схема мобильного МЭК, построенная на основе логического анализа, состоит из трех подсистем:

- 1) факторов внешних условий;
- 2) общих конструктивно-компоновочных решений;
- 3) энергетических и эксплуатационных свойств мобильного МЭК.

Между этими подсистемами и элементами системы установлены энергетические связи. Следует отметить, что к подсистеме факторов внешних условий относятся, прежде всего, климатические условия – температура, плотность и влажность воздуха, показатели качества энергоресурсов, в том числе теплота сгорания различных топлив, параметры почвы, размеры поля и др.

К подсистеме общих конструктивно-компоновочных решений относятся типы МЭК и энергоустановок, элементы системы – ДВС, генераторы, редукторы, каналы передачи энергии и др.

К подсистеме энергетических и эксплуатационных свойств относятся: показатели качества электрической и тепловой энергии; мощность системы, ДВС, технологического средства, тяговых модулей, системы утилизации тепла, силовых генераторов, электропривода, преобразователей частоты, накопителей энергии; частота вращения ДВС, силовых генераторов, трансмиссий электростанции, ходовых систем; момент ДВС и основных модулей; часовой и удельный расходы топлива ДВС, основных модулей и МЭК в целом; КПД мобильного МЭК, модулей и каналов передачи мощности к потребителям; тяговый КПД МЭК, коэффициент использования мощности МЭК и модулей; коэффициенты распределения мощности МЭК между модулями и потребителями; массогабаритные показатели МЭК и модулей и др.

Особенность разработки данной модели мобильного МЭК заключается в представлении математического описания энергетических связей между элементами таким образом, чтобы оптимизация режимов работы системы происходила по максимуму ее полного КПД в зависимости от коэффициента распределения мощности на входе или на выходе этой системы. При этом оценка энергетической эффективности каждого элемента системы может быть представлена в виде его КПД в зависимости от распределения мощности между каналами ее передачи, режимов работы и его характеристик.

Математическая модель обобщенного мобильного МЭК позволяет:

– рассмотреть с единых позиций технологические и энергетические процессы при работе комплекса любого типа;

– наметить и реализовать пути повышения эффективности мобильных МЭК благодаря обоснованию оптимальных общих конструктивно-компоновочных решений, оптимизации скоростных и силовых режимов;

– дать комплексную оценку последствий принимаемых решений в части формирования эксплуатационных характеристик МЭК и определить качества комплексов и предпочтительные условия их использования.

С ее помощью можно не только разработать методику по определению оптимальных параметров мобильных МЭК, но и создать основу для проектирования интеллектуальных мобильных МЭК. Достоинства такой модели заключаются, прежде всего, в том, что оптимальные параметры мобильных МЭК в целом и элементов системы в частности определяются в автоматическом режиме в реальном масштабе времени при наличии необходимых количественных характеристик внешних условий.

Применение интеллектуальных мобильных МЭК обеспечит:

– экономию топлива за счет оптимизации режимов работы ДВС на 10–20 % в зависимости от нагрузки и ее колебаний;

– повышение коэффициента использования топлива с 0,4–0,45 до 0,8–0,9 за счет комплексной утилизации сбросового тепла ДВС;

– согласованность характеристик энергетических и тяговых модулей, в том числе ДВС, генератора и потребителя нагрузок (повышение КПД ДВС-электростанции на 10–20 %);

– высокое качество электрической и тепловой энергии независимо от колебаний нагрузки;

– высокий коэффициент загрузки ДВС.

## Заключение

Электрификация мобильных энергосредств АПК – важная составляющая комплексных интегрированных систем энергоснабжения. Она в значительной степени может повлиять на синтез энергетических систем.

Решающим фактором в электрификации мобильных процессов в АПК является широкомасштабное внедрение мобильных МЭК в его отраслях.

Применение мобильных МЭК в сельскохозяйственном производстве обуславливает его переход на электропривод рабочих органов и электротрансмиссию ходовой системы МЭС.

Решение задачи по замене традиционных видов силовых приводов на электропривод имеет серьезное технологическое прорывное значение для повышения функциональной и энергетической эффективности мобильных энергетических средств и дальнейшей их роботизации, а также повышения производительности и рентабельности сельскохозяйственного производства.

Применение автоматизированного силового электропривода позволяет повышать энергоэффективность (высокое КПД), экологическую безопасность и маневренность машины, отказываясь от сложных кинематических схем трансмиссий, снижать уровень вибрации и шума, обеспечивать бесступенчатое регулирование скорости агрегата, а также в некоторых вариантах отказаться от ДВС с низким КПД.

#### Список литературы

1. *Стребков Д.С.* История сельской электрификации // История науки и техники. 2019. № 12. С. 20–30.
2. *Самсонов В.А., Лачуга Ю.Ф.* Расчет оптимальных значений мощности и энергонасыщенности сельскохозяйственного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 7. С. 25–31.
3. *Смирнов А.А., Пикалов Н.А.* Определение потребной энергоемкости накопителей электробуса методами имитационного моделирования // Инженерный вестник. 2016. № 12. С. 5.
4. *Разуваев А.В., Редько И.Я.* Энергетическая безопасность объектов // Молодой ученый. 2015. № 23 (103). С. 37–39.
5. *Годжаев З.А., Крюковская Н.С., Сенькевич С.Е.* Разработка стенда для испытания системы управления беспилотным зерноуборочным комбайном // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2020. Т. 20. № 3. С. 5–14. <http://dx.doi.org/10.14529/engin200301>.
6. *Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Алексеев И.С., Лонин С.Э., Ильченко Е.Н.* Разработка математической модели колесного МЭС тягового класса 0,6–0,9 для исследований продольных колебаний при агрега-

тировании с опрыскивателем // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 4 (33). С. 162–169.

7. *Комиев Г.О., Горелов В.А., Бекетов А.А.* Математическая модель движения вездеходного транспортного средства // Журнал автомобильных инженеров. 2008. № 1 (48). С. 50–54.

8. *Gorelov V.A., Komissarov A.I.* Mathematical model of the straight-line rolling tire – rigid terrain irregularities interaction // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1322–1328. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.309>

9. *Volskaia N.S., Zhileykin M.M., Zakharov A.Y.* Mathematical model of rolling an elastic wheel over deformable support base // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 315. Article number 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/315/1/012028>

10. *Стребков Д.С., Шогенов А.Х., Шогенов Ю.Х., Моисеев М.В.* Перспективы развития передачи электроэнергии по однопроводной линии // Техника и оборудование для села. 2019. № 4 (262). С. 33–38. <http://dx.doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-33-38>.

11. *Стребков Д.С.* Резонансные методы электропитания бесконтактного высокочастотного электрического транспорта // Энергетический вестник. 2018. № 24. С. 46–63.

12. *Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х.* Развитие интенсивных машинных технологий, роботизированной техники, эффективного энергообеспечения и цифровых систем в агропромышленном комплексе // Техника и оборудование для села. 2019. № 6 (264). С. 2–9. <http://dx.doi.org/10.33267/2072-9642-2019-6-2-8>.

13. *Годжаев З.А., Измайлов А.Ю., Лачуга Ю.Ф., Шогенов Ю.Х.* Перспективы применения автоматизированных и роботизированных электроприводов на мобильных энергосредствах и рабочих органах сельхозмашин // Известия МГТУ МАМИ. 2018. № 2 (36). С. 41–47.

#### Для цитирования

*Лачуга Ю.Ф., Стребков Д.С., Годжаев З.А., Редько И.Я.* Электрификация сельскохозяйственных мобильных энергосредств на основе тягово-энергетической концепции развития техники // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 260–270. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>

## Electrification of agricultural mobile power facilities based on the traction and energy concept of technology development

Yurii F. Lachuga<sup>a</sup>, Dmitry S. Strebkov<sup>b</sup>, Zakhid A. Godzhaev<sup>b</sup>, Ivan Ya. Redko<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, 32A Leninsky Prospekt, Moscow, 119334, Russian Federation

<sup>b</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5 1-i Institutskii Proezd, Moscow, 109428, Russian Federation

<sup>c</sup>Energy Institute of G.M. Krzhizhanovsky, 19 Leninsky Prospekt, Moscow, 119071, Russian Federation

### Article history:

Received: December 12, 2020

Revised: January 27, 2021

Accepted: January 30, 2021

### Keywords:

multifunctional energy technology complexes, MEC, traction and energy concepts, differentiated method, assessing the energy efficiency, using of alternative fuels, design and layout solutions of mobile MEC, electric drive of working bodies, electric transmission of the running system, mobile energy devices

**Abstract.** An important component of complex integrated energy supply systems is the electrification of mobile power facilities of the agro-industrial complex, which will significantly affect the synthesis of energy systems. The basis of mobile energy facilities are multifunctional energy technology complexes (MEC) of the traction-energy concept with multi-channel distribution of energy flows of different physical nature. Based on the logical analysis of the mobile MEC, a technological scheme consisting of three subsystems is constructed: 1) factors of external conditions; 2) general design and layout solutions; 3) energy and operational properties of the mobile MEC. Energy connections are established between these subsystems and the system elements. A differentiated method for evaluating the energy efficiency of using alternative fuels and an original mathematical model of the generalized mobile MEC have been developed, which will allow determining the type of MEC, optimal design and layout solutions, operating modes and parameters at the design stage.

### References

1. Strebkov DS. History of rural electrification. *History of Science and Engineering*. 2019;(12):20–30. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.25791/intstg.12.2019.1078>.
2. Samsonov VA, Lachuga YuF. Calculation of optimal power and energy saturation of an agricultural tractor. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017;(7): 25–31. (In Russ.)
3. Smirnov AA, Pikalov NA. Opredelenie potrebnostj energoemkosti nakopitelej elektrobusa metodami imitacionnogo modelirovaniya [Determination of the required energy consumption of electric bus storage devices by

simulation methods]. *Engineering Bulletin*. 2016;(12):5. (In Russ.)

4. Razuvaev AV, Redko IYa. Energeticheskaya bezopasnost' ob"ektov [Energy security of facilities]. *Molodoj Uchenyj [Young Scientist]*. 2015;23(103):37–39. (In Russ.)

5. Godzhaev ZA, Kryukovskaya NS, Senkevich SE. Unmanned combine harvester control system test stand development. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry*. 2020;20(3):5–14. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.14529/engin200301>.

6. Gojaev ZA, Senkevich SE, Alekseev IS, Lonin SE, Ilchenko EN. Development of a mathematical model of wheeled MES traction class 0.6–0.9 for studies of longitudinal vibrations when aggregated with a sprayer. *Innovacii v Sel'skom Hozyajstve [Innovations in Agriculture]*. 2019;4(33):162–169. (In Russ.)

7. Kotiev GO, Gorelov VA, Beketov AA. Matematicheskaya model' dvizheniya vezdekhodnogo transportnogo sredstva [Mathematical model of all-terrain vehicle movement]. *Zhurnal Avtomobil'nyh Inzhenerov [Journal of Automotive Engineers]*. 2008;1(48):50–54. (In Russ.)

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

**Dmitry S. Strebkov**, chief research officer of the FSAC VIM, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY SPIN-code: 2864-5630, Scopus Author ID: 7004652438.

**Zakhid A. Godzhaev**, Deputy Director of the FSAC VIM, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY SPIN-code: 1892-8405, Scopus Author ID: 57115314500, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>; fic51@mail.ru.

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

8. Gorelov VA, Komissarov AI. Mathematical model of the straight-line rolling tire – rigid terrain irregularities interaction. *Procedia Engineering*. 2016;150:1322–1328. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.309>

9. Volskaia NS, Zhileykin MM, Zakharov AY. Mathematical model of rolling an elastic wheel over deformable support base. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2018;315:012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/315/1/012028>

10. Strebkov DS, Shogenov AKh, Shogenov YuKh, Moiseev MV. Prospects for the development of single-wire power transmission. *Tekhnika i Oborudovanie dlya Sela [Machinery and Equipment for the Village]*. 2019;4(262):33–38. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-33-38>.

11. Strebkov DS. Rezonansnye metody elektros-nabzheniya beskontaktnogo vysokochastotnogo elektricheskogo transporta [Resonant methods of power supply of contactless high-frequency electric transport]. *Energeticheskij Vestnik [Energy Bulletin]*. 2018;(24): 46–63. (In Russ.)

12. Lachuga YuF, Izmailov AYu, Lobachevsky YP, Shogenov YuH. Development of intensive machine technologies, robotic technology, efficient energy supply and digital systems in the agribusiness. *Tekhnika i Oborudovanie dlya Sela [Machinery and Equipment for the Village]*. 2019;6(264):2–9. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.33267/2072-9642-2019-6-2-8>.

13. 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*. 2018;2(36):41–47.

#### For citation

Lachuga YuF, Strebkov DS, Godzhaev ZA, Redko IYa. Electrification of agricultural mobile power facilities based on the traction and energy concept of technology development. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):260–270. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-271-280

УДК 621.31

Научная статья

## Каскадные солнечные батареи космического и наземного применения

В.М. Андреев

Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
Российская Федерация, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

### История статьи:

Поступила в редакцию: 12 декабря 2020 г.

Доработана: 27 января 2021 г.

Принята к публикации: 30 января 2021 г.

### Ключевые слова:

каскадный солнечный элемент, космические батареи, концентрирование солнечного излучения

**Аннотация.** Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии – наиболее многообещающее направление возобновляемой энергетики. Солнечные батареи обеспечивают энергоснабжением космические аппараты и получают все большее применение на Земле. Основным барьером в увеличении темпов развития наземной солнечной фотоэлектрики является относительно высокая стоимость солнечной электроэнергии. Снизить ее можно путем повышения КПД энергосистем и уменьшения расхода материалов для батарей на основе каскадных солнечных элементов. Результаты разработок каскадных солнечных элементов и модулей для солнечных батарей космического базирования и наземных солнечных фотоэнергоустановок на основе каскадных солнечных элементов с концентраторами солнечного излучения показали, что КПД концентраторных каскадных фотопреобразователей превышает 45 % в наземных условиях – это значительно выше, чем в существующих кремниевых и тонкопленочных солнечных батареях. Увеличение КПД каскадных фотопреобразователей достигнуто за счет «расщепления» солнечного излучения на несколько спектральных интервалов и осуществления более эффективного преобразования энергии фотонов каждого из этих интервалов в определенной части полупроводниковой структуры. Каскадные фотоэлектрические преобразователи имеют наивысшее значение КПД и являются основным элементом современных космических солнечных батарей. Каскадные солнечные элементы обеспечивают высокоэффективное преобразование концентрированного солнечного излучения и снижение площади и стоимости солнечных элементов пропорционально кратности концентрирования. Таким образом, использование разработанных концентраторных фотоэнергоустановок в крупномасштабной наземной солнечной фотоэнергетике весьма перспективно.

## Введение

Развитие электроэнергетики в мире до недавнего времени не встречало принципиальных трудностей. Увеличение производства электро-

энергии происходило в основном за счет увеличения добычи нефти и газа. Однако энергетика оказалась первой крупной отраслью мировой экономики, которая столкнулась с ситуацией видимого истощения своей традиционной сырьевой базы. Сейчас все труднее становится сохранить высокий темп развития энергетики путем использования лишь традиционных ископаемых источников энергии. Кроме того, загрязнение окружающей среды продуктами сгорания ископаемого топлива является причиной ухудшения экологии.

**Андреев Вячеслав Михайлович**, заведующий лабораторией фотоэлектрических преобразователей ФТИ имени А.Ф. Иоффе, член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор; vmandreev@mail.ioffe.ru.

© Андреев В.М., 2020

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

Эти обстоятельства определяют возрастающую роль возобновляемых источников энергии и в первую очередь энергии Солнца. В последние годы в общественном сознании крепнет убежденность в том, что энергетика будущего должна базироваться на крупномасштабном использовании солнечной энергии. Солнце – это огромный, неиссякаемый, абсолютно безопасный источник энергии, в равной степени всем принадлежащий и всем доступный. Ставка на солнечную фотоэнергетику должна рассматриваться как беспримысленный и безальтернативный выбор для человечества.

Солнечные батареи обеспечивают энергоснабжением космические аппараты и получают все большее применение на Земле. В 2019 году в мире были установлены солнечные батареи мощностью 117 ГВт при общей мировой мощности установленных к 2020 году батарей более 634 ГВт.

В России основным производителем наземных кремниевых модулей является завод «Хевел», на котором внедрена технология, разработанная учеными ФТИ имени А.Ф. Иоффе. Объем производства на конец 2020 года составляет 350 МВт солнечных модулей в год.

Решающим для увеличения темпов развития наземной солнечной фотоэнергетики является повышение КПД энергосистем и уменьшение стоимости и расхода материалов для батарей. Солнечные фотоэнергоустановки на основе каскадных фотоэлектрических преобразователей с концентраторами солнечного излучения и системами слежения за солнцем перспективны для снижения стоимости солнечного электричества [1–9].

### **1. Каскадные фотоэлектрические преобразователи для космических солнечных батарей**

Современные космические аппараты предъявляют повышенные требования к эффективности и радиационной стойкости бортовых солнечных батарей (СБ). Наиболее перспективным путем решения этих задач является разработка технологии каскадных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) из арсенида галлия и родственных ему соединений  $A^3B^5$  на германиевых подложках [3; 10].

ФТИ имени А.Ф. Иоффе имеет пятидесятилетний опыт разработок гетероструктурных ФЭП для космических солнечных батарей [1; 3; 5; 11–14]. В ФТИ была впервые в мире разработана технология гетероструктурных  $AlGaAs/GaAs$  ФЭП,

с использованием которой в НПО «Квант» (Москва) было организовано крупномасштабное производство космических солнечных батарей (рис. 1). В последнее время накоплен большой опыт эксплуатации космических солнечных батарей на основе  $AlGaAs/GaAs$ ,  $AlGaInP/GaAs/Ge$  и других гетероструктур на основе соединений  $A^3B^5$  [5; 10]. Показано, что эти СБ обеспечивают увеличение КПД, удельного энергопотребления и радиационной стойкости по сравнению с кремниевыми батареями. В однопереходных ФЭП повышение КПД достигается за счет уменьшения толщины широкозонного «окна» до нескольких сот ангстрем, улучшения параметров материала активной области, создания тыльных потенциальных барьеров и встроенных полей, создания встроенного Брегговского зеркала.

В трехпереходных каскадных ФЭП, выполненных на основе трех последовательно соединенных p–n-переходов в материалах с различной шириной запрещенной зоны, обеспечивается существенное увеличение КПД до значений более 30 % в условиях околоземного космоса (воздушная масса  $AM0$ ). За последние 10 лет накоплен значительный опыт [10; 13; 15–17] по созданию трехпереходных каскадных солнечных элементов методом МОС-гидридной эпитаксии (рис. 2). Дальнейшие перспективы увеличения КПД связываются с разработкой четырехпереходных каскадных ФЭП [10; 18–19]. Получение таких ФЭП возможно только с применением высокопроизводительных прецизионных технологических установок МОС-гидридной эпитаксии и современных постростовых (планарных) технологий.

Несмотря на большую стоимость каскадных космических батарей по сравнению с кремниевыми, использование каскадных ФЭП обеспечивает приблизительно двухкратное снижение суммарных затрат, благодаря увеличению удельного энергопотребления, уменьшению размеров и веса СБ, увеличению ресурса работы СБ и снижению расхода топлива на доставку СБ на орбиту.

