

Использование систем накопления энергии для хранения энергии в автономных энергосистемах

Рецензия эксперта на статью получена
16.06.2023 [The expert review of the article
was received on June 16, 2023]

В России, где более 50 % территории не подключено к централизованному энергоснабжению, как никогда актуально применение автономных энергосистем, в том числе с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ). По данным [1, 2], население изолированных территорий регионов РФ составляет более 330 тыс. человек, а общая установленная мощность дизельных электростанций в стране превышает 1 ГВт. Средняя себестоимость выработки электроэнергии на изолированных территориях превышает 28 руб. за 1 кВт·ч, а максимальная стоимость 1 кВт·ч достигает 2500 руб. Для того, чтобы поддержать низкие тарифы в этих регионах, со стороны государства ежегодно выделяется до 20 млрд руб.

Основным топливом на этих территориях является привозной дизель, стоимость которого из-за неудобной логистики может превышать 150 тыс. руб. за тонну. В настоящий момент с целью снижения расходов на энергоснабжение изолированных территорий ведутся работы по частичной замене дизельного топлива на возобновляемые источники энергии. Однако при этом надо учитывать неравномерность производства электроэнергии и то, что спрос на электроэнергию не всегда совпадает с её выработкой электростанциями на базе ВИЭ. Наиболее эффективным решением проблемы несоответствия графиков производства и потребления электроэнергии является применение накопителей энергии.

Как видно из рис. 1, наибольшее количество дизельных электростанций и наибольший объём установленной мощности приходится на четыре региона: Республика Саха (Якутия), Красноярский край, Камчатка и Ямало-Ненецкий авто-

В настоящий момент с целью снижения расходов на энергоснабжение изолированных территорий ведутся работы по частичной замене дизельного топлива на электроэнергию, вырабатываемую с помощью ВИЭ. При этом надо учитывать неравномерность её производства и частое несоответствие спроса на электроэнергию и выработки

номный округ (ЯНАО). Следует отметить, что в Республике Саха зафиксирована самая высокая средняя стоимость электрической энергии на изолированных территориях — 43 руб. за 1 кВт·ч.

Использование в локальных энергосистемах комбинации автономных источников энергии и систем накопления энергии (СНЭ) может способствовать повышению надёжности энергоснабжения, значительному снижению затрат и уменьшению выбросов парниковых газов.

Типы накопителей электроэнергии и возможность их использование в системах накопления энергии

Гидроаккумулирующие электростанции

В мире существует большое разнообразие накопителей энергии, основные из которых приведены на рис. 2 и в табл. 1. Как видно из рис. 2, наиболее популярными техническими решениями в области накопления энергии являются гидравлические аккумулирующие электростанции (ГАЭС), работающие по принципу подъёма воды насосами в период низкого спроса на электроэнергию и сброса этой воды на турбины гидроэлектростанции в период высокого спроса на ресурс.

УДК 620.9. Научная специальность: 2.4.5 (05.14.01).

Использование систем накопления энергии для хранения энергии в автономных энергосистемах

В. А. Карасевич, к.т.н., доцент, базовая кафедра ВИЭ, [РГУ нефти и газа \(НИУ\) им. И.М. Губкина \(г. Москва\)](#)

Статья посвящена использованию накопителей энергии для автономных энергосистем изолированных объектов и поселений. Создание устойчивых локальных низкоуглеродных энергосистем является важным направлением развития энергетики в регионах России. Более 50 % территории России не электрифицировано, на изолированных объектах и поселениях расположено более 1 ГВт установленной электрической мощности. Ежегодные топливные дотации для арктических регионов превышают 20 млрд руб. Использование в арктических автономных энергосистемах локальной возобновляемой энергетики в сочетании с системами накопления электроэнергии позволяет значительно снизить потребление дорогого из-за логистики и обладающего высоким углеродным следом дизельного топлива. В статье рассмотрены основные накопители энергии и дана оценка целесообразности их применения в энергосистемах арктического региона.

Ключевые слова: автономное энергоснабжение, накопители энергии, ВИЭ, водородная энергетика.

UDC 620.9. The number of scientific specialty: 2.4.5 (05.14.01).

