

КИНЕТИЧЕСКИЕ НАКОПИТЕЛИ: МИРОВЫЕ ТРЕНДЫ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВТСП-ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

С.Г. Казанцев

Приведён краткий обзор отечественных и зарубежных разработок перспективных систем, предназначенных для накопления, хранения и отдачи электроэнергии. Представлен сравнительный анализ основных технических параметров электромеханических преобразователей, позволяющих хранить электрическую энергию путём преобразования её в кинетическую энергию вращающегося маховика, с альтернативными разработками. Показаны области их применения: в качестве резервных и аварийных источников питания, использования для улучшения показателей энергосистем при кратковременном включении потребителей большой мощности (компенсации пиковых нагрузок) и повышения устойчивости работы энергоустановок и систем электроснабжения, а также в качестве рекуператоров энергии между генерирующими установками и потребителями, работающими в нестационарных режимах.

Ключевые слова: энергосети, энергосистема, удельная энергоёмкость, кинетический накопитель, маховик, углеродное волокно, магнитный подвес, высокотемпературный сверхпроводник, мотор-генератор, синхронная электрическая машина, постоянный магнит на основе редкоземельных элементов.

Ключевые тренды в мировой энергетике, такие, как развитие возобновляемых источников энергии, создание интеллектуальных систем с активно-адаптивной сетью и т. д., обусловленные развитием прикладных технологий производства и доставки электроэнергии (рис. 1), в конечном итоге должны все более полно отвечать ожиданиям потребителей в повышении надёжности и качества электроснабжения [1 – 3].

В современной энергосети нередко возникают неисправности, причиной которых могут быть аварии в энергосистеме, неисправная работа вспомогательного оборудования, перегрузки и т. п. Материальный ущерб из-за перерыва в энергоснабжении для различных потребителей зависит от рода их деятельности и размеров производства и может достигать многих миллионов долларов США, а для некоторых предприятий непрерывного цикла, например, атомной энергетике или химической про-

мышленности, перерыв в энергопитании в течение нескольких минут может привести к катастрофическим последствиям [1 – 11]. Например, одним из решающих факторов развития аварии на АЭС «Фукусима-1» (Япония, 2011 г.) стала низкая надёжность аварийного энергоснабжения ответственных систем атомных энергоблоков.

В связи с этим актуальными остаются вопросы обеспечения бесперебойного питания ответственных потребителей электроэнергии, выравнивания графиков нагрузки в сети путём компенсации пиков энергетических нагрузок в крупных энергосистемах, сглаживания колебаний мощности, стабилизации малоинерционных систем распределенной генерации, а также ряд других, связанных с необходимостью дальнейшего повышения энергоэффективности [2 – 5, 10, 11].

Одним из путей повышения эффективности использования электрической энергии является при-



Рис. 1. Ключевые тенденции развития мировой энергетики

менение систем, аккумулирующих энергию генератора и выдающих её в сеть по мере необходимости. Разработанные к настоящему времени системы накопителей энергии способны решать различные задачи хранения и преобразования энергии, реализации оптимальных режимов работы оборудования, питания потребителей с нестандартными параметрами. Кроме того, накопители электрической энергии рассматриваются как важнейший элемент перспективных интеллектуальных активно-адаптивных сетей нового поколения [3 – 32].

Существует несколько видов классификации накопителей, однако наиболее удобным для практического сравнения представляется условное разделение их на электрохимические и физические.

К числу первых относятся накопители, преобразующие электроэнергию в химическую энергию веществ – аккумуляторные батареи (АКБ) и молекулярные конденсаторы (суперконденсаторы, ионисторы).

Ко вторым – гравитационные (гидроаккумулирующие электростанции – ГАЭС), электромеханические преобразователи энергии, работающие совместно с инерционными механическими накопителями (кинетические накопители энергии – КНЭ), накопители сжатого воздуха (НСВ) и сверхпроводниковые индукционные накопители энергии (СПИН).

Основные параметры, область применения и примеры практического использования разработанных к настоящему времени накопителей представлены в табл. 1 и 2.

Данные, представленные в табл. 1, позволяют сделать вывод о наличии у большинства электрохимических накопителей общих существенных недостатков, среди которых, прежде всего:

- высокая удельная стоимость строительства и эксплуатации систем на их основе;
- ограниченный цикл заряда/разряда и необходимость соблюдения регламента зарядки/разрядки (кроме суперконденсаторов);
- необходимость регулярного обслуживания и проверки систем;
- невозможность реагировать на короткие всплески потребления (кроме суперконденсаторов);
- специальные экологические требования к их эксплуатации и утилизации.

Как следует из сравнения данных, представленных в табл. 1 и 2, одним из наиболее перспективных типов накопителей энергии для маломасштабных систем накопления энергии являются КНЭ.

По величинам удельной энергии и удельной мощности, разработанные к настоящему времени КНЭ занимают промежуточное положение среди таких

типов накопителей энергии, как химические и СПИН (рис. 2). Удельная запасаемая энергия КНЭ сопоставима с традиционными кислотными аккумуляторными батареями, а удельная мощность выше. Несколько большую удельную мощность позволяют отдавать СПИН особенно с ВТСП обмотками, поэтому можно считать, что по удельным характеристикам КНЭ занимают промежуточное положение среди наиболее перспективных накопителей энергии.

Среди достоинств КНЭ можно выделить следующие: компактность, экологическая чистота, высокий коэффициент полезного действия (86 – 88%), неограниченный ресурс работы, срок эксплуатации свыше 10 лет, простота эксплуатации и обслуживания, меньшие затраты на стоимость системы охлаждения (~100 раз) по сравнению со СПИН, высокая энергоёмкость [1, 58, 62, 63, 66, 69]. Кроме того, теоретически маховик из высококачественных углеродных нановолокон (однослойных графеновых трубок) способен обеспечить высочайшую удельную массовую энергоёмкость – 53,4 кВт·ч/кг.

Кроме того, КНЭ обладает свойством практически мгновенного «подхватывания» провалов или перерывов в энергоснабжении потребителя, что недостижимо для источников бесперебойного питания, созданных, например, на базе химических аккумуляторов, имеющих большую инерционность включения и выхода на базовый режим работы. Это свойство КНЭ даёт необходимое время для запуска дизель-генераторной установки в случае аварийной ситуации, которой требуется время порядка десятков секунд, а иногда и минут.

Возможные области применения накопителей на объектах электроэнергетики РФ (рис. 3) [3, 10, 28 – 30, 58]:

- снятие перегрузок ЛЭП и АТ в режимах наибольших нагрузок электропередачи, повышение статической и динамической устойчивости, аварийный резерв (ЕЭС/ЕНЭС);
- совместно или вместо мобильных газотурбинных электростанций;
- совместно или вместо дизель-генераторных установок;
- на объектах нефтегазовой и химической промышленности;
- в регионах России, в которых отсутствует централизованное электроснабжение;
- для собственных нужд электростанций и подстанций (резервирование, бесперебойное питание ответственных систем энергоблоков и т. п.);
- на объектах с возобновляемыми источниками энергии.

**Основные параметры электрохимических накопителей
для средних и маломасштабных систем накопления электроэнергии [14 – 57]**

Параметры	Аккумуляторы				Супер-конденсаторы
	Свинцово-кислотный	Никель-кадмиевый	Натрий-серный	Литий-ионный	
Принцип действия	Химический источник с жидким электролитом и активным веществом положительных пластин – двуокисью свинца PbO ₂ , отрицательных пластин – губчатого свинца Pb	Формирование в щелочной среде гидроокиси кадмия Cd(OH) ₂ на аноде и гидроокиси никеля Ni(OH) ₂ – на катоде	Химический источник тока, использующий натрий и серу в жидком состоянии как анод и катод, с керамическим электролитом	Перенос заряда без участия жидкого электролита положительно заряженным ионом лития, который имеет способность внедряться в кристаллическую решётку других материалов с образованием химической связи: в графит с образованием LiC ₆ , оксиды – LiMnO ₂ , соли металлов – LiMnRON	Импульсное электрохимическое устройство, процесс запасаения энергии в котором осуществляется за счёт разделения заряда на двух электродах
Удельная мощность, Вт/кг	80 – 200	150 – 500	50 – 150	50 – 180 (500*)	2 000 – 10 000
Удельная массовая энергоёмкость, Вт·ч/кг (МДж/кг)	10 – 30 (0,04 – 0,1)	45 – 65 (0,16 – 0,25)	100 – 200 (0,36 – 0,72)	100 – 250 (0,36 – 1)	1 – 30 (0,004 – 0,01)
Удельная объёмная энергоёмкость, Вт·ч/куб. дм (МДж/куб. дм)	30 – 150 (0,1 – 0,5)	50 – 150 (0,2 – 0,5)	100 – 300 (0,3 – 1)	250 – 400 (1 – 1,5)	15–45 (0,05 – 0,15)
Удельная стоимость строительства, долл. США за 1 кВт·ч	2 000 – 3 500	500 – 1 500	2 500	2 000 – 4 000	1 450
Удельная стоимость обслуживания, долл. США за 1 кВт в год	600 – 800	~1 000	600	200 – 500	50 – 100

