



УДК: 53.084.8

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

*S.V. Kozlov, A.N. Kindryashov, E.V. Solomin*

Южно-Уральский государственный университет  
454080 г. Челябинск, пр. Ленина 76  
Тел./факс +79028909923; e-mail: soninpapa@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.02.004

Заключение совета рецензентов: 29.04.15 Заключение совета экспертов: 05.05.15 Принято к публикации: 07.05.15

В статье производится анализ известных накопителей энергии и оценивается их применимость для электросетей. В настоящее время для электросетей важным показателем стали пики энергопотребления. При сглаживании пиков можно использовать накопители энергии, подключаемые к локальным или магистральным сетям в период пикового потребления. В связи с этим рассмотрены основные методы и средства накопления энергии. Выявлено, что наибольшей эффективностью (более 90%) обладают сверхпроводящий индуктивный накопитель, супермаховик, суперконденсатор и литий-ионные аккумуляторы.

Ключевые слова: накопители энергии, электросети, локальные сети, электроснабжение.

## ANALYSIS OF ENERGY STORAGE SYSTEMS EFFICIENCY

*S.V. Kozlov, A.N. Kindryashov, E.V. Solomin*

South-Urals State University  
76 Lenin St., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation  
Tel./fax: +79028909923, e-mail: soninpapa@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.02.004

Referred 29.04.15 Expertise 05.05.15 Accepted 07.05.15

This paper analyses known energy accumulators and evaluate their applicability for electric grids. Nowadays, peaks of the power supply became the very important indicator of electric grids. To smooth the peaks, the power storage systems could be used to support local or main electric grids during the peak operation. We found out that the most efficient approaches are the superconducting storage, super flywheel, and Li-Ion accumulators.

Keywords: energy accumulator, electric grid, local grid, electric supply.



Козлов Сергей Васильевич  
Sergey V. Kozlov

**Сведения об авторе:** аспирант кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии» Южно-Уральского гос. университета.

**Образование:** Южно-Уральский Технический Университет (1994).

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии, накопители энергии.

**Публикаций:** 3.

**Information about the author:** post-graduate student of the Chair "Electric Engineering and Renewable Energy Sources" of South Ural State University.

**Education:** South Ural Technical University (1994).

**Research interests:** renewable energy sources, energy storage systems.

**Publications:** 3.



Kindryashov  
Александр Николаевич  
Alexander N. Kindryashov

**Сведения об авторе:** аспирант кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии» Южно-Уральского гос. университета.

**Образование:** Южно-Уральский Технический Университет (2010).

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии, накопители энергии, электрические машины, ветроэнергетические установки.

**Публикаций:** 3.

**Information about the author:** post-graduate student of the Chair "Electric Engineering and Renewable Energy Sources" of South-Urals State University.

**Education:** South-Urals Technical University (2010).

**Research interests:** renewable energy sources, energy storage systems, electric machines, wind power facilities.

**Publications:** 3.



Соломин  
Евгений Викторович  
Evgeny V. Solomin

**Сведения об авторе:** д-р техн. наук, профессор Южно-Уральского гос. университета.

**Образование:** Будапештский Технический Университет (1990).

**Область научных интересов:** ветроэнергетика, солнечная энергетика, распределенная энергетика, возобновляемые источники энергии, гибридные энергокомплексы.

**Публикаций:** 125.

**Information about the author:** Dr., Professor of South-Urals State University.

**Education:** Budapest Technical University (1990).

**Research interests:** wind power, solar power, distributed power, renewable energy, combined energy complexes.

**Publications:** 125.

## Введение

Системы накопления энергии все чаще применяются при создании локальных и магистральных электросетей. Использование накопителей позволяет увеличить надежность и динамическую стабильность электроснабжения, создавать запасы энергии на время перебоев. Системы позволяют сгладить пиковую нагрузку, заряжаясь в незагруженные часы, создавая возможность генераторам работать в оптимальном режиме, потенциально снижая среднюю себестоимость электроэнергии. Кроме того, увеличивая мощность систем накопления, можно избежать увеличения мощностей генераторов, снизить нагрузку на линии электропередач, внедрять в общие электросистемы энергию возобновляемых источников.