Usage of energy storage systems for distributed energy systems

V. A. Karasevich, PhD, Associated Professor, the Renewable Energy Department, [Gubkin State Oil and Gas University \(Moscow\)](#)

This article is devoted to energy storage systems usage for distributed energy systems of isolated locations and objects. Creation of sustainable low-carbon local energy systems is an important issue for Russian's regions. More than 50 % of Russian territory isn't connected to the power grid, isolated areas hold more than 1 GW of installed power capacity. Annually Russian government spend more than 20 billion rubles to subsidize energy supply to arctic regions. Using of local autonomous energy systems based on renewable energy and energy storage units help to reduce significantly expensive (because of complicated logistic) and high-carbon diesel. The article covers description and expediency of application in Russian Arctic regions for basic energy storage technologies.

Key words: distributed energy generation, energy storage systems, renewable energy, hydrogen.

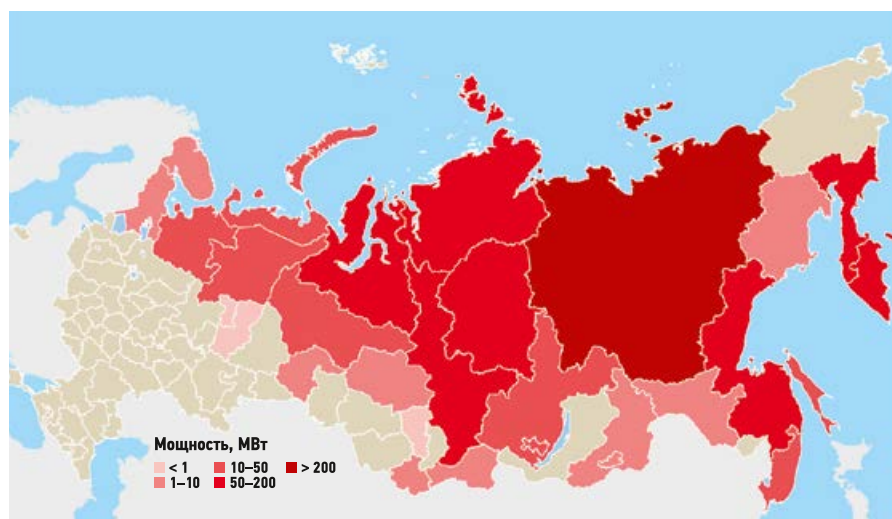


Рис. 1. Суммарная мощность объектов генерации на изолированных территориях РФ [1]

Несмотря на общемировую популярность ГАЭС (более 500 станций общей мощностью свыше 200 ГВт), данные накопители энергии не нашли широкого применения в России. Следует отметить Загорскую ГАЭС (установленная мощность — 1200 МВт) в Московской области и Ставропольскую ГАЭС (19 МВт), при этом часть турбин на Загорской ГАЭС после замены так и не вышли на проектную мощность. Это связано с тем, что территории европейской части России имеют преимущественно равнинный рельеф, и для эффективной работы ГАЭС не хватает перепада высот. В горных же районах страны нет рек и площадок вдоль них, подходящих для строительства станций.

Литий-ионные аккумуляторы

Если более 90 % мощности накопителей энергии в мире приходится на ГАЭС, то самыми популярными вариантами хранения электроэнергии по числу имеющихся в мире являются системы накопления энергии, работающие с применением литий-ионных аккумуляторных батарей. В 2022 году, по данным НИУ «МЭИ», в мире насчитывалось более 28 ГВт литий-ионных накопителей [4]. Литий-ионные накопители представляют из

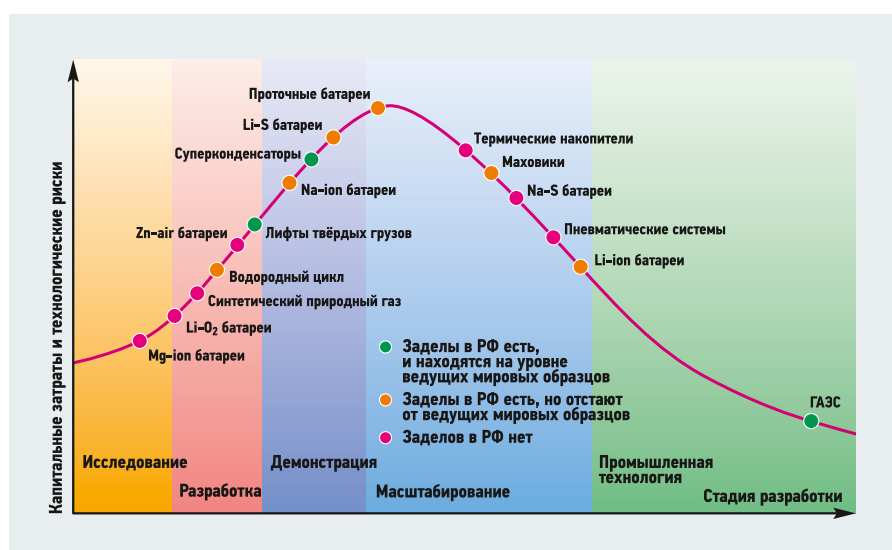


Рис. 2. Текущая ситуация с развитием накопителей электроэнергии [3]