Методом МОС-гидридной эпитаксии в ФТИ созданы гетероструктурные ФЭП [3; 5] со встроенным Брегговским зеркалом (рис. 3), состоящим из 20–30 слоев  $GaAs$  и  $AlAs$  толщиной 50–70 нм, в которых существенно улучшена стойкость к воздействию космической радиации, что обеспечивает увеличение срока службы солнечных батарей. Разработаны конструкции каскадных ФЭП с двухсекционными Брегговскими отражателями,

характеризующимися более широким максимумом отражения, что позволило повысить их радиационную стойкость.

Для создания каскадных гетероструктур в едином процессе был применен комплекс технологических разработок, включающий эпитаксиальный рост в системах полупроводников Al-Ga-As и Al-Ga-In-P на германиевой подложке, технологию создания туннельных p-n-переходов, методику согласования фотока в субэлементах каскадной структуры (рис. 4) с одновременным фор-

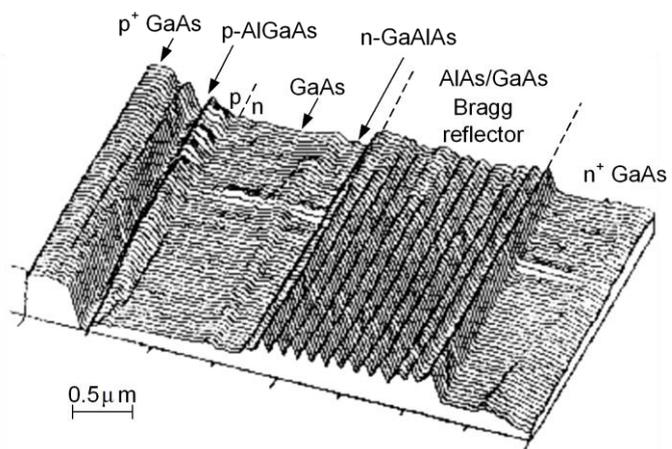
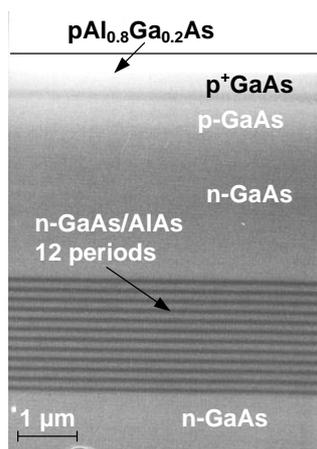
мированием в германиевой подложке дополнительного третьего фотоактивного p-n-перехода. Основными преимуществами замены GaAs-подложки на инородную являются: снижение стоимости ФЭП за счет меньшей стоимости Ge при толщине слоев гетероструктуры порядка 7–10 мкм; улучшение механической прочности ФЭП и, как следствие, возможность уменьшения толщины ФЭП до 120–150 мкм и увеличения удельного (на единицу веса) энергосъема в солнечных батареях (менее 1 кг/м<sup>2</sup>).



**Рис. 1.** Космическая станция «Мир» с AlGaAs/GaAs солнечной батареей, изготовленной в АО «НПП «Квант» по технологии ФТИ имени А.Ф. Иоффе [3]  
**[Figure 1.** Space station "MIR" with AlGaAs/GaAs solar array, fabricated in NPO "Kvant" with using the technology developed at the Ioffe Institute [3]]



**Рис. 2.** MOCVD технология каскадных гетероструктур для фотоэлектрических преобразователей (ФТИ имени А.Ф. Иоффе)  
**[Figure 2.** MOCVD technology of multijunction heterostructures for solar cells (Ioffe Institute)]



**Рис. 3.** Гетероструктуры с Брэгговским рефлектором, обеспечивающим увеличение радиационной стойкости за счет отражения и эффективное поглощение «подзонных» фотонов [5]  
**[Figure 3.** Heterostructures with Bragg reflectors, ensuring the radiation resistance increase owing to reflection and effective absorption of subbandgap photons [5]]

Созданы каскадные солнечные элементы на основе гетероструктуры Ge/GaAs/GaInP (рис. 5), в которых достигнуты значения КПД, превы-

шающие 30 % в условиях околоземного космоса (АМ0), в том числе с концентраторами солнечного излучения [5; 10–13]. Увеличение КПД

каскадных фотопреобразователей достигнуто за счет «расщепления» солнечного излучения на несколько спектральных интервалов и осуществления более

эффективного преобразования энергии фотонов каждого из этих интервалов в определенной части полупроводниковой структуры (рис. 4–6).



Рис. 4. Структура каскадного солнечного элемента и пути увеличения его эффективности

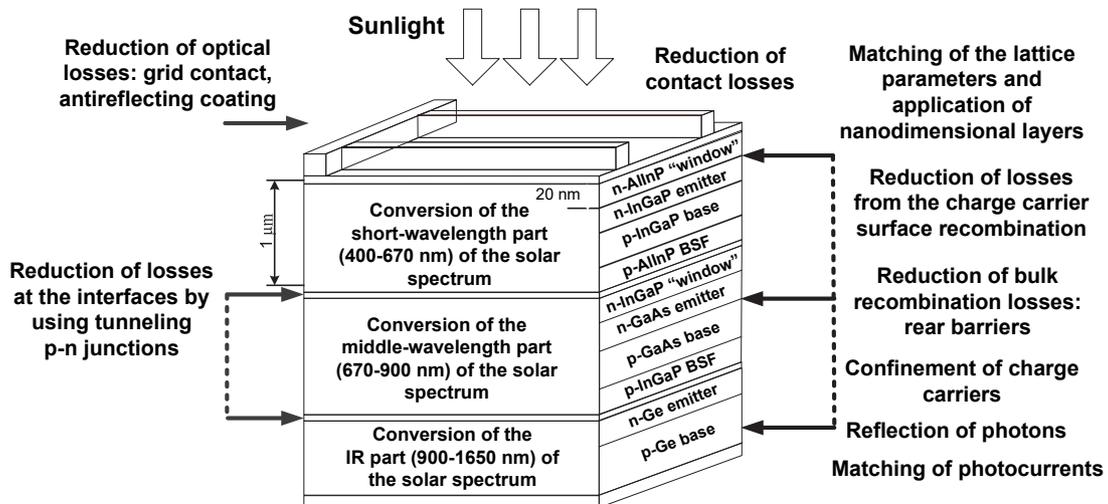


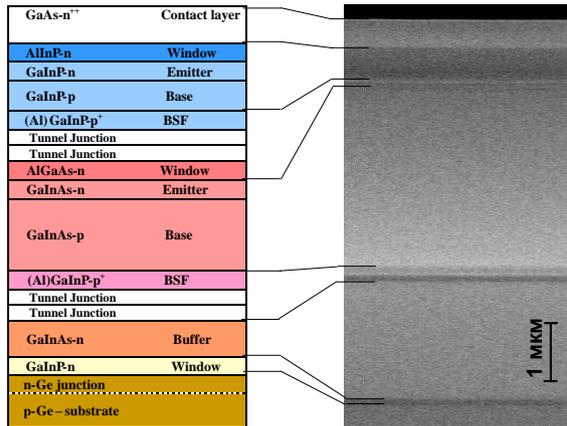
Figure 4. Structure of a multijunction solar cell and path for rising its efficiency

Выбор материалов для субэлементов каскадных ФЭП является наиболее критичным при разработке их структуры. С этой точки зрения в наиболее эффективной на данный момент структуре каскадных ФЭП на основе согласованных по параметру решетки материалов  $Ga_{0.52}In_{0.48}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$  ограничены возможности увеличения КПД, вследствие не оптимальности ширины запрещенной зоны этих материалов. Это выражается в большом фототоке верхнего GaInP и

нижнего Ge субэлементов по сравнению с фототоком среднего (GaInAs) субэлемента. Одним из реализованных путей повышения эффективности таких ФЭП явилось увеличение ширины запрещенной зоны материала верхнего субэлемента, что позволило увеличить генерируемое им напряжение и рабочее напряжение всего ФЭП. Для твердых растворов GaInP существует возможность увеличения ширины запрещенной зоны при сохранении параметра решетки за счет

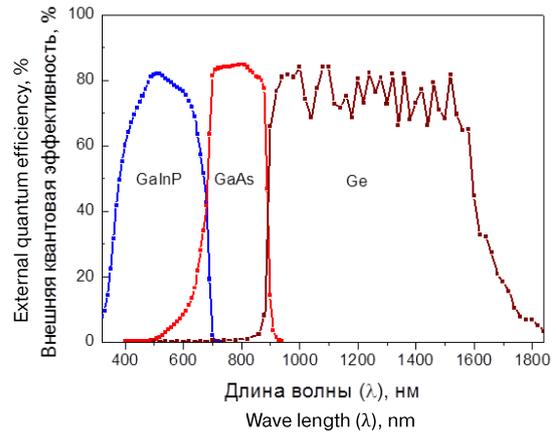
снятия упорядочения этих твердых растворов. Исследования в этой области позволили разработать технологию, обеспечивающую снижение упорядочения в GaInP.

Создание структур с квантоворазмерными поглощающими средами (квантовыми точками и

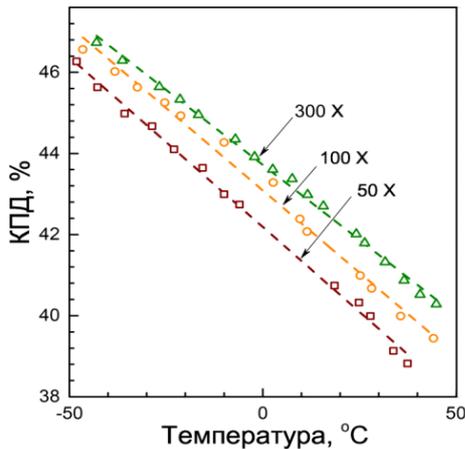


**Рис. 5.** Гетероструктура каскадного солнечного элемента [Figure 5. Heterostructure of a multijunction solar cell]

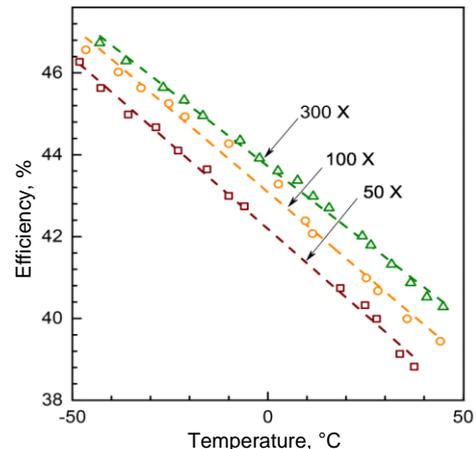
квантовыми ямами) позволило сдвинуть оптический край поглощения среднего субэлемента на основе GaInAs в длинноволновую область, что обеспечило повышение тока, генерируемого этим субэлементом, и увеличение тока каскадного ФЭП на основе GaInP/GaInAs/Ge [14].



**Рис. 6.** Спектр фотоответа трехпереходного солнечного элемента на основе гетероструктуры GaInP/GaAs/Ge [Figure 6. Photoresponse spectrum of a triple-junction solar cell based on GaInP/GaAs/Ge heterostructure]



**Рис. 7.** Зависимость КПД каскадного солнечного элемента от температуры при различных кратностях (50X, 100X, 300X) концентрирования «наземного» солнечного излучения [Figure 7. Temperature dependence in the triple-junction solar cells at the different sunlight concentration ratio (50X, 100X, 300X)]



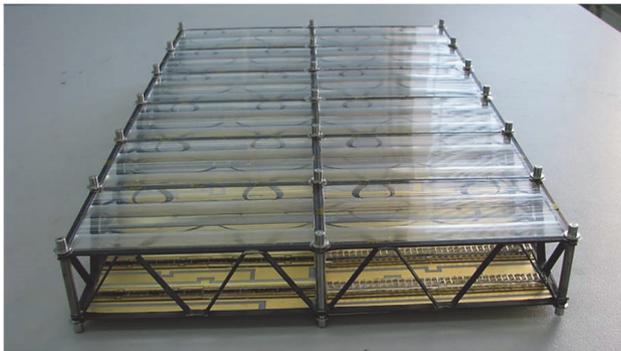
Разработанные структуры каскадных ФЭП включают:

- квантово-размерные (20–30 нм) фронтальные широкозонные «окна» AlGaInP, обеспечивающие фоточувствительность до ультрафиолетовой области спектра;
- квантово-размерные (10–50 нм) слои туннельных  $p^+-n^+$ -переходов, соединяющих фотоактивные области трех каскадов в гетероструктуре;

- встроенные в гетероструктуру Брегговские отражатели (на основе периодических структур, образованных слоями с толщинами 50–70 нм), обеспечивающие отражение в фотоактивную область «подзонных» фотонов;
- короткопериодные сверхрешетки для создания структур с градиентом ширины запрещенной зоны и для получения новых материалов;
- структуры с квантовыми точками в активных областях каскадных элементов.

Таким образом, для повышения КПД разработаны ФЭП нового поколения с использованием квантово-размерных слоев и новых материалов как в активных областях, так и в коммутирующих их туннельных диодах. Созданы ФЭП для космических солнечных батарей с КПД более 30 % в условиях околоземного космического пространства, в том числе ФЭП с КПД более 33 % за счет промежуточного концентрирования солнечного излучения.

Разработаны солнечные элементы [13], оптимизированные как для работы в условиях околоземного космоса, так и для работы на космических аппаратах, запускаемых в глубокий космос (в сторону от Солнца), например, в условиях околомарсианских орбит и на Марсе, характеризующихся меньшей рабочей температурой солнечных батарей по сравнению с рабочей температурой околоземных космических батарей. КПД таких ФЭП достигает величины 46 % при рабочей температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  в условиях облучения концентрированным наземным солнечным излучением (рис. 7). В космических условиях КПД таких элементов составляет порядка 38 % при температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и кратности концентрирования 100–300 солнц.



**Рис. 8.** Фрагмент панели (площадью 600 см<sup>2</sup>) космической солнечной батареи с линейками каскадных солнечных элементов и линзовыми линейными концентраторами солнечного излучения (ФТИ имени А.Ф. Иоффе)

**[Figure 8.** Photovoltaic module (square of 600 cm<sup>2</sup>) of space array based on multijunction solar cells and sunlight concentrators made of linear lenses (Ioffe Institute)]

На основе каскадных ФЭП и концентраторов (линз Френеля) разработаны и созданы [12] космические концентраторные модули (рис. 8), обеспечивающие повышение удельного энерго-съемы, снижение стоимости солнечных батарей и улучшение радиационной стойкости. Дости-

нуто уменьшение в 10 раз расхода полупроводниковых материалов в разработанных модулях с промежуточным десятикратным концентрированием солнечного излучения и, как следствие, обеспечено снижение стоимости солнечных батарей. В концентраторных батареях улучшена радиационная стойкость за счет защиты фотопреобразователей концентратором и теплоотводящим основанием, а также за счет фотонного и инжекционного «отжига» концентраторных солнечных элементов, работающих при повышенных интенсивностях светового потока.

Разработанные технологии космических каскадных ФЭП внедрены в серийное производство космических батарей ПАО «Сатурн» (Краснодар). Выполненные в ФТИ разработки каскадных ФЭП способствовали развитию отечественного производства энергоэффективных и радиационно-стойких космических батарей нового поколения, что является чрезвычайно важным для выполнения программ исследования космоса, космической связи и развития космических технологий.

## 2. Наземные концентраторные солнечные фотоэнергосистемы на основе каскадных солнечных элементов

Разработанные наземные солнечные батареи и энергоустановки нового поколения с концентраторами солнечного излучения [1–9] открывают перспективы существенного снижения стоимости получаемой электроэнергии за счет снижения площади солнечных элементов пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения и увеличения удельной (с единицы площади) мощности батарей. Прецизионное отслеживание положения Солнца и улучшенная температурная стабильность КПД приводит к дополнительному увеличению на 30–40 % количества электроэнергии, вырабатываемой концентраторными солнечными фотоэнергоустановками, по сравнению с традиционными батареями без систем слежения.

ФТИ имени А.Ф. Иоффе внес существенный вклад в создание высокоэффективных гетероструктурных (на основе соединений  $A^3B^5$ ) солнечных элементов и наземных концентраторных фотоэнергосистем на их основе [1; 3; 5; 6].

В разработанных наземных концентраторных фотоэнергосистемах (рис. 9, 10) на основе каскадных солнечных элементов при пятисот-

кратном концентрировании солнечного излучения обеспечивается существенное увеличение удельного (с единицы площади батарей) энергосъема за счет большего КПД и слежения за положением Солнца, а также снижение расхода солнечных элементов в 500 раз пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения.



**Рис. 9.** Наземная солнечная батарея на основе 576 каскадных солнечных элементов и концентраторов – линз Френеля (ФТИ имени А.Ф. Иоффе)

[Figure 9. Terrestrial solar array on the basis of 576 multijunction solar cells and Fresnel lens concentrators (Ioffe Institute)]

Преимуществом конструкции разработанных в ФТИ концентраторных солнечных модулей (рис. 9) являются малые линейные размеры концентраторов (менее 6 см) и фотопреобразователей при соотношении их площадей порядка 500. В этих модулях обеспечивается уменьшение их конструктивной толщины, снижение расхода основных материалов и простота отвода генерируемого тока и остаточного тепла от преобразователей. «Перегрев» фотопреобразователей относительно температуры окружающей среды составляет около 40 °С. Такой же перегрев имеет место и в кремниевых солнечных батареях без концентрации. Однако концентраторные солнечные батареи обладают лучшей температурной стабильностью КПД (рис. 7). Так, при увеличении рабочей температуры на 40 °С снижение мощности концентраторных батарей составляет всего 6 %. Это преимущество разработанных концентраторных батарей увеличивается при их использовании в условиях с повышенной температурой окружающей среды.

Линзы Френеля в разработанных концентраторных модулях объединяются в панели и пред-

ставляют собой композитную конструкцию с фронтальным элементом из обычного силикатного стекла и тыльным френелевским профилем, выполненным в тонком слое силикона. В этой конструкции фронтальная поверхность концентраторного модуля является плоской и стабильной к воздействию повреждающих факторов окружающей среды, включая воздействие абразивных частиц. В свою очередь, силикон является наиболее стойким прозрачным полимерным материалом по отношению к воздействию ультрафиолетового излучения и характеризуется высокой эластичностью. Френелевский профиль в силиконе получается путем полимеризации силикона на стекле при использовании промежуточного адгезивного слоя и матрицы с негативным френелевским профилем.

Модули с концентраторами излучения должны быть все время точно ориентированы на Солнце. В разработанных фотоэлектрических установках (рис. 10) модули расположены ступенчато на электронно-механической системе слежения, снабженной датчиком положения Солнца. Такое конструктивное решение способствует снижению влияния ветровых нагрузок. Работая в полностью автоматическом режиме, установки расходуют на собственные нужды лишь около 0,1 % от энергии, генерируемой размещенными на них модулями.