### I. Классификация накопителей энергии

Системы накопления энергии можно разделить на три основные функциональные категории:

1. Крупномасштабные накопители.
2. Быстроразряжаемые.
3. Системы накопления на базе аккумуляторов (BESS, battery energy storage system).

В настоящее время разработаны и используются самые разнообразные методы накопления энергии. В целом, накопители можно разделить на следующие группы:

1. Механические (способны накапливать потенциальную и кинетическую энергию).

2. Электрические (запас электростатической и электромагнитной энергии).

3. Электрохимические (электрический ток вызывает обратимую химическую реакцию).

4. Термальные (сохранение высокой либо низкой температуры).

5. Химические (топливные элементы, получение природного газа).

Выбор метода накопления для каждого случая индивидуален, поскольку у каждого из методов имеются свои недостатки. Далее будет показана примерная оценка коэффициента полезного действия цикла заряда-разряда для основных методов накопления энергии. Эффективность цикла определяется соотношением полученному на выходе количеству электроэнергии к затраченному.

**1. Механические накопители** используют потенциальную и (или) кинетическую энергию. Наибольшее распространение получили:

**1.1. Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС)** являются крупномасштабными накопителями, позволяющим сохранять электроснабжение на длительный период времени. В период малого энергопотребления вода закачивается в расположенный выше бьеф (или водохранилище), и в необходимое время вода сбрасывается в нижний бьеф через гидростанцию. Данный способ не позволяет сохранять непосредственно энергию, но позволяет запастись потенциальный объем воды с получением возвратной энергии, причем на выход гидротурбин в номинальный режим обычно требуется не более 60 секунд. Общий КПД таких систем составляет 65-85%. Он зависит от разницы напора, количества подающих насосов и типа

используемых турбин. Сегодня распространены комбинированные системы, где мотор и генератор – одно и то же устройство [1]. Географически и климатически данный метод применим далеко не везде (в связи с различием климатических условий). В качестве нижней точки могут использоваться подземные хранилища либо водные акватории.

**1.2. Гидравлические аккумуляторы** – резервуары с несжимаемой жидкостью, на которую действует сила упругости пружины, либо газа. Существуют конструкции с накоплением потенциальной энергии за счет поднятия грузов. КПД данного вида накопителя достигает 95%, но если использовать газ, то КПД снижается из-за теплотерь при сжатии-расширении и составляет 81-84% [2].

**1.3. Аккумуляторы сжатого воздуха CAES** (compressed air energy storage). По своим масштабам данный метод сравним с ГАЭС. Компрессор нагнетает воздух (50-70 атм.) в подземные хранилища, а по мере необходимости сжатым воздухом раскручивают турбины генераторов. Узким местом данного способа является нагрев воздуха при сжатии до 150-170<sup>0</sup>С. Без системы рекуперации КПД составляет около 40%, при ее использовании можно получить 55%. Для подогрева выходящего воздуха иногда применяют обычные виды топлива. Если совместно использовать накопители тепловой энергии (например, расплавленную соль), то КПД может достичь 70%. Существует и метод хранения воздуха в специальных подводных мешках (Energy Bag) на глубине 600 метров. С системой хранения тепловой энергии его КПД составляет 75-80% [3].

**1.4. Супермаховик (FESS – Flywheel Energy Storage System)** получает электрическую энергию на входе и сохраняет ее в виде кинетической за счет электродвигателя. Вращение в закрытом кожухе с отсутствием сил трения достигается наличием магнитных подвесов и вакуумированием рабочего объема. Возврат электроэнергии в сеть осуществляется за счет преобразования инерционных сил в электрическую энергию с помощью электрогенератора. Основные достоинства – быстрое накопление энергии, надежность, низкая стоимость обслуживания, отсутствие негативного влияния на окружающую среду, возможность многократного полного разряда. Количество запасенной в супермаховике энергии квадратично зависит от скорости вращения, поэтому в современных образцах она достигает 16 тысяч оборотов в минуту с запасом в количестве 500 Вт·ч (1,8 МДж) на килограмм массы. Электрический КПД супермаховика на магнитных подшипниках достигает 85-98%, при использовании обычных подшипников – на 20-50% ниже за счет торможения силами трения в подшипниках [4].