себя химические источники постоянного тока, способные накапливать и отдавать электрический заряд. Основными характеристиками батарей при применении в энергосистемах являются их мощность и ёмкость. Такие системы могут использоваться для выравнивания неравномерности нагрузок в сети (в этом случае они заряжаются в период низкого спроса и выдают электроэнергию в период вы-

сокого спроса), работая совместно с ВИЭ батареи могут обеспечивать накопление энергии для её потребления в нерабочие для ВИЭ-генерации часы (для солнечной электроэнергии это обычно ночной период, для ветряной генерации — период слабого и слишком сильного ветра). Также за счёт отсутствия у литиевых накопителей инерционности (они могут мгновенно как выдать, так и поглотить электроэнергию) они используются для поддержания частоты и напряжения в локальных энергосетях.

В качестве примера применения систем накопления энергии (СНЭ) на базе литий-ионных батарей можно привести программу ПАО «Россети» по внедрению накопителей энергии на подстанциях.

Характеристики систем хранения энергии

табл. 1

Система	Макс. мощность, МВт	Время разряда	Количество циклов или жизненный цикл	Энергетическая плотность, Вт·ч/л	КПД, %
ГАЭС	3000	4–16 ч	30–60 лет	0,2–2	70–85
ВАЭС	1000	2–30 ч	20–40 лет	2–6	40–70
Термальные ЭС	150	часы	30 лет	70–210	80–90
Литий-ионные батареи	100	одна минута — восемь часов	1000–10 000	200–400	85–95
REDOX-батареи	100	часы	12 000–14 000	20–70	60–85
Водород	100	минуты — недели	5–30 лет	600 (при 200 бар)	25–45
Маховики	20	секунды — минуты	20 000–100 000	20–80	70–95

На подстанциях компании установлены десятки накопителей, с 2022 года действует внутренний стандарт СТО 34.01-3.2-018-2022 «Системы накопления электрической энергии. Типовые технические требования».

Ещё одним примером использования накопителей в локальной энергосистеме в комбинации с ВИЭ может служить Бурзянская СЭС мощностью 10 МВт, которая оборудована литий-ионной СНЭ ёмкостью 8 МВт·ч. В связи с тем, что энергоснабжение Бурзянского района осуществляется по одноцепной линии с тупиковой подстанцией, локальная система в случае отключения от сети способна в автономном режиме обеспечивать нормальное энергоснабжение объектов и поселений.

Литий-ионные накопители также выполняют опорно-балансирующую функцию для других, более инертных СНЭ (например, водородных), на прогрев которых требуется некоторое время.

Водородные системы накопления энергии (СНЭ) состоят из генератора водорода, систем его хранения и электрохимического генератора (ЭХГ), на котором из водорода вырабатывается тепло и электроэнергия. При производстве водорода на 1 м³ газа обычным электролизом необходимо затратить до 5–6 кВт·ч электроэнергии (без учёта водоподготовки), что даёт эффективность по водороду 50–70 % (1 м³ водорода содержит 3,6 кВт·ч энергии). При генерации водорода с применением электролизёров с жидкостным охлаждением возможно получить с 1 м³ водорода до 0,5–1,0 кВт·ч тепла, эффективность работы генератора значительно вырастет при использовании получаемого в процессе генерации кислорода. Хранение водорода возможно в сжатом, сжиженном и связанном состоянии. При использовании водорода на топливных элементах электрический КПД ЭХГ не превышает 60 %, ещё до 35 % можно получить в виде тепла при жидкостном охлаждении ЭХГ. С учётом значительных энергозатрат на водоподготовку и проблемы с пресной водой во многих регионах Земли (например, на Ближнем Востоке), важным моментом в работе водородного СНЭ может быть рекуперация воды.

Водородные системы накопления энергии малой мощности в России предлагают несколько организаций, в том числе **МФТИ** и ГК «ИнЭнерджи» [5]. Помимо этого, водородные СНЭ планируется использовать в автономной энергосистеме международной арктической станции «Снежинка» в ЯНАО [6].