Основными преимуществами разработанных концентраторных фотоэнергоустановок являются:

- снижение расхода материалов для солнечных элементов в 500–1000 раз пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения. В солнечной концентраторной фотоэнергоустановке 1 г каскадного элемента эквивалентен по вырабатываемой за 25 лет работы электроэнергии 5 т нефти;

- увеличение более чем в 2 раза (к солнечным батареям на основе кристаллического кремния) количества электроэнергии, вырабатываемой концентраторными солнечными модулями с единицы площади, за счет большей эффективности (более 42 %) каскадных солнечных элементов [13; 15–19], слежения за Солнцем и лучшей температурной стабильности КПД;

- эффективная работа концентраторных фотоэнергоустановок в регионах с высокой инсоляцией и при повышенной температуре;

- снижение в 2 раза количества расходных материалов: стекла и металла для модулей;

– время возврата электроэнергии, затраченной на изготовление концентраторных фотоэнергоустановок, составляет менее 1 года.

Широкое использование таких установок в регионах Земли с высокой инсоляцией, в том



числе на юге РФ, позволит уменьшить негативную нагрузку на окружающую среду, а также будет способствовать решению социальной проблемы обеспечения электроэнергией населения, не имеющего централизованного энергоснабжения.



**Рис. 10.** Концентраторная солнечная установка на основе 2592 каскадных солнечных элементов и линз Френеля (ФТИ имени А.Ф. Иоффе)

[Figure 10. Concentrator solar installation on the basis of 2592 multijunction solar cells and Fresnel lenses (Ioffe Institute)]

## Заключение

Необходимость интенсивного развития фотоэнергетики в России определяют следующие факторы:

– существенная часть стоимости электроэнергии от ТЭЦ не включена в тарифы, а распределена на затраты всего общества и будущих поколений, которые будут лишены ископаемых ресурсов. Вследствие этого необходимо признать прямое и косвенное государственное субсидирование традиционной энергетики, загрязняющей окружающую среду;

– фотоэнергетика обеспечивает демонополизацию и децентрализацию рынка энергетики, то есть эффективную конкуренцию и поддержку независимых производителей энергии;

– фотоэнергетика экономически рентабельна уже сейчас для многих сфер, например, для обеспечения электроэнергией автономных потребителей и для низковольтного электрообеспечения (дежурное освещение, датчики, сенсоры и др.);

– фотоэнергетикой достигнут к настоящему времени ценовой паритет с сетевой электроэнергией в регионах с высокой инсоляцией;

– развитие фотоэнергетики соответствует большинству высших приоритетов в утвержденной «Энергетической стратегии России до 2030 года»: снижению вредного влияния ТЭК на окружающую

среду, комплексному использованию местных энергетических источников, увеличению роли возобновляемой энергетики, снижению эмиссии вредных веществ в атмосферу;

– успешное развитие солнечной фотоэнергетики в таких странах, как Китай, США, Германия, Италия и многих других, показывает, что после нескольких лет активной государственной поддержки солнечная энергетика может успешно развиваться самостоятельно, благодаря достижению паритета стоимости солнечной и сетевой электроэнергии.

Наземная солнечная фотоэнергетика зародилась в России во многом за счет развития электроэнергетики для космических аппаратов. Созданную научно-технологическую базу необходимо использовать для развертывания «новой энергетики», при которой снижены экологические опасности разного рода, а проблемы истощения ресурсов и их неравномерного распределения по странам в значительной степени сглажены. Наступает время, когда в России следует переходить к более широкому инвестированию средств в фотоэнергетику, как это делается в странах, лидирующих в технологическом отношении.

В России создан значительный научно-технологический задел для организации крупномасштабного производства концентраторных сол-

нечных фотоэнергосистем на основе каскадных солнечных элементов и систем слежения за Солнцем, открывающих перспективы дальнейшего снижения стоимости «солнечного» электричества и обеспечения паритета со стоимостью сетевой электроэнергии.

Повышение энергоэффективности и ресурса работы космических солнечных батарей нового поколения на основе каскадных ФЭП и расширение объема их производства необходимо для выполнения программ космических исследований и развития космических технологий – одного из приоритетов технологического прорыва.

### Список литературы / References

1. Andreev VM, Grilikhes VA, Rummyantsev VD. *Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight*. New York: John Wiley & Sons; 1997.
2. Luque A, Andreev V. (eds.) *Concentrator photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007.
3. Alferov ZI, Andreev VM, Rummyantsev VD. III–V heterostructures in photovoltaics. In: Luque A, Andreev V. (eds.) *Concentrator photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007. p. 25–50.
4. Petrova-Koch V, Hezel R, Goetzberger A. (eds.) *High-efficient low-cost photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2020.
5. Alferov ZI, Andreev VM, Shvarts MZ. III–V solar cells and concentrator arrays. In: Petrova-Koch V, Hezel R, Goetzberger A. (eds.) *High-efficient low-cost photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2020. p. 133–174. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22864-4\\_8](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22864-4_8).
6. Rummyantsev VD. Terrestrial concentrator PV systems. In: Luque A, Andreev V. (eds.) *Concentrator photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007. p. 151–174.
7. Bett AW, Dimroth F, Shiefer G. Multijunction concentrator solar cells. In: Luque A, Andreev V. (eds.) *Concentrator photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007. p. 67–87.
8. Sala G, Luque A. Past experiences and new challenges of PV concentrators. In: Luque A, Andreev V. (eds.) *Concentrator photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007. p. 1–23.
9. Algora C, Rey-Stolle I. (eds.) *Handbook of concentrator photovoltaic technology*. John Wiley & Sons; 2016.
10. Pakhanov NA, Andreev VM, Shvarts MZ, Pchelyakov OP. State-of-the-art architectures and technologies of high-efficiency solar cells based on III–V heterostructures for space and terrestrial applications. *Optoelectronics, instrumentation and data processing*. 2018;54(2):187–202.
11. Kalinovsky VS, Grebenshikova EA, Dmitriev PA, Ilinskaya ND, Kontrosh EV, Malevskaya AV, Usikova AA, Andreev VM. Photoelectric characteristics

of InGaP/Ga(In)As/Ge solar cells fabricated with a single-stage wet chemical etching separation process. *AIP Conf. Proc.* 2014;1616:326–330.

12. Kalinovskii VS, Kontrosh EV, Andreeva AV, Ionova EA, Malevskaya AV, Andreev VM, Malutina-Bronskaya VB, Zaleskiy VB, Lemesheskaya AM, Kuzoro VI, Khalimanovich VI, Zayceva MK. CPV module based on a hybrid solar cell. *AIP Conf. Proc.* 2019;2149:030003.

13. Andreev VM, Malevskiy DA, Pokrovskiy PV, Rummyantsev VD, Chekalin AV. On the main photoelectric characteristics of three-junction InGaP/InGaAs/Ge solar cells in a broad temperature range ( $-197\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq +85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). *Semiconductors*. 2016;50(10):1356–1361.

14. Kalyuzhnyy NA, Mintairov SA, Saliy RA, Nadtochiy AM, Payusov AS, Brunkov PN, Nevedomsky VN, Shvarts MZ, Marti A, Andreev VM, Luque A. Increasing the quantum efficiency of InAs/GaAs QD arrays for solar cells grown by MOVPE without using strain-balance technology. *Progress in photovoltaics: research and applications*. 2016;24(9):1261–1271. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2789>.

15. Sasaki K, Agui T, Nakaido K, Takahashi N, Onitsuka R, Takamoto T. Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells. *AIP Conf. Proc.* 2013;1556:22–25.

16. Aiken D, Dons E, Je S-S, Miller N, Newman F, Patel P, Spann J. Lattice matched solar cells with 40% average efficiency in pilot production and a roadmap to 50%. *IEEE J. Photovoltaics*. 2013;3(1):542–547.

17. Geisz JF, Duda A, France RM, Friedman DJ, Garcia I, Olavarria W, Olson JM, Steiner MA, Ward JS, Young M. Optimization of 3-junction inverted metamorphic solar cells for high-temperature and high-concentration operation. *AIP Conf. Proc.* 2013;1477:44–48.

18. Dimroth F, Grave M, Beutel P, Fiedeler U, Karcher C, Tibbits TND, Oliva E, Siefer G, Schachtner M, Wekkeli A, Bett AW, Krause R, Piccin M, Blanc N, Dratzek C, Guiot E, Ghyselen B, Salvetat T, Tauzin A, Signamarcheix T, Dobrich A, Hannappel T, Schwarzbürg K. Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs/GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Progress in photovoltaics: research and applications*. 2014;22(3):277–282.

19. France RM, Geisz JF, Garcia I, Steiner MA, McMahon WE, Friedman DJ, Moriarty TE, Osterwald C, Ward SJ, Duda A, Young M, Olavarria WJ. Quadruple-junction inverted metamorphic concentrator devices. *IEEE J. Photovoltaics*. 2015;5(1):432–437.

### Для цитирования

Андреев В.М. Каскадные солнечные батареи космического и наземного применения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 271–280. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-271-280>

## Multijunction solar arrays for space and terrestrial applications

Viacheslav M. Andreev

Ioffe Institute, 26 Polytechnicheskaya St, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

---

### Article history:

Received: December 12, 2020

Revised: January 27, 2021

Accepted: January 30, 2021

---

### Keywords:

cascade solar cells, space arrays, concentrated sunlight

*Abstract.* Photovoltaic conversion of the solar energy is the most prospective direction of the renewable power engineering. Solar arrays ensure power supply of spacecrafts and are gaining increasingly more application on the Earth. In the majority of developed countries, laws on state support of the “green” power engineering assisted in a substantial increase of power of the solar photovoltaic systems have been adopted. The main barrier to increasing the terrestrial solar photovoltaics development rates is a relatively high cost of the “solar” electric power. The ways for reducing the cost are the rise of the efficiency of power systems and the reduction of the material consumption for arrays based on multijunction solar cells. Results of multijunction solar cells and modules developments for space and terrestrial solar arrays are discussed in the article. In the last years, a significant experience on creation of multijunction solar cells was accumulated. Cascade solar cells and solar photovoltaic installations on their base with sunlight concentrators have been developed. At present, the terrestrial cascade solar cell efficiency exceeds 45%, which is substantially higher than that in conventional Si and thin-film solar arrays. The cascade solar cell efficiency increase has been achieved at the expense of “splitting” the sunlight spectrum into several intervals by the solar cell semiconductor structure fulfilling more effective photon energy conversion of each of these intervals in a definite parts of this structure. It is shown that multijunction solar cells provide the highest efficiency and they are the basic components of space arrays. Multijunction solar cells provide the highest conversion efficiency of concentrated sunlight as well. It opens prospects for decreasing the solar cell area and cost proportionally to the sunlight concentration. Developed concentrated photovoltaic installations are promising for wide applications in the high scale terrestrial solar photovoltaic energetics.

### For citation

Andreev VM. Multijunction solar arrays for space and terrestrial applications. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):271–280. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-271-280>



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-281-289  
УДК 629.78:620(035.3)

Научная статья

## Многоразовые межорбитальные буксиры мегаваттного класса: проблемы и перспективы

В.М. Мельников, Ю.Н. Разумный

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

### История статьи:

Поступила в редакцию: 4 ноября 2020 г.  
Доработана: 10 декабря 2020 г.  
Принята к публикации: 15 декабря 2020 г.

### Ключевые слова:

многоразовый буксир, ядерная и солнечная энергоустановки, электролиз воды в космосе, электроплазменные двигатели, электромагнитные ускорители

**Аннотация.** Проводится анализ возможностей создания солнечных многоразовых межорбитальных буксиров мегаваттного класса. Дается сравнение солнечных и ядерных энергоустановок, рассматриваются преимущества использования солнечных систем. На основании сравнительного анализа аналогов – солнечных парусов, отражателей солнечного света для освещения с орбиты районов Земли, солнечных батарей космических электростанций – обосновываются преимущества использования бескаркасных центробежных солнечных батарей по сравнению с каркасными аналогами. Отмечается достаточность проектно-конструкторского, а также производственно-технологического задела и испытательной базы для создания солнечной энергетической установки в РФ. Указывается на перспективу использования кислородно-водородных топлив, получаемых электролизом воды в космосе, многократно увеличивающих скорость транспортных операций, и необходимость создания электромагнитных ускорителей для старта с Земли при больших грузопотоках. Производится проектная оценка параметров центробежных солнечных батарей мощностью 1 и 5 МВт. Рассчитывается необходимое для проведения работ финансирование.

### Введение

Многоразовые межорбитальные буксиры (ММБ) для полетов к Луне, Марсу и другим телам солнечной системы прорабатываются с начала космической эры. Принципиальным является наличие в составе космического буксира энергоустановки на базе ядерных реакторов или солнечных

батарей электроплазменных двигателей, питаемых энергоустановкой, и полезной нагрузки, включающей научную аппаратуру и системы обеспечения жизнедеятельности космонавтов. Газо- и паротурбинные ядерные реакторы имеют вращающиеся элементы большой размерности на борту космического корабля (турбины и генераторы) при длительном ресурсе без возможности технического обслуживания и ремонта, а также связаны с необходимостью компенсации кинетического момента вращающихся систем. Использование солнечной энергии носит статический характер, солнечные батареи (СБ) просты по конструкции и надежны. Имеется богатый опыт их использования на космических аппаратах начиная с третьего искусственного спутника Земли (ИСЗ).

ММБ предназначены для решения следующих основных задач:

**Мельников Виталий Михайлович**, профессор департамента механики и мехатроники Института космических технологий Инженерной академии РУДН, академик Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского и Международной академии информатизации, доктор технических наук, профессор; vitalymelnikov45@yandex.ru.

**Разумный Юрий Николаевич**, директор Инженерной академии РУДН, директор департамента механики и мехатроники Института космических технологий Инженерной академии РУДН, академик Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского и Международной академии космонавтики, доктор технических наук, профессор.

© Мельников В.М., Разумный Ю.Н., 2020

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

- доставки космических аппаратов (КА) на геостационарную орбиту (ГСО) или другие высокие околоземные орбиты;
- доставки КА в точки либрации системы «Земля – Луна»;
- доставки КА на окололунную орбиту;
- энергоснабжения аппаратуры КА в точках доставки;
- выполнения работ по очистке околоземных орбит, включая ГСО, от неработающих спутников и космического мусора;
- транспортно-энергетического обеспечения экспедиции на Марс и др.

### 1. Ядерные энергетические установки (ЯЭУ)

После значительного снижения темпов работ в период перестройки и последующего времени Центр Келдыша в 2009–2010 годах инициировал так называемый Президентский проект с целью создания транспортно-энергетического модуля (ТЭМ) на основе ядерных энергетических установок мегаваттного класса с реактором по газотурбинной схеме (схеме Брайтона) [1]. Открытие направления газотурбинной схемы многими специалистами в отечественной космической энергетике воспринимается неоднозначно. В советский период был осуществлен широкий фронт работ по проектным, конструкторским, материаловедческим вопросам, а также большой комплекс экспериментальных исследований и отработки ключевых элементов термоэмиссионной схемы ЯЭУ, показавших ее преимущества по отношению к газотурбинной и выведших нашу страну в лидеры по разработкам космических ЯЭУ [1–3]. Был создан большой научно-технический задел по ЯЭУ и электроракетным двигательным установкам (ЭРДУ) для ММБ «Геркулес», включая создание высокотемпературных конструкционных, электродных, магнитных и электроизоляционных материалов, разработку технологии изготовления из них узлов и агрегатов, испытания модуля и полномасштабного нейтронно-физического макета термоэмиссионного реактора. Сложилась мощная научно-техническая кооперация, в том числе с институтами и предприятиями, находившимися в союзных республиках. В настоящее время многие возможности утеряны и создание столь сложной системы, как ЯЭУ, в значительной мере осложнено. В США ЯЭУ для ММБ мегаваттного класса не разрабатывались.

### 2. Сравнение солнечных энергетических установок (СЭУ) и ЯЭУ

Важнейшие недостатки ЯЭУ, в случае недооценки методов и средств обеспечения их безопасности, могут многократно перекрыть их потенциальные преимущества. Прежде всего, это:

- катастрофические последствия при возможных авариях в космосе, при создании и отработке в наземной инфраструктуре, а также при запусках с Земли и возвращении на Землю;
- сложности с техническим обслуживанием и ремонтом на орбите в процессе эксплуатации (привлечение космонавтов невозможно, а робототехника значительно усложняет систему и снижает в целом ее надежность);
- невозможность использования на околоземных орбитах высотой менее 800–900 км в силу принятых ООН ограничений;
- необходимость специфической утилизации или захоронения после окончания срока эксплуатации как самих реакторов, так и создающей их наземной инфраструктуры.

За последние годы в СЭУ космического назначения был достигнут значительный прогресс:

- показана возможность увеличения удельной мощности на небольшой СБ летавшего космического аппарата до 5000 Вт/кг (удельная масса 0,2 кг/кВт по сравнению с 12,6 кг/кВт на ЯЭУ «Геркулес»);
- КПД фотоэлектронных преобразователей на многопереходных гетероструктурах доведен до 40 %, в перспективе – до 58 %; в США в лабораторных условиях с применением нанотехнологий получен КПД кремниевых ФЭП, равный 42 % и более.

Разрабатываемые в США и Японии проекты космических солнечных электростанций (КСЭС) предполагают использование солнечных батарей мощностью до 10 ГВт [4]. Достижения в области солнечных батарей базируются на интенсивно развивающихся во всем мире нанотехнологиях и аналогично достижениям в радиоэлектронике в перспективе могут быть разнообразны и чрезвычайно эффективны. Технология СБ зависит от масштаба производства и при промышленном масштабном производстве может стать относительно дешевой.

По сравнению с ЯЭУ во всем диапазоне мощностей, в том числе при высоком уровне мощности (МВт – ГВт), солнечные энергоустановки имеют следующие преимущества:

– простота конструкции – не имеют высоко-температурных контуров, холодильников-излучателей, вращающихся турбин, делящегося урана, радиационной защиты и т. п.;

– экологическая чистота – не несут катастрофических последствий при авариях в космосе, при создании и обработке на Земле, а также при запусках с Земли и возвращении на Землю;

– возможность технического обслуживания и ремонта на орбите в процессе эксплуатации;

– отсутствие проблем с утилизацией или захоронением;

– уменьшение стоимости при крупномасштабном производстве;

– удельные (Вт/кг) характеристики лучше в 10 и более раз;

– многолетний (начиная с третьего ИСЗ) успешный опыт создания и эксплуатации на подавляющем большинстве КА (более 1000) отечественного и зарубежного производства;

– большие перспективы к совершенствованию в плане развития нанотехнологий;

– относительная простота в наземной отработке;

– бескаркасное центробежное исполнение и автоматизированные раскрытие и сворачивание на орбите, отсутствие в таком исполнении геометрических ограничений для любых, просматриваемых даже в дальней перспективе задач;

– возможность относительно простого увеличения масштаба СЭУ;

– огромные финансовые, организационные и научно-технические ресурсы не требуются;

– быстрая окупаемость в силу большой коммерческой эффективности и спектра приложений;

– широкое поле наземного использования;

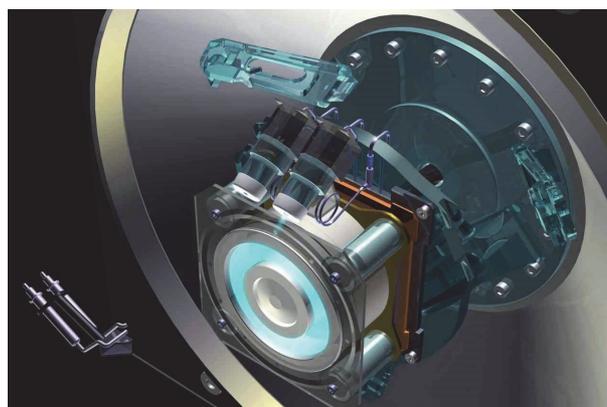
– наличие для СЭУ (по причине большей простоты) сохраненной и даже развитой производственной и испытательной базы, по сравнению с ЯЭУ, для которых необходима более сложная производственная и испытательная база, а также кооперация с институтами и предприятиями союзных республик СССР, связь с которыми в значительной мере утрачена.