**1.5. Железнодорожные накопители ARES** (Advanced Rail Energy Storage) основаны на использовании потенциальной энергии и являются достаточно громоздкими конструкциями. Железнодорожный состав на электротяге, груженный

бетоном и камнями массой несколько сот тонн поднимается в гору во время избытка электроэнергии и ожидает сигнала к потреблению. После поступления команды и начала движения состава, генератор мощностью несколько мегаватт возвращает энергию в сеть. Электрическая эффективность составляет более 68% [5].

**2. Электрические и электромагнитные накопители.**

**2.1. Конденсатор** сохраняет заряд на своих обкладках сразу в электрической форме и его КПД весьма высок – до 90%. Он надежен, однако удельная энергетическая емкость крайне невысока. Такой тип накопителей отлично подходит для сглаживания кратковременных провалов электропитания.

**2.2. Сверхпроводящий индуктивный накопитель SMES** (Superconducting Magnetic Energy Storage) хранит энергию в виде магнитного поля, созданного потоком постоянного тока в сверхпроводящей катушке, охлажденной ниже температуры сверхпроводимости. В заряженной катушке сила тока не снижается, и накопленная электроэнергия может храниться достаточно долго. При необходимости энергия возвращается в сеть. Потери в данном процессе вызывает только инвертор и система поддержания низкой температуры. Общий КПД может достигать 95% [6]. Однако в связи с высокой стоимостью сверхпроводников, SMES используют только для кратковременного хранения энергии, улучшая с его помощью качество электроснабжения.

**3. Электрохимические накопители.**

**3.1. Электрохимические аккумуляторы** представляют собой одну или несколько ячеек, в которых происходят обратимые электрохимические процессы, обеспечивающие многократные циклические накопление и отдачу энергии в сеть. Наиболее распространенными являются: свинцово-кислотный, никель-кадмиевый (NiCd), никель-металл-гидрид (NiMH), литий-ионный (Li-Ion), литий-ион полимерный (Li-Ion-Polimer). За последнее десятилетие сделаны значительные успехи в увеличении емкости и количестве циклов заряда-разряда, снижении саморазряда. Инверторы снижают общий КПД на 3-5%, а собственный КПД у новых типов аккумуляторов значительно различается. Для кислотных аккумуляторов КПД составляет 70-80% [7], Ni-Cd – 70-90%, Ni-MH – 65-80%, серно-натриевых при 350<sup>0</sup>С – 75-90% [9], на основе лития – от 60 до 95% [8]. Наиболее эффективными (КПД 99%) и надежными, но в то же время дорогостоящими, сегодня являются литий-железо-фосфатные LiFePO<sub>4</sub> аккумуляторы, имеющие наилучшие показатели по количеству циклов заряда-разряда и удельной плотности энергии [10].

**3.2. Проточные аккумуляторы (Flow battery)** являются переходом между аккумулятором и топливным элементом. Две жидкости с растворенными в них химическими элементами (например, цинк и бром) разделены между собой

мембраной и принудительно циркулируют в собственных объемах. КПД невысок и составляет 65-70%, но за счет размеров емкостей под электролит и долгого срока службы данный тип аккумуляторов имеет хорошие перспективы [11].

**3.3. Суперконденсаторы (ионисторы)** являются промежуточным звеном между мощными конденсаторами и слабыми электрохимическими аккумуляторами. Они характеризуются большим количеством циклов разряда-заряда с непродолжительным временем заряда по сравнению с химическими аккумуляторами. Их КПД составляет 90-95% [12].

**3.4. Ультрарабатарея (Ultrabattery)** представляет собой гибридный свинцово-кислотный аккумулятор и суперконденсатор. Благодаря суперконденсатору батарея способна быстро отдавать и принимать энергию, сглаживая перепады напряжения. Остальное время батарея работает как обычный аккумулятор. Данная батарея способна пережить миллионы циклов разряда-заряда. КПД составляет от 85 до 90% [13].

