

razvitiya sistem releynoy zashchity i avtomatiki energosistem» [Proceedings of the V International scientific and technical conference «Modern trends in the development of the Power System Relay Protection and Automation»]. Sochi, 2015.

6. NASPI 2014 Survey of Synchrophasor System Networks – Results and Findings. NASPI Technical Report. NASPI Data and Network Management Task Team, Network Systems Group, July 2015.

7. Nebera, A.A. Prikladnye voprosy primeneniya vektornykh izmereniy parametrov elektricheskogo rezhima [Practical issues regarding the application of electrical quantity phasor measurements]. *Sbornik dokladov III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye napravleniya razvitiya sistem releynoy zashchity i avtomatiki energosistem»* [Proceedings of the III International scientific and technical conference «Modern trends in the development of the Power System Relay Protection and Automation»]. Saint-Petersburg, 2011.

8. Bartolomey, P.I., Eroshenko, S.A., Lebedev, E.M., Suvorov, A.A. New information technologies for state estimation of power systems with FACTS. Proc. 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). Berlin, Germany, Oct. 14–17, 2012.

9. Dán, A.M., Raisz, D. Estimation of transmission line parameters using wide-area measurement method. Proc. 2011 IEEE Trondheim PowerTech, Trondheim, Norway, June 19–23, 2011.

10. Ritzmann, D., Wright, P.S., Holderbaum, W., Potter, B. A method for accurate transmission line impedance parameter estimation. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, October 2016, vol. 65, no. 10, pp. 2204–2213.

11. Wu, Z., Zora, L.T., Phadke, A.G. Simultaneous transmission line parameter and PMU measurement calibration. Proc. 2015 IEEE PES General Meeting, Denver, CO, USA, July 26–30, 2015.

12. Ivanov, I., Murzin, A. Synchrophasor-based transmission line parameter estimation algorithm taking into account measurement errors. Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Ljubljana, Slovenia, Oct. 9–12, 2016.

13. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vyp. 11. Raschety tokov korotkogo zamykaniya dlya releynoy zashchity i sistemnoy avtomatiki v setyakh 110–750 kV* [Guidelines on relay protection. Issue 11. Fault current computation for relay protection and power system control equipment in 110–750 kV power grids]. Moscow: Energiya, 1979.

14. Anderson, P.M. Analysis of Faulted Power Systems. Wiley–IEEE Press; 1 edition, 1995.

15. Dommel, H.W. Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book. Portland, OR, USA: Bonneville Power Administration, 1986.

16. Grainger, J.J., Stevenson, W.D., Jr. Power System Analysis. New York McGraw-Hill – McGraw-Hill series in electrical and computer engineering, 1994.

Иванов Игорь Евгеньевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических систем, e-mail: iivanov@mtu.edu

Ivanov Igor Evgenievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant Professor of the Electric Systems Department, e-mail: iivanov@mtu.edu

УДК 620.9

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ, КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Л.В. КАЛИМУЛЛИН, Д.К. ЛЕВЧЕНКО, Ю.Б. СМИРНОВА, Е.С. ТУЗИКОВА

ПАО «РусГидро», г. Москва, Российская Федерация,

E-mail: KalimullinLV@rushydro.ru, LevchenkoDK@rushydro.ru, SmirnovaUB@rushydro.ru, TuzikovaES@rushydro.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Развитие генерации на базе возобновляемых источников энергии, увеличивающаяся неравномерность графика нагрузки, а также несбалансированность размещения объектов генерации определяют критическую важность развития технологий накопления и хранения энергии в целях исключения необходимости содержания и строительства новых избыточных резервов мощности. Системы накопления электроэнергии и хранения открывают новые возможности для развития электроэнергетики и изменения современной архитектуры рынка электроэнергии и мощности. В настоящее время многие страны ведут активную политику по формированию национальных рынков систем накопления энергии и развитию производства систем хранения энергии. Основным драйвером роста систем аккумуляирования и хранения энергии является технологический прогресс, приводящий к снижению стоимости систем накопления и улучшению их эксплуатационных характеристик. В связи с этим необходимо определение приоритетных направлений, технологий и сценариев развития систем накопления энергии с учетом имеющихся перспектив России по данному направлению.

Материалы и методы. Методической основой проведенного исследования являются методы анализа и синтеза, сравнительного, экспертного и статистического анализа данных, представленные в научных трудах по проблемам развития систем накопления энергии, а также в материалах международных аналитических агентств и организаций.

Результаты. В исследовании рассмотрены технологии аккумулирования и хранения энергии. Выделены ключевые характеристики систем хранения энергии. Определены ключевые технологии систем накопления с точки зрения особенностей функционирования российской электроэнергетики. Особое внимание уделено сценариям прогноза развития технологий хранения энергии включая их развитие применительно для России. Определены приоритетные задачи государства и энергетических компаний в части развития технологий и проектов по аккумулированию энергии.

Выводы. Полученные результаты исследования могут быть использованы в составе стратегических документов государственного ударства по развитию энергетической системы России, а также в перспективных прогнозах технологического развития ТЭК нашей страны. Сделанные выводы по результатам сценарного моделирования могут послужить основой для формирования стратегических документов и инвестиционных программ энергетических компаний с точки зрения включения проектов по технологиям хранения и аккумулирования энергии в программы инновационного развития.

Ключевые слова: энергетические компании, конкурентоспособность, накопление энергии, гидроаккумулирование, водородная энергетика, ключевые тренды

PRIORITY AREAS, KEY TECHNOLOGIES AND SCENARIOS OF ENERGY STORAGE SYSTEMS' DEVELOPMENT

L.V. KALIMULLIN, D.K.LEVCHENKO, Yu.B. SMIRNOVA, E.S. TUZIKOVA

PAO «RusHydro», Moscow, Russian Federation

E-mail: KalimullinLV@rushydro.ru, LevchenkoDK@rushydro.ru, SmirnovaUB@rushydro.ru, TuzikovaES@rushydro.ru

Abstract

Background. The development of power generation from renewable energy sources, the increasing unevenness of the load schedule, and the imbalance in the location of generation facilities in the country are the key factors that make power storage an urgent need that could help avoid expenses on maintaining and constructing surplus capacity facilities. Energy storage systems open up new opportunities for developing electrical power engineering and changing the modern architecture of the power and capacity market. Currently, a lot of countries are actively implementing a policy of forming national markets of energy storage systems and developing energy storage system production. The main driver for the growth of energy storage systems is the technological progress that reduces the cost of storage systems and improves their operational characteristics. All this makes it necessary to set priorities, choose technologies and scenarios of energy storage systems development, in view of the current prospects in this direction in Russia.

Materials and methods. The methods underlying the research were those of analysis and synthesis, comparative, expert and statistical data analysis represented in scientific works on the problems of developing power storage systems and in the materials of international analytical agencies and organizations.

Results. The paper considers technologies of energy storage, identifies the key features of energy storage systems and determines the main technologies that are most suitable for the Russian power industry. Special attention is paid to the most likely scenarios of the development of energy storage technologies in Russia. The paper also sets the priority goals for the state and power companies in terms of developing power storage technologies and projects.

Conclusions. The results of the study can be used in the state strategic documents on the development of the Russian energy system, as well as in the long-term forecasts of the technological development of the fuel and energy complex of our country. Conclusions based on the results of scenario modeling can serve as the basis for the formation of strategic documents and investment programs of energy companies in terms of including energy storage projects in innovative development programs.

