

УДК 621.3.031

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ЗАПАСАНИЯ ЭНЕРГИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СУПЕРМАХОВИКОВ

М.А. Соколов^а, В.С. Томасов^а, R.P. Jastrzębski^б

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, tomasov@ets.ifmo.ru

^б Лаппеенрантский технологический университет, Лаппеенранта, Финляндия

Аннотация. Выполнен обзор и сравнительный анализ отечественных и зарубежных литературных источников последних лет по различным накопителям энергии. Рассмотрены современные разработки и опыт применения в различных областях техники. Сформулированы сравнительные показатели накопителей энергии – эффективность, качество и стабильность. Приведены типичные характеристики таких накопителей, как электрохимические аккумуляторы, суперконденсаторы, гидроаккумулирующие электростанции, системы на основе сжатого воздуха и индуктивные сверхпроводящие накопители. Показаны преимущества и перспективы высокоскоростных супермаховиков как одного из способов запасания энергии в виде кинетической энергии вращения. Большая выходная мощность супермаховика позволяет использовать его в качестве буферного источника пиковой мощности. Показано, что супермаховики обладают большим жизненным циклом (более 20 лет) и экологичностью. Отличительной особенностью таких источников является их хорошая масштабируемость. Продемонстрировано, что супермаховики особенно эффективны в гибридных энергоустановках, работающих в режиме заряд/разряд и применяемых, в частности, на электротранспорте. Важнейшими факторами для космического применения супермаховиков являются их модульность, высокая эффективность, отсутствие механического трения и долгое время работы без обслуживания. Быстрое время реакции на изменения в сети и высокая выходная мощность могут использоваться для поддержания требуемого качества электроэнергии и общей надежности сети одновременно с выполнением задачи накопления энергии.

Ключевые слова: супермаховик, запасание энергии, хранение энергии, энергоэффективность, магнитные подшипники, возобновляемые источники.

Благодарности. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

Работа выполнена в рамках разработки устройств запасания энергии для возобновляемых источников в Лаппеенрантском технологическом университете при проектировании умной системы электроснабжения «Green Campus» (научно-техническая программа ЕС «Horizon 2020»).

COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY ACCUMULATION SYSTEMS AND DETERMINATION OF OPTIMAL APPLICATION AREAS FOR MODERN SUPER FLYWHEELS

M.A. Sokolov^а, V.S. Tomasov^а, R.P. Jastrzębski

^а Department head, ITMO University, Saint Petersburg, Russia, tomasov@ets.ifmo.ru

^б Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland

Abstract. The paper presents a review and comparative analysis of late years native and foreign literature on various energy storage devices: state of the art designs, application experience in various technical fields. Comparative characteristics of energy storage devices are formulated: efficiency, quality and stability. Typical characteristics are shown for such devices as electrochemical batteries, super capacitors, pumped hydroelectric storage, power systems based on compressed air and superconducting magnetic energy storage systems. The advantages and prospects of high-speed super flywheels as means of energy accumulation in the form of rotational kinetic energy are shown. High output power of a super flywheels energy storage system gives the possibility to use it as a buffer source of peak power. It is shown that super flywheels have great life cycle (over 20 years) and are environmental. A distinctive feature of these energy storage devices is their good scalability. It is demonstrated that super flywheels are especially effective in hybrid power systems that operate in a charge/discharge mode, and are used particularly in electric vehicles. The most important factors for space applications of the super flywheels are their modularity, high efficiency, no mechanical friction and long operating time without maintenance. Quick response to network disturbances and high power output can be used to maintain the desired power quality and overall network stability along with fulfilling energy accumulation needs.

Keywords: super flywheel, energy accumulation, energy storage, energy efficiency, magnetic bearings, renewable power sources.

Acknowledgements. This work was partially financially supported by the Government of the Russian Federation, Grant 074-U01. The work is performed within the development project devoted to energy storage devices for renewable power sources in Lappeenranta University of Technology for «Green Campus» smart grid system (EU Research and Innovation Program "Horizon 2020").