Проточные REDOX-батареи

В отличие от литий-ионных накопителей электроэнергии, ёмкость которых ограничена габаритами батареи, в проточных REDOX-батареях электролит в зону окислительно-восстановительной реакции подаётся извне, что позволяет варьировать его объёмы, а следовательно, и ёмкость REDOX-батареи.

Наряду с водородными СНЭ, проточные REDOX-батареи, в том числе в контейнерном исполнении, являются хорошим и относительно недорогим техническим решением по накоплению электрической энергии. В настоящий момент в опытной эксплуатации находится только одна такая установка на полигоне ПАО «РусГидро» на острове Русский, расположенном в заливе Петра Великого в Японском море, прорабатывается установка подобных систем в контейнерном исполнении на других автономных объектах и поселениях, которые обслуживает ПАО «РусГидро» [7].



Воздушно-аккумулирующие станции

ВАЭС — это пневматические накопители электроэнергии, направленные на обеспечение надёжности поставок электроэнергии в сеть. Принцип работы ВАЭС состоит в том, что в период низкого спроса на электроэнергию она используется для сжатия воздуха до давления до 70 бар и выше и его закачки в хранилища (чаще всего это подземные соляные каверны), откуда он стравливается в период пикового спроса на электроэнергию на турбину и вырабатывает электрическую энергию для её продажи на рынке.

Перед закачкой в хранилище сжатый воздух, нагретый в процессе его компримирования (его температура в некоторых проектах может достигать до 600 °С), обычно охлаждают, так как при охлаждении его объём существенно падает, а перед редуцированием на турбине обычно происходит его подогрев. В адиабатическом режиме для подогрева используют отведённое ранее от воздуха тепло, которое хранят отдельно с использованием таких теплоносителей, как гликоль или масло. В термическом режиме отведённое тепло используется для нужд отопления и горячего водоснабжения.

Первая в мире ВАЭС мощностью 290 МВт была построена в 1978 году фирмой «Браун Боверн» в городе Гунторф (ФРГ) и по ночам, когда электроэнергия стоит дёшево, со скоростью 108 кг/с закачивала воздух в две соляные каверны, расположенные на глубине 650–800 м. На полное заполнение каверны требовалось восемь часов, запас воздуха позволял турбине мощностью 320 МВт работать два часа, после чего каверну необходимо было снова заполнить воздухом. В настоящее время по похожей схеме работают несколько крупных ВАЭС в США и Европе.

Анализ публикаций по тематике ВАЭС позволяет сформировать следующую классификацию этой группы накопителей: **крупные установки** более 100 МВт с рабочим давлением до 100 бар для совместной работы с газовыми турбинами (ВТАЭС); **крупные установки** до 320 МВт для накопления электроэнергии (давление до

100 бар) с использованием естественных ёмкостей для хранения сжатого воздуха (чаще всего речь идёт о соляных кавернах); **микро-ВАЭС** мощностью до 100 кВт для накопления энергии для частных домов и небольших населённых пунктов) [8].

ВАЭС малой мощности могут представлять интерес для автономных энергосистем южных регионов мира и России в части комбинированного источника холода, тепла и электроэнергии.

Гравитационные накопители энергии

Гравитационные накопители работают по принципу часов с кукушкой. Как и в случае с ГАЭС, избыточная электроэнергия, которая производится в период низкого спроса, тратится на поднятие груза на высоту (в случае с ГАЭС это вода). В период пикового спроса груз под воздействием силы тяжести начинает опускаться и через систему шестерёнок вращает вал генератора. Единственный в России лабораторный гравитационный накопитель расположен в городе Новосибирске.

Другие накопители

Другие представленные накопители энергии вряд ли имеют шансы на широкое внедрение на российском рынке. Например, маховиковые накопители достаточно широко распространены в автомобильной промышленности для хранения механической энергии, однако пока что практически не используются для хранения электроэнергии. ●