Key words: energy companies, competitiveness, energy storage, pumped storage, hydrogen power, key trends

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.042-054

Введение. В последние годы наблюдается значительный рост выработки электроэнергии от возобновляемых источников, прежде всего солнечной и ветряной генерации, что стало возможно за счет существенного снижения стоимости технологий: приведенная стоимость электроэнергии (LCOE) от ветряной и солнечной генерации в США, по данным Lazard, в 2009–2016 годах сократилась на 70–80 % [1], а согласно исследованию германского Fraunhofer ISE, LCOE солнечных электростанций уже в текущих условиях в Германии ниже, чем для других типов генерации [2]. Ценовые минимумы стоимости ветряной энергетике в Германии, Мексике, Бразилии, Канаде, Марокко и Индии, солнечной энергетике в Саудовской Аравии, Дубае, Чили, Мексике и Перу достигли показателя в 1,7 рубля за кВт·ч [3].

При этом темпы роста рынка электроэнергии на основе возобновляемых источников очень велики: в 2016 году, по данным IRENA, в мире введено 71 ГВт солнечных станций и

51 ГВт ветряных станций, а в 2017 году объем ввода в эксплуатацию солнечных станций оценивается как 99 ГВт⁶, из которых почти 53 ГВт – в Китае [4]. Для сравнения объем ввода новых электростанций в Китае соответствует 33% величины исторического максимума потребления мощности в ЕЭС России и объединенных энергосистемах (157 ГВт). Глобальные годовые инвестиции в сектор оцениваются более 250 млрд долл., что вдвое превышает инвестиции в традиционную углеводородную генерацию. Примером активного развития является, в частности, недавнее соглашение о намерениях, подписанное Саудовской Аравией с японской корпорацией SoftBank Group и предполагающее инвестирование порядка 200 млрд долл. в солнечную энергетику страны в рамках реализации программы Solar Plan 2030, предполагающей строительство 200 ГВт солнечных электростанций до 2030 года, что соответствует $\approx 50\%$ действующей установленной мощности мировой солнечной энергетики [5].

По прогнозу Международного энергетического агентства, 60 % всех электрогенерирующих мощностей в мире к 2040 году будут обеспечиваться за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Более того, согласно оптимистичным прогнозам Стэнфордского университета, возможно достижение обеспечения 100 % потребляемой человечеством энергии за счет ВИЭ уже к 2050 году [6]. В то же время стохастичность выработки электроэнергии данными видами генерации определяет критическую важность развития технологий накопления и хранения энергии в целях исключения необходимости содержания избыточных резервов мощности. Так, например, Германия предполагает к 2025 году довести установленную мощность ВИЭ до 161 ГВт, определяя потребность в инвестициях в накопители электроэнергии до 2022 года в размере 30 млрд долл.⁷

Методы исследования. Методической основой проведенного исследования являются методы анализа и синтеза, сравнительного, экспертного и статистического анализа данных, представленные в научных трудах по проблемам развития систем накопления энергии, а также в материалах международных аналитических агентств International Renewable Energy Agency, Energy storage association, International Energy Agency.

Анализ сформирован с точки зрения глобального вектора развития технологий, общества и экономики, а также локального кон-

текста, привносящего свое влияние в конечную конфигурацию энергосистемы.

В России в рамках реализации дорожной карты «Энерджинет» Центром стратегических разработок ведется активная работа по аккумулярованию знаний, прогнозам развития технологий накопления энергии (Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации, «Рынок систем накопления электроэнергии в России: потенциал развития»).

Помимо формирования рынка и необходимости стабилизации выработки ВИЭ, одной из ключевых предпосылок развития технологий хранения энергии является суточная неравномерность графика нагрузки. Так, для покрытия утреннего и вечернего максимумов необходимо поддерживать определенный объем резервов мощности, который, в свою очередь, вынужден оплачивать потребитель. В результате в часы пиковой нагрузки фиксируется также и рост нерегулируемой цены на электроэнергию. С другой стороны, возникает необходимость в снижении объемов выработки в ночные часы по причине снижения спроса на электроэнергию, что является трудноосуществимой задачей при наличии большого объема выработки маломаневренных крупных ТЭС и АЭС в общем суточном энергобалансе. Кроме того, работа в переменных режимах, даже если они реализуемые, приводит к повышенным удельным расходам топлива, а вынужденное понижение мощности приводит к снижению коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) и, следовательно, падению экономической эффективности. Данные факторы в свое время рассматривались в качестве одной из основных предпосылок, обосновывающих необходимость строительства гидроаккумулирующих станций. В настоящее время развитие и взаимоувязывание в единую систему АЭС и ГАЭС сохраняет высокую степень актуальности, позволяя повысить эффективность работы как самих АЭС, так и энергосистемы в целом.

Актуальность проблемы регулирования суточного графика остается высокой и на глобальном уровне. В частности, к 2050 году Китай планирует довести установленную мощность АЭС до 250 ГВт, при этом, по оценкам The Energy Research Institute, для регулирования этой мощности понадобятся промышленные системы хранения электроэнергии суммарной мощностью порядка 113 ГВт⁸.

Для России дополнительным фактором, определяющим необходимость развития систем хранения энергии, является несбалансированность размещения объектов генерации

⁶ Источник: данные SolarPower Europe.

⁷ Источник: данные Deutsche Bank.

⁸ Источник: China 2050 roadmap. The Energy research institute.

на территории страны. Россия обладает большим потенциалом генерации электроэнергии на базе действующих ГЭС, в том числе невосстановленным в настоящее время в условиях сложившейся специфики и территориальной организации промышленности в стране. Данное обстоятельство является предпосылкой к рассмотрению необходимости накопления энергии, в том числе, в виде водородного топлива, а также к его использованию в качестве инструмента транспортировки энергии.

Результаты исследования. Системы накопления электроэнергии открывают принципиально новые возможности для развития электроэнергетики, что существенно меняет современную архитектуру рынка электроэнергии и мощности за счет возможности снятия обязательного условия в части одновременности процессов генерации и потребления электроэнергии, а также активного внедрения технологий управления спросом и ценового арбитража.

В связи с этим в настоящее время многие развитые и развивающиеся страны ведут активную политику по формированию национальных рынков систем накопления энергии, рассматривая накопление энергии в качестве одной из ключевых сфер развития энергетики и интенсивно развивая производство систем хранения энергии, ориентированных на насыщение внутреннего и внешнего рынков. Основным драйвером роста при этом является технологический прогресс, приводящий к снижению стоимости систем накопления до приемлемого для потребителей уровня, одновременно обеспечивая улучшение их эксплуатационных характеристик. Развитие технологий позволит обеспечить рост коэффициента полезного действия, снижение операционных затрат, а также сокращение эффекта нарастающего износа аккумуляторных элементов и сохранение их способности аккумулировать и накапливать необходимый объем электроэнергии.

По прогнозам Центра стратегических разработок, объем мирового рынка систем хранения электроэнергии в 2025 году оценивается в 73,3 млрд долл.⁹ McKinsey Global Institute включил этот тип технологий в число 12 наиболее значимых для развития мировой энергетики [7]. В свою очередь, Navigant Research прогнозирует увеличение ежегодного ввода мощности накопителей для ВИЭ примерно с 2 ГВт в 2018 году до 24 ГВт в 2026 году – в 12 раз за восемь лет, с пропорциональным увеличением годовой выручки до 24 млрд долл. к 2026 году¹⁰.