**4. Термальные накопители** позволяют сохранять низкую либо высокую температуру в изолированных контейнерах. Тепло или холод могут быть использованы тепловыми двигателями для получения электроэнергии. Электроэнергия может быть использована также на резистивный нагрев с КПД до 90%, или заморозку (30-70%). Несмотря на невысокий КПД, эти накопители экологичны и хорошо сочетаются с возобновляемой энергетикой. Термальные накопители подразделяют на две группы: низкотемпературные и высокотемпературные (свыше 175<sup>0</sup>С). Низкотемпературные накопители наиболее широко используются для кондиционирования крупных

зданий. Принцип работы заключается в том, что в отсутствие пиков или по ночному электротарифу охлаждается (или замораживается) большое количество воды. Через теплообменник холод будет отдаваться зданию уже в дневное время, снижая потребление электроэнергии. Существуют системы, позволяющие запасаться холодом на продолжительное время. КПД накопителей энергии составляет 40-50% [14]. Высокотемпературные накопители используют расплавленные соли, термомасла с объемными накопителями. Существуют также керамические накопители и аккумуляторы со сменой агрегатного состояния.

**5. Химические.**

**5.1. Водородная энергетика.** Этот тип накопителей продолжает завоевывать рынки, вызывая особый интерес с развитием возобновляемой энергетикой. За счет электролиза воды возможно получение водорода. По мере необходимости водород может быть окислен с преобразованием в электрическую энергию при помощи топливного элемента. Общий КПД данного процесса крайне невысок – 10-20%. Если же рационально использовать выделяемое топливным элементом тепло, то эффективность комбинированной системы можно поднять до 80%. Несомненным плюсом водородной энергетикой является возможность транспортировки водорода и широкий спектр его использования [15].

**5.2. Получение метана.** С помощью реакции Сабатье из водорода, полученного электролизом, углекислого газа и никеля, в качестве катализатора, при высокой температуре можно получить метан. КПД данного процесса определить проблематично [16].

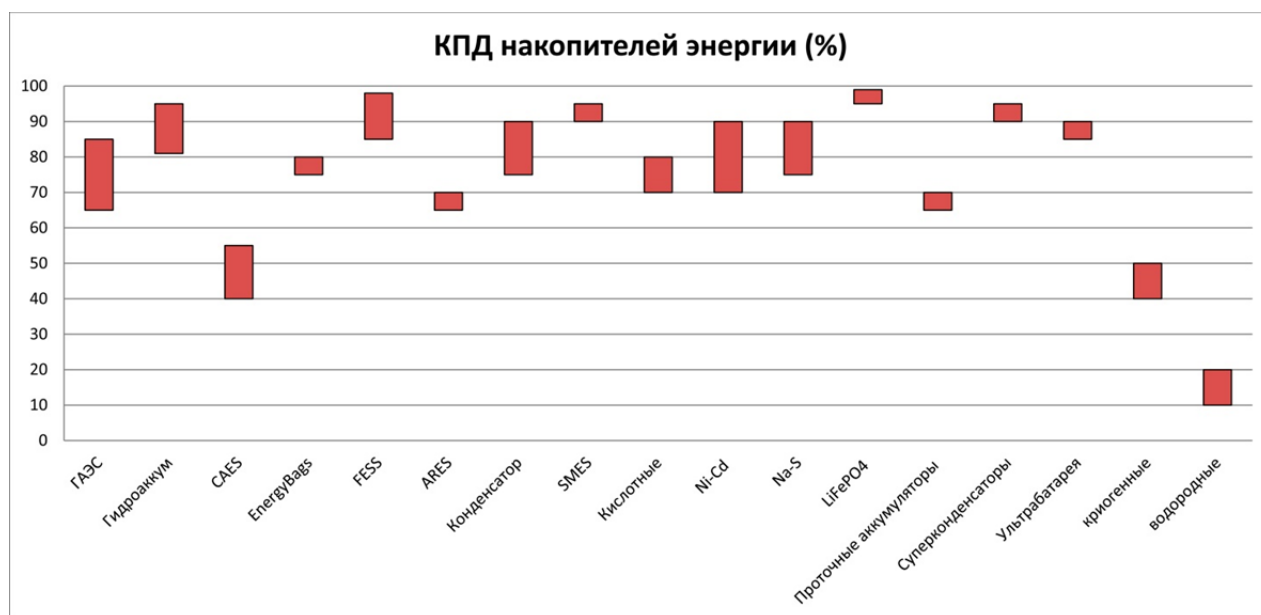


Рис.1. КПД рассмотренных накопителей энергии  
Fig. 1. Efficiency coefficient of the considered energy storages

