



ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Л.Р.Мухаметова¹, И.Г.Ахметова¹, В.Стриелковски²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

liliyamyhametova@mail.ru

²Пражский институт повышения квалификации, г. Прага, Чехия

strielkowski@gmail.com

Резюме: Инновационные технологии находят применение в самых разных областях человеческой жизни. Энергетическая сфера не является исключением, особенно в части вопросов эффективного хранения и использования энергии.

Научных разработок в этих областях существует достаточно много. Одни из них находятся на стадии теоретической разработки, а другие уже существуют в области работающих прототипов. Технологии накопления энергии сохраняют энергию, когда потребление ниже, чем ее производство, и снабжают энергией, когда потребление выше, чем ее производство. Это обеспечивает энергетическую безопасность и готовность к чрезвычайным ситуациям, например в случае аварии на электростанции; дает возможность балансировать нагрузки сети, где электричество генерируется с помощью возобновляемой энергии. Системы хранения энергии полезны и для потребителей – благодаря им возможно поддерживать стабильные цены на электроэнергию в масштабе общей сети или обеспечить индивидуальную гибкость и независимость потребления при локальном хранении в домах.

Развитие систем накопления и хранения энергии становится потенциальным методом решения проблем глобальной энергетической системы. Однако существуют технические и нетехнические барьеры, препятствующие широкому распространению устройств накопления энергии. В связи с этим необходимо выявить инновационные процессы, механизмы и системы, которые позволяют разработкам в области накопления энергии содействовать решению проблем энергетической системы, а также обеспечить промышленный рост за счет компаний, занимающихся разработкой технологий. В данной статье рассматриваются актуальные достижения и тенденции в области инноваций в сфере накопления энергии. Научная новизна статьи заключается во всестороннем обзоре современного положения дел в данной области и определении основных направлений развития.

Ключевые слова: хранение энергии; устройство накопления энергии; аккумуляторы; энергетическая политика.

Для цитирования: Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Стриелковски В. Инновации в области хранения энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. №4. С. 33-40. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40.

INNOVATIONS IN ENERGY STORAGE

L.R. Mukhametova¹, I.G. Akhmetova¹, W. Strielkowski²

¹Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

liliyamyhametova@mail.ru

²Prague Institute for Qualification Enhancement, Prague Czech Republic

strielkowski@gmail.com

Abstract: The development of energy storage and storage systems is becoming a potential method for solving the problems of the global energy system. However, there are technical and non-technical barriers to the widespread distribution of energy storage devices. In this regard, it is necessary to identify innovative processes, mechanisms and systems that allow developments in the field of energy storage to contribute to solving the problems of the energy system, as well as to ensure industrial growth at the expense of companies engaged in the development of technologies. This article discusses current advances and trends in energy

storage innovation. The scientific novelty of the article consists in a comprehensive review of the current state of affairs in this area and the determination of the main directions of development.

Keywords: *energy storage; storage device; batteries; energy policy.*

For citation: Mukhametova LR, Akhmetova IG, Strielkowski W. Innovations in energy storage. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019; 21(4):33-40. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40.

Введение

С экономической точки зрения стоимость, полученную от хранения дешевой или свободной энергии (то есть энергии, полученной из возобновляемых источников энергии в периоды внепикового или низкого потребления, которая может быть продана в часы пиковой нагрузки, приходящиеся, в основном, на вторую половину дня), можно рассчитать, определив разницу в рыночной цене в разные периоды времени. Таким образом, энергия, полученная из возобновляемых источников энергии и сохраненная в аккумуляторах в периоды внепикового потребления, может быть использована в периоды пикового потребления. В отличие от них, использование энергии невозобновляемых источников, таких как турбины, работающие на природном газе, стоит дороже. Для того чтобы получить полное представление о последствиях использования таких технологий при проведении строгого анализа, необходимо рассмотреть вопрос о негативном воздействии загрязнений на окружающую среду. Может случиться так, что, несмотря на экологические преимущества, связанные с накоплением энергии, одновременно может оказываться неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Например, можно не останавливать ветряные электростанции в ночное время, поскольку вырабатываемая электроэнергия может быть накоплена. При этом угольные электростанции также могут продолжать работать ночью, так как выработанная ими энергия также может быть сохранена, что приводит к общему эффекту небольшого увеличения общего количества загрязнения окружающей среды (Jacobsen, 2016).