Введение

Современные тенденции развития многих областей науки и техники, таких как электроэнергетика, электротранспорт, электrorаспределительные сети, а также возобновляемые источники энергии, ставят новые задачи по улучшению как количественных, так и качественных характеристик энергосистем. Одной из таких задач является задача запасания электроэнергии для улучшения показателей эффективности, качества и стабильности источников электроэнергии. Методы запасания энергии различаются по многим параметрам, таким как выходная мощность, количество запасаемой энергии, время хранения, количество циклов

заряд/разряд, стоимость, массогабаритные показатели, а также по специфике внедрения. Все это ограничивает области их применения, а также требует внимания при проектировании энергосистем на их основе.

Современной энергоэффективной и высокотехнологичной альтернативой перечисленным способам хранения энергии является устройство запасаения кинетической энергии – супермаховик [1]. Возможность использования маховиков в качестве конкурентоспособного устройства хранения энергии появилась сравнительно недавно благодаря разработкам в областях композитных материалов, магнитных подшипников, электрических машин и полупроводниковой электроники.

Все перечисленные методы хранения энергии имеют свои достоинства и недостатки, которые необходимо учитывать при разработке и внедрении систем запасаения энергии для решения конкретных задач. По причине многих специфических особенностей супермаховиков, а также других представленных методов задача выбора оптимальной системы хранения энергии является нетривиальной и требует особого внимания. Целью настоящей работы является сравнение супермаховиков с другими методами запасаения энергии по различным параметрам и аспектам использования, а также определение оптимальных областей применения супермаховиков.

Обзор характеристик и специфики супермаховиков

Долгое время использование маховиков имело целью лишь обеспечение плавной работы машин и механизмов. Новейшие разработки последних лет позволили создать супермаховики – сложные высокотехнологичные устройства, главным назначением которых является запасаение энергии. Супермаховик запасаает энергию в виде кинетической энергии вращения. Количество энергии пропорционально инерции вращающегося тела J и квадрату угловой скорости вращения ω , согласно формуле

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2. \quad (1)$$

Кинетическая энергия передается на маховик и от маховика при помощи мотор-генератора – обратимой электрической машины, чаще всего встроенной в конструкцию маховика. При работе в режиме двигателя электрическая энергия, подводимая к обмоткам статора, создает вращающий момент и увеличивает скорость вращения маховика. В режиме генератора имеет место обратный процесс – превращение кинетической энергии вращения в генераторный момент на валу и впоследствии в электрическую энергию. Для двустороннего обмена энергией мотор-генератор подключен к сети посредством обратимого преобразователя. Общий вид типичной конструкции супермаховика со встроенным мотор-генератором, подключенного к звену постоянного тока через инвертор напряжения, представлен на схеме (рисунок).

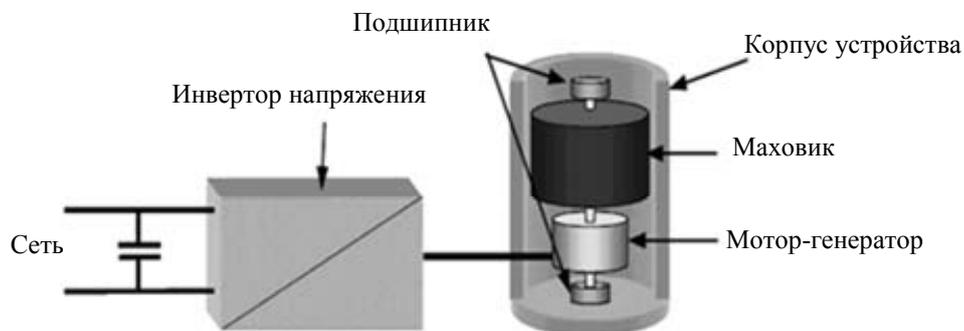


Рисунок. Общая схема супермаховика

До недавнего времени определенный круг технических проблем не позволял супермаховикам конкурировать с другими способами запасаения энергии. Прежде всего, это было связано с недостаточной энергоэффективностью, удельной энергоемкостью и максимальным временем хранения энергии. Все вышеперечисленное являлось причиной для неоправданного увеличения массогабаритных показателей, стоимости изготовления и эксплуатации, ограничения областей применимости и т.д.