В то же время прогноз Bloomberg New Energy Finance (BNEF) предполагает, что рынок «батарейных» накопителей будет развиваться по траектории, которая схожа с динамикой развития рынка фотоэлектрической солнечной энергетики в период 2000–2015 годов, в течение которого установленная мощность солнечной генерации удваивалась семь раз [8]. Всего к 2030 году, по прогнозу BNEF, будет построено 125 ГВт накопителей энергии суммарной емкостью 305 ГВт·ч (без учета ГАЭС), объем инвестиций составит 103 млрд долл. (динамика и географическое распределение приведены на рис. 1). При этом в части перспектив развития ГАЭС, несмотря на наличие экологических сложностей и существенно высоких требования к месту размещения объектов, прогноз IRENA предполагает рост установленной мощности станций до 235 ГВт к 2030 году [4].

Для России с учетом текущей ситуации в отрасли развитие систем хранения электроэнергии позволит существенно снизить остроту проблем, связанных с классическими «узкими местами» системной электроэнергетики, включая как ЕЭС, так и изолированные зоны и отдельные энергоузлы, а также с вопросами формирования и поддержания производства и потребления электроэнергии. Так, выравнивание графика спроса на электроэнергию и снижение циклических пиков позволит сократить объем вынужденных резервов мощности энергосистемы, включая сетевые, и, соответственно, затрат на их содержание. В свою очередь, оптимизация режимов работы оборудования, в особенности для тепловой генерации, и снижение необходимой маневренности позволят снизить удельные эксплуатационные расходы (включая расходы на топливо), а также выбросы CO₂. Дополнительно это позволит продлить срок службы действующего оборудования, одновременно сократив потребность в строительстве новых мощностей. В случае сетевого оборудования естественным образом произойдет сокращение потерь в сетях за счет снижения объемов перетоков. Также развитие промышленного хранения электроэнергии позволит расширить возможности использования как низкоманевренной атомной генерации, так и генерации ВИЭ, характерной непостоянным уровнем располагаемой мощности.

⁹ Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации (<https://minenergo.gov.ru/node/9013>).

¹⁰ Источник: данные Navigant Research.

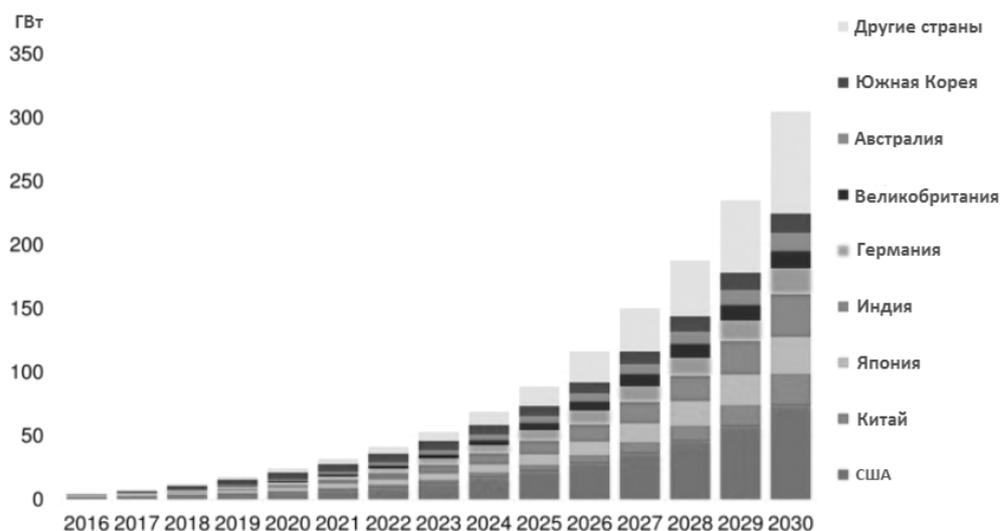


Рис. 1. Прогноз развития систем аккумулирования энергии (данные Bloomberg New Energy Finance)

Кроме того, активная реализация данного направления и формирование соответствующего центра компетенций будут способствовать выполнению задач по обеспечению технологической независимости энергетического сектора и развитию достаточных компетенций во всех критически важных для устойчивого развития энергетики видах деятельности с повышением уровня и расширением областей мировой технологической конкурентоспособности российского ТЭК¹¹.

В рамках поставленных в проекте Энергостратегии России задач предполагается развитие накопителей за счет новых ГАЭС, накопителей на солнечных и ветровых электростанциях, системных накопителей, накопителей у потребителей и на электромобилях (до 20 ГВт к 2035 году в оптимистическом сценарии).

Ключевые технологии. Основными способами аккумулирования энергии (по типам хранения энергии) в настоящее время являются¹²:

– электрохимические и проточные батареи. Среди компаний, реализующих проекты по данным технологиям, можно выделить EWE, Pu Neng, Sonnen, Enphase, Tesla, ViZN, NGK Insulators, а также российскую компанию Liotech;

– водородные системы (преобразование водорода в результате электролиза и его дальнейшее преобразование в электроэнергию с помощью топливных ячеек или прямое использование в газотурбинных генераторах для производства тепловой энергии). К лиде-

рам этих направлений можно отнести компании ITM-Power, Neoen, Thyssenkrupp, Hydrogen Utility, Fuel Cell Technologies, CHYODA, Объединенный институт высоких температур РАН, РИЦ «Курчатовский институт»;

– емкостные накопители (конденсатор большой емкости). Компании-лидеры по данному направлению – это CAP-XX, Panasonic, Boostcap, NEC, TVA, ЗАО «Элтон», ООО «ТЭЭМП»;

– индуктивные накопители (сверхпроводящая индуктивная катушка с криореактивным охлаждением). Среди компаний, реализующих перспективные проекты, можно отметить корпорацию «Русский Сверхпроводник», осуществляющую разработку компактного сверхпроводящего индуктивного накопителя;

– инерционные накопители (маховики различного исполнения). Среди компаний, реализующих проекты по созданию данных видов накопителей, выделяются Beacon Power, ABB, Hawaiian Electric, Amber Kinetics, а также российская компания Kinetic Power;

– пневмо-воздушное аккумулирование (аккумулирование воздуха в специальном резервуаре посредством воздушно-нагнетательной установки (турбина, компрессор)). Компании-лидеры по данному направлению – Ханторф, PG&E, Flowbattery, Hydrostor;

– тепловые накопители (энергия запасается путем повышения температуры или изменения фазового состояния рабочего тела вследствие нагревания), включая термодинамические накопители (накапливаемая электроэнергия преобразуется с использованием теплового насоса, работающего по одному из известных обратимых термодинамических циклов в разность температур теплоносителей или теплоносителей и окружающей среды, а

¹¹ Задача определена проектом Энергетической стратегии России до 2035 года.

¹² При этом нельзя исключать появление новых типов накопителей, функционирующих на иных принципах работы.

