

Автономные энергетические системы с кинетическим накопителем энергии

КОВАЛЕВ К.Л., ПОЛТАВЕЦ В.Н., КОЛЧАНОВА И.П.

Одна из основных проблем использования возобновляемых источников энергии — их зависимость от климатических условий на протяжении года, что снижает точность прогноза выработанной ими энергии, ведет к значительным колебаниям мощности, напряжения и частоты переменного тока. Существующие в настоящее время технологии пока не позволяют достичь устойчивой работы энергосистем, полностью построенных на использовании возобновляемых источников энергии. Выработка электроэнергии высокого качества невозможна без параллельного подключения традиционных источников и систем накопления энергии. В статье приведен обзор зарубежных разработок кинетических накопителей энергии, используемых на гибридных энергетических станциях, и описана конструкция первого в России накопителя энергии с магнитным ВТСП подвесом, объем запасаемой энергии составляет более 5 МДж.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электроэнергетика, возобновляемые источники энергии, гибридные энергетические установки, кинетический накопитель энергии, маховик, ВТСП подвес

Дефицит электроэнергии для потребителей, удаленных от централизованной энергосистемы (Дальневосточный регион, районы Крайнего Севера и Восточной Сибири), в основном компенсируется за счет использования автономных энергетических установок (АЭУ) на основе дизельных электрических станций (ДЭС), состоящих из дизель-генераторов разных типов и модификаций. Основной проблемой ДЭС является зависимость от поставок топлива, а в труднодоступных районах она усугубляется еще и ограниченностью сроков его сезонного завоза. Расходы на годовую закупку и доставку дизельного топлива для этих ДЭС в ряде случаев превышают 60 % затрат на выработанную ими электроэнергию и постоянно растут.

Автономные энергетические установки с использованием возобновляемых источников энергии и накопителей энергии. Основными требованиями при выборе типа генерирующего оборудования для АЭУ являются бездефицитность, низкая стоимость энергетических ресурсов и экологическая чистота. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют АЭУ с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ, прежде всего ветра и солнца), применение которых позволяет снизить топливную составляющую в общей себестоимости вырабатываемой электроэнергии и, соответственно, повысить их технико-экономическую эффективность.

В странах мира применяют различные схемы АЭУ на основе ВИЭ. Для зон децентрализованного электроснабжения особый интерес представляют автономные гибридные энергетические установки (АГЭУ), включающие одновременно несколько типов источников энергии — ветроэлектрическую установку (ВЭУ), фотоэлектрические панели (ФЭП), дизель-генераторную установку (ДГУ) и накопители энергии (НЭ). Структурная схема АГЭУ с НЭ представлена на рис. 1.

Основная проблема внедрения АЭУ на основе ВИЭ — нерегулярность их выходной мощности. Солнечная и ветровая энергии характеризуются высокой нестабильностью (суточной, сезонной, погодной), что приводит к значительным колебаниям мощности, напряжения и частоты переменного тока. Поэтому их комбинированное использо-

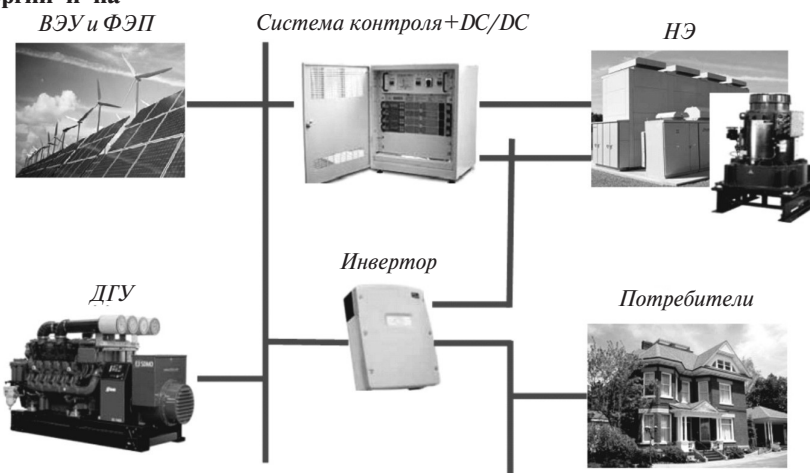


Рис. 1. Структурная схема автономной гибридной энергетической установки с накопителями энергии

вание совместно с другими источниками энергии (ДГУ и НЭ) позволяет повысить качество и бесперебойность электроснабжения, а также обеспечить минимальный расход топлива (экономия до 90 %). Для обеспечения стабильных параметров электрического напряжения и частоты в сети применяют системы накопления энергии (СНЭ).

Основные показатели, учитываемые при выборе технологии аккумулирования энергии [1]:

капитальные затраты на единицу мощности и на единицу емкости;

объем затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание в год;

характерное время разряда;

оптимальная глубина разряда и циклический ресурс, зависящий от глубины разряда;

объем производства аккумуляторов, обеспечивающий снижение стоимости продукции.

Для создания резервного запаса энергии в электросетях для ВИЭ, а также обеспечения эффективного управления энергией широко используются аккумуляторные батареи (АБ). Это прежде всего свинцово-кислотные (с клапаном сброса GEL и AGM и стационарные герметизированные батареи OPzV и OPzS), а также литий-ионные и литий-полимерные (LiFePO₄) аккумуляторы.

Помимо достоинств АБ имеют ряд существенных недостатков: малая энергоёмкость; низкая допустимая глубина разряда; зависимость ресурса от температуры и режимов эксплуатации; применение токсичных материалов и, соответственно, высокие капитальные и операционные затраты, связанные с хранением, утилизацией (для свинцово-кислотных аккумуляторов); высокая вероятность короткого замыкания и взрыва (для литий-ионных аккумуляторов большого размера).

В последние годы особый интерес представляют кинетические накопители энергии (КНЭ), принцип действия которых основан на преобразовании электрической энергии в кинетическую и обратно.

К основным достоинствам КНЭ можно отнести высокую удельную мощность и высокую способность к циклированию (см. табл. 1), широкий диапазон рабочей температуры, отсутствие вредных или опасных для экологии веществ. Срок жизни КНЭ практически не зависит от глубины разряда. Маховичные системы могут работать одинаково хорошо как на частые неглубокие разряды, так и на очень глубокие разряды. Этот тип изменения нагрузки, как правило, является сложным для АБ, поскольку сочетание низких и высоких нагрузок делает их конструкцию трудной для оптимизации.

В зарубежных энергосистемах КНЭ применяют уже давно, прежде всего в сетевых компаниях, что позволяет сглаживать пики потребления и нагрузки, регулировать частоту и напряжение, снижать

Таблица 1

Показатели	Аккумуляторные батареи			КНЭ
	Кислотн. GEL	Щелочн. NiCd	Li-ion	
Удельная мощность, Вт/кг	30÷90	150÷300	150÷315	400÷1600
Ресурс, циклов	100÷400	1000÷2000	500÷2500	10 ⁷
Срок службы, лет	2÷10	10÷15	5÷10	>20
КПД, %	70÷85	65÷80	80÷95	96÷98

потери при передаче и регулировании реактивной мощности.