Электрическая энергия может быть преобразована во множество различных форм для хранения. К распространенным формам относятся преобразование и хранение энергии в виде: гравитационной потенциальной энергии в водяных резервуарах, энергии сжатого воздуха, электромеханической энергии в батареях и проточных батареях, химической энергии в топливных элементах, кинетической энергии в маховиках и магнитной энергии в индукторах и электрическом поле в конденсаторах. Использование крупномасштабных систем накопления энергии, таких как насосные гидроаккумуляторы (*pumped hydro storage* – *PHS*), которые основаны на хранении электрической энергии в качестве гравитационной потенциальной энергии воды, включает в себя перекачку воды из нижнего резервуара в верхний в периоды внепикового потребления. Вода, в свою очередь, высвобождается для перетока в нижние резервуары в часы пик, и таким образом запускает водяные турбины, в конечном итоге генерирующие электроэнергию. Существует пропорциональная зависимость между накопленной энергией, объемом воды в верхнем резервуаре и высотой водопада. Установки *PHS* обычно служат от 30 до 50 лет и, как было определено, имеют приемлемую энергоэффективность полного цикла (*round trip efficiency*) от 65 до 75 процентов. Они также имеют быстрое время отклика (менее одной минуты), несмотря на управление большими объемами энергии и мощности, что делает их пригодными для регулирования частоты электрической сети и обеспечения резервной генерации энергии (Díaz-González et al., 2012).

Системы хранения энергии на основе сжатого воздуха (*Compressed Air energy storage* – *CAES*) основаны на хранении энергии в виде сжатого воздуха в подземных хранилищах. Таким образом, они основаны на использовании обычных газовых турбин. Во время пиковых часов потребления, требующих, как правило, поступления большего количества электроэнергии в сеть, сжатый воздух, смешанный с природным газом, извлекают из хранилищ, нагревают и запускают в газотурбинные установки высокого и низкого давления. Это преобразует энергию сжатого воздуха в кинетическую энергию. Турбины, в свою очередь, запускают электрогенераторы, в то время как выхлопы из турбин используются для нагревания сжатого воздуха из хранилищ. Однако эта технология не получила широкого применения во всем мире. Примеры включают одну установку в Германии с мощностью 290 МВт и еще одну в США мощностью 110 МВт.

Совершенствование технологии привело к созданию улучшенных адиабатических систем CAES (*Advanced Adiabatic CAES – AA-CAES*), которые основаны на адиабатном сжатии расширенного воздуха и последующем закачивании его на хранение в цистерны подземного хранилища. Этот метод влечет использование теплообменников, которые имеют более высокую стоимость, однако существенно увеличивают эффективность, результативность и экономичность. Они показали свою высокую эффективность в ходе испытаний их компрессоров и расширителей. По оценкам срок службы систем CAES составляет не менее 40 лет при уровне энергоэффективности 71 процент. Из-за очень низкого уровня саморазряда внутри системы они рассматриваются в качестве долгосрочных конкурентов PHS (Lu et al., 2004).

Аккумуляторные системы накопления энергии

Наиболее распространенными технологиями, применяемыми при хранения энергии, являются аккумуляторные системы накопления энергии (*battery energy storage system – BESS*). Эта технология включает комплект или несколько комплектов взаимосвязанных ячеек, соединенных последовательно, параллельно или обоими способами с целью получить определенное значение напряжения или емкости (Divya u Østergaard, 2009). В данных системах энергия хранится в виде электрохимической энергии. Electrodes, которые обычно сделаны из проводниковых материалов, помещены в специальный содержащий электролит герметичный контейнер, обеспечивая таким образом внешнюю нагрузку (Winter and Brodd, 2004). Через электролит происходит обмен ионов между электродами, в то время как электроны протекают через внешний контур. Этот метод основан на использовании энергетических аккумуляторных блоков, производящих более низкие напряжения, которые, будучи соединенными в цепь с параллельной или последовательной схемой соединения, достигают желаемых свойств и уровня производства электроэнергии. Как правило, BESS состоит из аккумуляторных батарей, системы управления и регулирования мощности (*Control and Power Conditioning System – C-PCS*) и защитного устройства для всей системы (Suberu и соавт., 2014). Различные типы используемых батарей включают свинцово-кислотные аккумуляторные батареи, никель-кадмиевые и литий-ионные батареи. Свинцово-кислотные батареи используются самое длительное время на протяжении около 140 лет. Эти батареи бывают двух типов: обычно применяемые аккумуляторные батареи с жидким электролитом (*flooded batteries*), и аккумуляторные батареи с регулируемым клапаном (*valve regulated batteries*), которые в настоящее время разрабатываются и совершенствуются.