при возврате энергии эта разница температур используется для привода теплового двигателя, работающего по этому же термодинамическому циклу). К лидерам по данным технологиям можно отнести шведские компании, а также компании Alphabet, Saipem S.A и АО «НПК Грасис»;

– гравитационные накопители (перемещение по наклонной поверхности груза с большой массой (запас потенциальной энергии)). Компании-лидеры по данному направлению – Heindl Energy, Gravity Power, ARES, Sinkfloat и российская компания ООО «Энергозапас» с технологией твердотельной аккумулирующей электростанции;

– гидроаккумуляция. Можно выделить компании БасКаунти, Хойчжоу, Гуандун, Linthal, Glenmuckloch (ГАЭС в угольном карьере), Yanbaru (проект на воде, перекачиваемой из океана), а также Группу РусГидро (действующие Загорская ГАЭС, Кубанская ГАЭС, Зеленчукская ГЭС-ГАЭС).

Каждый из представленных способов характеризуется временем рассеивания запасенной энергии и скоростью ее разрядки. Необходимо отметить, что 98,5 % аккумулирования мировой мощности в настоящий момент сосредоточено в ГАЭС. Второе и третье место в мире по установленной мощности занимают электрохимические накопители и накопители энергии на сжатом воздухе [9].

Перспективы развития систем аккумуляции и хранения энергии. Технологии аккумуляции и хранения энергии – важная составляющая «новой» энергетики и в целом новой промышленной революции (индустрия 4.0). Развитие этих технологий с существенным отставанием от мировых лидеров запускается в России. Объем мирового рынка систем накопления электроэнергии (СНЭ) вырос почти в три раза за последние 10 лет. По оценкам Фонда ЦСР, максимальный годовой объем рынка СНЭ в России к 2025 г. может составить \$8,6 млрд (консервативно – \$1,5–3 млрд), что даст экономике страны эффект в \$11 млрд (консервативно – \$2,5–5 млрд) [10].

В настоящий момент рынок СНЭ в России в большей степени представлен тремя ГАЭС мощностью 1375 МВт: Загорская ГАЭС в Подмосковье (1,2 ГВт/1,32 ГВт¹³), Кубанская ГАЭС (15,9 МВт) и Зеленчукская ГЭС-ГАЭС (320 МВт/160 МВт), которые по парковому ресурсу, диапазону регулирования и маневренности значительно превосходят все иные типы генерации. Кроме этого, существует ряд демонстрационных проектов иных технологий

накопления, которые реализуются за счет независимых инвестиционных фондов Сколково, Роснано и Российской венчурной компании.

Несмотря на то, что большинство российских стартапов не выходят за стадию научных исследований и не превращаются в коммерческие продукты, можно привести следующие примеры успешных инвестиционных проектов, профинансированных за счет фондов:

– ООО «Энергозапас». Компания занимается разработкой твердотельных аккумулирующих электростанций (ТАЭС) с поддержкой со стороны НТИ, Роснано, Сколково.

– АО «Русский сверхпроводник». Исследования и разработки в сфере энергоэффективности, электротехники, сверхпроводниковой индустрии, приборостроения и электроники. Компанией разработан источник бесперебойного питания на основе накопителей кинетической энергии.

– ООО «Товарищество энергетических и электромобильных проектов». Компания входит в Группу компаний Ренова и специализируется на производстве суперконденсаторов.

– ООО «Ультраконденсаторы Феникс». Компания располагается в бизнес-инкубаторе «Строгино» и также специализируется на производстве суперконденсаторов.

При этом общий объем государственного финансирования исследований и разработок накопителей электроэнергии только по линии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации за 2014–2017 гг. составил более 1 млрд руб. [10].

В настоящее время развитие отрасли СНЭ в России сдерживается совокупностью факторов, характерных для незрелого рынка высокотехнологической продукции, которая по своим показателям пока еще не заняла устойчивой позиции на рынке. Основным таким фактором является сравнительно высокая стоимость СНЭ. Уникальные функции СНЭ (повышение надежности, улучшение качества электроэнергии и показателей эффективности собственной генерации, резервирование, оптимизация графика потребления), благодаря которым может быть обеспечено исключительное применение данных систем на практике, до сих пор в достаточной мере не обеспечивают их экономическую эффективность.

Среди наиболее значимых барьеров, препятствующих развитию рынка СНЭ, необходимо выделить следующие:

1. В условиях действующей модели оптового рынка электроэнергии и мощности накопители не являются экономически эффективными и инвестиционно привлекательными объектами.

¹³ Приведены значения мощности в турбинном/насосном режимах.

2. Существуют ограничения нормативно-правового и технического регулирования электроэнергетики, отсутствует системная услуга «сглаживание минимумов нагрузки» или статус особого системного генератора.

3. Наблюдается высокий уровень импортозависимости. Практически нет собственных технологических продуктов СНЭ полного цикла производства (за исключением литий-ионных батарей, производимых компанией Лиотех).

4. Отсутствуют успешно реализованные демонстрационные проекты, подходящие для дальнейшего масштабирования в энергосистему.

Направления развития хранения электроэнергии в России напрямую отталкиваются от мировых перспектив развития технологий и преобладающих технологических направлений, а также перспектив и ограничений развития сопутствующих отраслей глобальной экономики. Выбор конкретных технологий зависит от наличия наработок и технологических заделов, способных обеспечить конкурентное преимущество российским решениям, в том числе, с точки зрения их экспорта.

В рамках развития хранения электроэнергии как мировой тенденции необходимо разделить понятия систем промышленного хранения энергии, характеризующихся относительно большой емкостью, и относительно малых накопителей, используемых для нужд домохозяйств и индивидуальных потребителей. К числу первых относятся гидро-, воздушные-, твердоотельноаккумулирующие станции различных конструкций, аккумуляторные батареи различного происхождения, используемые в гибридных станциях, и др. Вторые включают, в частности, аккумуляторы, устанавливаемые в домах, станции зарядки электромобилей. Соответственно, с учетом особенностей тех и других различается их потенциальное использование в системе и масштабы применения. Технологии, масштабируемые с одинаковой эффективностью из одного сегмента в другой, получают преимущество перед другими технологиями и проектами. В таблице представлены направления применения технологий хранения электроэнергии в соответствии с классификацией Мирового энергетического агентства.

Ключевым аспектом при дальнейшей реализации проектов строительства накопителей энергии является обеспечение инвестиционной привлекательности их строительства и дальнейшей эксплуатации путем обеспечения возвратности инвестиций за счет формирования денежного потока от проектов с учетом специфики аккумулирующих электростанций, работающих как в генераторном, так и в нако-

пительном режимах. Соответственно, ключевыми факторами, определяющими перспективность технологии, являются прогнозы в части удельной стоимости строительства и эксплуатации (и ее изменения), наличие соответствующих законодательных норм, а также спроса и сформированного рынка (потребности), обеспечивающих окупаемость проекта.

В области технологий накопления электроэнергии сегодня наблюдается настолько бурный прогресс, что даже консервативный прогноз Navigant Research показывает, что стоимость систем накопления энергии в различных технологиях будет падать в среднем на 5 % каждый год¹⁴. Параллельно с процессом удешевления систем накопления растет общий ресурс работы систем хранения, причем ряд новых технологий позволяет получить ресурс до 20 000 циклов работы (для химических накопителей), при пока еще высокой стоимости системы.

С учетом вышесказанного можно сформировать прогноз развития технологий по накоплению энергии. При формировании прогноза учитывались наличие конкурентных преимуществ и технологических или исследовательских заделов, разработок либо проектов, а также наиболее перспективные ниши применения.