В 2003 г. японской компанией Fuji Electric на ветроэлектрической станции о. Дого в Японии было установлено 200 маховиков Urengo общей мощностью 1800 кВт. Использование КНЭ помогло уменьшить колебания в системе, позволило дизель-генераторной системе работать с большей эффективностью, что привело к значительной экономии дизельного топлива [2].

Примером успешного применения КНЭ в малой энергетике является их использование в микросетях (Micro Grid) для стабилизации работы ВИЭ. Лидирующие позиции по внедрению технологии стабилизации напряжения с помощью КНЭ занимает компания ABB. Стабилизатор PowerStore, работающий на механическом принципе вращающегося маховика, является элементом системы MicroGrid Plus, в состав которой входят еще несколько генерирующих источников энергии, представленных комбинацией как традиционных источников (газовые или дизельные генераторы), так и на основе ВИЭ (ветроэлектростанции и фотоэлектрическая установка), специальные контроллеры для управления такой сетью [3]. PowerStore поддерживает интеграцию с неустойчивым использованием ВИЭ, обеспечивает их эффективное применение, а также позволяет снизить вредные выбросы от традиционных источников (в основном дизельных) и общую зависимость от такого рода топлива.

Стабилизатор PowerStore включает инверторы и специальное программное обеспечение (виртуальный генератор), контролирующее поток энергии в КНЭ и позволяющее мгновенно уменьшать колебания мощности, вырабатываемой ветрогенераторами или солнечными батареями. Время реакции такой системы составляет менее 150 мс, а перегрузочная способность — до 10 номинальных значений мощности. Компания ABB производит стабилизаторы сети PowerStore на — 500, 1000 и 1500 кВт. На рис. 2 представлено решение технологии MicroGrid Plus для стабилизации сети с использованием системы накопления PowerStore на основе КНЭ [4].

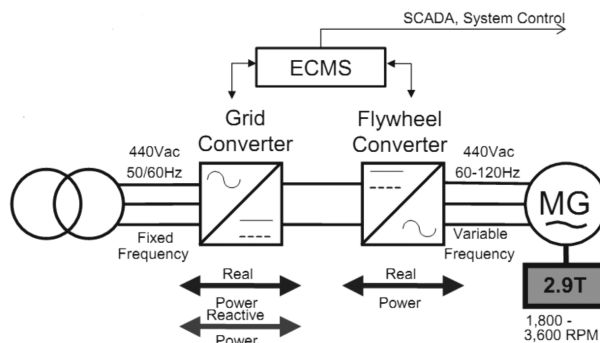
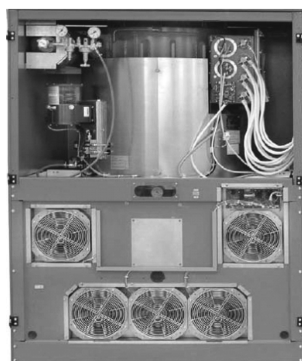
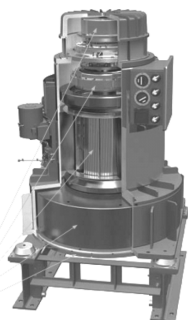


Рис. 2. Стабилизатор сети PowerStore для системы MicroGrid Plus с использованием КНЭ

В качестве накопителя PowerStore используется КНЭ технологии Piller энергоемкостью 5 кВт·ч. Общий вид КНЭ и его технические характеристики представлены на рис. 3 [4]. Конструктивно КНЭ Piller представляет собой вертикально установленные на общей оси стальной маховик и мотор-генератор, выполненный на основе синхронной электрической машины. Для уменьшения аэродинамических потерь при вращении маховика используется газообразный гелий. Низкая частота вращения маховика (3600 мин^{-1}) позволяет отказаться от необходимости создания глубокого вакуума внутри корпуса накопителя и использования активных магнитных подшипников для удержания массы маховика. Маховик поддерживается двумя парами механических подшипников (одна из которых резервная) и магнитной опорой. Магнитная опора применяется для уменьшения трения, а также способствует увеличению межремонтных интервалов и срока службы подшипников.



Наименование параметра	Значение
Энергоемкость, кВт·ч	5,0
Максимальная выходная мощность, кВт	1650
Частота вращения, мин^{-1}	1800-3600
Общий вес КНЭ, кг	6000
Вес ротора, кг	2900
Потери на холостом ходу, кВт	12
Срок службы подшипников, лет	8
Периодичность смазки подшипников, лет	5

Рис. 3. Общий вид КНЭ Piller и его технические характеристики

Компания АВВ предлагает контейнерное решение системы в различных мощностных вариантах. Продукт применим к изолированным сетям или в режиме поддержки сети, производит плавный переход от подключенной централизованной сети к автономному режиму.

Контейнерное решение системы имеет ряд преимуществ:

- готовность к вводу в эксплуатацию сразу после подключения к сети;

- отсутствие капитальных затрат на шумоизоляцию, вентиляцию и прокладку кабелей;

- отсутствие затрат на строительство помещений;
- возможность временного размещения.

На рис. 4 представлен проект Coral Bay ветродизельной электростанции с системой аккумулирования PowerStore в Австралии, введенной в эксплуатацию в 2007 г. Система MicroGrid Plus состоит из ВЭУ ($3 \times 200 \text{ кВт}$), ДГУ ($7 \times 320 \text{ кВт}$) с использованием технологии стабилизации сети PowerStore ($1 \times 500 \text{ кВт}$) на основе КНЭ [4]. Использование КНЭ помогло уменьшить колебания в системе, позволило ДГУ работать с большей эффективностью, что привело к значительной экономии дизельного топлива.

В табл. 2 представлена часть комплексных решений компании АВВ для изолированных сетей MicroGrid, использующих КНЭ в качестве стабилизатора сети [4–6].

Среди разработок КНЭ, применяемых с ВИЭ, следует отметить создание компаниями Enel и Amber Kinetics инновационного супермаховика модели M32 (рис. 5), у которого время работы продлено до 4 ч (у традиционных маховиков оно составляет от 1 до 15 мин). В основу конструкции супермаховика взята разработка (2015 г.) Amber Kinetics – КНЭ энергоемкостью 25 кВт ч [7]. Технология создания супермаховика и его тестирование были профинансированы Департаментом энергетики США и Энергетической комиссией Калифорнии [8]. Проект был первым коммерческим использованием передовой технологии Amber Kinetics в США.