Они имеют период эксплуатации от 1200 до 1800 циклов разрядки, который зависит от глубины разряда; энергоэффективность полного цикла (*round trip efficiency*) от 75 до 80 %, а срок службы от 5 до 15 лет в зависимости от рабочей температуры (Dufo-Lonec, 2015). Их лучше использовать для хранения энергии в течение длительного времени. Однако они часто демонстрируют низкую эффективность при высоких и низких температурах окружающей среды и имеют довольно короткий срок службы. Они также со временем требуют восполнения уровня воды, особенно это касается батарей с жидким электролитом. Усилия были направлены на то, чтобы никель-кадмиевые и литий-ионные батареи стали предпочтительным вариантом выбора, особенно с точки зрения их стоимости. Никель-кадмиевые аккумуляторы включают щелочные перезаряжаемые батареи, которые часто классифицируют в зависимости от сферы применения (Hadjipaschalis et al. 2009.). Они находятся либо в загерметизированной форме, которая часто используется на переносном электрическом оборудовании, либо в форме с жидким электролитом, используемой в промышленных применениях. Этот тип батареи имеет довольно длинный период эксплуатации: больше чем 3500 циклов и несложное обслуживание. Однако они токсичны из-за использования в производстве тяжелых металлов, представляющих опасность для здоровья и окружающей среды, и часто имеют недостаток в виде так называемого «эффекта памяти». Литий-ионные (*Li-Ion*) аккумуляторы, с другой стороны, обычно применяются в современных электронных устройствах, таких как мобильные телефоны и электронные устройства, требующие минимума энергии. Литий-ионные аккумуляторы имеют высокую удельную энергоемкость и удельную энергию между 75 до 125 Вт.ч/кг. К тому же они демонстрируют способность быстро заряжаться и разряжаться, а также иметь высокую эффективность полного цикла: 78 % в течение 3500 циклов. Эти аккумуляторы не могут использоваться для систем резервного питания из-за их срока службы, который зависит от глубины разряда (Young et al., 2013).

Система хранения энергии с использованием проточных аккумуляторных батарей (*Flow battery energy storage system – FBESS*) представляет собой новую технологию, основанную на использовании обратимых электрохимических реакций для получения

желаемого выходного напряжения тока. В этом типе аккумуляторной батареи используются два различных водных раствора, помещенных в отдельные емкости для хранения. Имеющиеся в продаже виды включают ванадиевые редокс-аккумуляторные батареи (*Vanadium Redox Battery – VRB*), цинко-бромные батареи (*Zinc Bromine Battery – ZBB*) и полисульфидные бромидные батареи (*Polysulphide Bromide Battery – PBB*). Проточные аккумуляторные батареи способны давать энергию без причинения какого-либо вреда и имеют относительно низкий уровень саморазряда. Они также имеют длительный срок эксплуатации, не требуют постоянного обслуживания, обладают легко масштабируемой мощностью в зависимости от объема хранящегося электролита, а также способны хранить энергию на протяжении длительного периода времени (*Chen et al.*, 2009).

Другие системы хранения энергии

Водородная система накопления энергии (*Hydrogen-based energy storage system – HESS*) основана на возможности различных методов и средств извлечения водорода, который потом можно хранить и использовать (позднее либо сразу). Различные способы получения водорода включают электролиз воды, возобновляемые источники энергии и газификацию биомассы, угля или топлива, что обычно является наиболее распространенным методом. Хранение водорода, как правило, предполагает использование технологий восстановления топливных элементов (*Regenerative Fuel Cell technologies – RFC*), которые обычно влекут электрохимические превращения формы водорода и позднее вводятся в национальные или региональные сети в форме электричества (*Zhao et al.*, 2014). Для *RFC* необходимы: системы электролиза воды для электрохимического разложения воды на водород и кислород; система топливных элементов; система хранения водорода и система преобразования электроэнергии. Устройства для электролиза (электролизеры) бывают различных видов, а именно: применяемые в настоящее время щелочные электролизеры и полимерно-электролитная мембрана (*Polymer Electrolyte Membrane – PEM*). В состав *RFC* обычно входят топливные элементы, благодаря их хорошим динамическим свойствам, быстрому запуску и, как правило, отсутствию акустических выбросов при работе. Единственным побочным продуктом является сливная отработанная вода. Учитывая, что технология *RFC* основана на технологии проточных аккумуляторных батарей, их мощность и энергоемкость не зависят друг от друга. Благодаря их модульной конструкции, они имеют высокую пиковую мощность: более 10 МВт, для систем высокой мощности – более 100 МВт час. Они также имеют нулевой саморазряд, что позволяет хранить энергию длительные промежутки времени – около 15 лет. Однако эта система имеет низкую эффективность – около 42 % (*Soloveichik*, 2011).