Достоинства	Широкое использование, отработанная технология производства и эксплуатации. Дешевизна производства. Высокий КПД, высокая мощность. Длительный срок хранения	Более высокие параметры, чем у свинцово-кислотных АКБ. Теоретическая массовая энергоёмкость – 237 Вт·ч/кг	Число циклов заряд/разряд 2000 – 4000 при глубине разряда до 80–90 %. Высокое значение теоретической массовой энергоёмкости (925 Вт·ч/кг). Отсутствие дорогостоящих материалов. Новое поколение электрохимического способа накопления энергии	Высокая энергоёмкость. Низкий саморазряд. Глубокие циклы заряд / разряд (70 – 80%). Отсутствие эффекта памяти	Высокая удельная мощность. Высокий КПД (>95%). Быстрая разрядка. Высокий ресурс (более 100 000 циклов заряд/разряд)
Недостатки	Малая энергоёмкость. Малое количество циклов заряд/разряд (100 – 500). Низкая допустимая глубина разряда. Применение токсичных материалов. Высокие капитальные и операционные затраты, связанные с хранением, утилизацией и системой доставки электролита	Эффект памяти – падение энергоёмкости при не полном разряде или заряде. Критичность к точному соблюдению требований по правильной эксплуатации. Применение токсичных материалов, высокая стоимость утилизации	Высокая рабочая температура аккумулятора (290 – 360 °С). Малый срок хранения запасаемой энергии. Низкая удельная мощность	Высокая вероятность короткого замыкания и взрыва литий-ионных аккумуляторов большого размера. Резкая зависимость ресурса и стоимости от типа электрохимических систем, применяемых на катоде и аноде, а также от температуры и режимов эксплуатации. Необходима схема балансировки ячеек для многобаночных аккумуляторов	Малая энергоёмкость. Значительное влияние типа материала на электрофизические характеристики используемых электродов
Область применения	Обеспечение эффективного управления энергией, накопление энергии для средних энергосистем. Создание резервного запаса энергии в электросетях (в основном для ветряных и солнечных электростанций)			Стабилизация работы генераторов. Компенсация провалов и колебаний напряжения (0,1 – 1 Гц). Использование в гибридных схемах с АКБ	

<p>Примеры реализованных проектов</p>	<p>BEWAG, электроснабжение Зап. Берлина (Германия, 1990 г.): мощность 8,5 МВт, время работы 20 мин.</p>	<p>GVEA, обеспечение бесперебойного электро-снабжения прибрежных районов Аляски вблизи г. Анкоридж (США, 2003г.): мощность 40 МВт, время работы 15 мин.</p>	<p>Ветряная станция Rokkacho, (Япония, 2008 г.). Всего внедрено около 100 объектов. Мощность 34 МВт, время работы 600 мин.</p>	<p>Буферный накопитель ветровой энергоустановки компании Altair-Nano (Гавайи, США): Мощность 1 МВт, ёмкость 250 кВт·ч</p>	<p>Использование в гибридных схемах для увеличения ресурса АКБ и снижения времени отклика системы, в электротранспортных средствах и гибридных автомобилях (США, Япония, Корея, Франция, Германия, Австралия)</p>
	<p>Резервирование и поддержание частоты мало-мощной сети Пуэрто-Рико (1998 г.): мощность 20 МВт, время работы 15 мин.</p>	<p>ПС Detroit Edison Site, (Мичиган, США, 2001 г.), для поддержания напряжения и собственных нужд, АКБ цинк-бром: мощность 0,4 МВт, время работы 480 мин.</p>	<p>Накопители подстанций электросети General Electric и NGK Insulators (США, Япония): мощность 34 МВт</p>		
	<p>Чинно (Калифорния, США, 1986 г.), различные объекты для исследования возможностей регулирования нагрузки, частоты, напряжения и реактивной мощности: мощность 10 МВт, время работы 240 мин</p>	<p>Один из крупных высокотехнологичных заводов в Японии (2001 г.), выравнивание графика нагрузок, АКБ Ванадиумредоксный: мощность 1,5 МВт, время работы 60 мин</p>			

Основные параметры физических накопителей [1, 3, 28 – 30, 32, 58 – 69]

Параметры	Крупномасштабные станции		Маломасштабные системы накопления энергии	
	ГАЭС	НСВ	КНЭ	СПИН
Принцип действия	Электростанции, работающие на принципе превращения электрической энергии в потенциальную энергию воды	Электростанции, работающие на принципе закачивания сжатого воздуха в специальные хранилища (Compressed Air Energy Storage – CAES)	Приборы, работающие на принципе электро-механического накопления энергии	Приборы, работающие на принципе накопления электромагнитной энергии сверхпроводниковым индукционным накопителем
Удельная мощность (Вт/кг)	–	–	500 – 10 000	3 000 – 50 000
Удельная массовая энергоёмкость, Вт·ч/кг (МДж/кг)	–	–	15 – 300 (0,05 – 1)	1 – 30 (0,036 – 0,1)
Удельная объёмная энергоёмкость, Вт·ч/куб.дм (МДж/куб. дм)	–	–	60 – 550 (0,2 – 2)	1 000 – 10 000 (3,6 – 36)
Удельная стоимость строительства, долл. США за 1 кВт·ч	Более 2 000	2 000 – 10 000	800 – 1 200	–
Удельная стоимость обслуживания, долл. США за 1 кВт в год	80 – 200	500	50 – 80	–
Достоинства	Высокая маневренность гидроэнергетического оборудования: число пусков обратимых гидроагрегатов, достигает 500 – 700 в месяц (возможно до 30 пусков в сутки). Значительная величина маневренной регулирующей мощности (сотни – тысячи МВт)	Экологическая чистота	Высокий КПД (95 %). Быстрая разрядка. Экологическая безопасность	Высокий КПД (98%). Быстрая разрядка. Длительный период использования. Высокое значение запасаемой энергии – до 100 МДж
Недостатки	Малая удельная энергоёмкость. Низкий КПД. Высокие требования к месту установки, необходимость существенного вмешательства в экологию района. Высокая удельная стоимость строительства	Необходимость утилизации тепла, выделяемого при сжатии воздуха, и подогрева закачанного воздуха при его адиабатическом расширении, что снижает эффективность системы в целом	Ограничения при увеличении мощности. Ограничения в применении для стабилизации напряжения	Необходимость использования низкотемпературных сверхпроводников и охлаждающего оборудования (криогенная система)

Область применения	Обеспечение эффективного управления энергией. Стабилизация частоты. Создание резервного запаса энергии в электросетях		Обеспечение качества электроэнергии. Аварийное электропитание	Обеспечение бесперебойного питания в электросетях и различных учреждениях. Стабилизация работы генераторов. Компенсация провалов и колебаний напряжения (0,1 – 1 Гц)
Примеры реализованных проектов	<p>Строительство осуществляется более 100 лет.</p> <p>Первая ГАЭС – Леттем (Швейцария, 1882 г.), мощность 100 кВт. В настоящее время в мире насчитывается около 500 ГАЭС, их суммарная мощность более 300 000 МВт. В России:</p> <p>Загорская ГАЭС (1-я очередь 1980 – 2003 г., 2-я очередь с 2007 г.), автоматическое регулирование частоты и перетоков мощности, покрытие суточных пиковых нагрузок в Московской и Центральной энергосистемах. Мощность 1-й очереди 1200 МВт, 2-й – 840 МВт</p> <p>Ставропольская ГАЭС на трассе Большого Ставропольского канала</p>	<p>Хранилища типа CAES: Ханторф (Германия) и Макинтош (США). Их предельная мощность составляет 290 МВт и 226 МВт соответственно</p> <p>Тестируемая подводная установка Underwater-CAES (Торонто, Канада): пиковая мощность наземной станции 660 КВт</p>	Широкое использование в составе стационарных и мобильных систем во многих технически развитых странах	<p>Babcock&Wilcox и Анкориджской энергокомпании Municipal Light and Power (США): энергоёмкость 1800 МДж, максимальная выдаваемая мощность 40 МВт</p> <p>Подстанция Такома (Лос-Аламосская лаборатория, США, 1983 г.): энергоёмкость 30 МДж, максимальная выдаваемая мощность 10 МВт</p> <p>Мюнхенский технический университет (Германия, 1992 г.): пилотный проект СПИН, энергоёмкость 1,4 МДж</p> <p>АМАС 500 (Испания, 1993 г.): энергоёмкость 1 МДж, максимальная выдаваемая мощность 500 кВт</p>

В мировой практике данные системы предназначены, прежде всего, для рекуперации энергии и работы в локальных энергосистемах с резко неравномерным графиком нагрузки. Однако подобные системы также рассматриваются Министерством обороны США, NASA [70, 71], частными коммерческими организациями [72, 73] и в качестве альтернативы вторичным химическим источникам тока для применения на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) и пилотируемых космических аппаратах (КА), как системы электроснабжения с повышенным ресурсом. Маховики, помимо своей основной функции, также могут выступать в качестве силовых гироскопов (гиродинов) систем управления КА.