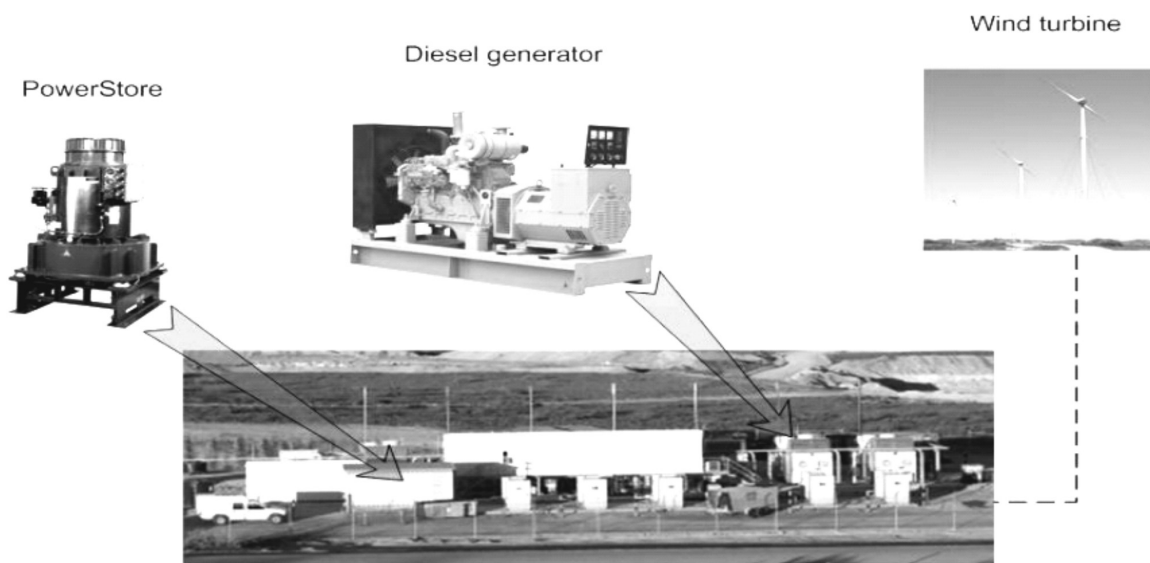


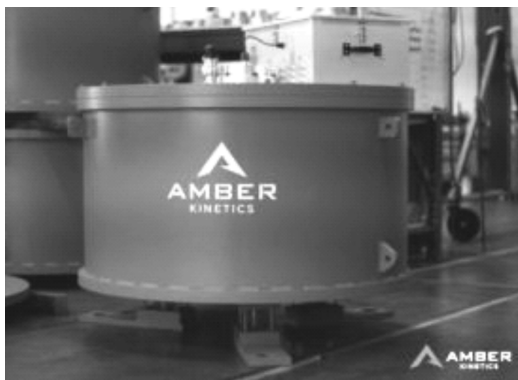
Рис. 4. Проект Coral Bay ветродизельной электростанции с системой аккумулирования PowerStore компании ABB в Австралии [4]

Таблица 2

Название проекта, страна, ввод в эксплуатацию	Описание технологии. Преимущество
Flores Island PowerStore, Азорские острова, Португалия, 2005	Интеграция ВЭУ с ГАЭУ и ДГУ. Преимущества для потребителя: стабилизатор сети PowerStore снижает колебания мощности, повышает долю участия ВЭУ. Минимизирует потребление дизельного топлива с доведением до режима полного отключения от системы ДГУ.
Coral Bay, Австралия, 2007	Система Microgrid Plus с использованием ВЭУ (3×200 кВт) и ДГУ (7×320 кВт) с технологией стабилизации сети PowerStore (1×500 кВт) на основе КНЭ. Преимущества для потребителя: надежное и стабильное электроснабжение с долей участия ВЭУ в системе 45%. Минимизация потребления дизельного топлива.
Ross Island, Антарктика, 2009	Microgrid Plus с интеграцией ВЭУ (3×330 кВт) и ДГУ (9×125 кВт) с технологией стабилизации сети PowerStore (1×500 кВт) на основе КНЭ. Преимущества для потребителя: доля участия ВЭУ в системе возрастет до 70%. Минимизация потребления дизельного топлива с ежегодной экономией 463 000 л. Снижение выбросов CO ₂ на 2800 т/г.
Marble Bar, Австралия, 2010	Интеграция ФЭУ (1×300 кВт) с ДГУ (4×320 кВт) с технологией стабилизации сети PowerStore (1×500 кВт) на основе КНЭ. Преимущества для потребителя: минимизация эксплуатации ДГУ, экономия в топливе 405000 л/г., снижение выбросов CO ₂ на 1100 т/г.
Kodiak Island, Аляска, США, 2015	Интеграцию ВЭУ мощностью 9 МВт с сетью осуществляет Microgrid Plus с использованием стабилизатора сети PowerStore (2×500 кВт) на основе КНЭ. Преимущества для потребителя: два действующих параллельно сетевых стабилизатора PowerStores обеспечивают оптимальную стабилизацию электросети морского порта на острове Kodiak, снижают нагрузку на две аккумуляторные системы мощностью 1,5 МВт, увеличивая их срок службы до 6 лет.
Marsabit, Кения, 2016	Интеграция ВИЭ с сетью. Преимущества для потребителя: PowerStore (1×500 кВт) на основе КНЭ стабилизирует интеграцию ВЭУ (2×275 кВт) к сети, обеспечивая их эффективное применение.
DeGrussa Mine, Австралия (медный рудник), 2016	Интеграция ФЭУ мощностью 10,6 МВт с ДГУ и КНЭ (2×2 МВт) в качестве стабилизаторов сети PowerStore, трансформатора (5 МВА) и системы Microgrid Plus. Преимущества для потребителя: данное решение позволяет минимизировать эксплуатацию ДГУ (экономия в топливе 5 млн л/г.), снизить выбросы CO ₂ .
Longmeadow, Южная Африка, штаб-квартира ABB в Йоханнесбурге, 2016	Интеграция ФЭУ мощностью 750 кВт с ДГУ и аккумуляторной системой PowerStore на основе КНЭ мощностью 1 МВт/380 кВт ч. Преимущества для потребителя: инновационное решение поможет обеспечить требуемое качество электроэнергии, максимально использовать солнечную энергию, снизить выбросы CO ₂ на 1000 т/г., минимизировав эксплуатацию ДГУ.

Стальной маховик массой 2 267 кг, раскручиваясь до 10 000 мин⁻¹, имеет энергоемкость 32 кВт·ч (115,2 МДж) и способен выдавать 8 кВт мощности в течение 4 ч [9]. Корпус маховика выполняет одновременно функции вакуумного сосуда и механи-

ческой опоры для подшипниковой системы. Система подшипников представляет собой гибридное механическое и магнитное подшипниковое устройство, которое обеспечивает долговечность, низкое сопротивление и надежную функциональность.



Amber Kinetics	Model 32
Энергоемкость, кВтч	32
Выходная мощность, кВт	8
Частота вращения, мин ⁻¹	10000
Срок службы, лет	30
КПД, %	88
Средние потери, Вт	<200
Время разряда, ч	4
Время полной мощности, с	<1

Рис. 5. Кинетический накопитель энергии, модель M32 компании Amber Kinetics и его технические характеристики [9]

Она спроектирована таким образом, чтобы обеспечить безопасную работу в условиях сейсмических возмущений до 1G, что значительно превышает номинальные значения класса IV для сейсмически активного региона Калифорнии. В качестве мотор-генератора КНЭ используется специально спроектированный и изготовленный компанией Amber Kinetics 8-полюсный трехфазный генератор с ПМ (рис. 6) [7].