В укрупненном виде было рассмотрено три сценария, два из которых описывают консервативный и оптимистичный варианты развития событий с учетом постепенного эволюционного развития технологий аккумулирования электроэнергии, предполагающего их постепенное удешевление и стандартизацию. Третий сценарий предполагает появление революционного технологического направления и условно описывается как «Прорывной», в рамках данного сценария происходит опережающее развитие новых технологий за счет появления инновационного решения существующих проблем и снятия рисков, мешающих их использованию или развитию в текущих условиях.

¹⁴ Источник: данные Navigant Research.

Ключевые характеристики систем хранения энергии

Область применения технологии	Технология СНЭ	Отпуск (электроэнергии, теплоэнергии)	Мощность системы (МВт)	Длительность разрядки	Циклы (типичные)	Время отклика
Сезонное хранение	ГАЭС, ТАЭС	электроэнергии, теплоэнергии	500–2000	пара дней – месяц	1–5 раз в год	день
Ценовой арбитраж	Электрохимические, емкостные, индуктивные накопители	электроэнергии	100–2000	8–24 ч	0,25–1 раз в день	> 1 ч
Регулирование частоты		электроэнергии	1–2000	1–15 мин	20–40 в день	1 мин
Горячий (вращающийся) резерв	Электрохимические	электроэнергии	10–2000	15 мин – 2 ч	0,5–2 в день	<15 мин
Негорячий резерв		электроэнергии	10–2000	15 мин – 2 ч	0,5–2 в день	<15 мин
Управление нагрузками (изменение нагрузки по заданному графику)	Электрохимические, емкостные, индуктивные накопители, ГАЭС, ТАЭС	электроэнергии, теплоэнергии	1–2000	15 мин – 1 день	1–29 в день	<15 мин
Управление «узкими местами» (точками перегрузок) в сетях		электроэнергии, теплоэнергии	10–500	2–4 ч	0,14–1,25 в день	> 1 ч
Выработка э/э и тепла на базе ВИЭ	Электрохимические аккумуляторы	электроэнергии, теплоэнергии	1–400	1 мин – 1 ч	0,5–2 в день	<15 мин
Управление инвестициями в инфраструктурные объекты (перераспределение)	Пневмо-воздушные аккумуляторы,	электроэнергии, теплоэнергии	1–500	2–5 ч	0,75–1,25 в день	> 1 ч
Поддержка напряжения	Электрохимические аккумуляторы	электроэнергии	1–40	1 с – 1 мин	10–100 в день	от 1 мс до с
Автономный пуск электростанции (без питания от внешнего источника)	Водород, ТАЭС, ГАЭС	электроэнергии	0,1–400	1–4 ч	<1 в год	<1 ч
Использование тепла отходящих газов	Тепловые накопители, термодинамические, пневмо-воздушные аккумуляторы, накопители	теплоэнергии	1–10	1 ч – 1 день	1–20 в день	<10 мин
Комбинированная выработка тепла и электричества (ТЭЦ)		теплоэнергии	1–5	1 мин – 1 ч	1–10 в день	<15 мин
Изменение спроса и сокращение пиков	Электрохимические, емкостные, индуктивные накопители, ГАЭС, ТАЭС, водородные элементы.	электроэнергии, теплоэнергии	0,001–1	1 мин – 1 ч	1–29 в день	<15 мин
Изолированные энергосистемы		электроэнергии, теплоэнергии	0,001–0,01	3–5 ч	0,75–1,5 в день	<1 ч

Источник: Technology Roadmap. Energy storage. The International Energy Agency (IEA).

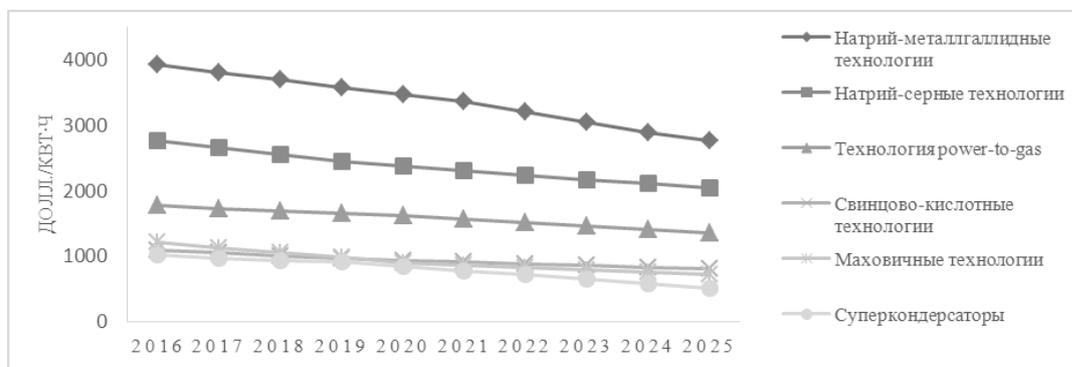


Рис. 2. Прогноз динамики удельной стоимости энергоемкости систем накопления электроэнергии (данные Navigant Research (оценка проведена только для уже «зрелых» технологий))

Сценарий №1 – «Консервативный». В рамках консервативного сценария в перспективе до 2030 года предполагается активное развитие и использование сегмента крупных накопителей одновременно с развитием гибридных электростанций, предполагающих строительство аккумулирующих мощностей на единой площадке с объектами ВИЭ. Данный сценарий предполагает также активное участие систем хранения электроэнергии в национальных рынках мощности как полноценных участников (в Великобритании практика реализуется с 2016 года [11]).

Реалистичность сценария подтверждается, в том числе, прогнозом, сформированным GTM Research [12] на основе результатов опроса участников конференции по системам хранения энергии «Greentech Media's 2017 Energy Storage Summit», ключевыми параметрами которого для среднесрочной перспективы стали следующие ожидания:

– по экономике четырехчасовой «батареи» накопитель энергии начнет сравниваться с газовой турбиной (по LCOE) через четыре года, а к 2026 году превзойдет;

– к 2022 году многие энергетические компании будут включать накопители энергии в свои долгосрочные инвестиционные планы (ряд крупных мировых компаний уже учитывает в своих инвестиционных программах создание систем накопления и хранения энергии, в частности EDF планирует до 2035 года инвестировать 8 млрд евро в хранилища электроэнергии – батареи и ГАЭС¹⁵);

– вероятно смена лидерства технологии батарей с литий-ионных аккумуляторов на проточные батареи уже в среднесрочной перспективе¹⁶. При этом, согласно исследованию Lazard, удельные расходы на данные типы аккумуляторов фактически являются сопоставимыми уже в настоящее время [1];

– технологией генерации ВИЭ, наиболее сочетающейся с накопителями энергии, является, по оценке экспертов, солнечная энерге-

тика, что обусловлено цикличностью смены дня и ночи.

Перспективным для России является развитие крупных промышленных систем хранения энергии, включая ГАЭС, твердотельных аккумулирующих электростанций, связанных систем АЭС-ГАЭС и их включение как в рынок системных услуг, так и в инвестиционные программы крупнейших электроэнергетических (генерирующих и сетевых) компаний (возможное формирование кластеров по направлениям развития). Кроме того, существует потенциал выполнения Россией роли системного регулятора циклов спроса на электроэнергию, в том числе, для стран ближнего зарубежья (Монголия, Казахстан). Будет осуществляться развитие гибридных электростанций в изолированных регионах, в том числе с учетом технологий «батарейных» аккумуляторов. Дальнейшее развитие батарейных аккумуляторов будет реализовано после успешной реализации пилотных проектов на Дальнем Востоке и в других изолированных регионах.