## II. Применение аккумуляторов в электросетях

Применение аккумуляторов в локальных и магистральных сетях должно быть основано на проведении соответствующих расчетов емкости аккумулирующих систем. Если с локальными сетями расчеты являются относительно простыми [17], то для магистральных сетей во внимание должны приниматься прогнозы пиков энергопотребления [18]. Например, во время жаркого лета возрастает потребление энергии за счет включения множества кондиционеров, количество которых невозможно проконтролировать. А значит и невозможно оценить точно пик, приходящийся на конкретный месяц и день. Аналогично непредсказуемым может оказаться пик потребления, связанный с резким похолоданием в межсезонье, что вызывает рост использования теплонагревательных приборов. В связи с этим возможны варианты прогнозирования, основанные на соответствующих статистических данных. Многие из устройств аккумулирования энергии могут располагаться в непосредственной близости к объектам потребления – жилым домам, офисам, цехам и непосредственно на них [19], что снижает установочные и эксплуатационные расходы. В этом случае с применением гибридных аккумуляторных

схем, для максимально эффективного использования аккумуляторных устройств, необходимо применять методы оценки уровней мощности от каждой аккумулирующей системы, что связано с балансировкой компонентов гибридной системы и внутренних элементов подсистем [20].

## III. Заключение

В статье рассмотрены основные методы и средства накопления энергии. В диаграмму (рис. 1) сведены рассмотренные выше накопители. Наибольшей эффективностью (более 90%) обладают: сверхпроводящий индуктивный накопитель, супермаховик, суперконденсатор и Li-ion аккумуляторы на основе лития. Некоторые из накопителей используются уже десятки лет, другие находятся в начале своего развития. Очевидно, что с развитием технологий КПД устройств будет расти. Наиболее важными являются такие параметры, как коэффициент мощности, время заряда-разряда, продолжительность хранения и стоимость внедрения. Низкий коэффициент полезного действия может существенно увеличить стоимость проекта, поэтому экономически выгодным может оказаться более дорогой, но и более эффективный накопитель.

### Список литературы

1. Bent Sørensen. Renewable Energy: Its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy, and Planning Aspects. Academic Press. 2004.
2. Otte B., Stelling O., and Müller C. High Pressure Lightweight Hydraulic Fully Composite Piston Accumulators // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Fluid Power Conference. Dresden, 2012.
3. Сайт The Engineer.  
<http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/compressed-air-energy-storage-has-bags-of-potential/1008374.article>.
4. Сайт IHS Engineering360.  
[http://www.globalspec.com/learnmore/electrical\\_electronic\\_components/power\\_generation\\_storage/alternative\\_power\\_generators/flywheel\\_power\\_systems](http://www.globalspec.com/learnmore/electrical_electronic_components/power_generation_storage/alternative_power_generators/flywheel_power_systems).
5. Сайт ARES company.  
<http://www.aresnorthamerica.com/ares-rem-technology-application>.
6. Cheung K.Y.C; Cheung S.T.H., Navin De Silvia, Juvonen, Singh, Woo J.J. Large-Scale Energy Storage Systems. Imperial College London: ISE2. 2002/2003.
7. Сайт ЭлектроТехИнфо. [http://www.eti.su/articles/electrotehnika/electro-tehnika\\_312](http://www.eti.su/articles/electrotehnika/electro-tehnika_312).
8. Сайт Electropaedia. <http://www.mpoweruk.com>.
9. Сайт The Energy Storage Assotiation.  
[http://www.electricitystorage.org/tech/technologies\\_technologies.htm](http://www.electricitystorage.org/tech/technologies_technologies.htm).
10. Languang Lu. LiFePO<sub>4</sub> battery performances testing and analyzing for BMS. Department of Automotive Engineering, Tsinghua University ECG