Система хранения энергии маховика (*Flywheel energy Storage system – FESS*) представляет собой хранение энергии в кинетической форме: масса вращается на двух магнитных подшипниках, с целью уменьшения трения при высоких скоростях, совместно с электрическим генератором (*Akagi and Sato*, 2002). Во время работы генератора и вращения его двигателя происходит передача энергии к маховику, в результате чего происходит его ускорение и, таким образом, зарядка накопительного устройства. Такая технология часто используется в магнитоэлектрических машинах радиального или осевого потока и синхронизированных реактивных электроиндукционных машинах. *FESS*, как правило, имеет много преимуществ, включая высокую эффективность: около 90 % при номинальной мощности, длинный жизненный цикл, широкий диапазон рабочей температуры, отсутствие влияния глубины разрядки, более высокую мощность и энергоемкость. Они, однако, не лишены и недостатков, таких как относительно высокие потери при простое и саморазряд на 20 % от накопленной энергии за час для всей системы маховика, что делает их совершенно неподходящими для долгосрочного хранения электроэнергии (*Vazquez et al.* 2010).

Другой технологией, разработанной для хранения энергии, является суперпроводниковое магнитное накопление энергии (*superconducting magnetic energy storage – SMES*), которое является новейшей технологией. Оно предполагает хранение энергии в магнитном поле в результате прохождения постоянного тока через сверхпроводящую катушку при криогенных температурах. Эта система включает в себя использование сверхпроводящих катушек, которые могут быть сгруппированы в высокотемпературные катушки (*high temperature coils – HTC*) с рабочей температурой около 70 К и низкотемпературные катушки с рабочей температурой около 5 К. При решении вопроса о том, какая технология лучше всего подходит для использования, важно чтобы были сбалансированы как стоимость, так и системные требования. Эта система способна достигать высокой энергоемкости, близкой к показателям, получаемым в маховиках и обычных батареях. Она также характеризуется высоким уровнем

энергоэффективности до 90 %, а также очень длинным периодом эксплуатации, достигающим десятков тысяч циклов. Также эта система способна сгенерировать или поглотить большое количество энергии за очень короткое время. Вместе с тем, из-за высокой стоимости системы, капитальные затраты на которую составляют от 1000 до 10 000 долл./кВт, было создано очень мало таких объектов (*Noe and Steurer, 2007*).

Экономические последствия накопления энергии

Накопление энергии является перспективным полем прикладных исследований будущего для достижения больших целей (*Ciamician, 2012*). Многие люди понимают, что доступные системы хранения энергии являются недостающим звеном между альтернативной возобновляемой энергетикой, основанной на таких источниках, как энергия ветра и солнца, и ее ежедневной надежностью. Во всем мире предприятия заинтересованы в возможности хранения запасов энергии для удовлетворения других потребностей, таких как сокращение отключений и устранение колебаний мощности, которые происходят независимо от производства возобновляемой энергии (*Urbaniec, 2015*). Крупные производители техники признают хранение энергии прикладной наукой, которая может изменить автомобили, турбины и потребительскую автоматику.