За рубежом КНЭ для использования в энергосистемах разрабатываются, испытываются и успешно эксплуатируются в течение десятков лет: около 500 накопителей установлены в автобусах Лондона (экономия топлива превышает 20 %), более 400 крупных маховиков по всему миру работают в энергетических сетях, выполняя задачи регулирования частоты, и многие тысячи задействованы в комплексных системах питания ответственного оборудования. Ниже приводится описание некоторых практических разработок КНЭ, опубликованных в источниках [1 – 3, 6 – 9, 14 – 30, 58, 60].

Компанией Boeing (США) в 2001 – 2003 гг. изготовлены и испытаны два прототипа КНЭ на 3 кВт/10 кВт·ч и на 100 кВт/5 кВт·ч (электрическая мощность/ запасае-

мая энергия, соответственно). В 2006 г. проведены испытания КНЭ максимальной емкостью 125 МДж (35 кВт·ч), а в 2010 г. компания представила в качестве готового к заказу прототип КНЭ с запасаемой энергией 18 МДж (5 кВт·ч) и электрической мощностью 3 кВт (рис. 4).

Добиваясь всё более высоких показателей удельной энергоёмкости, инженеры компании Boeing в 2012 г. достигли величины линейной скорости обода супермаховика ~800 м/с. Наилучший показатель на тот момент для малых тестовых систем составлял 1405 м/с. Кинетическая энергия вращающегося маховика пропорциональна его массе и квадрату скорости вращения, поэтому при разработке маховичных накопителей стараются добиваться как можно больших оборотов.

Не менее важный результат разработок конструкций КНЭ заключается в том, что с помощью сверхпроводящих электромагнитов инженеры компании смогли замедлить «саморазряд» накопителя до скорости, характерной для электрохимических систем.

В дальнейших планах компании Boeing – предлагать энергокомпаниям контейнерные системы ёмкостью 2 МВт·ч (7,2 ГДж), составленные из линейки малых маховиков по 100 кВт·ч (360 МДж) каждый. Ожидается, что удельная стоимость серийно производимых накопителей для энергетических предприятий будет составлять около 100 долл. США за 1 кВт·ч ёмкости.



Рис. 2. Сопоставление накопителей энергии по удельным характеристикам

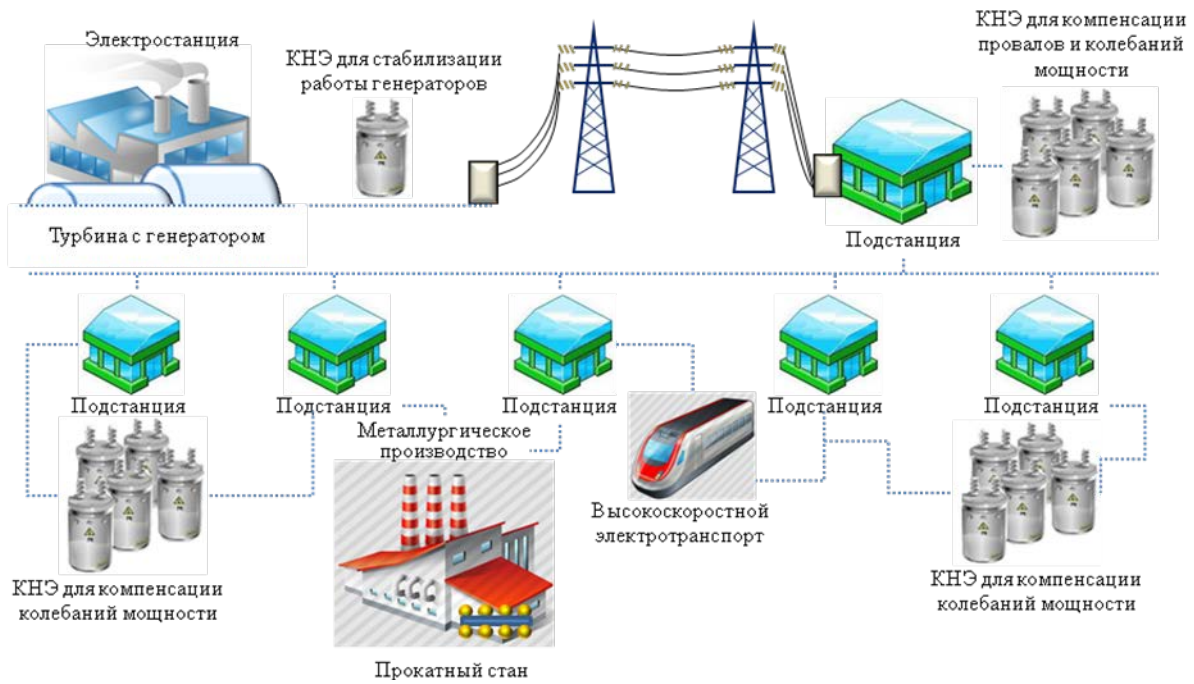


Рис. 3. Области применения КНЭ в электрических сетях

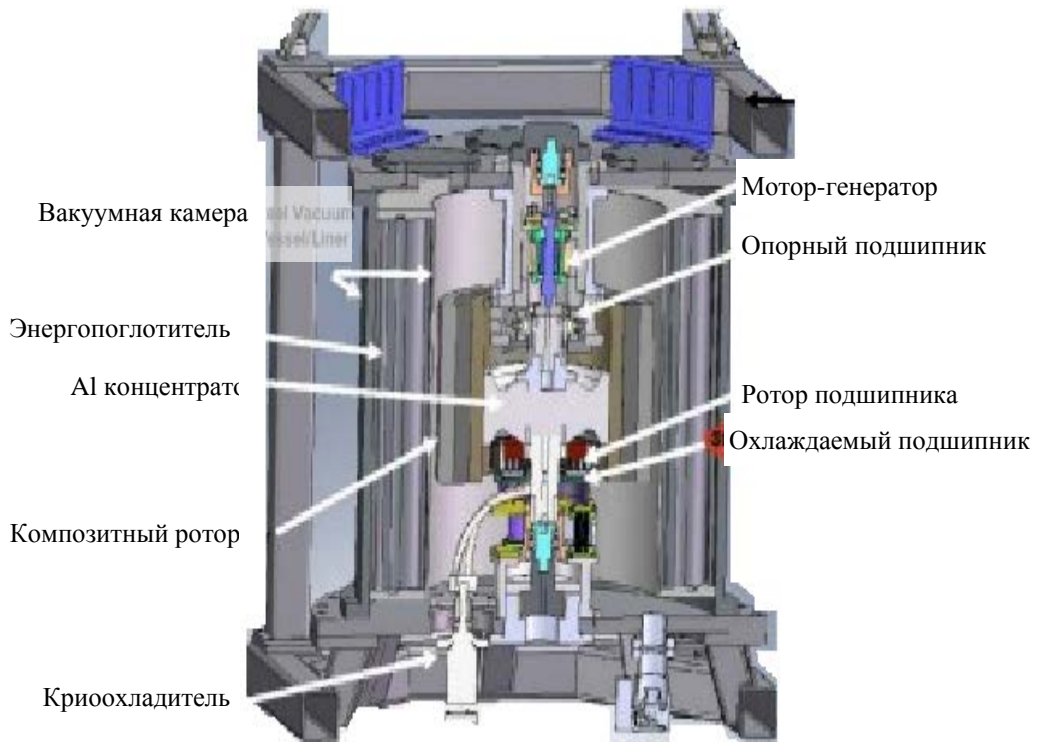


Рис. 4. КНЭ с уровнем запасаемой энергии 18 МДж (Boeing, США)