Из формулы (1) видно, что запасаемая в маховике кинетическая энергия имеет линейную зависимость от момента инерции вращающейся массы и квадратичную зависимость от скорости вращения. Соответственно при росте скорости вращения, даже если масса и момент инерции маховика будут пропорционально уменьшаться, количество запасаемой энергии будет расти [2]. Это утверждение позволяет сделать вывод о том, что материал для изготовления маховика с высокой энергоемкостью должен иметь высокий предел прочности при низкой плотности для работы при высоких скоростях вращения. До недавнего времени самыми распространенными материалами для изготовления маховиков являлись конструкционные стали, которые при высокой плотности не обеспечивают достаточной прочности на разрыв для сохранения структурной целостности при высоких скоростях вращения. Внедрение современных композитных материалов для изготовления маховиков, таких как стекловолокно и карбоновое волокно, предел прочности ко-

торых превышает сталь до пяти раз [3], позволило значительно увеличить скорости вращения и энергоемкость системы. Сравнение композитных материалов с металлами представлено в табл. 1 [4].

Материал	Композитные материалы			Металлы (примерные значения)	
	Toray T800	Toray T700	Advantex E-glass	Углеродистая сталь	Титановые сплавы
Предельная прочность, МПа	3100	2800	1400	300–1300	400–1400
Плотность, кг/м ³	1600	1594	2146	7800	4500

Таблица 1. Типичные механические характеристики материалов маховика

Помимо этого, высокие скорости увеличивают нагрузки и создают повышенные требования к подшипниковым узлам конструкции. Для решения этой проблемы в качестве элемента опоры ротора супермаховика используются активные магнитные подшипники, что позволяет поддерживать ротор по принципу магнитной левитации [1]. Развитие более прогрессивных алгоритмов управления, а также микропроцессорной техники позволяет в реальном времени стабилизировать ротор при любых скоростях вращения и добиться полного отсутствия соприкосновения ротора с другими элементами конструкции и свести механическое трение к нулю [5]. Помимо решения уже упомянутой проблемы высоких скоростей вращения, магнитные подшипники обладают другими достоинствами, особенно важными для супермаховиков. Следствием полностью бесконтактной работы являются устранение механического износа и необходимости регулярного технического обслуживания, что увеличивает рентабельность и надежность системы.

Другой мерой уменьшения потерь и последним шагом к долговременному хранению энергии является помещение ротора в безвоздушное пространство. Это достигается созданием специальной оболочки, способной выдержать атмосферное давление снаружи и поддерживать определенный уровень вакуума внутри. Поддержание сверхнизкого давления в камере требует вакуумного насоса, что несколько увеличивает сложность и стоимость системы, но необходимо для устранения аэродинамических потерь и запаса энергии на длительный срок. Работа магнитных подшипников и электрической машины в вакуумной среде требует отдельного внимания при проектировании со стороны, во-первых, используемых материалов, а во-вторых – отвода тепловых потерь [6].

Высокие скорости вращения и требования эффективности также подразумевают создание эффективных высокоскоростных электрических машин и высокочастотных преобразователей. Исследования последних лет в области электрических машин позволяют создавать бесколлекторные машины на постоянных магнитах и реактивные электродвигатели, коэффициент полезного действия (КПД) которых достигает 95% в номинальном режиме [7]. Использование таких типов машин требует высокочастотного инвертора. Коммерческие модели инверторов в настоящее время поддерживают частоты до 500 Гц, что позволяет обеспечивать работу двухполюсных машин на скоростях до 30000 об/мин, а также имеют достаточно высокое быстродействие для компенсации пульсаций и скачков сетевого напряжения. Это свойство составляет важную особенность супермаховика и является одним из главных преимуществ по сравнению с аккумуляторами. КПД преобразования инвертора, использующегося для питания супермаховика, может достигать 95–98% [8]. При создании специализированных моделей инверторов частота питания может быть увеличена, а КПД доведен до верхней границы указанного диапазона.