Следует также считаться с мнением международного сообщества и правительств ведущих стран мира, в целом отрицательно относящихся к выносу в космос ядерной энергии после аварий в Чернобыле и особенно в Фукусиме. Сегодняшнее ее использование связано с безальтернативностью в энергетических ресурсах для су-

ществования и развития многих стран. Ситуация кардинально меняется при создании космических солнечных электростанций, транслирующих СВЧ или лазерную энергию на Землю, имеющих одинаковую с солнечными буксирами проектно-конструкторскую базу. В Японии, Китае, США, Канаде, Индии, Англии, Израиле и Евросоюзе проводится в настоящее время интенсивная разработка КСЭС [4].

### 3. Электроплазменные двигатели

Удельная тяга двигательных установок на базе электроплазменных двигателей значительно превосходит тягу жидкостных ракетных двигателей (ЖРД): 100 000–70 000 и 2500–4500 м/сек соответственно, а их электропитание может быть обеспечено ядерным реактором или солнечной батареей. Разработки электроплазменных двигателей проводятся с начала космической эры. Среди многочисленных схем электроплазменных двигателей наибольшее распространение получили две – холловских двигателей с внешним магнитным полем, в которых замкнутый дрейф электронов играет ключевую роль, создавая в плазме сильное внутреннее электрическое поле, отвечающее за работу двигателя [5]. Это стационарный плазменный двигатель (СПД) и двигатель с анодным слоем (ДАС). Двигатели типа СПД производства ФГУП КБ «Факел» используются в качестве двигателей коррекции орбиты и ориентации относительно центра масс на многих отечественных и зарубежных КА (рис. 1).



**Рис. 1.** СПД на испытательном стенде  
[Figure 1. Stationary plasma engine at the test bench]

Источник: Военный обзор. URL: <https://militaryarms.ru/novye-texnologii/plazmennye-dvigateli/> (дата обращения: 17.09.2020).

Source: Voennyi obzor. Available from: <https://militaryarms.ru/novye-texnologii/plazmennye-dvigateli/> (accessed: 17.09.2020).

Создание ионных двигателей большой мощности столкнулось с проблемой охлаждения секций большой размерности.

Для целей коррекции орбиты и ориентации современных КА относительно центра масс достаточна размерность двигателя по мощности от 300 Вт до 4 кВт. Имеются проекты на мощность 25 и 50 кВт. Однако для будущих транспортных буксиров мощностью порядка мегаватта сегодняшние разработки недостаточны по размерности. Предлагаемый набор требуемой мощности большим количеством малых двигателей возможен в весьма широких пределах, однако в целом нецелесообразен по следующим соображениям. Во-первых, как известно из электротехники, эффективность большой электрической машины выше, чем малой. Во-вторых, каждый малый двигатель имеет достаточно сложные системы подачи рабочего тела и подвода электроэнергии для обеспечения собственных систем (анодного тока, катода-компенсатора, магнитной системы и т. д., до 7 систем). Тиражирование таких систем нецелесообразно. По этим причинам встает проблема создания одного или нескольких электроплазменных двигателей мощностью порядка мегаватта [6]. Увеличение мощности единичного модуля приводит к эффективному повышению компактности двигательной установки в целом.

НИЦ «Курчатовский институт» выходит с предложением создать такой инновационный двигатель, который будет обладать возможностью регулирования тяги и удельной тяги ( $N = P \cdot P_{уд}$ , где  $N$  – мощность,  $P$  – тяга,  $P_{уд}$  – удельная тяга) при заданной мощности, большим ресурсом работы и надежностью, универсальностью по отношению к рабочему веществу, высокой энергетической эффективностью.

Аналогичный двигатель создан и испытан в США по программе VASIMR в июле 2008 года на аргоне мощностью 30 кВт со сверхпроводящим магнитом и полупроводниковыми радиочастотными генераторами для раздельного нагрева за счет циклотронного резонанса электронной и ионной компонент плазмы [7] и является прототипом мегаваттных систем. Электромагнитные силы используются для удержания и разгона плазмы в магнитном сопле, образованном открытой магнитной ловушкой «бутылочного» типа. За ускорение плазмы ответственен «адиабатический инвариант», когда в меняющейся конфигурации магнитного поля поперечное оси системы вращение

заряженных частиц переходит в продольное ускорение. Явление хорошо изучено в термоядерной проблеме.

В НИЦ «Курчатовский институт» имеется большой научно-технический задел и экспериментальная база, созданные в результате многолетних экспериментальных и теоретических исследований в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза, необходимые для создания подобного двигателя.

#### 4. Конструктивный облик центробежной СЭУ ММБ

**Преимущества использования центробежных конструкций.** Сравнительный анализ по ряду проектов крупногабаритных космических конструкций солнечных парусов, отражателей солнечного излучения для освещения районов Земли отраженным с орбиты солнечным светом, КЭС, а также разработанных проектов солнечных батарей связанных систем, которые могут рассматриваться как аналоги СЭУ ММБ, указывает на существенные преимущества использования бескаркасных формируемых центробежными силами конструкций солнечных батарей. Основными преимуществами являются:

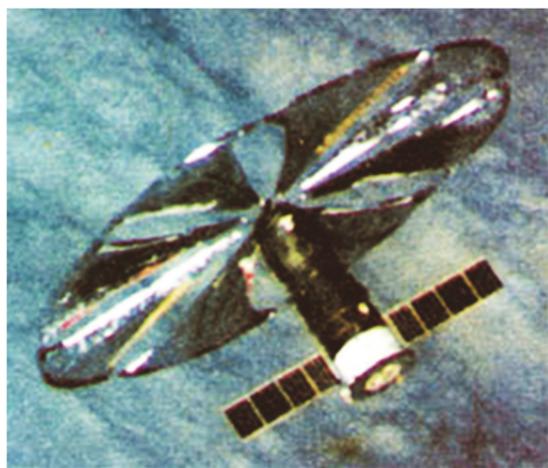
- значительно меньшая масса конструкции из-за отсутствия жесткого каркаса, который составляет до 90 % общей массы каркасных конструкций;
- меньшая стоимость технологии изготовления;
- простота конструкции, ее высокая надежность;
- большая возможность наземной модельной и поэлементной отработки;
- управление ориентацией в пространстве на гироскопическом принципе без расхода рабочего тела (за счет излома оси двух противорвращающихся конструкций в шарнире на базе пьезокристаллов).

В рамках темы Министерства общего машиностроения «Знамя» был запланирован и осуществлен 4 февраля 1993 года уникальный космический эксперимент на транспортно-грузовом корабле (ТГК) «Прогресс» вблизи орбитальной станции (ОС) «Мир» (рис. 2) [8–11].

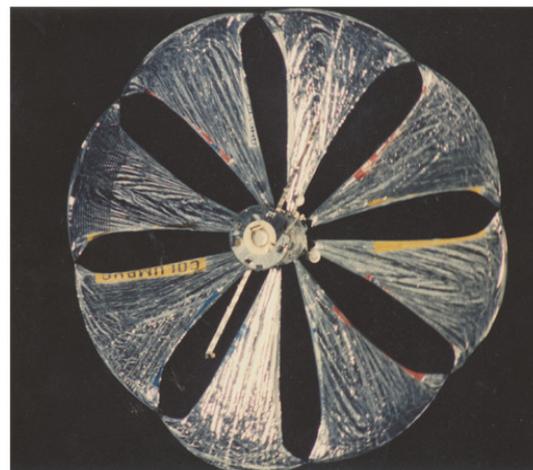
Центробежная конструкция из пленки майлар была диаметром 20 м и весила 4 кг. В космическом эксперименте, носившем название «Знамя-2», было осуществлено раскрытие конструкции из уло-

женного состояния и переориентация раскрытой конструкции в пространстве с демпфированием возникающих при этом колебаний. Эксперимент

подтвердил перспективность направления разработки центробежных бескаркасных конструкций, в том числе для создания ММБ.



а



б

**Рис. 2.** Космический эксперимент «Знамя-2», съемка с борта ОС «Мир»:

а – центробежная конструкция на ТГК «Прогресс» в полете над океаном; б – фото отражателя на фоне космического пространства [8]

**[Figure 2.** Space experiment “Znamya-2”, filming from the orbital station “Mir”:

а – centrifugal structure onboard “Progress” spacecraft in flight over the ocean; б – photo of the reflector against the background of outer space [8]

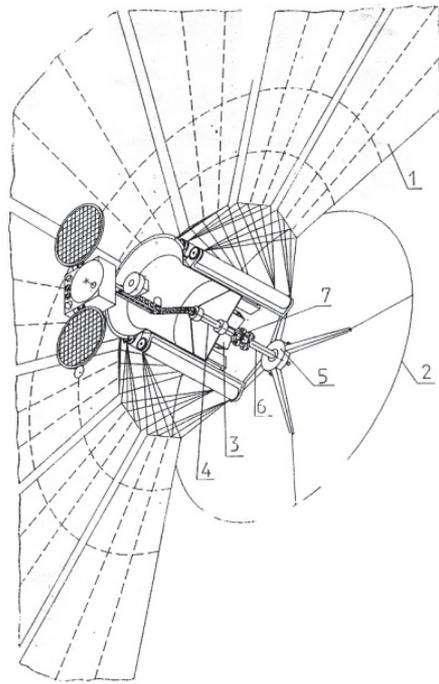
Отверждаемые конструкции относятся к каркасным конструкциями, переориентация которых в пространстве осуществляется за счет использования рабочего тела. При большом масштабе конструкции (сотни метров) и длительном ресурсе работы количество требуемого для переориентации рабочего тела составляет недопустимо большую величину. Тяжелые гироскопы также не справляются с этой задачей при большой размерности. Орбитальный эксперимент указал на невозможность получения достаточной для СБ плоской поверхности. Из-за допусков на раскрой в космическом эксперименте даже всего на 10 м конструкции, аналогичной приведенной на рис. 2, наблюдался выход из плоскости, равный нескольким метрам. Форма секторов была различна и непредсказуема. Что было бы с отверждаемой конструкцией при размерности в несколько сотен метров?

Требования к точности поверхности солнечных батарей значительно ниже требований к поверхности отражателей для освещения с орбиты отраженным солнечным светом районов Земли, подразумевающих максимальную зеркальность. Солнечная батарея функционирует при отклонении от нормали к поверхности солнечного луча до 10–12°. Это достаточно большая величина, и при использовании неразрезной конструкции полот-

на солнечной круговой центробежной батарее такое отклонение может быть обеспечено.

**Принципиальная конструктивно-технологическая схема СЭУ ММБ.** На ближайшем этапе создания солнечного буксира целесообразно использовать схему с центробежными солнечными батареями и электроплазменными двигателями, так как ее элементы отработывались в течение многих десятилетий и имеется большая технологическая и научная база. На основании сравнительного анализа проектов возможных прототипов солнечного буксира может быть предложен конструктивный облик центробежной СЭУ ММБ, приведенный на рис. 3.

Аналогично принятой в Японии модульной концепции построения КСЭС [4] перспективна возможность модульного построения ММБ, приводящая к концепции осуществления миссии многими однотипными аппаратами, что принципиально эффективнее использования одного аппарата. Создав базовый модуль относительно небольшой размерности, что технологически проще создания одного крупномасштабного объекта, будет создана база для обеспечения миссий любой размерности путем суммирования стандартных модулей меньшей размерности (поезд из отдельных вагонов).



**Рис. 3.** ММБ с центробежной солнечной батареей:

- 1 – пленочная поверхность солнечной батареи;
  - 2 – маховик противовращения; 3 – электропривод СБ;
  - 4 – ось вращения; 5 – электропривод маховика;
  - 6 – ось вращения маховика; 7 – шарнир излома осей вращения [8]
- [Figure 3.** Reusable interorbital tugs with a centrifugal solar battery:  
 1 – the film surface of the solar battery; 2 – counter-rotating flywheel;  
 3 – solar battery electric drive; 4 – axis of rotation;  
 5 – electrical flywheel drive; 6 – the axis of rotation of the flywheel;  
 7 – hinge of the fracture of the axes of rotation [8]

### 5. Оценка проектных параметров центробежной солнечной батареи ММБ на мощность 1 и 5кВт

Представим оценку основных проектных параметров пленочных центробежных аморфно-кремниевых СБ для ММБ размерностью 1 (табл. 1) и 5 (табл. 2) кВт, сделанную по приведенной в [8] методике. В качестве основного варьируемого параметра используется удельная масса площади поверхности  $\beta$ , кг/м<sup>2</sup> ( $\beta = \rho h$ , где  $\rho$  – удельная масса,  $h$  – толщина материала), поскольку этот параметр интегрально учитывает все технологические особенности СБ, с одной стороны, а с другой стороны – определяет все важнейшие проектные параметры СБ, приведенные в табл. 1 и 2:  $R_k$  – радиус СБ;  $M$  – массу СБ;  $\gamma$  – удельную мощность, Вт/кг;  $E_{кин}$  – энергию на раскрытие;  $T_0$  – время раскрытия;  $J$  – момент инерции СБ;  $J\omega$  – кинетический момент;  $\omega$  – угловую скорость вращения СБ, выбранную из условий прочности материала подложки СБ и усиливающих элементов.

Еще одним удельным параметром является удельный энергосъем  $\lambda$ , Вт/м<sup>2</sup>, связанный с другими удельными параметрами соотношением  $\gamma = \lambda / \beta$ . Через  $h_{ст}$  и  $h_{пол}$  обозначены толщина подложки СБ из стали и полимера, через  $m$  – количество топлива при возможном раскрытии системы химическими двигателями.

Таблица 1

**Проектные характеристики СБ мощностью  $N = 1$  МВт,  $R_k = 60$  м**  
 [Table 1. Design characteristics of a solar battery with a capacity of  $N = 1$  MW,  $R_k = 60$  m]

$\beta$ , кг/м <sup>2</sup> [kg/m <sup>2</sup> ]	$M$ , 10 <sup>3</sup> кг [kg]	$\gamma$ , Вт/кг [W/kg]	$h_{ст}$ , м [h <sub>steel</sub> m]	$h_{пол}$ , м [h <sub>polymer</sub> m]	$J$ , 10 <sup>7</sup> кг м <sup>2</sup> [kg m <sup>2</sup> ]	$J\omega$ , 10 <sup>6</sup> кг м <sup>2</sup> /с [kg m <sup>2</sup> /s]	$m$ , 10 <sup>3</sup> кг [kg]	$E_{кин}$ , 10 <sup>6</sup> Дж [E <sub>kinetic energy</sub> , 10 <sup>6</sup> J]	$T_0$ , ч [h]
0,01	0,11	9091	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$7,143 \cdot 10^{-6}$	0,02	0,008	0,011	0,064	0,05
0,03	0,33	3030	$3,75 \cdot 10^{-6}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$	0,067	0,028	0,045	0,21	0,16
0,1	1,1	909,09	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$7,143 \cdot 10^{-5}$	0,2	0,8	0,11	0,64	0,55
0,3	3,3	303,03	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$	0,67	2,8	0,345	2,1	1,6
1	11	90,909	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$7,143 \cdot 10^{-4}$	2	8	1,1	6,4	5,5

Таблица 2

**Проектные характеристики СБ мощностью  $N = 5$  МВт,  $R_k = 140$  м**  
 [Table 2. Design characteristics of a solar battery with a capacity of  $N = 5$  MW,  $R_k = 140$  m]

$\beta$ , кг/м <sup>2</sup> [kg/m <sup>2</sup> ]	$M$ , 10 <sup>3</sup> кг [kg]	$\gamma$ , Вт/кг [W/kg]	$h_{ст}$ , м [h <sub>steel</sub> m]	$h_{пол}$ , м [h <sub>polymer</sub> m]	$J$ , 10 <sup>7</sup> кг м <sup>2</sup> [kg m <sup>2</sup> ]	$J\omega$ , 10 <sup>6</sup> кг м <sup>2</sup> /с [kg m <sup>2</sup> /s]	$m$ , 10 <sup>3</sup> кг [kg]	$E_{кин}$ , 10 <sup>6</sup> Дж [E <sub>kinetic energy</sub> , 10 <sup>6</sup> J]	$T_0$ , ч [h]
0,01	0,55	9091	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$7,143 \cdot 10^{-6}$	0,11	0,44	0,074	0,09	0,07
0,03	1,45	3030	$3,75 \cdot 10^{-6}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$	0,38	1,46	0,245	0,3	0,23
0,1	5,5	909,09	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$7,143 \cdot 10^{-5}$	1,1	4,4	0,74	0,9	0,7
0,3	14,5	303,03	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$	3,8	14,6	2,45	3	2,3
1	55	90,909	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$7,143 \cdot 10^{-4}$	11	44	7,4	9	7

## **6. Использование электромагнитных ускорителей для вывода на опорную орбиту**

В перспективе создания большого числа солнечных ММБ и КСЭС в течение 30–50 лет для выведения их в космос многообещающим видится использование электромагнитного ускорителя с полосой разгона порядка 10 км, геометрически подобной лыжному трамплину [12]. Ускоритель должен строиться рядом с крупной электростанцией и использовать горный рельеф местности (например, около Саяно-Шушенской ГЭС). Подобный проект разработан в Центральном аэрогиродинамическом институте имени Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), где один килограмм выводимого на опорную орбиту груза по стоимости оценивается в 30 долл. по сравнению с 10–20 тыс. долл. при использовании системы «Спейс Шаттл». Направление электромагнитных ускорителей интенсивно разрабатывается в США.

Основное преимущество подобных ускорителей в отсутствии необходимости использования ракетных топлив, учитывая возможность их подорожания, и отрицательного влияния на экологию окружающей среды при сжигании топлива в атмосфере.

## **7. Транспортные буксиры с использованием воды для производства ракетных топлив в космосе**

Альтернативные варианты солнечных и ядерных энергоустановок мегаваттного класса для межорбитальных и межпланетных многоразовых буксиров с мощной электроракетной двигательной установкой должны рассматриваться в неразрывной связи с общим научно-техническим прогрессом и перспективными направлениями развития космической техники в целом. Среди наиболее масштабных из перспективных направлений – проекты по получению кислородно-водородных топлив в космосе и созданию КСЭС для беспроводной передачи электроэнергии на Землю.

Наличие в космосе громадных запасов льда (хвосты и ядра комет, полюсные шапки Марса, выход льда из разломов на Луне шириной до 60 км, возможность накопления запасов воды запусками ракет) открывает широкую перспективу электролизного получения кислородно-водородных ракетных топлив непосредственно в космосе для

стартов с космических тел и транспортных операций. Прорабатываемые в этом направлении концепции открывают новые подходы к созданию транспортных космических систем, а именно не требующих тяжелых носителей и транспортных буксиров на малой тяге.