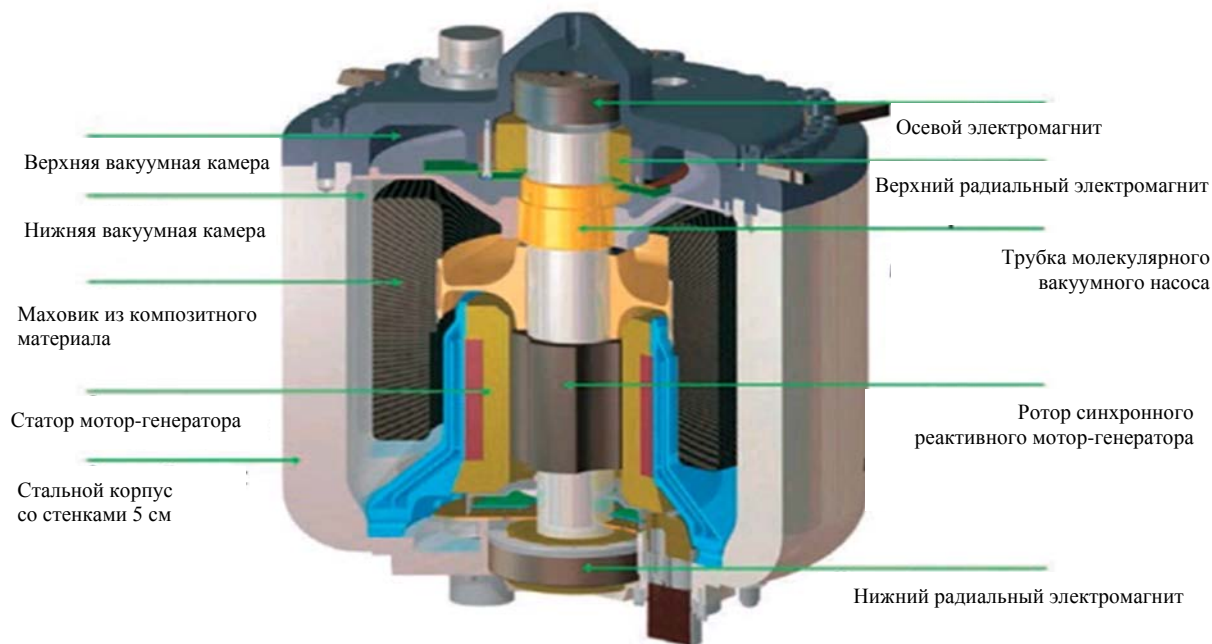


Рис. 5. Конструкция КНЭ компании POWERTHRU (США)



Рис. 6. Единичный образец и макет кластера КНЭ (Beacon Power, США)

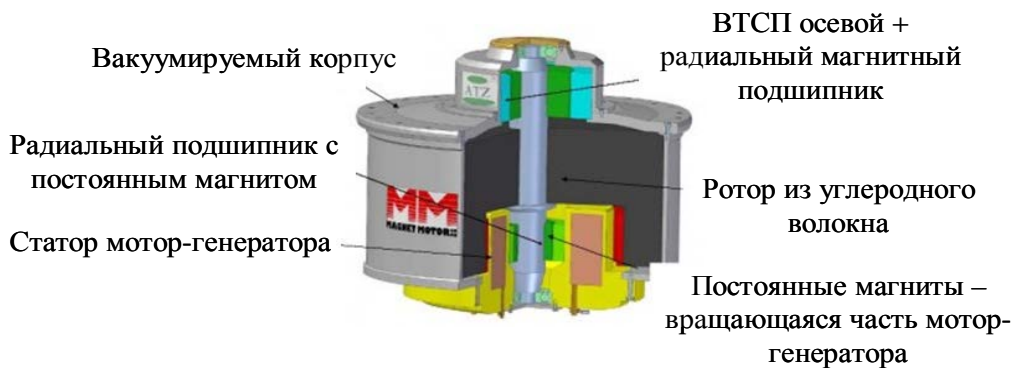


Рис. 7. Компактный КНЭ 20 МДж, 250 кВт (ATZ, Германия)

Ряд интересных технологических решений предложила другая американская компания – POWERTHRU (штат Мичиган). В частности, использовать вакуумный насос в качестве составной части системы. Компания использует для этого патентованный молекулярный насос с геликоидом (тонкой спиральной канавкой), находящимся непосредственно на валу маховика внутри его корпуса. В конструкции POWERTHRU (рис. 5) сам маховик и мотор-генератор заключены в общий вакуумированный корпус, при этом электрическая машина компактно поместилась внутри кольца маховика. Маховик из композитного материала, на основе углеродных волокон, вращается со скоростью от 30 до 53 тыс. об/мин.

Один модуль системы POWERTHRU имеет сравнительно небольшую ёмкость – 528 Вт·ч (при номинальной мощности 190 кВт она расходуется за 10 с), но ёмкость может быть увеличена параллельным соединением модулей.

Компания Beason Power (США), серийно выпускает стационарные накопители максимальной ёмкостью 6 и 25 кВт·ч (21,6 и 90 МДж), кластеры из которых предполагается использовать для целей регулирования частоты тока в электросетях США. Модель такого кластера представлена на рис. 6.

В Германии компанией ATZ разработан КНЭ с запасаемой энергией 20 МДж (5,5 кВт·ч) и мощностью 250 кВт. Диаметр накопителя 1,5 м, снабжён вращающимся маховиком из углеродного волокна, оснащён магнитным подвесом на основе ВТСП керамики и системой синхронизации с сетью, электрическая машина для обеспечения заряда и разряда накопителя интегрирована в конструкцию устройства и в целях снижения потерь сделана на основе постоянных магнитов (рис. 7).

В Японии разработкой КНЭ занимается ряд фирм: Chubu Electric Power Company и Mitsubishi Heavy Industries провели испытания модели КНЭ ёмкостью 1 кВт·ч (3,6 МДж).

В 2015 г. в Японии был создан маховичный накопитель мощностью 300 кВт способный запасать ~100 кВт·ч (360 МДж) электроэнергии. Диаметр маховика 2 м, масса – 4 т, скорость вращения порядка 6000 об/мин. Особенность конструкции – несущий подшипник включает две обмотки из ВТСП второго поколения (ВТСП-2), накопительный элемент собран из девяти колец толщиной 10 см, у которых внутренний диаметр равен 1,4 м, внешний – 2 м. Подобная конструкция позволяет регулировать ёмкость, меняя число колец. В кольцах намотаны нити, особым образом сплетённые из углеродных волокон. Сверхпроводящие магниты из лент ВТСП-2 на основе иттрия работают при температуре – 223 °С.

В настоящий момент данная система проходит испытания на фотоэлектрической солнечной станции мощностью 10 МВт в японском местечке Кокекураяма (префектура Яманаси).

В Корею компаниями Korea Electric Power Rasearch Institute и Korea Electric Power Corporation разработаны маховичные системы вертикального и горизонтального исполнения ёмкостью 0,3 кВт·ч (~1 МДж).

В России наиболее значительных результатов добилась кооперация научных коллективов из ряда ВУЗов и промышленных предприятий: МАИ, МГТУ им. Баумана, АО «ТВЭЛ», ЗАО «ЦентротехСПб», АО «ВПО «Точмаш», АО «НИИЭМ» и др. В период 2006 – 2016 гг. были разработаны и созданы КНЭ с величиной накапливаемой энергии 0,5 и 5 МДж.

Внешний вид и конструкция КНЭ с величиной накапливаемой энергии 0,5 МДж приведены на рис. 8 и 9, а основные параметры – в табл. 3 [1]. Внешний вид и конструкция КНЭ с величиной накапливаемой энергии 5 МДж приведены на рис. 10 и 11 соответственно [1].

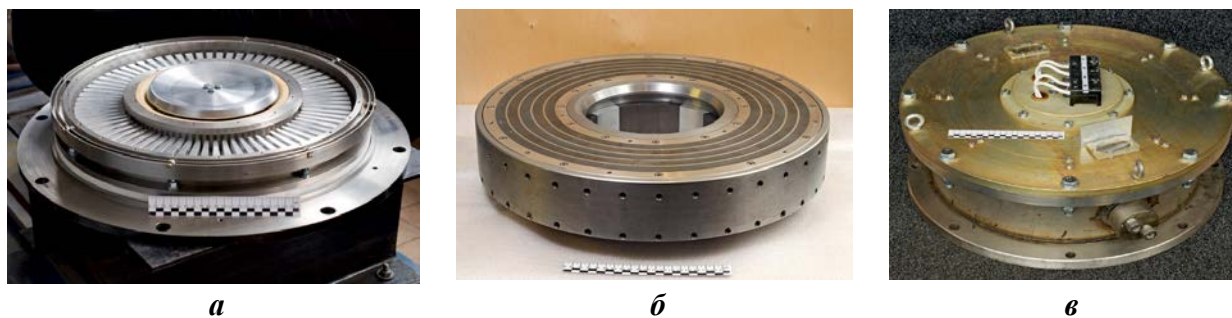


Рис. 8. Внешний вид КНЭ и основных его узлов с величиной накапливаемой энергии 0,5 МДж: криостат (а); маховик с постоянными магнитами (б); кинетический накопитель в сборе (в)