Общий КПД, с учетом потерь при хранении энергии и эффективности преобразования, превосходит 85% и в некоторых случаях может достигать максимальных значений в 97% [9]. Предельная энергоемкость современных супермаховиков достигает 300 Вт·ч/кг [10]. По прогнозам развития композитных материалов и увеличения их предела прочности, показатель энергоемкости может быть увеличен до 800 Вт·ч/кг в ближайшие 5 лет, а долговременный прогноз теоретического максимума достигает значения 2700 Вт·ч/кг [11].

Краткий обзор других способов запаса энергии

Для сравнения супермаховиков с другими способами запаса энергии необходимо рассмотреть характерные параметры и особенности современных способов хранения энергии, использующихся на практике в различных областях.

Электрохимические аккумуляторы. Являются одним из самых известных способов хранения энергии и широко используются в этом качестве в различных приложениях. Аккумуляторы являются модульным, бесшумным и относительно дешевым устройством [12]. Привлекательным вариантом их также делает неприхотливость к рабочей среде, удобство и быстрота установки. Крупные аккумуляторные сис-

темы используют инвертор для преобразования постоянного тока аккумулятора в переменный ток под-держиваемой сети. Общая эффективность такой системы обычно находится в диапазоне 60–80% [12]. Относительно низкая эффективность преобразования объясняется тем, что аккумуляторы запасают энергию при помощи электрохимического процесса. Каждый цикл преобразования энергии неизбежно сопровождается выделением тепла, что уменьшает КПД преобразования и требует контроля температуры для предотвращения уменьшения долговечности или термического повреждения аккумулятора.

Другой проблемой является ограниченный жизненный цикл аккумулятора. Он определяется как число циклов заряда/разряда, которое батарея может обеспечить, и является фиксированной величиной для каждого типа аккумуляторов. Более того, жизненный цикл зависит от типичной глубины разряда, которой аккумулятор подвергается при работе. При относительно невысоких показателях глубины разряда жизненный цикл не изменяется, но может ухудшиться при глубоком разряде.

Электрохимические аккумуляторы также имеют строго ограниченную скорость разряда или выходную мощность, превышение которой может повредить аккумулятор. Это значение может составлять 10–25% от общей емкости аккумулятора [13], в зависимости от типа, что значительно ограничивает применимость аккумуляторных батарей в приложениях большой мощности.

Суперконденсаторы. Суперконденсаторы или ионисторы являются электрохимическим устройством, совмещающим достоинства аккумуляторных батарей и конденсаторов. Такой тип устройств запасания энергии известен примерно с 1960-х гг. [14]. Механизм запасания энергии суперконденсатором не включает химических реакций, что делает цикл заряд/разряд более быстрым, надежным, отличающимся от аккумуляторов значительно большим жизненным циклом – до сотен тысяч циклов заряд/разряд [15]. Суперконденсатор также отличается устойчивостью к внешним воздействиям – температурным диапазоном от -40°C до $+65^{\circ}\text{C}$, вибрационной и ударной стойкостью [14]. Главным недостатком и ограничительным фактором применения суперконденсаторов является относительно низкая плотность энергии. По сравнению с электрохимическими аккумуляторами, типичная плотность энергии может быть на порядок меньше. При этом суперконденсаторы при тех же параметрах могут иметь на порядок большую выходную мощность, что позволяет использовать их вместе с аккумуляторами, объединяя их достоинства и компенсируя недостатки.