Сценарий №2 – «Оптимистичный». В дополнение к развитию направлений консервативного сценария предполагается активное развитие механизма виртуальных электростанций, а также совершенствование механизмов балансирования электроэнергии с выводом из эксплуатации части резервной генерации и сетей за счет полного срезания пиковой нагрузки. Также в рамках оптимистичного сценария предполагается существенное снижение удельной стоимости систем хранения электроэнергии различной конфигурации и, соответственно, расширение масштабов и кейсов применения за счет снижения требований и затрат. Кроме того, получение положительных эффектов стимулирует ускорение дальнейших исследований и улучшение технологий для повышения их специализации либо универсальности в зависимости от сформированных рынков потребления. Предполагается некоторое ограниченное развитие систем долгосрочного накопления электроэнергии, в том числе на основе водорода.

Перспективным для России является развитие малой генерации и ее включение в оптовый рынок через конструкцию виртуальных электростанций, в том числе, путем формирования условий для станций собственной генерации потребителей. В рамках данного рынка возможно развитие рынка электромобилей с учетом потенциала распределенной системы аккумулирования. Будет происходить активное развитие технологий, в том числе водородных накопителей, которые могут применяться как в условиях крайнего севера, так и в изолированных регионах.

¹⁵ Источник: данные EDF

¹⁶ В частности, в рамках выпущенного китайской Национальной комиссией по развитию и реформам (National Development and Reform Commission) 22.09.2017 «Руководства по продвижению технологий хранения энергии и развитию соответствующей промышленности» (Guidance on the Promotion of Energy Storage Technology and Industry Development), направленного на ускорение развертывания накопителей энергии, предусмотрен запуск пилотных проектов, включая строительство многочисленных накопителей энергии на 100 МВт на основе ванадиевых проточных аккумуляторов к концу 2020 года в целях дальнейшего крупномасштабного развертывания подобных проектов в течение последующих пяти лет.

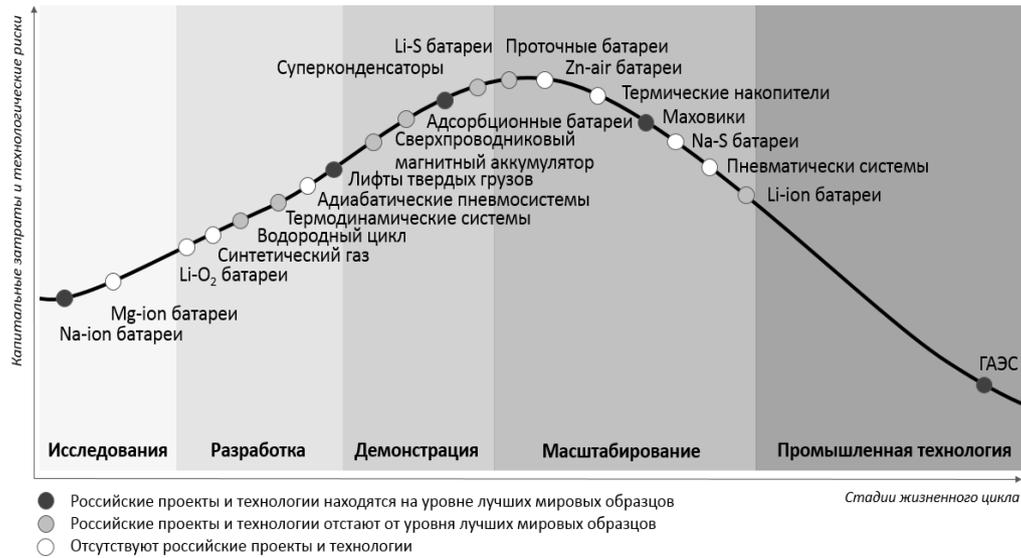


Рис. 3. Анализ существующего научно-технологического задела России в части технологий аккумулирования и хранения энергии

С технологической точки зрения возможна широкая реализация проектов с локализацией технологий в части батарейных аккумуляторов. В части водородных технологий возможна реализация совместных проектов с иностранными, в частности японскими, партнерами по повышению экономических эффектов от использования запертых мощностей на территориях Дальнего Востока. Одновременно в рамках сценария высока вероятность снижения инвестиций в сетевую инфраструктуру и масштабная консервация либо вывод мощностей, используемых для поддержания резерва.

Сценарий №3 – «Прорывной». В рамках сценария рассматривается возможность ускоренного развития технологий водородного цикла в результате революционного решения вопросов, связанных, в том числе, с рисками хранения и эксплуатации. Также сценарий предусматривает активизацию развития технологий хранения тепловой энергии, в том числе с использованием фазовых переходов, а также использование биотоплива для формирования синтетического газа.

Перспективы для России. С учетом существенной величины потерь на транспортировку теплоэнергии в условиях континентального климата и северных регионов российский рынок существенно выиграет в случае применения прорывных технологий в части хранения тепловой энергии, а также в случае существенного сокращения рисков технологий водородного цикла, в том числе экологических и связанных с возможным ущербом для здоро-

вья, не позволяющих располагать центры хранения вблизи крупных потребителей, включая населенные пункты.

Формирование траектории технологического развития систем хранения электроэнергии в России с учетом существующих реалий фактически должно отталкиваться от глобальных перспектив развития технологий и направлений использования. При этом необходимо учитывать существующую ограниченность опыта российских компаний в реализации подобных проектов и особенности функционирования национального рынка электроэнергии и мощности.

Выводы. Вне зависимости от сценария, ключевыми стратегическими задачами государства и компаний в развитии электроэнергетической отрасли являются следующие:

1. **Аккумуляция в отрасли новых компетенций, знаний и технологий.** Целесообразно форсированное развитие компетенций, конструирование и ввод в эксплуатацию опытных и промышленных образцов по технологическим направлениям и проектам, в которых у российских компаний и исследовательских организаций есть значимый и актуальный задел¹⁷. К числу таких технологий относятся в первую очередь ГАЭС и гравитационные накопители. При этом в рамках развития компетенций по

¹⁷ Должно сопровождаться изменениями законодательства и формированием рынка систем хранения мощности, а также включением накопителей электроэнергии в число участников рынка электроэнергетики.

данным технологиям необходимо максимально активное использование мирового опыта и инновационных решений, в том числе позволяющих снизить удельную стоимость строительства и эксплуатации мощностей, а также повысить масштабируемость и тиражируемость конструктивных решений.

2. *Разработка и воспроизводство передовых технологий.* С учетом существующего технологического отставания России в сфере «батарейных» аккумуляторов целесообразно создание партнерств и совместных исследований, разработка проектов с рассмотрением возможности трансфера технологий с фокусом на получении работающих систем хранения электроэнергии. При этом одновременно целесообразно добиваться максимальной локализации производства и комплектующих с параллельным развитием компетенций для обеспечения возможности последующего совершенствования технологий, повышения их адаптации к российским условиям и использования при разработке технологий следующего поколения. К числу ключевых технологий в данной части относятся наиболее распространенные в настоящее время литиевые батареи, проточные накопители, суперконденсаторы, адиабатические пневмоаккумулирующие системы. Ключевой задачей является создание общероссийского центра компетенций по развитию перспективных технологий аккумулирования и хранения энергии. Кроме того, важной задачей является формирование национальных «чемпионов», обладающих передовыми компетенциями по проектированию, производству и обслуживанию различных систем аккумулирования и хранения энергии.