Освоение околоземного космического пространства, Луны и Марса и неизбежное подорожание традиционных топлив, связанное с истощением углеводородов, делает создание технологий выработки ракетных топлив в космосе для старта с космических тел и транспортных операций весьма актуальным. При этом может быть многократно увеличена скорость транспортных операций, необходимая для уменьшения воздействия на космонавтов галактического и солнечного излучения.

Академик В.П. Глушко, будучи руководителем РКК «Энергия» имени С.П. Королева, в конце 80-х годов прошлого века говорил, что очень много думал на эту тему и все космические полеты надо осуществлять на химических двигателях. В применении к ММБ, как в то время, так и сейчас, концепция ЯЭУ или СЭУ и плазменных двигателей малой тяги с высокой удельной тягой считается оптимальной. Концепция кислородно-водородного топлива, производимого в космосе, значительно более эффективна и отвечает предвидению В.П. Глушко. Конечно, требуется создание новой элементной базы, но это и есть развитие космонавтики.

## **8. Оценка стоимости работ по ММБ**

Оценка стоимости создания ММБ мощностью 1 МВт может быть дана на основе стоимости СБ, которая для наиболее применимой для СЭУ тонкопленочной аморфнокремниевой ( $\alpha$ -Si) СБ составляет 80 долл./Вт. Тогда, умножая эту цифру на мощность 1 МВт =  $10^6$  Вт, имеем 80 долл./Вт ·  $10^6$  Вт = 80 млн долл.

В состав работ входят разработка проектно-конструкторской документации на конструкцию СБ и агрегат ее раскрытия, а также КА с традиционными системами, изготовление, наземная модельная и поэлементная отработка и орбитальная отработка, а также изготовление двигательных систем. Эти этапы минимум вдвое повысят стоимость работ по сравнению со стоимостью электрогенерирующей основы СБ.

## Заключение

Создание солнечного ММБ является реальной научно обоснованной задачей, имеющей достаточные научный, проектно-конструкторский и производственно-технологический заделы, а также испытательную базу в РФ. К разработке могут быть привлечены ведущие предприятия ракетно-космической и других отраслей, имеющие богатый опыт создания аналогичных систем и обладающие достаточным для солнечного ММБ научно-техническим потенциалом.

## Список литературы

1. *Ярыгин В.И.* Ядерная энергетика прямого преобразования в космических миссиях XXI в. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2013. № 2. С. 5–20.
2. *Ярыгин В.И., Ружников В.А., Синявский В.В.* Космические и наземные ядерные энергетические установки прямого преобразования энергии: монография. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 364 с.
3. *Синявский В.В.* Научно-технический задел по ядерному электроракетному межорбитальному буксиру «Геркулес» // Космическая техника и технологии. 2013. № 3. С. 25–45.
4. *Райкунов Г.Г., Комков В.А., Сыроев В.К., Мельников В.М.* Космические солнечные электростанции – проблемы и перспективы. М.: Изд-во РУДН, 2017. 283 с.
5. *Горшков В.А., Муравлев А.А., Шагайда О.А.* Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / под ред. А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2008. 280 с.
6. *Мельников В.М., Елкин К.С., Матюшенко И.Н., Русаков А.В.* Мегаваттный безэлектродный плазменный двигатель – новое направление в российской космонавтике // Космонавтика и ракетостроение. 2015. Вып. 2 (81). С. 47–53.

7. *Squire J.P., Olsen C.S., Díaz F.C., Cassady L., Longmier B., Ballenger M.G., Carter M., Glover T.W., McCaskill G., & Bering E.* VASIMR VX-200 operation at 200 kW and plume measurements: future plans and an ISS EP test platform // The 32<sup>nd</sup> International Electric Propulsion Conference (IEPC-2011-154) (Wiesbaden, 11–15 September 2011). URL: <http://electricrocket.org/IEPC/IEPC-2011-154.pdf> (accessed: 10.10.2020).

8. *Райкунов Г.Г., Комков В.А., Мельников В.М., Харлов Б.Н.* Центробежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции. М.: Физматлит, 2009. 447 с.

9. *Семенов Ю.П., Бранец В.Н., Григорьев Ю.И., Зеленищikov Н.И., Кошелев В.А., Мельников В.М., Платонов В.Н., Севастьянов Н.Н., Сыромятников В.С.* Космический эксперимент по разворачиванию пленочно-бескаркасного отражателя  $D = 20$  м («Знамя-2») // Космические исследования. 1994. Т. 32. № 4–5. С. 186–193.

10. *Комков В.А., Мельников В.М., Харлов Б.Н.* Формируемые центробежными силами солнечные батареи. М.: Черос, 2007. 188 с.

11. *Melnikov V.M., Koshelev V.A.* Large space structures formed by centrifugal forces. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1998. 157 p.

12. *Плохих В.П., Бузулук В.И.* Сравнительный анализ различных типов старта многоразового воздушно-космического самолета (МВКС) // IV Международный конгресс IAC-2003: сборник докладов. М., 2003. С. 246–251.

## Для цитирования

*Мельников В.М., Разумный Ю.Н.* Многоразовые межорбитальные буксиры мегаваттного класса: проблемы и перспективы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 281–289. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-281-289>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-281-289

Research article

## Reusable interorbital tugs of megawatt class: problems and prospects

Vitaly M. Melnikov, Yury N. Razoumny

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

### Article history:

Received: November 4, 2020

Revised: December 10, 2020

Accepted: December 15, 2020

*Abstract.* The possibilities of creating solar reusable megawatt-class interorbital tugs are analyzing. A comparison of solar and nuclear power plants is given, and the advantages of using solar systems are justified. On the basis of a comparative analysis of analogues, such as solar sails, solar reflectors for illumination from Earth's orbit, solar panels of space power

*Vitaly M. Melnikov*, Professor of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Institute of Space Technologies of the Academy of Engineering of the RUDN University, Academician of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics and International Academy of Informatization, Doctor of Sciences (Techn.), Professor; [vitalymelnikov45@yandex.ru](mailto:vitalymelnikov45@yandex.ru).  
*Yury N. Razoumny*, Director of the Academy of Engineering of the RUDN University, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Institute of Space Technologies of the Academy of Engineering of the RUDN University, Academician of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics and International Academy of Astronautics, Doctor of Sciences (Techn.), Professor.

**Keywords:**

reusable tug, nuclear and solar power plants, electrolysis of water in space, electroplasma engines, electromagnetic accelerators

plants, the advantages of using frameless centrifugal solar panels in comparison with frame analogues are justified. It is indicated that the design and development, as well as the production and technological reserve and test base are sufficient for the creation of a solar power plant in the Russian Federation. The authors point out the prospect of using oxygen-hydrogen fuels obtained by electrolysis of water in space, which greatly increase the speed of transport operations, and the need to create electro-magnetic accelerators for launching from Earth with large cargo flows. The design evaluation of the parameters of centrifugal solar panels with a capacity of 1 and 5 MW is given. The necessary funding for the work was estimated.

**References**

1. Yarygin VI. Nuclear power of direct conversion in space missions of the 21st century. *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*. 2013;(2):5–20. (In Russ.)
2. Yarygin VI, Ruzhnikov VA, Sinyavsky VV. *Kosmicheskie i nazemnye yadernye energeticheskie ustanovki pryamogo preobrazovaniya energii [Space and ground-based nuclear power plants for direct energy conversion]*. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2015. (In Russ.)
3. Sinyavsky VV. Advanced technology for nuclear electric propulsion orbital transfer vehicle Hercules. *Space Technique and Technologies*. 2013;(3):25–45. (In Russ.)
4. Rajkunov GG, Komkov VA, Sysoev VK, Melnikov VM. *Kosmicheskie solnechnye elektrostancii – problemy i perspektivy [Space solar power plants-problems and prospects]*. Moscow: RUDN University; 2017. (In Russ.)
5. Gorshkov VA, Muravlev AA, Shagajda OA. *Hollovskie i ionnye plazmennye dvigateli dlya kosmicheskikh apparatov [Hall and ion plasma engines for spacecraft]*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2008. (In Russ.)
6. Melnikov VM, Elkin KS, Matyushenko IN, Rusakov AV. A megawatt electrodeless plasma engine as a new direction of the Russian cosmonautics. *Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2015;2(81):47–53. (In Russ.)
7. Squire JP, Olsen CS, Diaz FC, Cassidy L, Longmire B, Ballenger MG, Carter M, Glover TW, McCaskill G, Bering E. VASIMR VX-200 operation at 200 kW and plume measurements: future plans and an ISS EP test platform. *The 32nd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2011-154) (Wiesbaden, 11–15 September*

2011). Available from: <http://electricrocket.org/IEPC/IEPC-2011-154.pdf> (accessed: 10.10.2020).

8. Rajkunov GG, Komkov VA, Melnikov VM, Harlov BN. *Centrobezhnye beskarkasnye krupnogabaritnye kosmicheskie konstrukcii [Centrifugal frameless large-size space structures]*. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2009. (In Russ.)

9. Semenov YuP, Branets VN, Grigoriev YuI, Zelenshchikov NI, Koshelev VA, Melnikov VM, Platonov VN, Sevastyanov NN, Syromyatnikov VS. Space experiment on the deployment of a film frameless reflector  $D = 20$  m (“Znamya-2”). *Kosmicheskie Issledovaniya*. 1994;32(4–5):186–193. (In Russ.)

10. Komkov VA, Melnikov VM, Harlov BN. *Formiruemye centrobezhnymi silami solnechnye batarei [Solar batteries formed by centrifugal forces]*. Moscow: Cheros Publ.; 2007. (In Russ.)

11. Melnikov VM, Koshelev VA. *Large space structures formed by centrifugal forces*. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers; 1998.

12. Plokhikh VP, Buzuluk VI. A comparative analysis of different types of launching a reusable liquid-propellant spaceplane. Proceedings of the Fourth International Aerospace Congress IAC-2003. Moscow; 2003. p. 246–251. (In Russ.)

**For citation**

Melnikov VM, Razoumny YuN. Reusable interorbital tugs of megawatt class: problems and prospects *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):281–289. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-281-289>



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-290-301

УДК 621.31

Научная статья

## План ГОЭЛРО – образец системного подхода к долгосрочному развитию отечественной электроэнергетики

В.Э. Воротницкий

ООО «Энергоэкспертсервис», Российская Федерация, 115201, Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3

### История статьи:

Поступила в редакцию: 4 октября 2020 г.

Доработана: 22 ноября 2020 г.

Принята к публикации: 29 ноября 2020 г.

### Ключевые слова:

электрификация, электроэнергетика, история и перспективы развития, техника и технологии, инновации

*Аннотация.* Рассмотрена краткая история создания Государственного плана электрификации России (ГОЭЛРО), утвержденного в 1920 году и перевыполненного в течение 15 лет. Показано, что план ГОЭЛРО, основы которого активно разрабатывались и обсуждались еще в дореволюционной России, был, по существу, государственным планом развития экономики страны на долгосрочный период. Представлен анализ основных тенденций и направлений развития мировой и отечественной электроэнергетики на основе применения новых технологий и техники производства, передачи и распределения электроэнергии. Перечислены системные ключевые проблемы современной электроэнергетики России, обусловленные ее реформированием в постсоветский период. На основе анализа этих проблем и с учетом мнений экспертного сообщества сделан вывод о необходимости более активного участия государства в управлении отраслью, в создании нормативной базы для повышения эффективности этого управления. Предложено разработать и реализовать новый план ГОЭЛРО, учитывающий тенденции развития мировой энергетики, достижения четвертой промышленной революции, многолетний положительный опыт функционирования ЕЭС России, перспективы экономического развития ее регионов.

### Введение

В декабре 2020 года Россия отметила 100-летие Государственного плана электрификации России (ГОЭЛРО). Несмотря на огромные трудности первых лет советской власти, голод и разруху, правительство отчетливо понимало, что без электрификации России невозможно обеспечить ее экономическую безопасность, независимость и обороноспособность. Системный подход к разработке этого плана и сегодня является образцом государственной политики при создании

базы ускоренного развития промышленности и экономики страны в целом. Цель статьи – рассмотреть историю создания, задачи и результаты выполнения плана ГОЭЛРО, основные тенденции и направления развития мировой и отечественной электроэнергетики, современные ключевые проблемы электроэнергетики России и пути их решения на основе применения инновационных техники, технологий и активного участия государства в управлении отраслью.

### 1. Краткая история создания, основные задачи плана ГОЭЛРО и результаты его выполнения

Об электрификации в России начали заботиться задолго до декабря 1920 года. Еще в 1880 году выдающимися российскими электротехни-

*Воротницкий Валерий Эдуардович*, заместитель генерального директора, действительный член Академии электротехнических наук, д. т. н., профессор; eLIBRARY SPIN-код: 6123-7192, Scopus Author ID: 6507361692; Evve46@yandex.ru.

© Воротницкий В.Э., 2020



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

ками, объединенными в Шестой электротехнический отдел Императорского Русского технического общества, был основан журнал «Электричество», который стал в те годы и остается сегодня одним из основных отечественных теоретических и профессиональных журналов.

В 1886 году по инициативе братьев Вернера и Карла Сименсов, работавших в России с 1852 года и возглавлявших компанию «Сименс и Гальске», в Санкт-Петербурге было создано «Акционерное общество электрического освещения 1886 года» (далее – «Общество 1886 года») (рис. 1).



**Рис. 1.** Участники одного из совещаний «Общества 1886 года»  
**[Figure 1.** Participants of one of the meetings of the “Society of 1886”]

*Источник:* Музей истории Мосэнерго. URL: [http://www.mosenergo-museum.ru/History\\_of\\_Mosenergo/Historical\\_Review/1887\\_1917/](http://www.mosenergo-museum.ru/History_of_Mosenergo/Historical_Review/1887_1917/) (дата обращения: 12.09.2020).

*Source:* Mosenergo Development History Museum. Available from: [http://www.mosenergo-museum.ru/History\\_of\\_Mosenergo/Historical\\_Review/1887\\_1917/](http://www.mosenergo-museum.ru/History_of_Mosenergo/Historical_Review/1887_1917/) (accessed: 12.09.2020).

Устав «Общества 1886 года» был утвержден 4 июля 1886 года высочайшим указом императора Александра III. Устав позволял «как производить электроэнергию, транспортировать ее, так и реализовывать».

На заседании правления «Общества 1886 года» 5 февраля 1887 года в Санкт-Петербурге было заслушано сообщение директора-распорядителя А.А. Троицкого о необходимости «подготовить почву для действия Общества в Москве». Правление поручило директору-распорядителю посетить Москву, чтобы «войти с предложениями устроить центральные электрические станции частного потребления». Правление поручило 5 марта 1887 года М.О. Альберту быть агентом «Общества 1886 года» в Москве и принимать заявления от лиц, желающих пользоваться электрическим освещением. Деятельность «Общества 1886 года» в Москве началась с

заключения в апреле 1887 года договора с городской управой, согласно которому Обществу предоставлялось право прокладывать по улицам подземные электрические провода (рис. 2).



**Рис. 2.** Фрагмент рекламного документа Московской центральной электрической станции Общества электрического освещения 1886 года  
**[Figure 2.** Fragment of the advertising document of the Moscow Central Electric Power Station of the Electric Lighting Society of 1886]

*Источник:* Музей истории Мосэнерго. URL: <http://www.mosenergo-museum.ru/Museum/Archive/Photo/410/#pg-img-16> (дата обращения: 12.09.2020).

*Source:* Mosenergo Development History Museum. Available from: <http://www.mosenergo-museum.ru/Museum/Archive/Photo/410/#pg-img-16> (accessed: 12.09.2020).

Правление «Общества 1886 года» заключает первый контракт на освещение частного владения в Москве – Пассажа г-жи Постниковой на Тверской улице (сегодня в этом здании расположен Театр имени М.Н. Ермоловой) 31 июля 1887 года. Именно эту дату принято считать днем рождения Мосэнерго.

Семь всероссийских электротехнических съездов, на которых велись обсуждения и диспуты по решению основных вопросов и проблем отечественной электроэнергетики, путей ее развития, были проведены с 1899 по 1913 год (табл. 1). Публиковались научные доклады, статьи. Возможности науки и техники демонстрировались на выставках (рис. 3) [1].

Первый проект по электрификации страны, принадлежащий перу профессора К. Клингенборга, был создан в 1913 году. В нем рассматривались вопросы по строительству гидроэлектростанций и теплоэлектроцентралей, предлагалось перевести промышленность на электричество. В 1914 году положено начало объединению электростанций – электростанцию «Электропередача» включили на параллельную работу со станцией на Раушской набережной.



**Рис. 3.** На одном из Всероссийских электротехнических съездов [1]  
**[Figure 3.** At one of the All-Russian Electrical Congresses [1]]



**Рис. 4.** Члены комиссии ГОЭЛРО за работой [1]  
**[Figure 4.** Members of the GOELRO commission at work [1]]

Таблица 1

**Динамика развития генерирующих мощностей в России за 1888–1917 годы [2]**  
**[Table 1. Dynamics of the development of generating capacity in Russia for 1888–1917 [2]]**

Годы [Years]	Мощность, кВт [Power, kW]	Количество построенных станций [Number of stations built]	Средняя мощность одной станции, кВт [Average power of 1 station, kW]	Средний ежегодный прирост станций [Average annual station growth]
1888–1892	5554	5	1111	1
1893–1897	93 905	16	5863	3,2
1898–1902	161 578	36	4489	7,2
1903–1907	63 574	27	2355	5,4
1908–1912	63 798	99	647	19,8
1913–1917	54 736	89	615	17,8
<b>Итого за 29 лет [Total for 29 years]</b>	<b>443 145</b>	<b>272</b>	<b>1630</b>	<b>9</b>

Первая мировая война и две последующие революции существенно затормозили развитие электрификации страны. Тем не менее уже в январе 1918 года на I Всероссийской конференции работников электропромышленности было предложено создать орган для руководства энергетическим строительством. Через четыре месяца был создан «Электрострой». Одновременно с ним был образован преемник и продолжатель всероссийских электротехнических съездов – Центральный электротехнический совет (ЦЭС), в состав которого вошли крупнейшие российские энергетики: И.Г. Александров, А.В. Винтер, Г.О. Графтио, Р.Э. Классон, А.Г. Коган, Т.Р. Макаров, В.Ф. Миткевич, Н.К. Поливанов, М.А. Шателен и др. В апреле 1918 года, концепцию электрификации страны подготовил Ленин в статье «Набросок плана научно-технических работ», а в 1919 году Кржижановский детализировал эту концепцию в статье «Задачи электрификации промышленности»

и получил на нее положительный отклик. Эти две работы легли в основу принятия решения в феврале 1920 года о создании комиссии ГОЭЛРО. В комиссию вошли Г.М. Кржижановский, А.И. Эйсмэн, А.Г. Коган, Б.И. Угримов, Н.Н. Вашков, Н.С. Синельников, Г.О. Графтио, Л.В. Дрейер, К.А. Круг, М.Я. Лапиров-Скобло, Б.Э. Стонкель, М.А. Шателен, Е.Я. Шульгин, Д.И. Комаров, Р.А. Ферман, Л.К. Рамзин, А.И. Таиров, А.А. Шварц (рис. 4). В подготовке плана электрификации России принимали участие в общей сложности около 250 лучших специалистов, завершивших работу к концу года. С самого начала план ГОЭЛРО разрабатывался как комплексный Государственный план развития экономики.