Самостоятельно суперконденсаторы часто используются для кратковременного запасания небольших количеств энергии, улучшения качества электроэнергии и стабильности небольших сетей. Суперконденсаторы являются многообещающей альтернативой аккумуляторов при длительном жизненном цикле, быстром цикле заряд/разряд и эффективностью около 95% и выше [14, 16]. Главными проблемами суперконденсаторов остаются низкая плотность энергии и высокая стоимость [14].

Гидроаккумулирующие электростанции. Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) используются во всем мире в течение более чем 70 лет. Эти крупномасштабные системы хранения энергии являются наиболее широко применяемой технологией хранения энергии, используемой сегодня [12]. Примерно 280 проектов ГАЭС работают по всему миру, обеспечивая генерируемую мощность около 90 ГВт, что составляет около 3% мировой генерации электроэнергии [12, 17]. Такой тип электростанций работает по тому же принципу, что и обычные ГЭС, с той лишь разницей, что их генераторы могут также работать в режиме двигателя. Во время низкого потребления электроэнергии вода закачивается из нижнего резервуара в верхний, а во время высокого энергопотребления вращает турбину и производит электроэнергию по принципу гидрогенератора.

Такие системы способны запастись большое количество энергии на длительное время при эффективности полного цикла около 70–80% [12, 17]. Количество запасаемой энергии зависит только от вместимости резервуара. Главным недостатком такого способа хранения энергии является использование больших площадей для создания резервуаров и необходимый перепад высот. Большинство подходящих участков земли уже использованы, а освоение новых сопряжено с нанесением большого вреда экологии региона. Также такие системы требуют длительного времени на создание и сопряжены с большими расходами на проектирование и реализацию.

Системы со сжатым воздухом. Сжатый воздух используется в качестве носителя для хранения энергии относительно недавно. Первая система, основанная на принципе сжатия и расширения воздуха, была построена в Huntorf, Германия, в 1978 г. Энергоемкость системы составляет 290 МВт в течение 4 часов. При этом полная эффективность преобразования составляет около 85% [12, 18]. Это объясняется тем, что такой тип электростанций чаще всего использует сжатый воздух в сочетании с одним из различных видов топлива для работы турбогенератора. Но электростанция со сжатым воздухом использует на две трети меньше топлива, по сравнению с обычными термоэлектростанциями, и способна начать работу в течение лишь нескольких десятков минут [18].

Основной особенностью системы запасания энергии со сжатым воздухом является герметичный и очень большой резервуар. Создание подземных резервуаров для сжатого воздуха сопряжено с большими трудностями, а небольшие резервуары, находящиеся на поверхности, как правило, ограничены в накоплении энергии лишь на несколько часов [12]. Чтобы получить большую эффективность и создать систе-

му, работающую без дополнительного топлива, разрабатываются новые гибридные технологии, совмещающие описанный принцип с использованием суперконденсаторов, гидравлики и пневматики.

Сверхпроводящие системы. Индуктивные сверхпроводящие накопители являются одной из самых современных и технически сложных технологий хранения энергии. Они представляют собой криогенные системы, охлаждающие электромагнитную катушку до создания эффекта сверхпроводимости, что, по сути, исключает потери энергии в проводниках. Энергия в такой системе хранится в виде магнитного поля, которое может быть высвобождено в виде постоянного тока, который, в свою очередь, преобразуется в переменный ток с частотой сети. Такой принцип позволяет добиться быстрой реакции и высокой выходной мощности, а эффективность таких устройств может достигать 95–98% [12]. Помимо больших ГАЭС, это единственная система, которая способна сглаживать и компенсировать энергопотребление мощных систем при высоком КПД. При больших потенциальных возможностях технологии главными недостатками таких систем являются сложность охлаждения катушки до сверхпроводящих температур и крайне высокая стоимость производства и эксплуатации.

Сравнительный анализ и рекомендации по применению супермаховиков

После краткого обзора различных способов запасаения энергии выполнено количественное сравнение их параметров (табл. 2) [19, 20].