Другие исследователи, тем не менее, придерживаются более скептической позиции, понимая, что хранение энергии не станет перспективной деятельностью в ближайшее время. Эту неопределенность нельзя не принимать во внимание. Уже в течение долгого времени рассматривается вопрос о трансформационной перспективе хранения энергии, однако и в настоящее время хранение энергии имеет малую долю (*Gallagher, 2009*). В 2015 году были установлены рекордные объемы емкости хранения – 221 мегаватт емкости хранения, что более чем в три раза больше, чем в 2014 году – 65 мегаватт, что само по себе означало значительный рост по сравнению с предыдущим годом (*Fertig and Apt, 2011*). Однако более 100 мегаватт 2015 года было использовано частной местной передающей корпорацией *PJM Interconnection*. *PJM* обслуживает штаты: Иллинойс, Делавэр, Кентукки, Индиана, штат Мэриленд, Нью-Джерси, Мичиган, Огайо, штат Северная Каролина, Теннесси, Пенсильвания, Вирджиния, Западная Вирджиния и Вашингтон, округ Колумбия. Кроме того, 221 мегаватт – это не так уж много, учитывая полную производственную мощность США более миллиона мегаватт.

Когда появляются установки и перспектива для хранения энергии для 10 ведущих стран мира, становится очевидным, что, хотя Китай имеет большую часть установленной мощности, он отстает от Соединенных Штатов и Японии по ряду проектов (*DOE Global Energy Storage Database, 2016*).

Исследования раскрывают значительную краткосрочную возможность стационарного хранения электроэнергии. Одно из заключений состоит в том, что цены падают и могут приблизиться к \$ 200 за киловатт-час в 2020 году – это половина от сегодняшней цены; и составить \$ 160 за киловатт-час или меньше в 2025 году (*Lundmark u Bäckström, 2015*). Другое дело, что исследование наиболее эффективных аспектов и групп потенциальных потребителей в отношении хранения энергии показало смещение интереса в сторону определенного круга организаций, включающих: поставщиков электроэнергии, инженерные компании электросетей, производителей аккумуляторных батарей, интеграторов хранения энергии и предприятия со встроенными связями с потенциальными клиентами, такими как энергосервисные компании и разработчики солнечной энергии. Это особенно важно в отношении растущей доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и целевых показателей ВИЭ, установленных ЕС (*Eurostat, 2016*). Инновации в области накопления энергии имеют решающее значение для содействия этому росту.

Необходимо устанавливать планы и идентифицировать клиентов. Это позволяет понимать, как используется энергия и сколько она стоит, а также дает представление о стоимости хранения энергии. Однако слишком часто предприятия, которые имеют доступ к информации об использовании энергии, не имеют достаточных знаний о том, как оценивать экономику хранения; те же, кто понимает эту экономику, имеют недостаточный доступ к фактическим мировым данным об использовании энергии. Кроме того, существует склонность отождествлять некоторые данные при проведении анализа. Агрегирование оценок, тем не менее, нецелесообразно при оценке преимуществ хранения энергии, поскольку одинаковые структуры по соседству друг с другом могут иметь совершенно разные модели использования энергии. Выводы, сформированные на основе средних данных, следовательно, не обладают уровнем точности, необходимым для определения того, каких потребителей было бы целесообразно обслуживать.

Выводы и мнения

В заключение становится очевидным, что из вышеизложенного можно сделать несколько существенных выводов.

Во-первых, хранение энергии теперь имеет экономическую обоснованность для специфического использования. Этот пункт иногда игнорируется в связи с важностью сборов, платежей за некоторые схемы хранения энергии и неэкономических или трудноизмеримых финансовых оснований для хранения (таких как эластичность и защита от перебоев в подаче электроэнергии).

Во-вторых, участникам рынка необходимо получить полные данные, которые могли бы позволить им различать и выделять приоритетные группы потребителей, для которых хранение полезно. Учитывая сложность хранения энергии, для развертывания системы более разумно применить политику «толчка», нежели модель постепенного «растягивания», поддерживать предпринимательские усилия, которые находят новаторские способы получения и использования этих данных.

В-третьих, поставщики систем хранения энергии должны быть открытыми и непредвзятыми в своем видении картины развития отрасли и при определении того, будут ли свинцово-кислотные, литий-ионные, проточные или иные технологии представлять наибольшую ценность. Подход, совмещающий различные технологии, может быть связан с дополнительными расходами, однако он также может защитить от неожиданного повышения цен.

В-четвертых, ожидается, что фирмы, использующие аккумуляторные системы и загружающие данные, накопят здоровые объемы. Отдельные индивидуальные потребители будут поддерживать индивидуальные стратегии, обеспечивая развитие «алгоритмов», которые помогают находить и получать наибольшую ценность. Для получения последовательных данных и наиболее экономически обоснованной реакции по мере развития законов и технологий необходимы сильные объединения потребителей.