22 декабря 1920 года председатель комиссии Глеб Максимилианович Кржижановский выступил перед собравшимися в Большом театре. На огромном стенде с картой России под его указкой зажигались огни на месте будущих электростанций (рис. 5).



Рис. 5. Карта электрификации России [1]  
[Figure 5. Electrification map of Russia [1]]

Таблица 2

Структура мощностей электростанций, которые необходимо было построить в регионах страны по плану ГОЭЛРО  
[Table 2. Structure of power plant capacities to be built in the regions of the country according to the GOELRO plan]

Станции [Stations]	Северный район [Stations of the Northern district]	Центрально- промышлен- ный район [Central- industrial district]	Южный район [Sou- thern district]	Волжский район [Volzhsky district]	Уральский район [Uralsky district]	Кавказский район [Kavkazsky district]	Западно- Сибирский и Туркестанский районы [West Siberian and Turkestan districts]	Всего [Total]
Общее число [Total number of stations]	4	6	5	4	4	4	3	30
Общая мощность, тыс. кВт [Total power, thousand kW]	195	360	560	120	210	155	150	1750
Из них [Of them]:								
– паровых [steam stations]	1	6	4	4	3	1	1	20
– гидроэлектрических [hydroelectric power stations]	3	–	1	–	1	3	2	10
Мощность паровых станций, тыс. кВт [Power of steam stations, thousand kW]	40	360	330	120	180	30	50	1110
Мощность гидроэлектрических станций, тыс. кВт [Hydroelectric power capacity, thousand kW]	155	–	230	–	30	125	100	640

В соответствии с планом необходимо было за 10–15 лет построить 30 районных электростанций общей мощностью 1,75 млн кВт. При разработке плана ГОЭЛРО страну разделили на 8 экономических районов: Северный, Центрально-промышленный, Южный, Приволжский, Уральский, Западно-Сибирский, Кавказский и Туркестанский. Каждый из них имел свой подробный план реализации, увязанный с планами развития их экономики, отраслей промышленности, железных дорог, водного транспорта и сельского хозяйства (табл. 2) [2].

Помимо нового строительства электростанций, план ГОЭЛРО предусматривал также их так называемое кустование, которое заключалось в объединении существующих станций через электрические сети с целью взаимной поддержки и достижения более правильного распределения нагрузки между станциями. Причем менее выгодные в экономическом отношении станции подлежали закрытию за счет увеличения загрузки наиболее экономичных [2].

На удивление всему миру за 15 лет план ГОЭЛРО по основным показателям был не только выполнен, но и перевыполнен. Сегодня известно, какой ценой достигнуто это перевыполнение. На строительстве гидросооружений, электрических станций и сетей, железных дорог, промышленных предприятий в тяжелейших условиях трудились не только вольнонаемные рабочие и крестьяне, но и огромное количество заключенных. Оборудование для станций и заводов приходилось закупать за границей на валюту от продажи культурных ценностей и пшеницы (во время губительного голода во многих районах страны). Проводилась насильственная коллективизация сельского хозяйства, привлекалось большое число иностранных консультантов. Несмотря на все трудности и жертвы, к 1935 году СССР по производству электроэнергии стал третьим в мире после США и Германии. Была выстроена основа для создания Единой энергетической системы (ЕЭС), которая развивалась в последующие годы с активным участием многих поколений выдающихся отечественных электротехников и энергетиков как единый технологический комплекс с устойчивой и надежной параллельной работой электрических станций и сетей на территории всей страны от Мурманска до Владивостока.

В юбилейный год плана ГОЭЛРО необходимо вспомнить не только связанные с ним победы и достижения, но и тех, кто отдал свои жизни ради них.

## 2. Основные тенденции и направления развития мировой и отечественной электроэнергетики

ЕЭС как инфраструктурная база энергетической и национальной безопасности сыграла важнейшую роль в развитии промышленности страны в 20–30-е годы XX века, победе в Великой Отечественной войне, восстановлении и развитии экономики СССР в послевоенные годы, сохранении от развала постсоветской России в кризисные 90-е годы двадцатого столетия.

Построенные в советский период электрические станции и сети и сегодня являются основой электроэнергетики современной России, которая по праву становится частью мировой электроэнергетической системы и развивается с учетом современных вызовов, новых техники и технологий производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии.

В настоящее время мировая электроэнергетика находится на пороге перехода к четвертой промышленной революции и шестому технологическому укладу [3], к новым технологиям производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Этот переход осуществляется на базе трех *D* – декарбонизации, децентрализации и диджитализации (цифровизации) с созданием интеллектуальных систем электроснабжения и активным вовлечением потребителей в управление режимами энергосистем, генерацией и потреблением электроэнергии.

Декарбонизация обусловлена необходимостью снижения отрицательного влияния энергетических объектов на климат и окружающую среду и направлена в первую очередь на уменьшение вредных выбросов от сжигания топлива на тепловых электростанциях в атмосферу.

Децентрализация электроэнергетики вызвана объективным стремлением потребителей уменьшить зависимость надежности электроснабжения и тарифов на электроэнергию от ее централизованной передачи по электрическим сетям. Для этого все шире используются распределенная генерация (РГ) и возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Мировой рынок РГ растет активными темпами – 6–9 % в год. Побудительными мотивами к расширению объемов децентрализации производства электроэнергии и распределенной генерации послужили разработки новых газотурбинных и парогазовых технологий, проводимые в 1970–1980 годы в США и Европе. Эти тех-

нологии позволили создавать недорогие и эффективные электростанции небольшой мощности – от десятков кВт до десятков МВт, а их применение – в ряде случаев снизить затраты потребителей на оплату электроэнергии и повысить надежность электроснабжения.

В первом десятилетии XXI века активное развитие получили технологии применения ВИЭ, силовой электроники, накопителей электроэнергии. Их внедрение из политической постепенно превращается в технико-экономическую задачу. Стоимость выработки одного кВт·ч электроэнергии на солнечных и ветряных электростанциях в 2009–2017 годах в мире упала на 67–86 %. РГ и ВИЭ стали внедряться среди потребителей электроэнергии [4].

Следует заметить, что к ВИЭ кроме солнечных и ветроэлектростанций относятся также:

- гидроэнергетика, включая малые ГЭС и ГАЭС;
- геотермальная энергетика;
- источники, использующие энергию биомассы, приливов и отливов, волн и течений и т. п.;
- гибридные, сочетающие в себе несколько типов параллельно работающих ВИЭ.

Опыт внедрения РГ и ВИЭ и интеграции с традиционной централизованной (а в настоящее время уже и с частично глобальной) энергетикой в различных странах обнаружил целый ряд преимуществ и эффектов, в частности:

- обеспечение надежного электроснабжения наиболее ответственных потребителей;
- снятие ограничений на подключение к электросетям новых потребителей и увеличение мощности присоединенной нагрузки;
- снижение затрат на передачу электроэнергии по магистральным и распределенным электрическим сетям за счет оптимизации потоков активной мощности и приближения генерации к местам потребления;
- повышение эффекта от оптимизации потоков реактивной мощности в электрических сетях;
- обеспечение нормативных уровней напряжения в узлах электросетей в послеаварийных режимах;
- отсрочка реконструкции электросетевых объектов из-за снижения перегрузок силовых трансформаторов и линий электропередач за счет выработки мощности в распределительных сетях;
- расширение возможностей интеграции разнородных источников централизованной генерации, ВИЭ и активных потребителей;

- повышение эффективности управления электропотреблением и выравниванием формы графиков нагрузки линий и силовых трансформаторов [4].

Одновременно с этим при расширении объемов внедрения РГ и ВИЭ приходится решать множество проблем, к главным из которых относятся [5]:

- рост уровней колебания напряжения в узлах сети и точках поставки электроэнергии потребителям;
- увеличение реверсивных перетоков мощности в электрических сетях низкого и среднего напряжения, из-за которых могут существенно вырасти потери мощности и электроэнергии в данных сетях;
- необходимость изменения структуры, уставок и алгоритмов работы систем релейной защиты и автоматики в сетях низкого и среднего напряжения, а также регулирования роста уровней токов короткого замыкания в этих сетях;
- обеспечение запасов устойчивости энергосистемы при отключении больших объемов мощности РГ и ВИЭ;
- введение дополнительных мер по обеспечению электробезопасности обслуживания электрических сетей при наличии РГ и ВИЭ у потребителей, синхронной работе энергосистем, РГ и ВИЭ.

Широкое внедрение РГ и особенно ВИЭ создает серьезные проблемы прогнозирования производства и потребления мощности и электроэнергии на электроэнергетических рынках – растут погрешности такого прогноза при применении традиционных методик. В результате наблюдается постепенный отход от проектирования сети по ее номинальной пропускной способности и детерминированной исходной информации к вероятностным статистическим методам и подходам, использованию искусственного интеллекта при проектировании развития сетей и оперативном управлении их режимами. Проблемы с прогнозированием приводят к росту локальных небалансов мощности и электроэнергии, в частности к необходимости держать избыточные мощности для покрытия дефицита по причине невозможности их покрытия возобновляемыми источниками энергии. Из-за колебаний климатических условий в последние годы выработка электроэнергии ВИЭ отличается все большей нестабильностью.

### 3. Пути инновационного развития электроэнергетики России

Решение перечисленных и многих других проблем, связанных с необходимостью обеспечения современных требований к надежности, качеству и экономичности электроснабжения потребителей в новых условиях, потребовало разработки и создания новой концепции развития энергетики, управления режимами энергосистем и сетей. При этом рассматривались различные варианты выхода из складывающейся ситуации. В результате глубокого и всестороннего анализа, проведенного в США, Китае, ЕС, России и других странах был выбран инновационный путь развития, основанный на интеллектуализации энергетики, в том числе на создании интеллектуальных энергетических систем и электрических сетей (Smart Grid), а в последние годы – на применении цифровых технологий (цифровизации) в энергетике [6].

В России уже в 2012 году были разработаны и приняты к исполнению Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) [7].

Концепция ИЭС ААС была дополнена и конкретизирована в Политике инновационного развития, энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «Россети» (далее – Политика), утвержденной советом директоров компании в апреле 2014 года.

Во исполнение и развитие Политики решением Совета директоров от 30 декабря 2016 года № 250 утверждена Программа инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016–2020 годов с перспективой до 2025 года.

Таким образом, основы применения цифровых технологий (в современном их понимании) в электрических сетях России были сформулированы в отраслевых нормативных документах уже в 2012–2014 годах. Интеллектуализация и широкая автоматизация систем управления на основе применения вычислительной техники в отечественной электроэнергетике была начата в СССР значительно раньше – в начале семидесятых годов прошлого столетия при создании ИОАСУ-Энергия.

Существенным стимулом в последние годы к активизации работ по цифровой трансформации энергетики, в том числе электрических сетей, послужила утвержденная распоряжением Правительства РФ от 27 июля 2017 года № 1632-р программа «Цифровая экономика Российской Федерации». С целью ее исполнения Министерством

энергетики России сформирован ведомственный проект «Цифровая энергетика». Одним из его активных участников, а также инновационного развития электросетевого комплекса как инфраструктурной основы электроэнергетики, является ПАО «Россети», которым за последние годы разработаны и утверждены концепция «Цифровая трансформация 2030» (2018) [8] и положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе (новая редакция), утвержденное советом директоров, протокол от 8 ноября 2019 года № 378 (далее – Единая техническая политика).

Перечисленные документы периодически уточняются с учетом опыта их внедрения и дополняются новыми. С вводом их в действие значительно активизировались работы электросетевых компаний и бизнеса для эффективного решения поставленных в них задач. Эти задачи должны решаться комплексно с учетом их взаимного влияния, анализа передового отечественного и зарубежного опыта. Необходимость такого подхода все отчетливее подтверждается на ежегодных отраслевых выставках техники и технологий для электроэнергетики и электрических сетей, где экспонируется все большее количество не уступающих передовым зарубежным аналогам цифровых измерительных приборов, интеллектуальных коммутационных аппаратов, средств и систем диагностики, приборов и систем учета электроэнергии, программно-аппаратных комплексов, построенных на международных стандартах информационного обмена данными, и многое другое.

Утверждены отраслевые стандарты ПАО «Россети»: СТО 34.01-21-004-2019. Цифровой питающий центр; СТО 34.01-21-005-2019. Цифровая электрическая сеть. Требования к проектированию цифровых распределительных электрических сетей 0,4-220 кВ. Планируется разработка серии других стандартов с их адаптацией при необходимости к международным стандартам. На десятках объектов ПАО «Россети» ведутся работы по созданию и внедрению пилотных проектов «Цифровая подстанция», «Цифровой РЭС». Развиваются проекты «Цифровой электромонтер», «Цифровой контролер» и т. п.

Инновационное развитие электроэнергетики России на долгосрочный период закреплено в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года [9] (далее – Стратегия), разработанной в соответствии с Федераль-

ным законом «О стратегическом планировании в Российской Федерации» [10], рядом других нормативных документов и правил. Стратегия определяет цели, ориентиры, приоритеты и направления развития, которые должны конкретизироваться в генеральных схемах развития и инвестиционных программах. Реализация Стратегии разделена на два этапа (до 2024 года и на период 2025–2035 годов) и включает в себя четыре направления: эффективное обеспечение потребностей социально-экономического развития России соответствующими объемами производства и экспорта продукции и услуг ТЭК, пространственное и региональное развитие энергетики, достижение технологической независимости ТЭК и повышение его конкурентоспособности, совершенствование государственного управления и развитие международных отношений. По каждому из этих направлений перечислены задачи, требующие решения для преодоления основных проблем и факторов риска, к которым отнесены:

- критическая зависимость от импорта технологий, оборудования, материалов, услуг и программного обеспечения по ряду наиболее перспективных направлений развития электроэнергетики;
- дефицит инвестиционных ресурсов, в том числе вследствие сдерживания роста тарифов в сфере электроэнергетики, ограничения возможности привлечения долгосрочного финансирования со стороны иностранных инвесторов и слабого развития венчурного кредитования;
- сохранение в электроэнергетике наряду с рыночными отношениями нерыночных отношений и обременений в сфере конечного потребления продукции и услуг, в том числе наличие перекрестного субсидирования;
- диспропорция между заявляемыми характеристиками электропотребления при технологическом присоединении и их последующими фактическими значениями;
- низкая платежная дисциплина потребителей на розничном рынке электрической энергии;
- несовершенство действующей модели отношений и ценообразования в сфере энергоснабжения и теплоснабжения и недостаток конкуренции на рынках электрической энергии и мощности;
- сохранение перекрестного субсидирования, снижающее эффективность централизованной системы энергоснабжения;
- недостаточный уровень автоматизации технологических процессов и повышение уязвимо-

сти объектов, связанное с усложнением систем и алгоритмов управления этими объектами.

В целом можно констатировать, что российская электроэнергетика сегодня находится в общемировом тренде применения современных и перспективных техники и технологий, в первую очередь цифровых, для совершенствования и развития систем управления в отрасли. К сожалению, пока этот тренд ограничивается лишь отдельными пилотными проектами, требующими тщательной технико-экономической оценки результатов их внедрения. Формирование на их основе комплексных проектов и программ пока практически отсутствует, как и реализация таких проектов. Именно в этих проектах и программах в полной мере достигаются максимальные эффекты от внедрения новых технологий.

#### **4. Результаты реформирования и анализ связанных с ними ключевых проблем отечественной электроэнергетики**

Постановление Правительства РФ от 11 июня 2001 года № 526 «О реформировании электроэнергетики Российской Федерации», Федеральный закон Российской Федерации от 26 марта 2003 года № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» и Федеральный закон от 26 марта 2003 года № 36-ФЗ «Об особенностях функционирования электроэнергетики и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации и признании утратившими силу некоторых законодательных актов Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона “Об электроэнергетике”» фактически ликвидировали главное преимущество ЕЭС СССР путем отделения функций естественных монополий от так называемых конкурентных функций. К естественным монопольным видам деятельности были отнесены передача и распределение электроэнергии и функции системного оператора, к конкурентным – производство (генерация) электроэнергии, сбыт, ремонтные и сервисные функции. В результате созданный всей страной единый электроэнергетический комплекс превратился в тысячи технологических не связанных между собой бизнес-единиц и процессов, компаний и организаций, малых, средних и крупных предприятий. Большинство из них оказались в частных руках. Все они были наделены самостоятельными, часто противоречивыми целями и задачами получения прибыли в условиях рынка электроэнергии.

Практика со всей очевидностью показала, что ни одна из целей, поставленных реформой электроэнергетики, не достигнута. Более того, количество проблем ее функционирования и развития не только не снижается, но увеличивается. К основным из них относятся:

- снижение эффективности управления отраслью, координирующей роли государства в управлении развитием электроэнергетики, создании и совершенствовании нормативной базы этого развития;

- высокий и постоянно растущий моральный и физический износ, недостаточная эффективность использования основного оборудования электрических станций, электрических и тепловых сетей;

- неоптимальная структура генерирующих мощностей, возникшая из-за недостатка пиковых и полупиковых маневренных электростанций, что негативно сказывается на эффективности работы АЭС, расположенных в Европейской части страны;

- продолжающееся отставание в создании и применении современных парогазовых и экологически чистых угольных технологий на ТЭС, отставание в создании и применении современных технологий в электросетевом комплексе, систем учета энергоресурсов;

- низкое качество прогнозов, проектов и схем развития электроэнергетики на среднесрочную и долгосрочную перспективу, отсутствие четких, понятных и обоснованных целей, критериев, моделей и задач развития как по стране в целом, так и по ее регионам;

- снижение роли науки и формальное участие экспертного сообщества и специалистов в вопросах стратегии развития электроэнергетики, рост влияния административных, лоббистских и политических решений этих вопросов;

- ликвидация центров ответственности в субъектах РФ, федеральных округах и стране в целом за надежное, качественное и экономическое электро- и теплоснабжение потребителей. Задачи электро- и теплоснабжения заменены на платные услуги по передаче электрической и тепловой энергии. «Гарантирующими поставщиками» электроэнергии назначены энергосбытовые, а не электросетевые организации, что существенно размывает и снижает ответственность за качество и надежность электроснабжения потребителей;

- необоснованное сокращение специализированных ремонтных и строительных подразделений – их деятельность выделена в отдельный бизнес на конкурсной основе. В результате в ряде случаев повысилась стоимость ремонтов и строительства с одновременным снижением их качества;

- неэффективность системы конкурсных закупок продукции и услуг, которая стимулирует осуществление этих закупок по минимальным ценам, часто с низким качеством и блокирует использование более дорогих инновационных и технологических решений, применение высокотехнологичного и энергосберегающего оборудования;

- отсутствие эффективной системы стимулирования в отрасли по внедрению новой, энергосберегающей техники и технологий и, как следствие, низкая энергетическая эффективность отрасли и страны в целом, отставание ее технологического развития от промышленно развитых стран по экспертным оценкам на 20–25 лет;

- рост издержек на производство и распределение электроэнергии, сложность и непрозрачность тарифной политики и ценообразования в отрасли и стране в целом, неуклонный и необоснованный рост тарифов на энергоресурсы, несмотря на активные усилия Правительства РФ по административному его сдерживанию. Уже в настоящее время тарифы на электроэнергию для промышленности России сравнялись с тарифами в странах Западной Европы по паритету покупательной способности. По многочисленным экспертным оценкам тарифы на энергоресурсы в стране завышены в среднем не менее чем на 30 %;

- систематическое недофинансирование и сокращение отраслевых научных и проектных организаций, вузовской науки, системы высшего технического образования и повышения квалификации персонала с соответствующим снижением качества научных исследований, проектов развития электроэнергетики, качества обучения, ликвидацией научных школ [11].