3. *Исследование неизведанного.* Необходимо отдельно определить приоритет формирования прорывных технологий и технологий, рассматривающихся как потенциальные лидирующие технологии следующего поколения в глобальном формате. При этом при определении данных технологий целесообразно отталкиваться от потенциального объема рынка применения. Наиболее перспективными технологиями в этом направлении являются разработки в части водородных накопителей, термодинамических накопителей и новые типы химических батарей (пост-литиевые электрохимические технологии: натрий-ионные, алюминий-ионные, магний-ионные и другие типы), аналогичных по принципу работы литий-ионным аккумуляторам, но снимающих риск дефицита комплектующих и обеспечивающих более высокую плотность энергии, а также возможность большей плотности снижения стоимости с увеличенным ресурсом циклирования. При этом целесообразно приоритизировать техно-

логии, характеризующиеся большими токами зарядки и разрядки, максимизацией циклирования (количество циклов), минимизацией удельной капиталоемкости на МВт. Отдельным плюсом может являться возможность масштабирования технологических решений или параллельной разработки линейки накопителей различных емкостных решений на одной или схожих технологических платформах.

Список литературы

1. **Lazard's Levelized Cost of Storage Analysis.** Lazard. 2017. 49 p. URL: <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-storage-2017>.
2. **Stromgestehungskosten** Erneuerbare Energien / C. Kost, S. Shammugam, V. Jülich, N.-T. Nguyen, T. Schlegl. – Fraunhofer ISE. 2018. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>.
3. **Мельников Ю., Чугунов Д.** Водородная экономика: разрушит ли новое топливо «ископаемую» цивилизацию. Forbes. 16.03.2018. URL: <http://www.forbes.ru/biznes/358673-vodorodnaya-ekonomika-razrushit-li-novoe-toplivo-iskopaemuyu-civilizaciyu>.
4. **Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030.** The International Renewable Energy Agency (IRENA). 2017. 132 p. URL: http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf.
5. **Nereim V., Cunningham S.** Saudis, SoftBank Plan World's Largest Solar Project. Bloomberg Technology. 28.03.2018. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-03-28/saudi-arabia-softbank-ink-deal-on-200-billion-solar-project>.
6. **Mark Z. Jacobson, Mark A. Delucchi, Zack A.F. Bauer, Jingfan Wang, Eric Weiner, Alexander S. Yachanin.** 100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World. Joule 1, 108–121, September 6. 2017. URL: [http://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351\(17\)30012-0.pdf](http://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351(17)30012-0.pdf)
7. **Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy.** McKinsey Global Institute. 2013. 176 p. URL: https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/McKinsey%20Digital/Our%20Insights/Disruptive%20technologies/MGI_Disruptive_technologies_Full_report_May2013.ashx.
8. **Global Storage Market to Double Six Times by 2030.** Bloomberg New Energy Finance. 2017. URL: <https://about.bnef.com/blog/global-storage-market-double-six-times-2030>.
9. **Экспертно-аналитический доклад «Новая технологическая революция: Вызовы и возможности для России».** ЦСР. 2017. URL: <https://csr.ru/wp-content/uploads/2017/10/novaya-technologicheskaya-revolutsiya-2017-10-13.pdf>
10. **Прогноз развития энергетики мира и России 2016 / под ред. А.А. Макарова, Л.М. Григорьева, Т.А. Митровой; ИНЭИ РАН–АЦ при Правительстве РФ. – М., 2016.**

11. **Liam Stoker.** Storage secures 3.2GW of Capacity Market contracts in auction success. 2016. URL: https://www.solarpowerportal.co.uk/news/battery_storage_secures_3.2gw_of_capacity_market_contracts_in_auction_success.
12. **The Next Five Years in Energy Storage** According to 500 Energy Professionals. GTM Research. 2015. 15 p. URL: http://storage.pardot.com/264512/44552/The_Next_Five_Years_in_Energy_Storage_According_to_500_Energy_Professionals.pdf.
13. **Popel' O.S., Tarasenko A.B.** Гибридные накопители электрической энергии: их особенности и применение (Обзор) // Теплоэнергетика. – 2018. – № 5. – С. 27–44.
14. **Savard С., Яковлева Э.В.** Развитие технологий накопления электрической энергии // Молодой ученый. – 2017. – № 50. – С. 76–82.
15. **Воропай Н.И., Стенников В.А., Барахтенко Е.А.** Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология // Проблемы прогнозирования. – 2017. – № 5. – С. 39–49.
16. **Ерзнкян Б.А., Арутюнян С.М.** ТЭК России на пороге четвертой промышленной революции // Экономический анализ: теория и практика. – 2018. – № 5. – С. 836–855.
17. **Майорова Т.В.** Трансформация Экономики: низкоуглеродный путь развития // Экономика и политика. – 2017. – № 1. – С. 58–62.
18. **Марченко О.В., Соломин С.В., Лебедев А.В.** Математическое моделирование энергосистем с возобновляемыми источниками энергии // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2017. – № 2(6). – С. 57–64.
19. **Масленников М.И.** Технологические инновации и их влияние на экономику // Экономика региона. – 2017. – № 4. – С. 1221–1235.
20. **Шкрадюк И.** Перспективы технологий электроэнергетики до 2050 года // Энергетический вестник. – 2017. – № 22. – С. 74–82.
21. **Новые энергетические технологии.** Исследование № 2. Ассоциация НП «Совет рынка», 2017. 150 с. URL: https://www.np-sr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskie_tehnologii.pdf.
22. **35x25: A Vision for Energy Storage.** The Energy Storage Association (ESA) 2017. 37 p. URL: <http://energystorage.org/vision2025>.
23. **Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook 2015.** The International Renewable Energy Agency (IRENA), 2015.
24. **David Frankel and Amy Wagner.** Battery storage: The next disruptive technology in the power sector. McKinsey & Company. 2017.
25. **Functional Requirements for Electric Energy Storage Applications on the Power System Grid.** What Storage Has to Do to Make Sense. The Electric power research institute. 2011.
26. **Global Market Outlook 2017-2021.** Solar Power Europe. 2017. URL: <http://www.solarpowereurope.org/home>.
27. **Impacts of DER, Storage, and PEV** The Advanced Distribution Planning Challenge. Leidos, 2017. 13 p. URL: <http://energy.leidos.com/lp-advanced-distribution-planning-white-paper>.
28. **Paolo D'Aprile, John Newman, and Dickon Pinner** The new economics of energy storage. McKinsey & Company, 2016.
29. **Revisiting Energy Storage: There Is a Business Case.** The Boston Consulting Group, 2011. 32 p. URL: <https://www.bcg.com/documents/file72092.pdf>.
30. **Technology Roadmap.** Energy storage. The International Energy Agency (IEA), 2014.