Важной особенностью любого высокоскоростного маховика являются резонансные режимы работы, при которых могут возникать большие колебательные смещения, если эти режимы недостаточно демпфированы и наблюдается умеренный дисбаланс. Поэтому массы компонентов первичной системы и жесткость их соединений были тщательно настроены так, чтобы никакие резонансные режимы не возникали на частотах в нормальном ра-

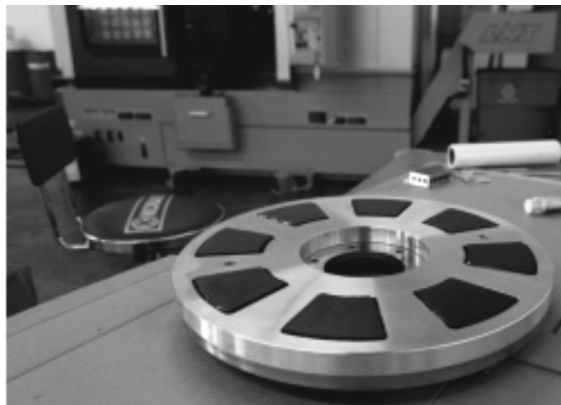


Рис. 6. Мотор-генератор с ПМ [1]

бочем диапазоне. Для ограничения пиковых резонансных амплитуд во время операций пуска и останова вводится демпфирование [7].

Благодаря 30-летнему сроку службы система хранения кинетической энергии Amber Kinetics® исключает затраты на замену изношенных стеков химических батарей. Подшипники, основной компонент замены, нуждаются в обслуживании только один раз в 10 лет и могут обслуживаться в полевых условиях. Система не требует воздушного или водяного охлаждения, может работать при экстремально высоких и низких температурах без потери эффективности и не требует дополнительного контроля температуры. Экологически чистый КНЭ на 98% состоит из стали, что позволяет его полностью переработать по истечении 30-летнего срока службы [9].

По итогам исследования Координационного совета по инновационным технологиям Калифорнии (Emerging Technologies Coordinating Council, ETCC), результаты которого опубликованы в апреле 2017 г., технология Amber Kinetics признана рентабельной (срок окупаемости 2–3 г.) при использовании активными потребителями для управления спросом и стабилизации напряжения [10].

Весной 2018 г. компания Hawaiian Electric в сотрудничестве с Amber Kinetics и Elemental Excelsator начали тестирование КНЭ «Model 32» на генерирующей станции Campbell Industrial Park на о. Оаху (Гавайи) с целью интеграции ВИЭ в сеть [11].

Гибридные системы накопления энергии. Перспективный путь развития технологии аккумулирования энергии – применение гибридной схемы накопления энергии, объединяющей технологию хранения энергии быстродействующих маховиков с обычной электрохимической батареей с более низким рабочим циклом. Примером использования такой технологии являются системы с применением супермаховиков Weacon 400. Одна из таких систем, состоящая из двух накопителей серии Weacon 400 Modular мощностью 160 кВт и свинцово-кислотной аккумуляторной батареи глубокого цикла производства Hitachi, установлена в Ирландии [12].

Накопители Weacon 400 Modular представляют собой автономную конфигурацию маховика со встроенной силовой электроникой и маховиком в одном отдельном корпусе. Технические характеристики накопителей серии Weacon 400 и их модификация (400 Modular и 400 XP) представлены в табл. 3 [13].

Другим примером использования гибридной системы накопления энергии является инновационный проект энергообеспечения в Анкоридже на Аляске. В 2015 г. Weacon Power и Chugach Electric Association заключили соглашение о поставке нако-

Таблица 3

Название продукта	400	400 Modular	400 XP
Напряжение питания	480 В	480 В	480 В
Реальная выходная мощность / время разряда	100 кВт за 15 мин	160 кВт за 5 мин до 50 кВт за 35 мин	360 кВт за 4 мин до 70 кВт за 30 мин
Энергоемкость	25 кВтч	30 кВтч	36 кВтч
Улучшение продукта	Масштабируемость сетки	Индивидуальный модуль управления питанием	Композитный маховик
Год выпуска	2011	2014	2015

питателей для инновационного проекта энергообеспечения на Аляске. В проекте также используется модульная система накопителя Weacon Power мощностью 160 кВт, которая управляет и стабилизирует переменную мощность от ВИЭ. Это уже третья установка модульной системы хранения Weacon мощностью 160 кВт, которая является следующим поколением накопителей мощностью 100 кВт [13].

Все накопители серии Weacon 400 и их модификации выполнены в виде герметичной стальной цилиндрической емкости, внутри которой на активных магнитных подшипниках подвешен маховик из углеволоконного композита (рис. 7). На стальном валу маховика установлен ротор высокоэффективной обратимой электрической машины — мотор-генератора (на постоянных магнитах). Для уменьшения потерь при больших оборотах от трения маховика о воздух маховик размещен в вакуумной камере. Размеры и масса накопителя зависят от модели [13].

На основе накопителей Weacon Power созданы «матричные» системы накопления энергии «Smart Energy Matrix» на большие уровни запасаемой энергии и мощности как передвижного (контейнеры), так и стационарного исполнения. Это введенные в эксплуатацию регулирующие частоту тока в электросетях США заводы мощностью 0,5 МВт (2008, Tyngsboro, MA), 20 МВт (2011, Stephentown, NY) и 20 МВт (2014, Hazle, PA) [13].

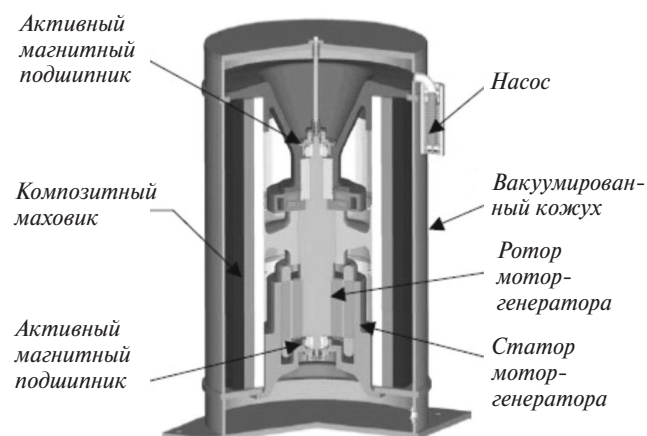


Рис. 7. Устройство маховичного накопителя Weacon Power

Компания АВВ в системах MicroGrid Plus также использует гибридную схему накопления энергии (стабилизатор PowerStore + АБ). Такое применение позволяет получить полностью сбалансированную сеть, устойчивую к изменениям на стороне генерации и независимую от потребления. Примером может служить Чугачская гибридная система накопления (Chugach, Alaska, USA), введенная в эксплуатацию в 2017 г. Заказчик Chugach Electric. Система MicroGrid включает: ВЭУ (11×1,6 МВт); ДГУ (1×17,6 МВт, 1×9 МВт, 1×3,6 МВт, 1×0,76 МВт); PowerStore на основе КНЭ (1×1 МВт) и PowerStore на основе АБ (1×2 МВт). Два КНЭ PowerStore, действующих параллельно, снижают пиковую нагрузку и уменьшают нагрузку на существующую систему накопления энергии на основе АБ [14].

Сверхпроводниковые КНЭ. В связи с прогрессом и доступностью технологии сверхпроводниковых пассивных магнитных подшипников в последнее время был создан ряд КНЭ, использующих магнитные ВТСП подшипники. Так, компанией Boeing в 2001 — 2003 гг. изготовлены и испытаны два прототипа КНЭ на 3 кВт/10 кВтч и на 100 кВт/5 кВтч (электрическая мощность/ запасаемая энергия). В 2006 г. проведены испытания КНЭ максимальной емкостью 125 МДж (35 кВтч), а в 2010 г. компания представила в качестве готового к заказу прототип КНЭ с запасаемой энергией 18 МДж (5 кВтч) и электрической мощностью 3 кВт [15]. В Германии компанией ATZ был разработан КНЭ с запасаемой энергией 20 МДж (5,5 кВтч) и мощностью 250 кВт. Диаметр накопителя 1,5 м, снабжен вращающимся маховиком из углеродного волокна, оснащен магнитным подвесом на основе ВТСП керамики [16].