Параметры	Система					
	Аккумулятор	Супер-конденсатор	ГАЭС	Сжатый воздух	Сверх-проводная катушка	Супер-маховик
Эффективность, %	70	95	75	85	95	90
Энергоемкость, Вт·ч/кг	150	15	–	–	200	300
Количество циклов	10 ³	10 ⁶	10 ⁴	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁵
Жизненный цикл, лет	3–5	10	20	20	10	20+
Время заряда	ч	сек	ч	ч	мин	мин
Выходная мощность	средняя	высокая	очень высокая	очень высокая	высокая	высокая
Стоимость	низкая	средняя	очень высокая	очень высокая	очень высокая	высокая
Масштабируемость	высокая	средняя	низкая	низкая	средняя	высокая
Экологические проблемы	средние	низкие	высокие	средние	низкие	низкие

Таблица 2. Сравнение типичных характеристик и свойств различных способов запасаения энергии

Рассмотрение специфических особенностей супермаховиков, их достоинств и недостатков по сравнению с другими способами запасаения энергии позволяет дать некоторые рекомендации по их применению.

Большая выходная мощность супермаховика позволяет использовать его в качестве буферного источника пиковой мощности в сочетании с другим устройством, не способном компенсировать пиковую мощность, например, аккумуляторами.

Высокая эффективность и большой жизненный цикл супермаховика в сочетании с экологичностью делают его отличным комплиментарным устройством для возобновляемых источников энергии, таких как ветрогенераторы и солнечные батареи. Нерегулярность генерации таких источников, зависящая от внешних факторов, может быть эффективно скомпенсирована супермаховиком. Хорошая масштабируемость позволяет создавать устройства хранения энергии как для локальных источников возобновляемой энергии небольшой мощности, так и для крупных электростанций.

Еще одной рекомендуемой областью применения супермаховиков являются электротранспорт и транспортные средства с гибридными электроустановками. Повышение эффективности за счет рекуперативного торможения требует устройства для сохранения энергии, способного часто работать в режиме заряд/разряд и при этом поддерживать требуемый уровень энергоемкости, надежности и эффективности. Супермаховики могут успешно использоваться для этой цели на современных автомобилях, электропоездах, общественном транспорте, метро и т.д.

Более узкая ниша потенциального применения – аэрокосмическая отрасль, которая также может воспользоваться многими перечисленными достоинствами супермаховиков. Модульность, высокая эф-

фективность, отсутствие механического трения и долгое время работы без обслуживания – важные факторы для космического применения.

Малое время реакции на изменения в сети и высокая выходная мощность могут использоваться для поддержания требуемого качества электроэнергии и общей надежности сети одновременно с выполнением задачи накопления энергии.

Заключение

В работе рассмотрены различные системы хранения энергии, а также современное устройство запасаения кинетической энергии – супермаховик. Анализ их характеристик и сравнение типичных параметров и специфичных особенностей применения позволили определить оптимальные области применения супермаховиков и дать основные рекомендации по их использованию. Сделан вывод о том, что супермаховики являются перспективным способом как запасаения энергии, так и улучшения качества и надежности электроснабжения сетей.

Развитие областей науки и техники, ставших основной причиной развития и распространения супермаховиков, будет способствовать дальнейшему улучшению характеристик и прогрессу в данной отрасли. Экологическая нейтральность супермаховиков также является важным преимуществом и в будущем будет все больше способствовать их распространению, вместе с возобновляемыми источниками энергии и умными сетями электроснабжения.

Проведенный анализ и рекомендации по внедрению супермаховиков будут использованы при разработке устройств запасаения энергии для возобновляемых источников в Лаппеенрантском технологическом университете для проектирования умной системы электроснабжения «Green Campus» (научно-техническая программа ЕС «Horizon 2020»).