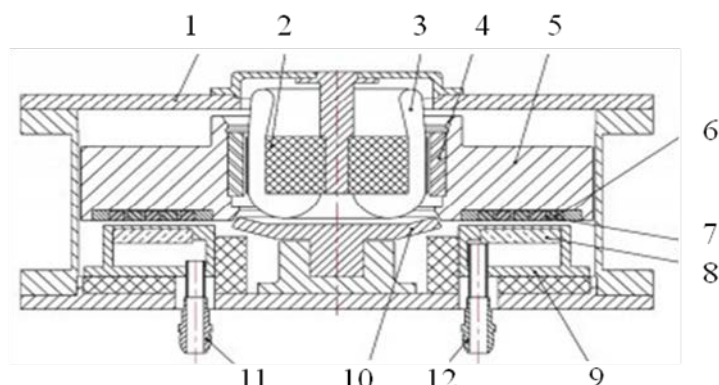


Рис. 9. Конструкция КНЭ с величиной накапливаемой энергии 0,5 МДж: 1 – корпус; 2 – сердечник статора мотор-генератора; 3 – многополюсная обмотка; 4 – полюса ротора из постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов; 5 – маховик; 6 – постоянные магниты; 7 – проставки из немагнитного материала; 8 – кольцевой блочный массив из ВТСП – 2 керамики; 9 – криостат; 10 – опора; 11 – ввод жидкого азота; 12 – вывод газообразного азота

Таблица 3

Параметры КНЭ с величиной накапливаемой энергии 0,5 МДж

Параметр	Величина
Накопитель	
Максимальный уровень запасаемой энергии, не менее	0,5 МДж
Номинальный уровень отбираемой энергии	0,25 МДж
Время заряда (время разгона маховика)	300 с
Время разряда (время питания нагрузки) при мощности 10 кВт	25 с
Время разряда при мощности 1 кВт	250 с
Максимальная мощность накопителя, отдаваемая за время разряда	10 кВт
Уровень выходного напряжения	220 – 240 В
Частота выходного напряжения	50 Гц
Маховик	
Частота вращения маховика	4000 – 6000 мин ⁻¹
Момент инерции	~ 3,55 кг·м ²
Масса	~ 100 кг
Мотор-генератор	
Максимальная мощность	11 кВт
Напряжение питания	160 – 240 В
Количество фаз	3
Частота тока	200 Гц
Число пар полюсов	2
КПД	90 – 99%
Коэффициент мощности (cos φ)	> 0,9

Таблица 4

Основные параметры КНЭ с величиной накапливаемой энергии 5 МДж

Параметр	Величина
Уровень запасаемой энергии, не менее	5 МДж
Максимальная мощность мотор-генератора	до 100 кВт
Время заряда	до 300 с
Напряжение питания (без использования инвертора на выходе)	от 150 до 350 В
Частота выходного напряжения (с использованием инвертора на выходе)	50 Гц
Время разряда	50 с
Частота вращения маховика	5000 – 8000 мин ⁻¹



Рис. 10. КНЭ с величиной накапливаемой энергии 5 МДж: внешний вид (а); сборка основных узлов, монтаж маховика (б)

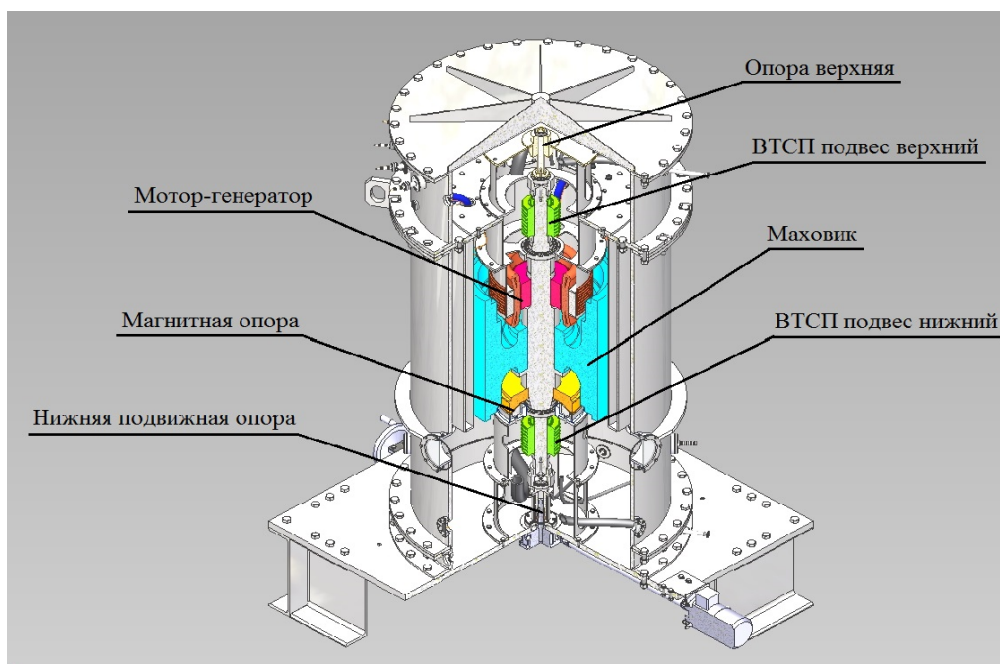


Рис. 11. Конструкция КНЭ с величиной накапливаемой энергии 5 МДж

Применение магнитных подвесов на основе ВТСП-2 керамики обеспечивает левитацию маховика, размещенного в вакуумированном герметичном корпусе, за счёт взаимодействия магнитного поля постоянных магнитов подвеса и активированных ВТСП-2-блоков. При электромагнитном взаи-

модействии полюсов вращающегося магнитного поля обмотки статора и полюсов ротора мотор-генератора возникает момент, который разгоняет маховик до заданной частоты вращения. При этом кинетическая энергия, накопленная маховиком в процессе заряда КНЭ, сохраняется длительное

время ввиду отсутствия потерь в опорах и при необходимости отбирается мотор-генератором.

Основными конструктивными элементами данного КНЭ являются: маховик, мотор-генератор, магнитный подвес, ВТСП-подшипники, верхняя и нижняя подвижные опоры, герметичный составной корпус, система безопасности (предназначена для гашения кинетической энергии разлетающихся осколков маховика в случае разрушения КНЭ).

Для снижения потерь на трение в КНЭ применены ВТСП-2-подшипники и магнитный подвес, а также производится откачка воздуха из герметичного корпуса.

Маховик КНЭ выполнен в виде диска из алюминиевого сплава Д16 с прикрепленной к нему трубой из стали марки 12Х18Н10Т. Для обеспечения требуемой прочности маховика на трубу намотан бандаж из углеволокна. Мотор-генератор представляет собой синхронную машину с магнитами на основе редкоземельных элементов (Nd-Fe-B). Магнитный подвес состоит из двух частей (статор и ротор магнитной опоры) с вклеенными в их корпуса постоянными магнитами на основе редкоземельных элементов (Nd-Fe-B). Магнитный подвес воспринимает осевую нагрузку ротора с маховиком. ВТСП-2-подшипники необходимы для обеспечения устойчивости и гашения колебаний при вращении ротора КНЭ. Верхняя и нижняя подвижные опоры предназначены для центровки ротора КНЭ в момент захолаживания ВТСП-2-подшипников. Основные параметры КНЭ приведены в табл. 4 [1].

Представленные материалы позволяют сделать следующие выводы.

Мировой опыт создания КНЭ свидетельствует, что разработанные к настоящему времени конструкции КНЭ позволяют относить их к наиболее перспективным маломасштабным системам, способным решить задачи хранения и преобразования энергии, реализации оптимальных режимов работы оборудования, электроснабжения потребителей с нестандартными параметрами.

Отечественные разработки при, несомненно, мировом уровне достигнутых технических параметров, пока являются лишь опытными прототипами, не нашедшими должного практического применения, что является сдерживающим фактором для дальнейшего развития данного направления в электроэнергетике страны.

Литература

1. Казанцев С. Г., Меньшенин А. Л., Пирог А. В. Перспективные разработки кинетических накопителей энергии АО «НИИЭМ» // Тез. докл. науч.-техн. конф.

«Иосифьяновские чтения – 2016», Истра, 10 ноября 2016 г., НИИЭМ. – С. 80 – 83.

2. Новиков Н. Л. Повышение режимной надёжности и управляемости объединённых энергосистем с помощью новых средств и систем управления: дисс. докт. техн. наук. – Новосибирск, 2001. – 503 с.

3. Ковалёв Л. К., Ковалёв К. Л., Колчанова И. П. Анализ состояния зарубежных и отечественных разработок по созданию сверхпроводниковых электрических машин // Электричество. – 2013. – № 1. – С. 2 – 13.

4. Глушкин И. З., Иофьев Б. И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах / И. З. Глушкин, Б. И. Иофьев. – М.: Знак, 2009. – Т. I.

5. Глушкин И. З., Иофьев Б. И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах / И. З. Глушкин, Б. И. Иофьев. – М.: Знак, 2011. – Т. II.

6. Геро Рютер, Михаил Бушуев. Информационный сайт Германии «DeutscheWelle» (Раздел: «Экономика», рубрика: «Энергетика», тема: «Солнечная энергетика: кризис в Европе и надежда на новые рынки» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dw.de/p/18t5S> – 2013.

7. Renewables 2013. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ren21.net>. – 2013.

8. «BP Statistical Review of World Energy, June 2012» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bp.com/assets/bp-internet/globalbp>.