В Японии в 2015 г. Railway Technical Research Institute (RTRI) совместно с Furukawa Electric и Kubotek был создан самый большой сверхпроводниковый КНЭ с запасаемой энергией 360 МДж (100 кВтч), мощностью 300 кВт и частотой вращения 6 000 мин⁻¹ (рис. 8). Композитный маховик с наружным диаметром 2 м и внутренним диаметром 1,4 м (рис. 9) выполнен из сплетенных особым методом углеродных волокон [17].



Рис. 8. Сверхпроводниковый КНЭ емкостью 100кВт·ч

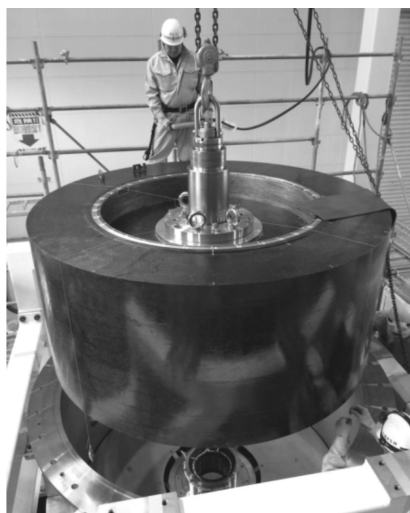
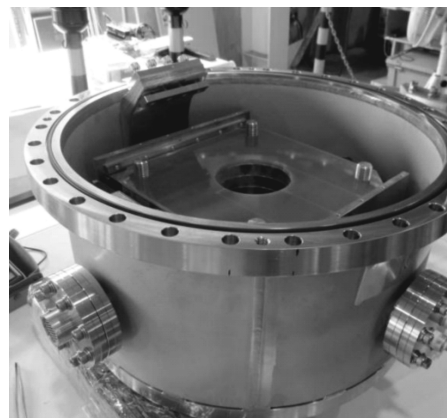


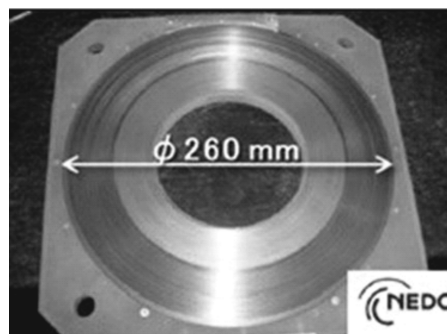
Рис. 9. Композитный маховик КНЭ

Для подъема ротора маховика массой 4 т используется сверхпроводящий магнитный подшипник (рис. 10,а), который состоит из высокотемпературных сверхпроводящих пластин, изготовленных из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, и ВТСП катушек, изготовленных компанией Chubu Electric из ВТСП-2 проводника производства SuperPower (рис. 10,б). Внешний диаметр обмоток 260 мм, внутренний диаметр 120 мм, рабочий ток 100 А (предельный ток 163 А), рабочая температура 50 К, что в свою очередь позволяет снизить стоимость системы охлаждения [18]. Данный КНЭ планируется использовать для выравнивания мощности, генерируемой солнечной электростанцией мегаваттного класса [17].

В России в 2015 г. в рамках реализации проекта государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Инновационная энергетика/Сверхпроводниковая индустрия (2011–2015 гг.)» был создан и испытан опытный образец КНЭ с магнитным ВТСП подвесом с запасаемой энергией более 5 МДж [19]. На рис. 11 показан созданный КНЭ с

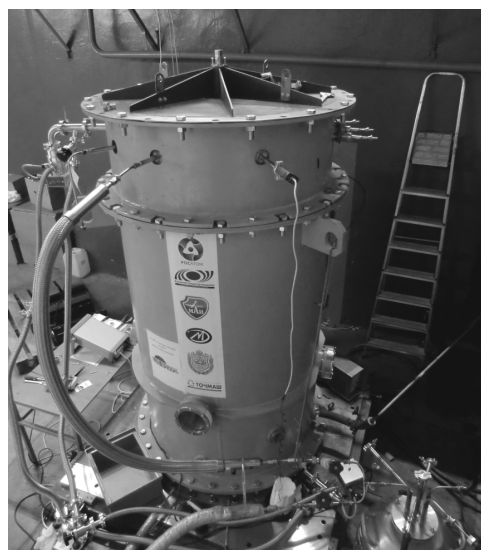


а)



б)

Рис. 10. Сверхпроводящий магнитный подшипник: а — общий вид; б — обмотка сверхпроводящего магнита



Наименование параметра	Значение
Запасаемая энергия, МДж	5,0
Выходная мощность, кВт	100
Частота питающего напряжения, Гц	300–400
Диапазон выходного напряжения, В	150–350
Частота выходного напряжения с использованием инвертора, Гц	50
Время заряда, ч	300
Время разряда, ч	50
Частота вращения, мин ⁻¹	8000

Рис. 11. Накопитель с магнитным ВТСП подвесом и его основные технические характеристики

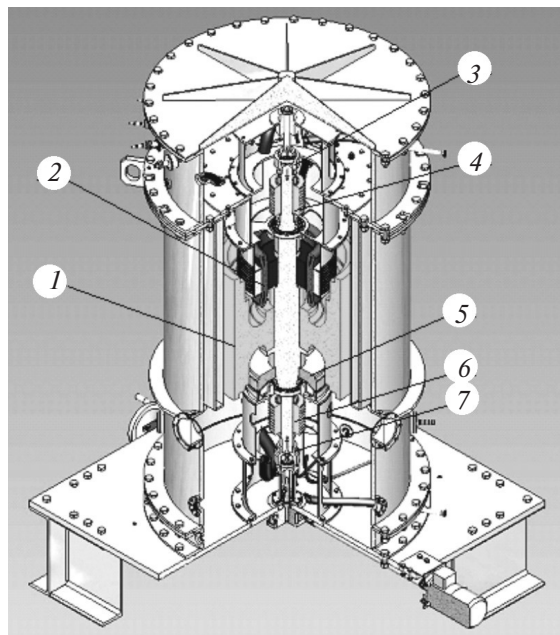


Рис. 12. Общий вид сверхпроводящего КНЭ: 1 – маховик; 2 – мотор-генератор; 3 – опора верхняя; 4 – верхний ВТСП подвес; 5 – магнитная опора; 6 – нижний ВТСП подвес; 7 – опора нижняя подвижная

магнитным ВТСП подвесом и представлены его основные технические характеристики. Работа по созданию КНЭ с магнитным ВТСП подвесом проводилась в Московском авиационном институте в кооперации с МГТУ им. Н.Э. Баумана, АО «Горизонт», АО «Научно-исследовательский институт электромеханики», АО «ВПО Точмаш» и ОАО «Центротехснаб-СПб».

Основными элементами КНЭ являются: маховик, магнитный ВТСП подвес, магнитная опора на постоянных магнитах и мотор-генератор. Общий вид КНЭ с магнитным ВТСП подвесом представлен на рис. 12.