References

- Gulia N.B. *Inertionnye Akkumulyatory Energii* [Flywheel Energy Storage]. Voronezh, VSU Publ., 1973, 240 p.
- Bolund B., Bernhoff H., Leijon M. Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, vol. 11, no. 2, pp. 235–258. doi: 10.1016/j.rser.2005.01.004
- Daoud M.I., Abdel-Khalik A.S., Massoud A., Ahmed S., Abbasy N.H. On the development of flywheel storage systems for power system applications: a survey. *Proc. 20th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2012*. Marseille, France, 2012, pp. 2119–2125. doi: 10.1109/ICEMMach.2012.6350175
- Kamf T. *High Speed Flywheel Design: Using Advanced Composite Materials*. Uppsala universitet, 2012.
- Schweitzer G., Maslen E.H. *Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Springer, 2009, 600 p.
- Schmid J. Leerlauf im luftleeren Raum? *Mechatronik Sonderheft Antriebstechnik*, 2013, pp. 14–15.
- Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V. *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & Sons, 2009, 538 p.
- Eckroad S. *Flywheels for Electric Utility Energy Storage*. Technical Report. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, EPRI report TR-108889, 1999.
- Arghandeh R., Pipattanasomporn M., Rahman S. Flywheel energy storage systems for ride-through applications in a facility microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 1955–1962. doi: 10.1109/TSG.2012.2212468
- Wu S., Cui S., Song L. Optimal design of the rotor of air-core compulsator. *Proc. 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, EML 2012*. Beijing, China, 2012, art. no. 6325021.
- Roe G. *Boeing flywheel energy storage technology*. Available at: www.uaf.edu/files/acep/BoeingFlywheelOverview_06_20_2012.pdf (accessed 25.06.14).
- Schlinker R.B. Executive overview: energy storage options for a sustainable energy future. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004, vol. 2, pp. 2309–2314.
- Smith S.C., Sen P.K., Kroposki B. Advancement of energy storage devices and applications in electrical power system. *IEEE Power and Energy Society General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. Pittsburgh, USA, 2008, art. no. 4596436. doi: 10.1109/PES.2008.4596436
- Maxwell Technologies Ultracapacitors*. Available at: www.maxwell.com/ultracapacitors (accessed 26.03.2014).
- Ultra Capacitor*. Available at: www.ultracapacitors.org (accessed 26.03.2014).
- Barton J.P., Infield D.G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, vol. 19, no. 2, pp. 441–448. doi: 10.1109/TEC.2003.822305
- Leonard W., Grobe M. Sustainable electrical energy supply with wind and pumped storage – a realistic long-term strategy or utopia. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004, vol. 2, pp. 1221–1225.
- Schlinker R.B., Nakhamkin M. Compressed air energy storage (CAES): overview, performance and cost data for 25 Mw to 220 Mw plants. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1985, vol. PAS-104, no. 4, pp. 791–795.
- Pena-Alzola R., Sebastian R., Quesada J., Colmenar A. Review of flywheel based energy storage systems. *Proc. of International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. Malaga, Spain, 2011, art. no. 6036455. doi: 10.1109/PowerEng.2011.6036455
- Yu Y., Wang Y., Sun F. The latest development of the motor/generator for the flywheel energy storage system. *Proc. of International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, MEC 2011*. Jilin, China, 2011, pp. 1228–1232. doi: 10.1109/MEC.2011.6025689

- Соколов Максим Алексеевич* – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, maxisokolov@yandex.ru
- Томасов Валентин Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, tomasov@ets.ifmo.ru
- Jastrzebski Rafal* – кандидат технических наук, Лаппеенрантский технологический университет, Лаппеенранта, Финляндия, Rafal.Jastrzebski@lut.fi
- Maksim A. Sokolov* – student, ITMO University, Saint Petersburg, Russia, maxisokolov@yandex.ru
- Valentin S. Tomasov* – PhD, Associate professor, Department head, ITMO University, Saint Petersburg, Russia, tomasov@ets.ifmo.ru
- Rafal P. Jastrzebski* – PhD, Academy Research Fellow, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, Rafal.Jastrzebski@lut.fi

Принято к печати 21.04.14
Accepted 21.04.14