References

1. Lazard's Levelized Cost of Storage Analysis. Lazard. 2017. 49 p. URL: <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-storage-2017>.
2. Kost, C., Shammugam, S., Jülch, V., Nguyen, N.-T., Schlegl, T. Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Fraunhofer ISE. 2018. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>.
3. Mel'nikov, Yu., Chugunov, D. *Vodorodnaya ekonomika: razrushit li novoe toplivo «iskopaemuyu» tsivilizatsiyu* [Hydrogen economy: will the new fossil civilization be destroyed]. Forbes. 16.03.2018. URL: <http://www.forbes.ru/biznes/358673-vodorodnaya-ekonomika-razrushit-li-novoe-toplivo-iskopaemuyu-civilizaciyu>.
4. Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030. The International Renewable Energy Agency (IRENA). 2017. 132 p. URL: http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf.
5. Nereim, V., Cunningham, S. Saudi's Soft Bank Plan World's Largest Solar Project. Bloomberg Technology. 28.03.2018. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-03-28/saudi-arabia-softbank-ink-deal-on-200-billion-solar-project>.
6. Mark Z. Jacobson, Mark A. Delucchi, Zack A.F. Bauer, Jingfan Wang, Eric Weiner, Alexander S. Yachanin. 100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World. Joule 1, 108–121, September 6. 2017. URL: [http://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351\(17\)30012-0.pdf](http://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351(17)30012-0.pdf)
7. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. McKinsey Global Institute. 2013. 176 p. URL: https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/McKinsey%20Digital/Our%20Insights/Disruptive%20technologies/MGI_Disruptive_technologies_Full_report_May2013.ashx.
8. Global Storage Market to Double Six Times by 2030. Bloomberg New Energy Finance. 2017. URL: <https://about.bnef.com/blog/global-storage-market-double-six-times-2030>.
9. *Ekspertno-analiticheskiy doklad «Novaya tekhnologicheskaya revolyutsiya: Vyzovy i vozmozhnosti dlya Rossii»* [Expert-analytical report «New technological revolution: Challenges and opportunities for Russia»]. CSR. 2017. URL: <https://csr.ru/wp-content/uploads/2017/10/novaya-tehnologicheskaya-revolutsiya-2017-10-13.pdf>
10. *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2016* [Power Industry Development Prediction in the World and Russia 2016]. Moscow, 2016.

11. Liam, Stoker. Storage secures 3.2GW of Capacity Market contracts in auction success. 2016. URL: https://www.solarpowerportal.co.uk/news/battery_storage_secures_3.2gw_of_capacity_market_contracts_in_auction_success.
12. The Next Five Years in Energy Storage According to 500 Energy Professionals. GTM Research. 2015. 15 p. URL: http://storage.pardot.com/264512/44552/The_Next_Five_Years_in_Energy_Storage_According_to_500_Energy_Professionals.pdf.
13. Popel', O.S., Tarasenko, A.B. Gibridnye nakopiteli elektricheskoy energii: ikh osobennosti i primeneniye [Hybrid Electric Energy Storage Facilities: Their Features and Applications]. *Teploenergetika*, 2018, no. 5, pp. 27–44.
14. Savard, C., Yakovleva, E.V. Razvitiye tekhnologiy nakopleniya elektricheskoy energii [Development of electrical energy storage technologies]. *Molodoy uchenyy*, 2017, no. 50, pp. 76–82.
15. Voropay, N.I., Stennikov, V.A., Barakhtenko, E.A. Integrirovannyye energeticheskiye sistemy: vyzovy, tendentsii, ideologiya [Integrated energy systems: challenges, trends, ideology]. *Problemy prognozirovaniya*, 2017, no. 5, pp. 39–49.
16. Erznkyan, B.A., Arutyunyan, S.M. TEK Rossii na poroge chetvertoy promyshlennoy revolyutsii [Russian fuel and energy complex on the threshold of the fourth industrial revolution]. *Ekonomicheskyy analiz: teoriya i praktika*, 2018, no. 5, pp. 836–855.
17. Mayorova, T.V. Transformatsiya Ekonomiki: nizkouglerodnyy put' razvitiya [Economy transformation: low carbon development]. *Ekonomika i politika*, 2017, no. 1, pp. 58–62.
18. Marchenko, O.V., Solomin, S.V., Lebedev, A.V. Matematicheskoye modelirovaniye energosistem s vozobnovlyаемymi istochnikami energii [Mathematical modeling of energy systems with renewable energy sources]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii*, 2017, no. 2(6), pp. 57–64.
19. Maslennikov, M.I. Tekhnologicheskyye innovatsii i ikh vliyaniye na ekonomiku [Technological innovations and its impact on the economy]. *Ekonomika regiona*, 2017, no. 4, pp. 1221–1235.
20. Shkradyuk, I. Perspektivy tekhnologiy elektroenergetiki do 2050 goda [Prospects for power generation technologies until 2050]. *Energeticheskyy vestnik*, 2017, no. 22, pp. 74–82.
21. *Novyye energeticheskiye tekhnologii. Issledovaniye №2* [New energy technologies. Study number 2]. Associatsiya NP «Sovet rynka», 2017. 150 p. URL: https://www.np-sr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novyye_energeticheskiye_tekhnologii.pdf.
22. 35x25: A Vision for Energy Storage. The Energy Storage Association (ESA) 2017. 37 p. URL: <http://energystorage.org/vision2025>.
23. Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook 2015. The International Renewable Energy Agency (IRENA). 2015.
24. David Frankel and Amy Wagner. Battery storage: The next disruptive technology in the power sector. McKinsey & Company. 2017.
25. Functional Requirements for Electric Energy Storage Applications on the Power System Grid. What Storage Has to Do to Make Sense. The Electric power research institute. 2011.
26. Global Market Outlook 2017–2021. Solar Power Europe. 2017. URL: <http://www.solarpowereurope.org/home>.
27. Impacts of DER, Storage, and PEV The Advanced Distribution Planning Challenge. Leidos. 2017. 13 p. URL: <http://energy.leidos.com/lp-advanced-distribution-planning-white-paper>.
28. Paolo D'Aprile, John Newman, and Dickon Pinner The new economics of energy storage. McKinsey & Company. 2016.
29. Revisiting Energy Storage: There Is a Business Case. The Boston Consulting Group. 2011. 32 p. URL: <https://www.bcg.com/documents/file72092.pdf>.
30. Technology Roadmap. Energy storage. The International Energy Agency (IEA). 2014.

Калимуллин Леонид Вячеславович,

ПАО «РусГидро» (г. Москва), кандидат экономических наук, начальник управления стратегического развития,

e-mail: KalimullinLV@rushydro.ru

Kalimullin Leonid Vyacheslavovich,

RusHydro (Moscow), Candidate of Economic Sciences (PhD), Head of Strategic Development Division,

e-mail: l.v.kalimullin@mail.ru

Левченко Денис Константинович,

ПАО «РусГидро» (г. Москва), главный эксперт Управления стратегического прогнозирования,

e-mail: LevchenkoDK@rushydro.ru

Levchenko Denis Konstantinovich,

RusHydro (Moscow), Chief Expert of Strategic Forecasting Division, e-mail: LevchenkoDK@rushydro.ru

Смирнова Юлия Борисовна,

ПАО «РусГидро» (г. Москва), главный эксперт Управления стратегического прогнозирования,

e-mail: SmirnovaUB@rushydro.ru

Smirnova Yulia Borisovna,

RusHydro (Moscow), Chief Expert of Strategic Forecasting Division, e-mail: SmirnovaUB@rushydro.ru

Тузикова Екатерина Сергеевна,

ПАО «РусГидро» (г. Москва), начальник управления инвестиционного анализа, e-mail: TuzikovaES@rushydro.ru

Tuzikova Ekaterina Sergeyevna,

RusHydro (Moscow), Head of Investment Analysis, e-mail: TuzikovaES@rushydro.ru