Маховик, вал, роторы верхнего и нижнего магнитных ВТСП подвесов, ротор магнитной опоры и ротор мотор-генератора образуют единый вращающийся узел, который поддерживается системой левитации, состоящей из магнитной опоры и двух цилиндрических магнитных ВТСП подвесов, находящихся в верхней и нижней частях вала маховика. Магнитная опора удерживает маховик в осевом направлении, а магнитные ВТСП подвесы обеспечивают радиальную устойчивость и частичную компенсацию массы маховика. Вакуумирование корпуса КНЭ устраняет трение маховика о воздух. Использование магнитных ВТСП подшипников и вакуумной камеры позволяет уменьшить потери энергии.

Маховик КНЭ имеет многослойную конструкцию (диск из алюминиевого сплава Д16, труба из нержавеющей стали и бандаж из углеволокна). Такая конструкция обладает высокой надежностью и безопаснее в эксплуатации, чем сплошные метал-

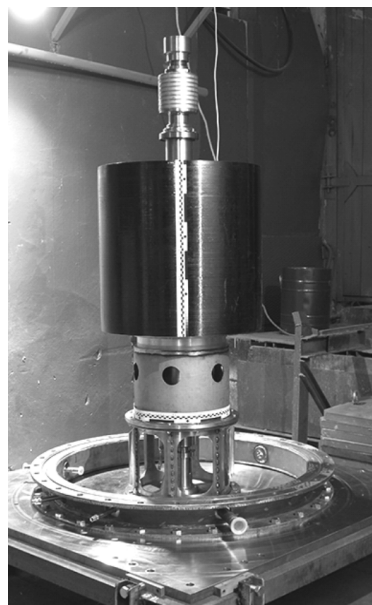


Рис. 13. Сборка КНЭ с магнитным ВТСП подвесом

лические маховики. Для совершенствования методов проектирования и технологии изготовления маховика для опытного образца КНЭ был спроектирован, изготовлен и испытан макет маховика в масштабе 1:2. На рис. 13 представлено фото маховика во время сборки КНЭ. Макет маховика и маховик опытного образца КНЭ были изготовлены в АО «ВПО Точмаш», бандаж маховика — в ОАО «Центротехснаб-СПб» по специально разработанной технологии намотки.

Магнитный ВТСП подвес конструктивно состоит из двух цилиндрических магнитных ВТСП подвесов (верхнего и нижнего) и находится внутри корпуса КНЭ. На рис. 14 и 15 представлены схема магнитного ВТСП подвеса опытного образца КНЭ и его основные узлы, разработанные и изготовленные в АО «Горизонт».

Основными элементами ВТСП подвесов являются статор и ротор. Статор (рис. 15,б) содержит блок с ВТСП элементами на основе иттриевой ке-

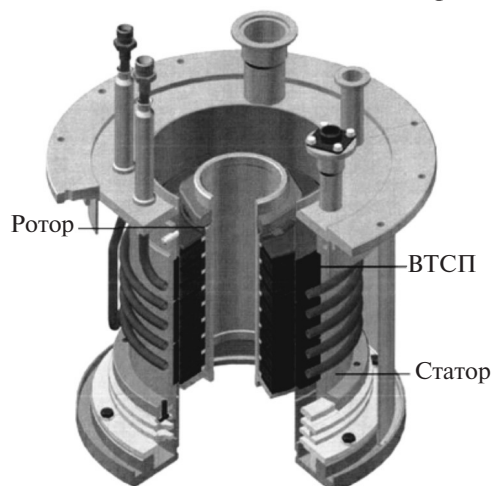


Рис. 14. Схема магнитного ВТСП подвеса

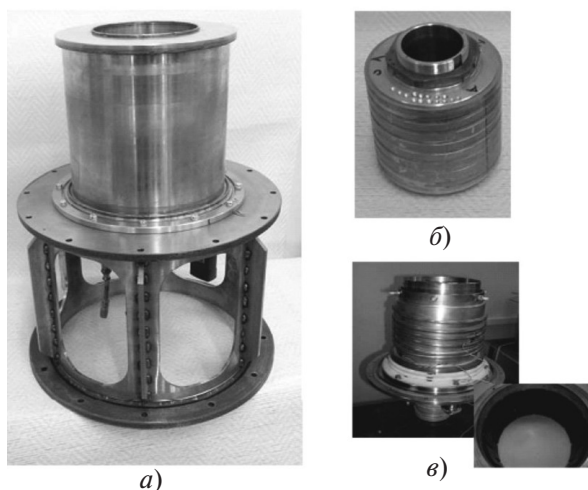


Рис. 15. Узлы магнитного ВТСП подвеса: *а* — нижний подвес на опорном переходнике; *б* — ротор; *в* — статор нижнего ВТСП подвеса без наружного кожуха с ВТСП блоком

рамики (YBCO), изготовленными по специально разработанной технологии в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Конструкции статоров верхнего и нижнего подвесов фактически унифицированы. Их основное отличие заключается в конструкции выводов криосистемы и вакуумной системы. Ротор магнитного ВТСП подвеса (рис. 15,б) состоит из последовательно расположенных вдоль оси магнитных колец на основе NdFeB, соединенных гильзой. Между магнитами — проставки (шиммы) из магнитомягкого материала, обеспечивающие формирование необходимой структуры магнитного поля в зазоре между ротором и статором.

Непрерывная эксплуатация магнитного ВТСП подвеса в составе КНЭ и поддержание температуры ВТСП элементов статора в диапазоне от 65 до 75 К обеспечивается замкнутой системой криообеспечения с использованием циркуляционного контура. На этапе отладки опытного образца КНЭ с магнитным ВТСП подвесом была использована расходная система криообеспечения.

Для удержания массы вращающегося узла КНЭ (примерно 600 кг) было принято решение добавить в силовой подвес опору на постоянных магнитах (ПМ), которая воспринимает часть массы маховика, удерживая его в осевом направлении. Была выбрана опора с применением встречно намагниченных конических кольцевых ПМ трапециевидального сечения на основе NdFeB.

В качестве мотор-генератора опытного образца КНЭ используется синхронная шестиполюсная электрическая машина с постоянными магнитами из РЗМ на основе NdFeB с радиально-тангенциальной намагниченностью и безжелезным статором мощностью 100 кВт. Параметры мотор-генератора следующие:

- мощность 100 кВт;
- напряжение питания фазное 230–380 В;

- номинальный ток 156–96 А;
- частота вращения 5000–8000 мин⁻¹;
- число фаз обмотки $m=3$;
- число полюсов $2p=6$;
- наружный диаметр пакета статора 428 мм;
- диаметр расточки статора 220 мм;
- активная длина 120 мм.

Использование синхронной электрической машины с ПМ и безжелезным статором позволило сделать конструкцию мотор-генератора КНЭ компактной (отсутствие обмоток на роторе), избежать потерь на перемагничивание в режиме хранения энергии и исключить энергозатраты на создание магнитного поля возбуждения.

Работа по созданию опытного образца КНЭ с магнитным ВТСП подвесом с запасаемой энергией свыше 5 МДж успешно завершена. Проведены экспериментальные исследования. Выбранная конструкция основных элементов КНЭ показала надежность во всем рабочем диапазоне частот вращения.