9. Официальный сайт Японского Центрального научно-исследовательского института электроэнергетики (CRIEPI) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://criepi.denken.or.jp>.

10. Кузнецов О. Н. Разработка алгоритмического и методического комплекса исследований динамической устойчивости электроэнергетических систем со статическими накопителями электроэнергии: дисс. канд. техн. наук. – М., 2003. – 193 с.

11. Брагин А. А. Алгоритм формирования графиков электрических нагрузок предприятия с применением аккумуляторных батарей в качестве потребителей-регуляторов мощности: дисс. канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2013. – 130 с.

12. Виссарионов В. И. и др. Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов по направлению «Электроэнергетика». – 2-е изд. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 276 с.

13. Виссарионов В. И., Дерюгин В. И., Крувенкова С. В. Теоретические основы энергетика возобновляемых источников / В. И. Виссарионов и др. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

14. Официальный сайт компании «International Energy Agency» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.worldenergyoutlook.org>. – 2010.

15. Официальный сайт компании «International Energy Agency» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iea.org>. – 2010.

16. Информационный сайт «Солнечные элементы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://solarwind.net.ua/bars.html>.

17. Официальный сайт компании «Микро АРТ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.invertor.ru/solbat.html>.
18. Официальный сайт компании НИИКЭУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.supercap.ru/superkondensatori.html>
19. Официальный сайт компании «Delta Batter». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.deltabatt.com/catalog/gel>.
20. Официальный сайт компании «Элтон» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elton-cap.ru>.
21. Официальный сайт компании «Heliocentris» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.heliocentris.com.
22. Официальный сайт компании Ballard Ltd [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ballard.com>.
23. Официальный сайт компании UTC – Power Ltd. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.utcrpower.com>.
24. Официальный сайт компании Ceramic Fuel Cells [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cfcl.com.au>.
25. Официальный сайт компании Cummins Power Generation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cummins.com>.
26. Официальный сайт компании Siemens [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.usa.siemens.com>.
27. Официальный сайт компании GE Energ Management [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ge-energy.com>. 01.2011.
28. Бут Д. А., Алиевский Б. Л., Мизюрин С. Р., Васюкевич П. В. Накопители энергии / Д. А. Бут и др. – М. : Энергоатомиздат, 1991.
29. Алексеев Б. А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике // Электро. – 2005. – № 1. – С. 42 – 46.
30. Большаков К. Г. Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – № 4 (24). – С. 52 – 57.
31. Поппель О. С., Тарасенко А. Б. Современные виды электрохимических накопителей и их применение в автономной и централизованной энергетике // Теплоэнергетика. Энергоэксперт. — 2011. – № 3. – С. 26 – 35.
32. Бут Д. А., Богданович Е. Г. Электромеханические преобразователи энергии для энергетических установок ЛА / Д. А. Бут, Е. Г. Богданович. – М. : Изд-во МАИ, 1989.
33. Divya K. S., Шtstergaard J. Battery energy storage technology for power systems – An overview // Electric Power Systems Research. – 2009. – Vol. 79. – P. 511 – 520.
34. Smith S. C., Sen P. K., Kroposki B. Advancement of Energy Storage Devices and Applications in Electrical Power System // Proceedings of the IEEE. – 2008.
35. Lund P. D., Paatero J. V. Energy Storage Options for Improving Wind Power Quality // Nordic Wind Power Conference // Espoo. – 2006.
36. Коровин Н. В. «Химические источники тока» справочник / под ред. Н. В. Коровина, А. М. Скудина / М. : Издательский дом МЭИ, 2003 г. – 740 с.
37. Хрусталева Д. А. Аккумуляторы. – М. : ООО «Измуд», 2003. – 224 с.
38. Lund H., Salgi G. The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems // Energy Conversion and Management. – 50 (2009). – P. 1172 – 1179.
39. Тарасенко А. Б., Школьников Е. И. Водородный цикл и другие способы буферного аккумулирования электроэнергии для энергоустановок на солнечных батареях: сравнительный технико-экономический анализ // Тезисы докладов Второй Международной конференции «Технологии хранения водорода» (Москва, 28 – 29 октября 2009 г.) – С. 43 – 44.
40. Bottling Electricity: Storage as a Strategic Tool for Managing Variability and Capacity Concerns in the Modern Grid, EAC Report December 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oe.energy.gov/eac.htm>.
41. Ribeiro P. F., Johnson B. K., Crow M. L., Arsoy A., Liu Y. Energy Storage Systems for Advanced Power Applications // Proceedings of the IEEE. – 2001. – Vol. 89. – No. 12. – P. 1744 – 1756.
42. San Martyn J. I., Zamora I., Aperribay V., Eguya P. Energy Storage Technologies for Electric Applications. International Conference Renewable Energies and Power Quality. (ICREPQ'11), Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2011. – P. 1 – 7.
43. Faias S., Santos P., Sousa J., Castro R. An Overview on Short and Long-Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications // Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'08), 2008. – P. 1 – 13.
44. Jung H. Y., Kim A. R., Kim J. H., Park M., Yu J. K., Kim S. H., Sim K., Kim H. J., Seong K. C., Asao T., Tamura J. A Study on the Operating Characteristics of SMES for the Dispersed Power Generation System // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19. – P. 2028 – 2031.
45. Larminie J., Dicks A. Fuel Cell Systems Explained. – Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2003. – P. 406.
46. Madlener R., Latz J. Economics of centralized and decentralized compressed air energy storage for enhanced grid integration of wind power // Appl. Energy (2011).
47. Каменев Ю. Б. Оценка перспективности свинцово-кислотных аккумуляторов // Сборник научн. трудов по свинцовым аккумуляторам ЗАО «Электротяга». – СПб : Химиздат, 2005. – С. 13 – 62.
48. Деньщиков К. К. Оптимизация взаимодействия наноструктурированных углеродных материалов и электролитов на основе ионных жидкостей для повышения электроэнергетических характеристик суперконденсаторов // Труды Международного форума по нанотехнологиям (Роснанофорум), Москва, 2008 г.
49. Scrosati Bruno, Garche Jürgen. Lithium batteries: Status, prospects and future // Journal of Power Sources. – 2010. – Vol. 195. – P. 2419 – 2430. – ISSN 03787753. – DOI:10.1016/j.jpowsour.2009.11.048.
50. Memory effect in a lithium-ion battery (Эффект памяти в литиевых аккумуляторах) // Nature Materials 12, 569 – 575 (2013) doi:10.1038/nmat3623.
51. How to rebuild a Li-Ion battery pack. Electronics-lab.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа :

- <http://www.electronics-lab.com/articles/Li-Ion-reconstruct> / Retrieved 8 October 2009.
52. Taku Oshima, Masaharu Kajita, Akiyasu Okuno. Development of Sodium-Sulfur Batteries // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2004. – Vol. 1. – P. 269 – 276. doi:10.1111 / j.1744-7402.2004.tb00179.
53. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://agmetalmminer.com/2009/05/18/ge-betting-sodium-sulfur-batteries-are-the-way-forward>.
54. Кузнецов В., Панькина О., Мачковская Н., Шувалов Е., Востриков И. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6.
55. Vivekchand S. R. C., Chandra Sekhar Rout, Subrahmanyam K. S., Govindaraj A. and Rao C. N. R. (2008). Graphene-based electrochemical supercapacitors. Chem. Sci. J. / Indian Academy of Sciences 120, January 2008. – P. 9 – 13.
56. Burke A. Ultracapacitor Technologies and Application in Hybrid and Electric Vehicles / Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2009.
57. 10th Annual Solid State Energy Conversion Alliance (SECA) Workshop, Pittsburgh, PA July 14 – 16, 2009. – (Publications Conference Proceedings).
58. Ковалёв Л. К., Ковалёв К. Л. Кинетические накопители энергии с магнитным ВТСП подвесом. Инновационные технологии в энергетике / Российская академия наук. – М. : Наука, 2010. – Кн. 2. Инновационные водородные и сверхпроводниковые технологии для энергетики / под ред. О. М. Бударгина, С. П. Малышенко. – М. : Наука, 2012. – С. 140 – 162.
59. Масалев Д. Ю. Исследование и разработка методов выбора характеристик сверхпроводникового индуктивного накопителя в системе противоаварийного управления электроэнергетических систем: дисс. канд. техн. наук. – М., 2000. – 137 с.
60. Патент №133986 от 27 октября 2013 г. Кинетический накопитель энергии с ВТСП магнитным подвесом / Полтавец В. Н., Ковалёв Л. К., Ковалёв К. Л., Ильясов Р. И., Егошкина Л. А., Колчанова И. П. – (Заявка № 20131 16214 от 09 апреля 2013 г.).
61. Джафаров Э. А. Энергосберегающие трансформаторы энергетических систем на основе сверхпроводниковых технологий и силовой электроники: дисс. канд. техн. наук. – М., 2004. – 234 с.
62. Фортов В. Е., Поппель О. С. Возобновляемые источники энергии в мире и в России // Материалы 1-го Международного форума «Возобновляемая энергетика». Пути повышения энергетической и экономической эффективности. 22 – 23 октября 2013 г. Москва. – С. 12 – 22.
63. Дорофеев В. В., Черноплеков Н. А., Кейлин В. Е. и др. Проблемы создания и применения в электрических сетях устройств, использующих явления сверхпроводимости // Электричество. – 2005. – № 7. – С. 22 – 30.
64. Ковалёв Л. К., Илюшкин К. В., Ковалёв К. Л. и др. Новые типы сверхпроводниковых электрических машин // Сверхпроводимость: исследования и разработки. – 2002. – № 11. – С. 301 – 302.
65. Шевцов А. В., Зибольд А. Ф. Использование явления сверхпроводимости в электротехнике // Межвузовская студенческая конференция «Физика и научно-технический прогресс» (ФиНаТ-2006) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2009/eltf/shevtsov/library/Source1.htm>.
66. Покровский Д. В. Некоторые аспекты применения высокотемпературных сверхпроводников в энергетике // Электро. – 2004. – № 4. – С. 34 – 39.
67. Steele R. S., Babelay E. F. Jr. Data Analysis Techniques Used at the Oak Ridge Y-12 Plant Flywheel Evaluation Laboratory // Proceeding of the 1980 Flywheel Technology Symposium. – Scottsdale, AZ. – P. 423 – 433.
68. Steele R. S. Composite Flywheel Balance Experience. Proceeding of the 16th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. – Atlanta, GA, August 1981.
69. Herbst J. D., Manifold S. M., Murphy B. T., Price J. H., Thompson R. C., Walls W. A., Alexander A., Twigg K. Design, Fabrication and Testing of 10 MJ Composite Flywheel Energy Storage Rotors. – (SAE Technical Paper Series, 2000-01-1282).
70. Christopher D. A., Beach R. Flywheel Technology Development Program for Aerospace Applications // IEEE. – 1997.
71. Официальный сайт NASA [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.eosweb.larc.nasa.gov>.
72. Pieronek T. J., Decker D. K., Spector V. A. Spacecraft Flywheel Systems – Benefits and Issues // IEEE. – 1997.
73. Edwards J., Christopher D. A., Aldrich J. W., Beach R. F, Barton J. R. Flight Test Demonstration of a Flywheel Energy Storage System on the International Space Station // IEEE. – 1997.

Поступила в редакцию 02.12.2016

Сергей Геннадьевич Казанцев, доктор технических наук,
заместитель генерального директора,
т. (977) 458-18-05, e-mail: sg.kazantsev@niiem.ru.
(АО «НИИЭМ»).

KINETIC ENERGY STORAGE SYSTEMS: GLOBAL TRENDS and RUSSIAN NATIONAL DEVELOPMENTS USING HTS TAPES of the SECOND GENERATION

S.G. Kazantsev

A brief revision of Russian national and foreign advanced system developments has been performed; the systems are intended for collection, storage and output of electric energy. The comparative analysis of the general specifications of electromechanical converters with alternative projects is presented. The converters of that type provide the ability to store electrical energy by converting it into kinetic energy of a rotating flywheel. The possible areas of their application are given: as backup and emergency power sources, for improvement of energy system parameters during short-term actuation of high-power energy users (peak load compensation), for providing steady operation of the power supply systems and power installations, as energy recuperators between power generation installations and energy users, operating in non-steady modes.

Key words: power grids, electric energy system, specific heat capacity, kinetic energy storage system, flywheel, carbon fiber, magnetic bearing, high-temperature superconductor, motor-generator, synchronous electric machine, rare earth permanent magnet.

References

1. Kazantsev S. G., Menshenin A. L., Pirog A. V. Advanced developments of kinetic energy storage systems of 'НИИЭМ' JC // Thesis of science and technology conference «Iosifian readings – 2016», Istra, November 10th, 2016., НИИЭМ. – Pp. 80 – 83.
2. Novikov N. L. Improvement of the integrated electric systems operational reliability and controllability with the help of the new tools and control systems: Thesis prepared by the Doctor of Technical Sciences (D. Sc.). – Novosibirsk, 2001. – 503 pp.
3. Kovalev L. K., Kovalev K. L., Kolchanova I.P. . Analysis of the Russian national and foreign developments related to the designing of superconductive electric machines // Electricity. – 2013. –No.1. – Pp. 2 – 13.
4. Gluskin I. Z., Iofev B. I. Emergency control equipment in electric systems / I. Z. Gluskin, B. I. Iofev. – M.: Znak 2009. – T. I.
5. Gluskin I.Z., Iofev B.I. Emergency control equipment in electric systems / I.Z. Gluskin, B.I. Iofev. – M.: Znak 2011. – T. II.
6. Gero Riuter, Mikhail Bushuev. 'DeutscheWelle' informational website of Germany (Chapter: «Economics», section: «Power industry», topic: «Solar energy: European crisis and hope to find new markets» [Digital resource]. – Available at: <http://www.dw.de/p/18t5S> – 2013.
7. Renewables 2013. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century [Digital resource]. – Available at: <http://www.ren21.net>. – 2013.
8. «BP Statistical Review of World Energy, June 2012» [Digital resource]. – Available at: [http:// www. bp.com/assets/bp-internet/globalbp](http://www.bp.com/assets/bp-internet/globalbp).
9. Official website of the Japanese Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) [Digital resource]. – Available at: <http://criepi.denken.or.jp>.
10. Kuznetsov O. N. The development of the algorithmic and methodological complex intended for the research of dynamic stability of electric energy systems containing static energy storage systems within their composition: Thesis prepared by the Candidate of Technical Sciences (Ph. D.). – M., 2003. – 193 pp.
11. Bragin A. A. Algorithm of the electric load diagram generation (within the enterprise) using storage batteries as the power regulating users: Thesis prepared by the Candidate of Technical Sciences. – Saint-Petersburg, 2013. – 130 pp.
12. Vissarionov V. I. and others. Solar energy: Manual for higher-educational institutions in the field of 'Electric engineering' – 2nd edition. – M. : Publishing house of MPEI, 2011. – 276 pp.
13. Vissarionov V. I., Deriugin V. I., Kruvenkova S. V. Theoretical basis of power industry based on renewable sources / V.I. Vissarionov and others. – M.: Publishing house of MPEI, 2008.
14. Official website of the company «International Energy Agency» [Digital resource]. – Available at: <http://www.worldenergyoutlook.org>. – 2010.
15. Official website of the company «International Energy Agency» [Digital resource]. – Available at: <http://www.iea.org>. – 2010.
16. Informational website «Solar cells» [Digital resource]. – Available at: <http://solarwind.net.ua/bars.html>.
17. Official website of the company «Micro ART» [Digital resource]. – Available at: <http://www.invertor.ru/solbat.html>.
18. Official website of the company DriveElectro [Digital resource]. – Available at: <http://www.supercap.ru/superkondensatori.html>.
19. Official website of the company «Delta Battery». [Digital resource]. – Available at: <http://www.deltabatt.com/catalog/gel>.
20. Official website of the company «Elton» [Digital resource]. – Available at: <http://www.elton-cap.ru>.
21. Official website of the company «Heliocentris» [Digital resource]. – Available at: www.heliocentris.com.
22. Official website of the company Ballard Ltd [Digital resource]. – Available at: <http://www.ballard.com>.
23. Official website of the company UTC – Power Ltd. [Digital resource]. – Available at: [http:// www. utcpower.com](http://www.utcpower.com).
24. Official website of the company Ceramic Fuel Cells [Digital resource]. – Available at: <http://www.cfcl.com.au>.
25. Official website of the company Cummins Power Generation [Digital resource]. – Available at: <http://www.cummins.com>.