Одной из причин возникновения перечисленных проблем является уже упомянутый Федеральный закон № 35-ФЗ «Об электроэнергетике». В нем дано следующее определение электроэнергетики: это «...отрасль экономики Российской Федерации, включающая в себя комплекс экономических отношений, возникающих в процессе производства передачи электрической энергии, оперативно-диспетчерского управления

в электроэнергетике, сбыта и потребления электрической энергии...». Согласно этому определению, электроэнергетика – не часть сложнейшего научно-технологического топливно-энергетического комплекса, а всего лишь отрасль экономики. Она включает в себя только комплекс экономических отношений, а не сложный технологический и научно-технический комплекс. Из этого определения и следуют полное пренебрежение нормативно-техническим обеспечением отрасли, оптимальным ее развитием, а также все вышеназванные и неназванные проблемы.

## **5. Роль государства в управлении электроэнергетикой**

В основе нарастающего количества перечисленных проблем лежат отсутствие должной координации деятельности субъектов электроэнергетики со стороны государства, снижение качества работ по разработке и обоснованию стратегии развития электроэнергетики России и ее режимов на среднесрочную и долгосрочную перспективу, а также уверенность руководителей отрасли, что рынок электроэнергии и конкуренция сами все отрегулируют и лучшее само пробьет себе дорогу.

Опыт промышленно развитых стран с реально действующими конкурентными рынками продукции и услуг показывает, что роль государства в создании коммерческих и технологических правил этих рынков, в отраслевой стратегии развития, в стандартизации деятельности субъектов рынка является, как правило, определяющей, и не только не уменьшается, а, наоборот, повышается. Особенно яркое тому подтверждение демонстрирует Китай, экономика которого в последние 20 лет стала второй в мире.

Сегодняшняя структура и система управления отечественной электроэнергетикой не соответствуют современным вызовам и требуют совершенствования, в первую очередь в направлении более активного и эффективного участия государства в ее функционировании и развитии. Чем дальше будет переноситься это совершенствование, тем больше проблем в отрасли будет накапливаться, тем дороже будут затраты на их ликвидацию, тем сложнее будут решаться и вопросы развития экономики страны в целом.

Как показывает анализ, проблемы современной отечественной электроэнергетики носят комплексный, системный характер, поэтому та-

кими же системными должны быть подходы к их решению [11]. Основное внимание должно уделяться совершенствованию и инновационному развитию электроэнергетики и ее системы управления. Главные цели такого развития: недискриминационное удовлетворение спроса отечественных потребителей на электрическую и тепловую энергию, обеспечение их надежного, качественного и экономичного энергоснабжения, оптимизация тарифов на энергоресурсы, преодоление негативных последствий структурных реформ электроэнергетики.

Для комплексного решения этих проблем с учетом современных тенденций развития энергетики в мире в публикациях ведущих ученых и специалистов, на различных форумах и конференциях все чаще высказываются мнения о необходимости разработки нового Государственного плана электрификации России (ГОЭЛРО-2). Такой план действительно нужен. Он должен стать частью системы стратегического планирования и управления экономикой новой России, предусматривающей сочетание частной инициативы и рыночных механизмов, с одной стороны, и государственной поддержки осуществления совместно выстраиваемых планов развития, с другой стороны. Такой план должен создаваться на основе частно-государственного партнерства и предусматривать взаимную ответственность органов государственного управления, компаний с государственным участием, проектных, научно-исследовательских организаций и частных предприятий за достижение совместно устанавливаемых целей. При этом предприниматели могли бы брать на себя обязательства по наращиванию, модернизации и развитию производства продукции, а государство – по актуализации и совершенствованию нормативной базы, обеспечению стабильных и благоприятных условий ведения бизнеса, включая предоставление взаимовыгодных долгосрочных кредитов на финансирование инвестиций для выполнения совместно разработанных планов [12].

## **Заключение**

План ГОЭЛРО, утвержденный в 1920 году, по существу, стал планом развития народного хозяйства страны, послужившим основой создания и развития на долгие годы вперед Единой энергетической системы Советского, а затем и Российского государства.

Современной России нужен новый план ГОЭЛРО, который должен быть обеспечен финансовыми и материальными ресурсами со строжайшим контролем их расходования, выполнения поставленных задач, утвержденных показателей и сроков их достижения. Образец такого плана, разработанный в начале XX века отечественными специалистами высочайшей квалификации, был успешно выполнен и перевыполнен. Сегодня такие специалисты в России также имеются. При активной поддержке государства они вполне бы справились с разработкой и реализацией ГОЭЛРО-2 как практической основы для решения задач, поставленных в Энергетической стратегии РФ и долгосрочных программах социально-экономического развития страны в целом.

### Список литературы

1. Электрификация страны: план ГОЭЛРО // История в датах. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5bc9c87c5e9ba600af1be18f/elektrifikaciia-strany-plan-goelro-5c1e453fa2ef2500ab9e32a0> (дата обращения: 12.09.2020)
2. Слободкин Г.Л. Электрификация СССР. М.: 2019. 264с.
3. Воротницкий В.Э., Моржин Ю.И. Цифровая трансформация энергетики России – системная задача четвертой промышленной революции // Энергия единой сети. 2018. № 6 (42). С. 12–21.
4. Распределенная энергетика в мире: потенциал развития. Сколково: Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, 2018.
5. Илюшин П.В. Предпосылки и подходы к созданию моделей управления объектами распределенной генерации в составе распределительных сетей:

презентация доклада. М., 2015. URL: <https://docviewer.yandex.ru/view/114281440/?=nmEovJZ> (дата обращения: 10.09.2020).

6. Воротницкий В.Э. О цифровизации в экономике и энергетике // Энергетик. 2019. № 12. С. 6–14.

7. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. URL: <https://www.fsk-ees.ru>upload/docs/ies-aas/pdf> (дата обращения: 10.09.2020).

8. Концепция «Цифровая трансформация 2030». URL: [www.rosseti.ru>investmen/transformatia-2030.pdf](http://www.rosseti.ru>investmen/transformatia-2030.pdf) (дата обращения: 10.09.2020).

9. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об энергетической стратегии РФ на период до 2035 года». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prim/doc/74148810/> (дата обращения: 19.09.2020).

10. Федеральный закон от 28 июня 2014 года № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями). URL: <https://base.garant.ru/70684666/#frient> (дата обращения: 19.09.2020).

11. Воротницкий В.Э. Решение проблем электроэнергетики России должно быть системным и клиенто-ориентированным // Энергетик. 2018. № 6. С. 14–21.

12. Глазьев С.Ю. Рынок в будущее. Россия в новых технологическом и мирохозяйственном укладах. М.: Книжный мир, 2018. 768 с. (Коллекция Изборского клуба).

### Для цитирования

Воротницкий В.Э. План ГОЭЛРО – образец системного подхода к долгосрочному развитию отечественной электроэнергетики // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 290–301. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-290-301>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-290-301

Research article

## State Electrification Plan of Russia – an example of a systematic approach to the long-term development of the national electric power industry

Valery E. Vorotnitsky

“Energoexpertservis”, Ltd, 22 Kashirskoe Shosse, bldg 3, Moscow, 115201, Russian Federation

### Article history:

Received: October 4, 2020

Revised: November 22, 2020

Accepted: November 29, 2020

### Keywords:

electrification, electric power industry, history and development prospects, engineering and technology, innovation

*Abstract.* A brief history of the State Electrification Plan of Russia (GOELRO plan) development, established in 1920, and its execution during 15 years is considered. It is shown that the basic statements of the GOELRO plan were developed and discussed in pre-revolutionary Russia, and actually it was a state plan for the development of the country's economy for a long-term period. The analysis of the main trends of development in the world and national electric power industries based on the use of new technologies and techniques for the production, transmission and distribution of electricity is also presented. A list of key systemic problems

in the modern Russian electric power industry aroused as a result of its reform in the post-Soviet period is discussed. The conclusion about the need of more active state government participation in the industry management, in the creation of a new regulatory framework to improve the efficiency of the management was done based on the analysis of the mentioned problems. It is suggesting the developing of a new GOELRO plan, which has to take into account modern trends in the development of world energy, the achievements of the Fourth Industrial Revolution; the positive experience of many years in the functioning of the Unified Power System of Russia and the prospects for the economic development of its regions.

## References

1. *Electrification of the country: GOELRO plan. History in dates.* (In Russ.) Available from: <https://zen.yandex.ru/media/id/5bc9c87c5e9ba600af1be18f/elektrifikaciia-strany-plan-goelro-5c1e453fa2ef2500ab9e32a0> (accessed: 12.09.2020).

2. Slobodkin GL. *Elektrifikaciya SSSR [Electrification of the USSR]*. Moscow; 2019. (In Russ.)

3. Vorotnickij VE, Morzhin YuI. Digital transformation of the Russian energy industry – a system task of the fourth industrial revolution. *Energiya Edinoj Seti.* 2018;6(42):12–21. (In Russ.)

4. *Raspredeleonnaya energetika v mire: potencial razvitiya [Distributed energy in the world: the potential for development]*. Skolkovo: Energeticheskij centr Moskovskoj shkoly upravleniya SKOLKOVO Publ.; 2018. (In Russ.)

5. Ilyushin PV. *Prerequisites and approaches to creating models for managing distributed generation facilities as part of distribution networks.* Moscow; 2015. (In Russ.) Available from: <https://docviewer.yandex.ru/view/114281440/?=nmEovJZ> (accessed: 10.09.2020).

6. Vorotnickij VE. On digitalization in the economy and energy. *Energetik.* 2019;(12):6–14. (In Russ.)

7. *The main provisions of the concept of an intelligent power system with an active-adaptive network.* (In Russ.) Available from: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies-aas/pdf> (accessed: 10.09.2020).

8. *The concept of “Digital Transformation 2030”.* (In Russ.) Available from: [www.rosseti.ru/investmen/transformatia-2030.pdf](http://www.rosseti.ru/investmen/transformatia-2030.pdf) (accessed: 10.09.2020).

9. *Decree of the Government of the Russian Federation No. 1523-r of June 9, 2020 “On the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035”.* (In Russ.) Available from: <https://www.garant.ru/products/ipo/prim/doc/74148810/> (accessed: 19.09.2020).

10. *Federal Law No. 172-FZ of 28 June 2014 “On Strategic Planning in the Russian Federation” (as amended).* (In Russ.) Available from: <https://base.garant.ru/70684666/#frient> (accessed: 19.09.2020).

11. Vorotnickij VE. The solution to the problems of the Russian electric power industry should be systematic and customer-oriented. *Energetik.* 2018;(6):14–21.

12. Glazev SYu. *Ryok v budushchee. Rossiya v novyh tekhnologicheskoy i mirohozyajstvennom ukladah [A dash to the future. Russia in the new technological and world economic structures]*. Moscow: Knizhnyj mir Publ.; 2018.

## For citation

Vorotnitsky VE. State Electrification Plan of Russia – an example of a systematic approach to the long-term development of the national electric power industry. *RUDN Journal of Engineering Researches.* 2020;21(4):290–301. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-290-301>



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-302-308

УДК 621.311

Научная статья

## Анализ становления большой и малой электрогенерации Южного Урала

И.М. Кирпичникова

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),  
Российская Федерация, 454080, Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76

### История статьи:

Поступила в редакцию: 12 ноября 2020 г.

Доработана: 15 декабря 2020 г.

Принята к публикации: 21 декабря 2020 г.

### Ключевые слова:

план ГОЭЛРО, электрогенерация Урала, Челябинская ГРЭС, возобновляемая энергетика

*Аннотация.* Описано состояния энергетики России в дореволюционный период, приведены данные по производству электроэнергии на душу населения. Представлены краткая история создания комиссии по разработке Государственного плана электрификации России и некоторые результаты его реализации. Рассказано о строительстве первой крупной электростанции на Южном Урале, возведенной по плану ГОЭЛРО, – Челябинской ГРЭС, имеющей в то время огромное значение для развития промышленности области и остающейся одной из мощных электростанций в настоящее время. Раскрыты возможности использования возобновляемых источников энергии, в частности местных гидроэнергетических ресурсов для производства энергии. Показаны проблемы Порожской ГЭС – старейшей и уникальной гидроэлектростанции Урала, охарактеризованы малые ГЭС Южного Урала, обсуждены перспективы использования гидроэнергетического потенциала Челябинской области. Продемонстрирован потенциал солнечной и ветровой энергии, рассмотрены характеристики и особенности солнечных электростанций Урала и ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения, разработанных в Южно-Уральском государственном университете. Установлено, что биомасса в качестве ресурса для получения энергии имеет хорошие перспективы использования, однако в силу климатических условий данное направление пока не получило развития. Сделан вывод о том, что малая и распределенная энергетика по-прежнему являются важной составляющей в общей энергетике области и страны.

### Введение

На рубеже XIX–XX веков Россия, вступив на путь индустриализации, имела слабо развитую промышленность, а ее энергетика отставала от ведущих стран Запада и Америки, находясь на ше-

стидесятом месте в мире по выработке электроэнергии. Например, в 1913 году она составляла всего 14 кВт·ч электроэнергии на душу населения (для сравнения: в США – 236 кВт·ч) [1].

До начала Первой мировой войны в Российской империи насчитывалось более 300 городских электростанций и свыше 9000 малых энергоустановок, которые находились в частных руках и принадлежали богатым купцам и промышленникам.

Эти небольшие источники генерации не могли обеспечить все возрастающие потребности в энергии для работы заводов и освещения улиц.

*Кирпичникова Ирина Михайловна*, заведующая кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» ЮУрГУ (НИУ), доктор технических наук, профессор; eLIBRARY SPIN-код: 4553-2206, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4078-8790>; [kirpichnikovaim@susu.ru](mailto:kirpichnikovaim@susu.ru).

© Кирпичникова И.М., 2020

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

Однако в начале XX века в стране стали появляться первые электростанции небольшой мощности. Например, на Урале, в Челябинске в 1913 году началось строительство городской тепловой электростанции мощностью 250 кВт, работающей на буром угле Копейского месторождения [2].

### 1. Становление электрификации России

Развитию энергетики помешали Первая мировая война, революция и гражданская война. После установления мира молодой советской республике нужно было восстанавливать хозяйство и развивать экономику.

По инициативе В.И. Ленина была организована комиссия из двухсот специалистов, инженеров и ученых, задачей которых стало создание программы электрификации страны. За основу был принят план, разработанный Г.М. Кржижановским в 1915–1916 годах. В нем обосновывалось строительство электростанций в стране с использованием местных топливных и гидроресурсов [3].

В соответствии с планом, в восьми экономических районах страны в кратчайшие сроки необходимо было построить 30 крупных районных электростанций для энергоснабжения промышленных предприятий и городов с дальнейшим объединением их в крупные электроэнергетические системы. Говоря о важности электрификации страны на VIII Съезде Советов, Ленин подчеркивал, что этот план – вторая программа Коммунистической партии, которая должна стать «планом по созданию всего народного хозяйства и доведению его до современной техники» [3].

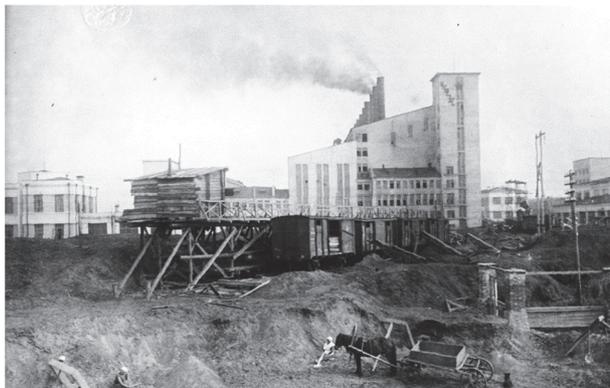
После утверждения Государственного плана электрификации России (ГОЭЛРО) 22 декабря 1920 года на VIII Всероссийском съезде Советов страна приступила к его реализации. План ГОЭЛРО стал важнейшим этапом развития энергетики России и определил рост экономики нашей страны на долгие годы. Благодаря четко спланированной программе развития, уже в 1935 году Россия вышла на третье место в мире по выработке электроэнергии [4].

На Урале план ГОЭЛРО был реализован в первое десятилетие после его принятия. В 1923 году запущена Егоршинская ГРЭС в Свердловской области, в 1924 году построена Кизеловская (Губахинская) ЭС в Пермской области, работающая на местном топливе.

Производство электроэнергии к 1937 году увеличилось в 13 раз [5].

### 2. Строительство Челябинской ГРЭС

Первой электростанцией, построенной на Южном Урале по плану ГОЭЛРО, была Челябинская государственная районная электростанция (ЧГРЭС) (рис. 1). Из 30 электростанций, которые предстояло построить, ЧГРЭС была в списке под номером 27 [6]. Торжественная закладка главного корпуса Челябинской ГРЭС состоялась 6 ноября 1927 года в честь 10-летия Октябрьской революции, а первый промышленный ток был дан уже в сентябре 1930 года. Такие высокие темпы строительства обеспечивались самоотверженным трудом рабочих и строителей [7].



**Рис. 1.** Строительство Челябинской ГРЭС – первенца ГОЭЛРО на Южном Урале  
**[Figure 1.** Construction of the Chelyabinsk State District Power Plant – the first-born of GOELRO in the South Urals]

*Источник:* Фонд Государственного исторического музея Южного Урала.

*Source:* Fund of the State Historical Museum of the South Urals.

Электростанция работала на буром угле, месторождение которого находилось рядом с Челябинском. Уголь доставлялся на ГРЭС по специально построенной для этих целей железной дороге. Для охлаждения механизмов и машин станции использовалась вода реки Миасс.

С 1963 года станция работает на природном газе, а 1 апреля 2018 года ЧГРЭС была официально переименована в Челябинскую ТЭЦ-4 с электрической мощностью 742 МВт и тепловой мощностью 850 Гкал/ч.

С началом работы Челябинской ГРЭС в 1930-е годы ускорилось строительство ставших в последствии гигантами промышленности Челябинского тракторного завода, Челябинского электрометаллургического комбината, лакокрасочного, электролитного цинкового и других крупных заводов Челябинской области.

### 3. Порожская ГЭС – старейшая гидроэлектростанция Урала

В июле 1931 года государственная комиссия приняла в эксплуатацию первую очередь Челябинского ферросплавного завода (ныне электрометаллургический комбинат), который до сегодняшнего дня является основным поставщиком ферросплавов в России.