Выводы. 1. Экономический эффект от внедрения КНЭ в автономную электроэнергетическую систему достигается за счет увеличения надежности и устойчивости энергетической системы, повышения качества электроэнергии для снабжения потребителей. Кинетический накопитель энергии способствует интеграции ВИЭ в сеть с повышением доли их участия в системе генерации энергии. При работе с ДГУ минимизирует эксплуатацию ДГУ с экономией дизельного топлива и снижением выбросов CO₂.

2. Последние достижения в области технологии производства композитных материалов, их использование для изготовления маховиков позволяет сделать маховик достаточно надежным и безопасным, значительно увеличить его частоту вращения и, соответственно, энергоемкость системы накопления. С применением в конструкции КНЭ магнитных ВТСП подшипников повышается рабочий ресурс (более 20 лет) накопителя, создается возможность производства экологически чистых систем накопления энергии с длительным сроком хранения запасенной энергии.

3. Такие достоинства КНЭ, как масштабируемость и модульность, могут способствовать построению «матричных» систем накопления больших уровней запасаемой энергии и мощности как передвижного (контейнеры), так и стационарного исполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Станкевич Д.О., Николаев А.Г., Андреева Е.В., Путляева М.Н., Клепиков В.И., Шалаев А.В. Новые энергетические технологии [Электрон. ресурс] https://www.np-sr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskie_tehnologii.pdf (дата обращения 11.11.2018).

2. **Gyuk I., Eckroad S.** Handbook Supplement of Energy Storage for Grid Connected Wind Generation Applications [Электрон. ресурс] <http://www.sandia.gov/ess/publications/EPRI-DOE%20ESHB%20Wind%20Supplement.pdf> (дата обращения 11.11.2018).
3. **Шиллер М., Рублевский Е.** MicroGrid. Вызовы нового времени. — Энергия разума, 2017, № 1, с. 24–29 [Электрон. ресурс] https://www.gradientkilby.ru/o-kompanii/abb_energiya_razuma_01_2017.pdf (дата обращения 11.11.2018).
4. **Galton W.** Stabilizing and maximizing renewables using a flywheel-inverter system. RPI CFES Workshop on Microgrid Technology and Applications. ABB US, Oct. 2013 [Электрон. ресурс] [https://www.rpi.edu/dept/cfes/Workshop on Microgrid/B4 William ABB.pdf](https://www.rpi.edu/dept/cfes/Workshop%20on%20Microgrid/B4%20William%20ABB.pdf) (дата обращения 13.11.2018).
5. **Cleiton S.** Renewable microgrids Reduced LCOE and secured supply August, 2016 [Электрон. ресурс] <https://new.abb.com/distributed-energy-microgrids/our-offering/microgrid-plus-system> (дата обращения 15.11.2018).
6. **Microgrid Solutions.** Worldwide Installations. Local Grids Management Systems Workshop, October 28, 2015 [Электрон. ресурс] www.abb.com (дата обращения 17.11.2018).
7. **Amber Kinetics.** 2015 Smart Grid Demonstration Program Contract ID: DE-OE0000232 Project Type: Flywheel Energy Storage Demonstration Amber Kinetics Technical Report (Final) Revision: V1.0. December 30, 2015.
8. **Amber Kinetics, Bryan Lee B., Pina F., Ten Hope L., Oglesby R.** 2015 Low-cost flywheel energy storage demonstration Amber Kinetics Final Project Report June 2015 CEC-500-2015-089.
9. **ENEL, Viale E.** 2017 Enel signs agreement with US company Amber Kinetics on innovative flywheel storage system Press Release July 2017 (Rome).
10. **Исследование** Координационного совета по инновационным технологиям Калифорнии [Электрон. ресурс] <http://www.etcc-ca.com/reports/flywheel-energy-storage-study> (дата обращения 21.11.2018).
11. **Amber Kinetics, Stout M.** Hawaiian Electric and Amber Kinetics Begin Kinetic Energy Storage Demonstration with Support from Elemental Excelsior. News, Press Releases. Mar 12, 2018 [Электрон. ресурс] <http://amberkinetics.com/hawaiian-electric-and-amber-kinetics-begin-flywheel-energy-storage-demonstration-with-support-from-elemental-excelserener/> (дата обращения 21.11.2018).
12. **Новости** Energystorage 01.04.2016 [Электрон. ресурс] <https://www.energy-storage.news/news/flywheel-battery-hybrid-system-installed-in-ireland> (дата обращения 21.11.2018).
13. **Офф. сайт** компании «Beacon Power» http://beaconpower.com/wp-content/themes/beaconpower/inc/beacon_power_brochure_081414.pdf (дата обращения 21.11.2018).
14. **Microgrid solutions.** Integration of renewables and reliable power supply in Alaska. ARCTIC ENERGY SUMMIT, SEPTEMBER 19TH 2017, HELSINKI [Электрон. ресурс] <http://www.arcticenergysummit.com/files/velazquez-20170928032543.pdf> (дата обращения 21.11.2018).
15. **Strasik M., Hull J.R., Mittleider J.A., Gonder J.F., Johnson P.E., McCrary K.E., McIver C.R.** An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings. Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 034021 (5pp), doi:10.1088/0953-2048/23/3/034021 [Электрон. ресурс] <http://dx.doi.org/1088/0953-2048/23/3/034021> (дата обращения 21.11.2018).
16. **Frank N. Werfel, Uta Floegel-Delor, Thomas Riedel, Rolf Rothfeld, Dieter Wippich, Bernd Goebel, Gerhard Reiner, Niels Wehlau.** Towards high capacity hts flywheel system. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 4, August-2010 [Электрон. ресурс] <http://ieeesc.org/sites/ieeesc.org/files/2010.pdf> (дата обращения 21.11.2018).
17. **Furukawa Electric Co.** World's Largest Superconducting Flywheel Power Storage System Test Machine Completed and Test Operation Started. News. Release. April 15, 2015 [Электрон. ресурс] https://www.furukawa.co.jp/en/release/2015/kenkai_150415.html (дата обращения 21.11.2018).
18. **Mukoyama S., Matsuoka T., Hatakeyama H., Kasahara, H., Furukawa M., Nagashima K. et al.** 2015 Test of REBCO HTS Magnet of Magnetic Bearing for Flywheel Storage System in Solar Power System. — IEEE Transactions on Appl. Superconductivity 25(3), pp. 1–4. Doi:10.1109/tasc.2014.2363044.
19. **Полтавец В.Н., Ковалев К.Л., Колчанова И.П., Ильясов Р.И.** Кинетический накопитель энергии с запасаемой энергией 5 МДж на магнитном ВТСП подвесе: Сб. тезисов V Международ. конф. «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости», 5–9 октября 2015 г., Малаховка (Московская обл.). М.: Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, 2015, с. 240–241.

[19.03.2019]

А в т о р ы: Ковалев Константин Львович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института (НИУ «МАИ»), диссертацию защитил в 2005 г.

Полтавец Владимир Николаевич — кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» НИУ «МАИ», диссертацию защитил в 1979 г.

Колчанова Ирина Петровна — старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» НИУ «МАИ».