26. Official website of the company Siemens [Digital resource]. – Available at: <http://www.usa.siemens.com>.
27. Official website of the company GE Energy Management [Digital resource]. – Available at: <http://www.ge-energy.com>. 01.2011.
28. But D. A., Alievskii B. L., Mizurin S. R., Vasiukevich P. V. Power storage devices / D. A. But and others. – M.: Energoatomizdat, 1991.
29. Alekseev B. A. Application of the energy storage systems in the electric engineering // *Electro*. – 2005. – No. 1. – Pp. 42 – 46.
30. Bolshakov K. G. Alternative energy and ecology. – 2005. – No. 4 (24). – Pp. 52 – 57.
31. Poppel O. S., Tarasenko A. B. Modern types of electrochemical storage systems and their application in autonomous and centralized power industry // *Thermal engineering. Energoexpert*. – 2011. – No. 3. – Pp. 26 – 35.
32. But D.A., Bogdanovich E.G. Electromechanical power converters for aircraft energy installations / D.A. But, E.G. Bogdanovich. – M.: Publishing house of MPEI, 1989.
33. Divya K. C., Istergaard J. Battery energy storage technology for power systems – An overview // *Electric Power Systems Research*. – 2009. – Vol. 79. – Pp. 511 – 520.
34. Smith S. C., Sen P. K., Kroposki B. Advancement of Energy Storage Devices and Applications in Electrical Power System // *Proceedings of the IEEE*. – 2008.
35. Lund P. D., Paatero J. V. Energy Storage Options for Improving Wind Power Quality // *Nordic Wind Power Conference // Espoo*. – 2006.
36. Korovin N. V. 'Chemical cells' reference book / edited by N.V. Korovin, A.M. Skundin / M.: Publishing house of MPEI, 2003. – 740 pp.
37. Khrustalev D. A. Storage batteries. – M.: «Izumrud» JSC, 2003. – 224 pp.
38. Lund H., Salgi G. The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems // *Energy Conversion and Management*. – 50 (2009). – Pp. 1172 – 1179.
39. Tarasenko A. B., Shkolnikov E. I., The hydrogen cycle and other means of buffer accumulation of electric energy intended for power installations with solar batteries installed: comparative technical and economical analysis // *Thesis from reports of the Second International Conference «Hydrogen storage technologies» (Moscow, October 28th – 29th, 2009)*. – Pp. 43 – 44.
40. Bottling Electricity: Storage as a Strategic Tool for Managing Variability and Capacity Concerns in the Modern Grid, EAC Report December 2008 [Digital resource]. – Available at: <http://www.oe.energy.gov/eac.htm>.
41. Ribeiro P. F., Johnson B. K., Crow M. L., Arsoy A., Liu Y. Energy Storage Systems for Advanced Power Applications // *Proceedings of the IEEE*. – 2001. – Vol. 89. – No. 12. – pp. 1744 – 1756.
42. San Martyn J. I., Zamora I., Aperribay V., Eguya P. Energy Storage Technologies for Electric Applications. International Conference Renewable Energies and Power Quality. (ICREPQ'11), Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2011. – pp. 1 – 7.
43. Faias S., Santos P., Sousa J., Castro R. An Overview on Short and Long-Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications // *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'08)*, 2008. – Pp. 1 – 13.
44. Jung H. Y., Kim A. R., Kim J. H., Park M., Yu J. K., Kim S. H., Sim K., Kim H. J., Seong K. C., Asao T., Tamura J. A Study on the Operating Characteristics of SMES for the Dispersed Power Generation System // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2009. – Vol. 19. – pp. 2028 – 2031.
45. Larminie J., Dicks A. Fuel Cell Systems Explained. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2003. – P. 406.
46. Madlener R., Latz J. Economics of centralized and decentralized compressed air energy storage for enhanced grid integration of wind power // *Appl. Energy* (2011).
47. Kamenev Iu. B. The evaluation of lead-acid storage batteries application perspective // *The collection of the scientific articles on lead storage batteries prepared by «Electrotyaga» JSC*. – Saint Petersburg: Himizdat, 2005. – Pp. 13 – 62.
48. Denshchikov K. K. The optimization of interaction between nanostructured carbon materials and electrolytes on the basis of ionic liquids for improvement of electric parameters of super capacitors // *Proceedings of the International forum on nanotechnologies (Rosnanoforum)*, Moscow, 2008.
49. Scrosati Bruno, Garche Jürgen. Lithium batteries: Status, prospects and future // *Journal of Power Sources*. – 2010. – Vol. 195. – P. 2419 – 2430. – ISSN 03787753. – DOI:10.1016/j.jpowsour.2009.11.048.
50. Memory effect in a lithium-ion battery (Эффект памяти в литиевых аккумуляторах) // *Nature Materials* 12, 569 – 575 (2013) doi:10.1038/nmat3623.
51. How to rebuild a Li-Ion battery pack. Electronics-lab.com [Digital resource]. – Available at: <http://www.electronics-lab.com/articles/Li-Ion-reconstruct/> Retrieved 8 October 2009.
52. Taku Oshima, Masaharu Kajita, Akiyasu Okuno. Development of Sodium-Sulfur Batteries // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. – 2004. – Vol. 1. – P. 269 – 276. doi:10.1111/j.1744-7402.2004.tb00179.
53. [Digital resource]. – Available at: <http://agmetminer.com/2009/05/18/ge-betting-sodium-sulfur-batteries-are-the-way-forward>.

54. Kuznetsov V., Pankina O., Machkovskaia N., Shuvalov E., Vostrikov I. Capacitors with double electrical layer (ionistors): development and production // Components and technologies. – 2005. – No.6.
55. Vivekchand S. R. C., Chandra Sekhar Rout, Subrahmanyam K. S., Govindaraj A. and Rao C. N. R. (2008). Graphene-based electrochemical supercapacitors. Chem. Sci. J. / Indian Academy of Sciences 120, January 2008. – Pp. 9 – 13.
56. Burke A. Ultracapacitor Technologies and Application in Hybrid and Electric Vehicles / Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2009.
57. 10th Annual Solid State Energy Conversion Alliance (SECA) Workshop, Pittsburgh, PA July 14 – 16, 2009. – (Publications Conference Proceedings).
58. Kovalev L. K., Kovalev K. L. Kinetic energy storage systems with magnetic HTS bearing. Application of innovative technologies in electric engineering area / Russian Academy of Science. – M. : Science, 2010. – Book. 2. Innovative hydrogen and superconductive technologies for electric engineering / edited by O. M. Budargin, S. P. Malysenko. – M. : Science, 2012. – Pp. 140 – 162.
59. Masalev D. Iu. Research and development of methodology intended for parameters selection of superconductive inductive storage system in the emergency control systems of electric systems: Thesis prepared by the Candidate of Technical Sciences (Ph. D.). – M., 2000. – 137 pp.
60. Patent No. 133986 of October 27, 2013. Kinetic energy storage system with HTS magnetic bearing / Poltavets V.N., Kovalev L. K., Kovalev K. L., Iliasov R. I., Egoshkina L. A., Kolchanova I. P. – (Request No. 20131 16214 of April 09, 2013).
61. Dzhafarov E. A. Energy saving transformers of electric systems based on the superconductive technologies and power electronics: Thesis prepared by the Candidate of Technical Sciences. – M., 2004. – 234 pp.
62. Fortov V. E., Poppel O. S. Renewable energy sources in the world and in Russia // Materials of the 1st International forum «Renewable energy». Ways to improve the energy and economic efficiency. October 22 – 23, 2013. Moscow. – Pp. 12 – 22.
63. Dorofeev V. V., Chernoplekov N.A., Keilin V.E. and others. Issues of design and application of devices using the superconductivity phenomena in the electric grids // Electricity. – 2005. – No. 7. – Pp. 22 – 30.
64. Kovalev L. K., Iliushkin K. V., Kovalev K. L. and others. New types of superconductive electric machines // Superconductivity: research and development. – 2002. – No. 11. – Pp. 301 – 302.
65. Shevtsov A. V., Zibold A. F. Application of the superconductivity phenomena in electric engineering // Interuniversity students conference «Physics and scientific-technological progress» (FiNaT-2006) [Digital resource]. – Available at: <http://masters.donntu.org/2009/eltf/shevtsov/library/Source1.htm>.
66. Pokrovskii D. V. Several aspects of application of the high-temperature superconductors in power industry // Electro. – 2004. – No. 4. – Pp. 34 – 39.
67. Steele R. S., Babelay E. F. Jr. Data Analysis Techniques Used at the Oak Ridge Y-12 Plant Flywheel Evaluation Laboratory // Proceeding of the 1980 Flywheel Technology Symposium. – Scottsdale, AZ. – Pp. 423 – 433.
68. Steele R. S. Composite Flywheel Balance Experience. Proceeding of the 16th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. – Atlanta, GA, August 1981.
69. Herbst J. D., Manifold S. M., Murphy B. T., Price J. H., Thompson R. C., Walls W. A., Alexander A., Twigg K. Design, Fabrication and Testing of 10 MJ Composite Flywheel Energy Storage Rotors. – (SAE Technical Paper Series, 2000-01-1282).
70. Christopher D. A., Beach R. Flywheel Technology Development Program for Aerospace Applications // IEEE. – 1997.
71. Official website of NASA [Digital resource]. – Available at: <http://www.eosweb.larc.nasa.gov>.
72. Pieronek T. J., Decker D. K., Spector V. A. Spacecraft Flywheel Systems – Benefits and Issues // IEEE. – 1997.
73. Edwards J., Christopher D. A., Aldrich J. W., Beach R. F., Barton J. R. Flight Test Demonstration of a Flywheel Energy Storage System on the International Space Station // IEEE. – 1997.

*Sergei Gennadevich Kazantsev, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.),
Deputy Director General,
tel. (977) 458-18-05, e-mail: sg.kazantsev@niiem.ru.
(JC «NIIEM»).*