В-пятых, для того, чтобы использовать хранение для снижения общесистемных расходов, необходимы определенные знания.

Модели могут включать в себя ценовые сигналы, которые связаны с заметными различиями в производстве и потреблении электроэнергии, практики, которые вознаграждают предоставление хранения энергии для оказания помощи различным объектам в непосредственной близости, и сборы, которые благоприятствуют самостоятельному потреблению (или перемещению нагрузки) возобновляемой энергии.

Наиболее существенная взаимосвязь заключается в следующем: крупномасштабное распределение накопителей энергии может нарушить рынок, привычный для некоторых предприятий электроэнергетики. В развитых странах, например, центральное или массовое производство традиционно используется для удовлетворения непосредственного спроса, при этом дополнительная помощь служит для сглаживания несоответствий между производством электроэнергии и нагрузкой. Хранение энергии хорошо подходит для того, чтобы предоставить такую «дополнительную помощь». В конечном счете, по мере падения цен, оно может выйти за рамки этой функции, производя и подавая в электросеть все больше и больше энергии, заменяя, таким образом, традиционные электростанции. Но необходимо знать, что процесс хранения энергии способен перевернуть бизнес-структуры, как экономические, так и физические, которые сформировали энергетический бизнес за последнее столетие.

Литература

1. Akagi H., Sato H. Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2002. V.17.N.1.pp. 109–116.
2. Chen H., Cong T.N., Yang W., Tan,C., Li Y., Ding Y // *Progress in electrical energy storage system: A critical review*. Progress in Natural Science.2009. V.19. N.3. pp. 291–312.
3. Ciamician G. (1912). The photochemistry of the future. *Science*. P. 385–394.
4. Díaz-González F., Sumper A., Gomis-Bellmunt O., Villafañila-Robles R. A review of energy storage technologies for wind power applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. V.16. N.4. pp. 2154–2171.
5. Divya K.C., Ostergaard J. Battery energy storage technology for power systems. An overvie // *Electric Power Systems Research*. 2009. V.79.N.4. pp. 511–520.
6. DOE Global Energy Storage Database. (2016), Available at: <http://www.energystorageexchange.org/>.
7. Dufo-López R. Optimisation of size and control of grid-connected storage under real time electricity pricing conditions // *Applied Energy*. 2015. V.140. pp. 395–408.

8. Eurostat. (2016), Simplified energy balances – annual data. Available at: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_100a&lang=en.
9. Fertig E., Apt J. Economics of compressed air energy storage to integrate wind power: A case study in ERCOT // *Energy Policy*. 2011. V.39. N.5. pp. 2330–2342.
10. Gallagher K. (2009). *Acting in time on energy policy*. Washington, D.C.: Brookings Institution Press
11. Hadjipaschalis I., Poullikkas A., Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2009. V.13(6). pp. 1513–1522.
12. Jacobsen M. // *Economics and Policy of Large Scale Battery Storage*. Kleinman Center for Energy Policy, University of Pennsylvania. 2016. Available at: <http://kleinmanenergy.upenn.edu/policy-digests/economics-and-policy-large-scale-battery-storage>.
13. Lu N., Chow J.H., Desrochers A.A. Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004. V.19. N2. pp. 834–841.
14. Lundmark R. Bäckström K. Bioenergy innovation and energy policy. *Economics Of Innovation And New Technology*. 2015. V.24. N8. pp. 755–775.
15. Noe M., Steurer M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status // *Superconductor Science and Technology*. 2007. V.20(3). R15.
16. Soloveichik G.L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage // *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. 2011. V.2. pp. 503–527.
17. Suberu M.Y., Mustafa M.W., Bashir N. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. V.35. pp. 499–514.
18. Urbaniec M. Towards Sustainable Development through Ecoinnovations: Drivers and Barriers in Poland, *Economics and Sociology*. 2015. Vol.8. N.4. pp. 179–190.
19. Vazquez S., Lukic S.M., Galvan E., Franquelo L.G., Carrasco J.M. Energy storage systems for transport and grid applications // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. V.57. N.12. pp. 3881–3895.
20. Winter M., Brodd R.J. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? // *Chemical reviews*. 2004. V. 1.104. N.10. pp. 4245–4270.
21. Young K., Wang C., Wang L.Y., Strunz K. // *Electric vehicle battery technologies*. In *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks* 2013. pp. 15–56. Springer New York.
22. Zhao P., Dai Y., Wang J. Design and thermodynamic analysis of a hybrid energy storage system based on A-CAES (adiabatic compressed air energy storage) and FESS (flywheel energy storage system) for wind power application // *Energy*. 2014. 70. pp. 674–684.