До этого времени ферросплавы производились на небольшом заводе, работающем в поселке Пороги Саткинского района, электроэнергия для которого поступала от Порожской ГЭС. Эта гидроэлектростанция – единственная на Урале и одна из старейших в России – была запущена в эксплуатацию в 1910 году.

Проектировал ее известный ученый-гидротехник Б.А. Бахметьев. При строительстве использовался местный материал, плотина была выло-



**Рис. 2.** Машинный цех Порожской ГЭС (фотографии сделаны автором)

[Figure 2. Machine room of the Porozhskaya hydroelectric power station (photos taken by the author)]

### 4. Малые ГЭС Южного Урала

На территории Челябинской области имеется еще ряд малых ГЭС, работавших или работающих в настоящее время на местных водотоках. Одна из них – Верхнеуральская ГЭС, расположенная на реке Урал, которая использует расчетный перепад в 17 м на Верхнеуральском водохранилище. Мощность электростанции 1 МВт.

Две малые гидроэлектростанции Южного Урала, построенные в прошлом веке, – Зюраткульская и Аргазинская в настоящий момент не эксплуатируются. Строительство Зюраткульской ГЭС велось с 1942 по 1952 год. Объект представляет собой двухкаскадную ГЭС деривационного типа. В ее состав вошли плотина, деривационный канал длиной 9 км, напорный бассейн

жена из дикого камня и имела арочную архитектуру. Для преобразования энергии воды на порогах реки Большая Сатка применялись уникальные гидротурбины, которые были изготовлены по индивидуальному заказу ведущими фирмами Европы и действуют до сих пор. Их мощность составляла 560 и 845 кВт. Два генератора мощностью 550 кВт произведены в 1909 году немецкой фирмой «Бригель, Хансен и К°» (г. Гота, Германия), генератор третьей турбины – швейцарской фирмой «Браун, Бовери и К°» (рис. 2) [8].

На сегодняшний день производство свернуто как экономически невыгодное. Плотина, оборудование и здание Порожской ГЭС находятся в аварийном состоянии. Если не принять срочных мер по их восстановлению, ГЭС может окончательно разрушиться, и тогда мы лишимся этого уникального памятника инженерной мысли.



и два здания ГЭС первой и второй очереди. В 1978 году ГЭС была закрыта в связи с нерентабельностью. Оборудование зданий ГЭС демонтировано, сами здания по большей части разрушены, в неплохом состоянии находится напорный бассейн. В случае восстановления ГЭС ее мощность должна составить 6,4 МВт.

Вторая ГЭС – Аргазинская, расположенная на реке Миасс в селе Байрамгулово Аргаяшского района, строилась с 1939 года, в эксплуатацию запущена в 1946 году. Планируется ее восстановление с мощностью 1,35 МВт.

Использование такого местного ресурса, как малые реки и водотоки, может быть технически и экономически выгодным. А учитывая, что на территории Челябинской области находится более 3500 рек, из которых 90 % относятся

ся к очень малым, длиной менее 10 км, строительство малых ГЭС на них в большинстве случаев имеет хорошие перспективы [9].

## 5. Солнечная энергетика Урала

Потенциал солнечной энергии как ресурса для Урала в целом и для Челябинской области в частности достаточен для строительства здесь солнечных электростанций. Вероятность среднемесячной продолжительности солнечного сияния составляет 0,4–0,6, годовое поступление солнечной радиации на территорию области равно от 1050 кВт·ч/м<sup>2</sup> на севере и до 1250 кВт·ч/м<sup>2</sup> на юге. Уровень инсоляции составляет 4–4,5 кВт·ч/м<sup>2</sup>/сут [10].

Именно поэтому на территории Урала строятся новые и вводятся дополнительные очереди солнечных электростанций:

- Башкортостан: Бурибаевская – 20 МВт, Бурзянская – 20 МВт, Бугульчанская – 15 МВт, Исянгуловская – 9 МВт;

- Оренбургская область: семь солнечных электростанций, суммарной мощностью 250 МВт (Орская солнечная электростанция – СЭС имени А.А. Влазнева – 40 МВт);

- Свердловская область: планируется строительство трех СЭС общей мощностью 28 МВт.

- Челябинская область: планируется строительство СЭС мощностью 5 МВт.

Первая крупная кровельная СЭС в Челябинской области появилась на заводе АО «Русские электрические двигатели», расположенном в черте Челябинска (рис. 3).



**Рис. 3.** СЭС на кровле завода «Русские электрические двигатели» [11]  
**[Figure 3.]** Solar power plant on the roof of the plant “Russian Electric Motors” [11]

Батарея состоит из 840 гетероструктурных 60-ячеечных фотоэлектрических модулей «Хевел». Мощность установленного оборудования равна 240 кВт [11].

Увеличивается количество других солнечных энергоустановок, в том числе и для индивидуального использования.

## 6. Ветроэнергетические установки

Ветроэнергетический потенциал Челябинской области до недавнего времени считался бесперспективным с точки зрения строительства крупных ветропарков. Среднегодовые скорости ветра в большинстве районов области не превышают 4–5 м/с. Однако имеются участки с абсолютной высотой 1000–1200 м. Эти районы располагают большим ветроэнергетическим потенциалом – 28 597 МДж/м (103 МВт·ч/м) за год. К таким участкам относится гора Таганай – самое ветровое место в области со среднегодовыми скоростями ветра 10–12 м/с.

С развитием конструкций ветроэнергетических установок становится возможным их строительство и эксплуатация в местах с меньшими среднегодовыми скоростями ветра. Такие установки разработаны в Южно-Уральском государственном университете. Они могут использоваться как источники для индивидуальной электрогенерации, а также в составе ветро-солнечных комплексов [12].

В составе энергокомплекса ветроэнергетические установки хорошо дополняют солнечные модули (фотоэлектрические преобразователи), увеличивая общую надежность комплекса.

Для маломощных потребителей разработан гибридный ветро-солнечный микроэнергокомплекс, основанный на совместной выработке электроэнергии двумя альтернативными источниками номинальной мощностью 0,5 кВт (ветроэнергостановка, ВЭУ) и 0,1 кВт (солнечный модуль). Такая система является полностью автономной и работает практически без обслуживания (рис. 4).

Работа ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения мощностью 1 и 3 кВт не зависит от направления ветра, а старт происходит уже при скорости ветра до 2 м/с. Установки отличаются низким уровнем шума и вибрации и стабильной частотой вращения.

Разработанные ВЭУ испытывались как в условиях Уральского региона, так и в различных климатических зонах от экватора до Арктики:

– Япония, Акита (партнер Green Power, Токио);

– США, Сан-Франциско, Рамона, Ронерт Парк (партнер Национальная лаборатория имени Лоуренса в Беркли, США);

– Арктика, Канин Нос (НИИ космического приборостроения, Россия).

Испытания показали хорошую работоспособность комплексов и установок и подтвердили их преимущества [13].



**Рис. 4.** Ветроэнергетическая установка ВЭУ-3 с солнечным модулем (фотография сделана автором)  
[Figure 4. Wind turbine VEU-3 with a solar module (photo taken by the author)]

Еще один местный ресурс, который может быть использован для получения энергии и биотоплива, – биомасса. Объем биогаза, который мог бы быть получен при переработке отходов животноводства, показан в таблице [14].

Таблица

**Потенциал производства биогаза в Челябинской области**  
[Table. Potential for biogas production in the Chelyabinsk region]

Год [Year]	Кол-во животных, тыс. голов [Number of animals, thousand heads]	Объем биогаза, $\text{м}^3 \cdot 10^6$ [Biogas volume, $\text{m}^3 \cdot 10^6$ ]
2000	356,7	967,4
2005	212,1	636,3
2010	287,1	861,3
2015	314,1	942,3
2020	409,5	1228,5

Получение энергии только от использования отходов животноводства в различные годы могло бы составить от 1,5 до 6,0 ГВт электроэнергии. К сожалению, низкие температуры, особенно в зимний период, и другие экономические особенности не позволяют в полной мере использовать биогазовые технологии на территории Урала.

## Закключение

Для координации развития различных видов малой генерации в регионе создана Ассоциация малой энергетики Урала, которая традиционно является лидером по строительству и введению в строй объектов малой энергетики.

Ассоциация объединяет высокотехнологичные компании, которые работают в сфере малой распределенной генерации и смежных отраслях. Суммарная мощность введенных в эксплуатацию проектов членами Ассоциации составляет 245 МВт [15].

Малая и распределенная энергетика вносит свой значительный вклад в развитие общей энергетики региона и страны, которая, как и 100 лет назад, призвана решать основные задачи развития экономики и энергобезопасности страны.

## Список литературы

1. Принят план ГОЭЛРО // История.РФ. URL: <https://histrf.ru/lenta-vremeni/event/view/priniat-plan-goelro> (дата обращения: 10.12.2020).
2. Липовцева И., Михеев М., Мельников Н., Сапарулова А. ПРОСВЕТ. История становления и развития уральской энергосистемы в 1920–1950-е гг. Екатеринбург: Альфа Принт, 2017. 200 с.
3. История разработки плана ГОЭЛРО // Музей истории Мосэнерго. URL: [http://mosenergo-museum.ru/History\\_of\\_Mosenergo/Historical\\_Review/19034/](http://mosenergo-museum.ru/History_of_Mosenergo/Historical_Review/19034/) (дата обращения: 10.12.2020)г.
4. Гвоздецкий В.Л. План ГОЭЛРО. Мифы и реальность // Наука и жизнь. 2001. № 5. С. 102–109.
5. История народного хозяйства Урала: в 2 ч. Ч. 1. 1917–1945. Свердловск, 1988.
6. Первенцы ГОЭЛРО. 1917–1941 годы // Музей энергетики Урала. URL: <http://musen.ru/chronicle/> (дата обращения: 12.12.2020).
7. «Ток дан!»: 90 лет назад была запущена Челябинская ГРЭС // Государственный исторический музей Южного Урала. URL: [http://www.chelmuseum.ru/news/tok-dan-90-let-nazad-byla-zapushchena-chelyabinskaya-gres/?sphrase\\_id=13174](http://www.chelmuseum.ru/news/tok-dan-90-let-nazad-byla-zapushchena-chelyabinskaya-gres/?sphrase_id=13174) (дата обращения: 15.12.2020).

8. Кирпичникова И.М. Порожская ГЭС – уникальное сооружение XX века // Электрические станции. 2008. № 8. С. 4–8.

9. Гусева О.А., Пташкина-Гирина О.С. Оценка целесообразности электроснабжения от малых ГЭС // Вестник ИрГСХА. 2017. № 81–2. С. 105–111.

10. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б., Соловьев А.Ю., Шестакова В.В. Особенности эксплуатации солнечных энергоустановок в различных климатических условиях // Энергоэффективность. Ценология. Экология и энергобезопасность: материалы научной конференции / под науч. ред. Л.Х. Зайнутдиновой, М.Г. Тягунова. Астрахань, 2020. С. 46–55.

11. Крышная СЭС для АО «Русские электрические двигатели» // Хевел. URL: <https://www.hevelsolar.com/projects/pervaya-na-yuzhnom-urale-promyshlennaya-solnechnaya-elektrostanciya/> (дата обращения: 15.12.2020).

12. Амерханов Р.А., Соломин Е.В., Кирпичникова И.М., Мартыанов А.С., Коробатов Д.В., Лутовац М. Использование ветро-водородного комплекса бесперебойного энергоснабжения в различных климатических условиях // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2018. № 13–15. С. 30–54. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.13-15.030-054>

13. Аникиенко Е. «Чистая энергия» Урала выходит на рынки АСЕАН»: интервью с Евгением Соламиным // Южно-Уральская панорама. 2015, 4 декабря. URL: <https://ur74.ru/articles/ekonomika/81712/> (дата обращения: 12.12.2020).

14. Перспективы использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в Челябинской области // Распоряжение губернатора Челябинской области от 23.03.2017 г. № 256-р «Об утверждении схемы и программы перспективного развития электроэнергетики Челябинской области на 2016–2020 годы». URL: <http://docs.cntd.ru/document/450328134> (дата обращения: 10.12.2020).

15. Ассоциация малой энергетики. URL: <https://energo-union.com/ru/association> (дата обращения: 15.12.2020).

#### Для цитирования

Кирпичникова И.М. Анализ становления большой и малой электрогенерации Южного Урала // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 302–308 <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-302-308>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-302-308

Research article

## Analysis of the formation of large and small power generation in the Southern Urals

Irina M. Kirpichnikova

South Ural State University (National Research University), 76 Lenina Ave, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

#### Article history:

Received: November 12, 2020

Revised: December 15, 2020

Accepted: December 21, 2020

#### Keywords:

State Electrification Plan of Russia, GOELRO plan, power generation of the Urals, Chelyabinsk State District Power Plant, renewable energy

*Abstract.* The description of the state of power engineering in Russia in the pre-revolutionary period, data on the production of electricity per capita are presented. A brief history of the creation of a commission for the development of the State Electrification Plan of Russia (GOELRO plan) and some results of its implementation are provided. The construction of the first large power plant in the South Urals, built according to the GOELRO plan, – Chelyabinsk State District Power Plant, which at that time was of great importance for the development of the region's industry and remains one of the most powerful power plants at the present time, is described. The possibilities of using renewable energy sources, in particular local hydropower resources for energy production, are disclosed. The problems of the Porozhskaya Hydropower Plant – the oldest and unique hydroelectric power plant in the Urals are designated, the characteristics of small hydropower plants in the Southern Urals are given, the prospects for using the hydropower potential of the Chelyabinsk region are revealed. The potential of solar and wind energy is discussed, the characteristics and

features of solar power plants in the Urals and wind power plants with a vertical axis of rotation, developed at the South Ural State University, are specified. It is established that biomass as a resource for energy production has good prospects for use, but due to climatic conditions, this direction has not yet been developed. It is shown that small and distributed energy is still an important component in the general energy of the region and the country.

## References

1. Istorija.RF. *The GOELRO plan was adopted*. (In Russ.) Available from: <https://histrf.rulenta-vremeni.eventviewpriniat-plan-goelro> (accessed: 10.12.2020).

2. Lipovceva I, Miheev M, Melnikov N, Sarapulova A. *PROSVET. Istorija stanovlenija i razvitija ural-skaj energosistemy v 1920– 1950-e gg. [PROSVET. The history of the formation and development of the Ural power system in the 1920s and 1950s]*. Ekaterinburg: AlfaPrint; 2017. (In Russ.)

3. Mosenergo History Museum. *History of the GOELRO plan development*. (In Russ.) Available from: [http://mosenergo-museum.ru/History\\_of\\_Mosenergo/Historical\\_Review/19034/](http://mosenergo-museum.ru/History_of_Mosenergo/Historical_Review/19034/) (accessed: 10.12.2020).

4. Gvozdeckij VL. GOELRO plan. Myths and reality. *Nauka i Zhizn*. 2005;(5):102–109. (In Russ.)

5. *Istorija narodnogo hozjajstva Urala Ch. 1. 1917–1945 [History of the national economy of the Urals. Part 1. 1917–1945]*. Sverdlovsk; 1988.

6. Ural Energy Museum. *The firstborn of GOELRO. 1917–1941*. (In Russ.) Available from: <http://musen.ru/chronicle/> (accessed: 12.12.2020).

7. State Historical Museum of the Southern Urals. *“Tok dan!”: 90 years ago, the Chelyabinsk hydroelectric power station was launched*. (In Russ.) Available from: [http://www.chelmuseum.runewstok-dan-90-let-nazad-by-la-zapushchena-chelyabinskaya-gressphrase\\_id=13174](http://www.chelmuseum.runewstok-dan-90-let-nazad-by-la-zapushchena-chelyabinskaya-gressphrase_id=13174) (accessed: 15.12.2020).

8. Kirpichnikova IM. Porozhskaya HPP – a unique structure of the XX century. *Elektricheskie Stancii*. 2008;(8):4–8. (In Russ.)

9. Guseva OA, Ptashkina-Girina OS. Estimation of electrical supply valuation from small hydroelectric power stations. *East Siberian Journal of Biosciences*. 2017;(81–2):105–111. (In Russ.)

10. Kirpichnikova IM, Mahsumov IB, Sologubov AJu, Shestakova VV. Features of operation of solar power installations in various climate conditions. *Energy*

*Efficiency. Cenology. Ecology and Energy Security*. Astrakhan; 2020. p. 46–55. (In Russ.)

11. Hevel. *Roof SES for JSC “Russian Electric Motors”*. (In Russ.) Available from: <https://www.hevelsolar.com/projects/pervaya-na-yuzhnom-urale-promyshlennaya-solnechnaya-elektrostanciya> (accessed: 15.12.2020).

12. Solomin EV, Kirpichnikova IM, Amerkhanov RA, Korobatov DV, Lutovats M, Martyanov AS. The use of wind-hydrogen uninterrupted power supply plant in different climatic conditions. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2018;(13–15):30–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.15518/isjaec.2018.13-15.030-054>

13. Anikienko E “‘Chistaja energija’ Urala vyhodit na rynki ASEAN”: intervju s Evgeniem Solominym [“Ural ‘clean energy’ enters the ASEAN markets”: interview with Evgeny Solomin]. *Juzhno-Uralskaja panorama*. 2015, December 4. (In Russ.) Available from: <https://up74.ru/article/ekonomika/81712> (accessed: 12.12.2020).

14. Prospects for the use of non-traditional renewable energy sources in the Chelyabinsk region. *Order of the Governor of the Chelyabinsk region of 23.03.2017 No. 256-r “On approval of the scheme and program for the prospective development of the electric power industry of the Chelyabinsk Region for 2016–2020”*. (In Russ.) Available from: <http://docs.cntd.rudocument450328134> (accessed: 10.12.2020).

15. Distributed Power Generation Association. (In Russ.) Available from: <https://energo-union.com/ru/association> (accessed: 15.12.2020).

## For citation

Kirpichnikova IM. Analysis of the formation of large and small power generation in the Southern Urals. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):302–308. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-302-308>



**ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ – 2021»**

**Октябрь 2021 года**

**Место проведения:** Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3,  
Департамент строительства, Инженерная академия РУДН.

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ЯЗЫКИ КОНФЕРЕНЦИЙ**

Русский, английский.

**ПУБЛИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИЙ**

Статьи будут опубликованы в сборниках трудов конференций, индексируемых в БД РИНЦ, или в журнале, индексируемом в БД Scopus и Web of Science.

**НАУЧНЫЕ СЕКЦИИ**

- Материаловедение, металлургия и нанотехнологии.
- Машиностроение, энергетика и транспорт.
- Авиационные и космические системы.
- Геология, горное и нефтегазовое дело.
- Гражданское, промышленное и гидротехническое строительство.
- Архитектура и промышленный дизайн.
- Инновационный менеджмент в промышленности.

## **КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

**Организатор конференций:** Российский университет дружбы народов (РУДН).

**Адрес страницы конференций на портале РУДН:** <http://enegr.rudn.ru/?p=14247>

**Место проведения конференций:**

Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, Инженерная академия РУДН.

Заседание секции «Машиностроение, энергетика и транспорт» состоится по адресу:

Москва, Подольское ш., д. 8, корп. 5.

**Председатель Оргкомитета:**

Малькова Марианна Юрьевна, профессор департамента строительства Инженерной академии РУДН.

E-mail: [malkova-myu@rudn.ru](mailto:malkova-myu@rudn.ru)