1. Объекты генерации в изолированных и труднодоступных территориях в России: Аналитический доклад (март 2020). — М.: АЦ при Правительстве РФ, 2020. 78 с.
2. Дальний Восток и регионы Арктики получают инвестиционную карту объектов промышленной распределённой генерации [Электр. текст]. РЭА Минэнерго России от 07.07.2023. Режим доступа: rosenargo.gov.ru. Дата обрац.: 25.06.2023.
3. Рынок систем накопления электроэнергии в России: потенциал развития. Экспертно-аналитический доклад ЦСР / Под ред. Ю. Удальцова и Д. Холкина. — М.: АО «Роснано»; «ЭнерджиНет», 2018. 72 с.
4. Международное энергетическое агентство [Электр. текст]. International Energy Agency (IEA). Режим доступа: iea.org. Дата обрац.: 21.06.2023.
5. Российские компетенции водородной промышленности: сборник. — М.: Минпромторг России, 2022. 170 с.
6. «Снежинка» выходит на старт: Главгосэкспертиза одобрила проект международной арктической станции [Электр. текст]. Главгосстройэкспертиза России от 09.03.2023. Режим доступа: gge.ru. Дата обрац.: 20.06.2023.
7. ПАО «РусГидро» — гибридная СНЭ на Русском острове [Электр. текст]. ГК «ИнЭнерджи». Режим доступа: inenergy.ru. Дата обрац.: 24.06.2023.
8. Федюхин А.В., Карасевич В.А. Перспективы применения воздушно-аккумулирующих станций для балансирования режимов энергосистемы / Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: Мат. XVI Межд. науч.-техн. конф. (11–13.11.2022). — Саратов: СГТУ, 2022.

References — see page 79.

Usage of energy storage systems for distributed energy systems. Pp. 68–70.

V. A. Karasevich, PhD, Associated Professor, the Renewable Energy Department, [Gubkin State Oil and Gas University \(Moscow\)](#)

1. *Ob#ekty generatsii v izolirovannykh i trudnodostupnykh territorijakh v Rossii: Analiticheskiy doklad (mart 2020)* [Generation facilities in isolated and hard-to-reach areas in Russia: An analytical report (March 2020)]. Moscow. *ATs pri Pravitel'stve RF* [Analytical Center under the Government of the Russian Federation] 2020. 78 p. [In Russian]
2. *Daľnij Vostok i regiony Arktiki poluchat investitsionnuju kartu ob#ektov promyshlennoj raspredelennoj generatsii* [The Far East and the regions of the Arctic will receive an investment map of industrial distributed generation facilities]. *RfeA Minjenergo Rossii ot 07.07.2023* [Russian Energy Agency of the Ministry of Energy of Russia from July 7, 2023]. Web-source: rosenergo.gov.ru. Access date: 25.06.2023. [In Russian]
3. *Rynok sistem nakoplenija jelektroenergii v Rossii: potentsial razvitiija. Jekspertno-analiticheskiy doklad TsSR* [Market of electric power storage systems in Russia: A development potential. Expert and analytical report of the Center for Strategic Research (CSR)]. Edited by Ju. Udaltsov and D. Kholkin. Moscow. AO "Rosnano" ["Rosnano", JSC]; "Jenerdzhinet" ["EnergyNet"]. 2018. 72 p. [In Russian]
4. International Energy Agency (IEA). Web-source: [iea.org](https://www.iea.org). Access date: 21.06.2023.
5. *Rossijskie kompetentsii vodorodnoj promyshlennosti: sbornik* [Russian competencies of the hydrogen industry: A collection]. Moscow. *Minpromtorg Rossii* [Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation]. 2022. 170 p. [In Russian]
6. "Snezhinka" vykhodit na start: Glavgosjekspektiza odobrila proekt mezhdunarodnoj arktičeskoj stantsii ["Snezhinka" goes to the start: Glavgosjekspektiza approved the project of the International Arctic Station]. *Glavgostrojekspektiza Rossii ot 09.03.2023* ["Main Department of State Expertise" Federal Autonomous Institution (Glavgosjekspektiza of Russia) of Mart 9, 2023]. Web-source: gge.ru. Access date: 20.06.2023. [In Russian]
7. PAO "RusGidro" — gibrinadaja SNje na Russkom ostrove ["RusHydro", PJSC — a hybrid energy storage system on Russky Island]. GK "InJenerdzhinet" ["InEnergy" Group]. Web-source: inenergy.ru. Access date: 24.06.2023. [In Russian]
8. A.V. Fedjukhin, V.A. Karasevich. *Perspektivy primenenija vozdukh-akkumulirujushhih stantsij dlja balansirovanija rezhimov jenergosistemy* [Prospects for the use of air-storage stations for balancing power system modes]. *Problemy sovershenstvovanija toplivno-jenergetičeskogo kompleksa: Mat. XVI Mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [Problems of improving the fuel and energy complex: Proc. of the XVI International Scientific and Technical Conference]. October 11–13, 2022. Saratov. *SGTU* [Yuri Gagarin State Technical University of Saratov]. 2022. [In Russian]