Self-Contained Power Systems with a Kinetic Energy Storage

KOVALEV Konstantin L. (National Research University «Moscow Aviation Institute» — NRU «MAI», Moscow, Russia) — Professor, Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

POLTAVETS Vladimir N. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Leading Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

KOLCHANOVA Irina P. (NRU «MAI», Moscow, Russia) — Senior Scientist

Dependence of renewable energy sources on the climatic conditions during a year is one of the main problems associated with their utilization, a circumstance that does not allow the amount of energy produced by them to be predicted with sufficient accuracy and entails significant fluctuations of their AC power output, voltage, and frequency. The presently available technologies do not make it possible to achieve stable operation of power systems fully based on the use of renewable energy sources. High-quality

electric power cannot be produced without parallel connection of conventional sources and energy storage systems. The article presents a review of foreign developments of kinetic energy storages used at hybrid power plants, and describes Russia's first energy storage equipped with a magnetic HTSC levitation system with the energy storage capacity more than 5 MJ.

Key words: *electric power engineering, renewable energy sources, hybrid power installations, kinetic energy storage, flywheel, HTSC levitation system*

REFERENCES

1. Stankevich D.O., Nikolaev A.G., Andreyeva Ye.V., Putlyayeva M.N., Klepikov V.I., Shalaev A.V. *Novye energeticheskiye tekhnologii*. Moscow, 2017 [Electron. Resurs] https://www.np-sr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskiye_tekhnologii.pdf (Data obrashcheniya 11.11.2018).
2. Gyuk I., Eckroad S. Handbook Supplement of Energy Storage for Grid Connected Wind Generation Applications [Electron. Resurs] <http://www.sandia.gov/ess/publications/EPRI-DOE%20ESHB%20Wind%20Supplement.pdf> (Data obrashcheniya 11.11.2018).
3. Shiller M., Rublevskiy Ye. *Vyzovy novogo vremeni. Energiya razuma*, 2017, No. 1, pp. 24–29 [Electron. Resurs] https://www.gradientkilby.ru/o-kompanii/abb_energiya_razuma_01_2017.pdf (Data obrashcheniya 11.11.2018).
4. Galton W. Stabilizing and maximizing renewables using a flywheel-inverter system. RPI CFES Workshop on Microgrid Technology and Applications. ABB US, Oct. 2013 [Electron. Resurs] [https://www.rpi.edu/dept/cfes/Workshop on Microgrid/B4 William ABB.pdf](https://www.rpi.edu/dept/cfes/Workshop%20on%20Microgrid/B4%20William%20ABB.pdf) (Data obrashcheniya 13.11.2018).
5. Cleiton S. Renewable microgrids Reduced LCOE and secured supply August, 2016 [Electron. Resurs] <http://new.abb.com/distributed-energy-microgrids/our-offering/microgrid-plus-system> (Data obrashcheniya 15.11.2018).
6. Microgrid Solutions. Worldwide Installations. Local Grids Management Systems Workshop, October 28, 2015 [Electron. Resurs] www.abb.com (Data obrashcheniya 17.11.2018).
7. Amber Kinetics. 2015 Smart Grid Demonstration Program Contract ID: DE-OE0000232 Project Type: Flywheel Energy Storage Demonstration Amber Kinetics Technical Report (Final) Revision: V1.0. December 30, 2015.
8. Amber Kinetics, Bryan Lee B., Pina F., Ten Hope L., Oglesby R. 2015 Low-cost flywheel energy storage demonstration Amber Kinetics Final Project Report June 2015 CEC-500-2015-089.
9. ENEL, Viale E. 2017 Enel signs agreement with US company Amber Kinetics on innovative flywheel storage system Press Release July 2017 (Rome).
10. Issledovaniye Koordinatsionnogo soveta po innovatsionnym tekhnologiyam Kalifornii (Research Coordination Council on Innovation Technologies California) [Electron. Resurs] <http://www.etcc-ca.com/reports/flywheel-energy-storage-study> (Data obrashcheniya 21.11.2018).
11. Amber Kinetics. Stout M. Hawaiian Electric and Amber Kinetics Begin Kinetic Energy Storage Demonstration with Support from Elemental Excelerator. News, Press Releases. Mar 12, 2018: [Electron. Resurs] <http://amberkinetics.com/hawaiian-electric-and-amber-kinetics-begin-flywheel-energy-storage-demonstration-with-support-from-elemental-excelerator/> (Data obrashcheniya 21.11.2018).
12. Novosti Energystorage 01.04.2016 [Electron. Resurs] <https://www.energy-storage.news/news/flywheel-battery-hybrid-system-installed-in-ireland> (Data obrashcheniya 21/11/2018).
13. Ofits. Sayt Company «Beacon Power» http://beaconpower.com/wp-content/themes/beaconpower/inc/beacon_power_brochure_081414.pdf (Data obrashcheniya 21.11.2018).
14. Microgrid solutions. Integration of renewables and reliable power supply in Alaska. ARCTIC ENERGY SUMMIT, SEPTEMBER 19TH 2017, HELSINKI [Electron. Resurs] <http://www.arcticenergysummit.com/files/velazquez-20170928032543.pdf> (Data obrashcheniya 21.11.2018).
15. Strasik M, Hull J.R., Mittleider J.A, Gonder J.F, Johnson P.E, McCrary K.E., McIver C.R. An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings. *Supercond. Sci. Technol.* 23 (2010) 034021 (5pp), doi:10.1088/0953-2048/23/3/034021 [Electron. Resurs] <http://dx.doi.org/1088/0953-2048/23/3/034021> (Data obrashcheniya 21.11.2018).
16. Frank N. Werfel, Uta Floegel-Delor, Thomas Riedel, Rolf Rothfeld, Dieter Wippich, Bernd Goebel, Gerhard Reiner, Niels Wehlau: Towards high capacity hts flywheel system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 20, No. 4, August-2010 [Electron. Resurs] <http://ieeesc.org/sites/ieeesc.org/files/2010.pdf> (Data obrashcheniya 21.11.2018).
17. Furukawa Electric Co. World's Largest Superconducting Flywheel Power Storage System Test Machine Completed and Test Operation Started. News. Release. April 15, 2015 [Electron. Resurs] https://www.furukawa.co.jp/en/release/2015/kenkai_150415.html (Data obrashcheniya 21.11.2018).
18. Mukoyama S., Matsuoka T., Hatakeyama H., Kasahara, H., Furukawa M., Nagashima K. at al. 2015 Test of REBCO HTS Magnet of Magnetic Bearing for Flywheel Storage System in Solar Power System. — *IEEE Transactions on Appl. Superconductivity* 25(3), pp 1–4. Doi:10.1109/tasc.2014.2363044.
19. Poltavets V.N., Kovalev K.L., Kolchanova I.P., Il'yasov R.I. *Kineticheskiy nakopitel' energii s zapasaemoy energiyey 5 MDh na magnitnom VTSP podvese. Sb. tezisov V Mezhdunarod. konf. «Fundamental'nye problemy vysokotemperaturnoy sverkhprovodimosti»* (Kinetic energy storage with stored energy of 5 MJ on a magnetic HTSC suspension: Sat. Abstracts V International. conf. «The fundamental problems of high-temperature superconductivity»), 5 – 9 October 2015, Malakhovka (Moscow obl.). Moscow, RAN, Physical Institute named P.N. Lebedev, 2015, pp. 240–241.

[19.03.2019]