Авторы публикации

Мухаметова Лилия Рафаэльевна – канд. экон. наук, доцент кафедры «Экономика и организация производства» (ЭОП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ахметова Ирина Гареевна – д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Экономика и организация производства» (ЭОП), директор Института цифровых технологий и экономики Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Стриелковски Вадим – д-р экон. наук, профессор, директор Пражского института повышения квалификации.

References

1. Akagi H., Sato H. Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2002;17(1):109–116.
2. Chen H., Cong T.N., Yang W., Tan, C., Li Y., Ding Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*. 2009;19(3):291–312. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>
3. Ciamician, G. (1912). The photochemistry of the future. *Science*. P. 385–394.
4. Díaz-González F., Sumper A., Gomis-Bellmunt O., Villafila-Robles R. A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012; 16(4):2154–2171.
5. Divya K.C., Østergaard J. Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research*. 2009; 79(4):511–520. doi: 10.1016 / j.epr.2008.09.017.

6. DOE Global Energy Storage Database. 2016. Available at: <http://www.energystorageexchange.org/>.
7. Dufo-López R. Optimisation of size and control of grid-connected storage under real time electricity pricing conditions. *Applied Energy*. 2015; 140: 395–408.
8. Eurostat. (2016), Simplified energy balances – annual data. Available at: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_100a&lang=en.
9. Fertig E., Apt J. Economics of compressed air energy storage to integrate wind power: A case study in ERCOT. *Energy Policy*. 2011;39(5):2330–2342.
10. Gallagher K. *Acting in time on energy policy*. Washington, D.C.: Brookings Institution Press. 2009.
11. Hadjipaschalis I., Poullikkas A., Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2009;13(6): 1513–1522.
12. Jacobsen M. *Economics and Policy of Large Scale Battery Storage*. Kleinman Center for Energy Policy, University of Pennsylvania. Available at: <http://kleinmanenergy.upenn.edu/policy-digests/economics-and-policy-large-scale-battery-storage>. 2016.
13. Lu N., Chow J.H., Desrochers A.A. Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004;19(2):834–841.
14. Lundmark R. Bäckström K. Bioenergy innovation and energy policy. *Economics Of Innovation And New Technology*. 2015; 24(8): 755–775. <https://doi.org/10.1080/10438599.2014.998862>.
15. Noe M., Steurer M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. *Superconductor Science and Technology*. 2007;20(3):15. doi: 10.1088 / 0953-2048 / 20/3 / R01.
16. Soloveichik G.L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. 2011;2:503–527. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116>.
17. Suberu M.Y., Mustafa M.W., Bashir N. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 35:499–514. doi: 10.1016 / j.rser.2014.04.009.
18. Urbaniec M. Towards Sustainable Development through Ecoinnovations: Drivers and Barriers in Poland. *Economics and Sociology*. 2015;8(4):179–190. doi: 10.14254/2071-789X.2015/8-4/13
19. Vazquez S., Lukic S.M., Galvan E., Franquelo L.G., Carrasco J.M. Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010; 57(12):3881–3895. doi: 10.1109/TIE.2010.2076414.
20. Winter M., Brodd R.J. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chemical reviews*. 2004; 104(10): 4245–4270.
21. Young K., Wang C., Wang L.Y., Strunz K. Electric vehicle battery technologies. In *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks* 2013:15–56. Springer New York.
22. Zhao P., Dai Y., Wang J. Design and thermodynamic analysis of a hybrid energy storage system based on A-CAES (adiabatic compressed air energy storage) and FESS (flywheel energy storage system) for wind power application. *Energy*. 2014;70:674–684. doi: 10.1016 / j.energy.2014.04.055.

Authors of the publication

Liliya R. Mukhametova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Irina G. Akhmetova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Wadim Strielkowski – Prague Institute for Qualification Enhancement, Prague Czech Republic.

Поступила в редакцию

18 апреля 2019 г.