### References

1. Bent Sørensen. Renewable Energy: Its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy, and Planning Aspects. Academic Press. 2004.
2. Otte B., Stelling O., and Müller C. High Pressure Lightweight Hydraulic Fully Composite Piston Accumulators // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Fluid Power Conference. Dresden, 2012.
3. Sajt The Engineer.  
<http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/compressed-air-energy-storage-has-bags-of-potential/1008374.article>.
4. Sajt IHS Engineering360.  
[http://www.globalspec.com/learnmore/electrical\\_electronic\\_components/power\\_generation\\_storage/alternative\\_power\\_generators/flywheel\\_power\\_systems](http://www.globalspec.com/learnmore/electrical_electronic_components/power_generation_storage/alternative_power_generators/flywheel_power_systems).
5. Sajt ARES company.  
<http://www.aresnorthamerica.com/ares-rem-technology-application>.
6. Cheung K.Y.C; Cheung S.T.H., Navin De Silvia, Juvonen, Singh, Woo J.J. Large-Scale Energy Storage Systems. Imperial College London: ISE2. 2002/2003
7. Sajt ElektroTehInfo. [http://www.eti.su/articles/electrotehnika/electro-tehnika\\_312](http://www.eti.su/articles/electrotehnika/electro-tehnika_312).
8. Sajt Electropaedia. <http://www.mpoweruk.com>.
9. Sajt The Energy Storage Assotiation.  
[http://www.electricitystorage.org/tech/technologies\\_technologies.htm](http://www.electricitystorage.org/tech/technologies_technologies.htm).
10. Languang Lu. LiFePO<sub>4</sub> battery performances testing and analyzing for BMS. Department of Automotive Engineering, Tsinghua University ECG

(Engine Control Group) Aug. 2011.

11. Сайт Greentech Media.

<http://www.greentechmedia.com/articles/read/unienergy-brings-next-gen-vanadium-flow-battery-to-commercial-scale>.

12. Panasonic Industrial Europe GmbH, Panasonic Electronic Devices Co., Ltd. Capacitor Business Unit "Panasonic Electric Double Layer Capacitors "Gold Capacitor". 2005.

13. Development of UltraBattery. Furukawa Review, No. 43. 2013.

14. Wen DS, Chen HS, Ding YL, et al. Liquid nitrogen injection into water: pressure build-up and heat transfer // Cryogenics. 2006. 46:740-8.

15. Phatiphat Thounthong. Fuel cell high power applications // IEEE Industrial Electronics Magazine. March, 2009.

16. Сайт ScienceDirect.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S10020710800381X>.

17. Мартянов А.С., Соломин Е.В. Система отопления на основе ветроэнергетической установки и теплового аккумулятора // Альтернативная энергетика и экология. М.: НИИЭС. 2011. № 2. С. 30-33.

18. Волович Г.И., Кирпичникова И.М., Соломин Е.В., Топольский Д.В., Топольская И.Г. Development of automation in power engineering using renewable energy sources (О развитии средств автоматизации в энергетике с использованием возобновляемых источников энергии) // Альтернативная энергетика и экология (Письма в международный научный журнал). М.: НИИЭС. 2014. № 1(123). С. 54-55.

19. Соломин Е.В. О размещении ветроэнергетических установок на зданиях и сооружениях // Альтернативная энергетика и экология. М.: НИИЭС. 2014. № 09(149). С. 42-45.

20. Возмилов А.Г., Соломин В.Е. и др. Анализ причин разбалансировки аккумуляторных батарей и др. // Альтернативная энергетика и экология. М.: НИИЭС. 2012. № 11(115). С.65-68.

(Engine Control Group) Aug. 2011.

11. Sajt Greentech Media.

<http://www.greentechmedia.com/articles/read/unienergy-brings-next-gen-vanadium-flow-battery-to-commercial-scale>.

12. Panasonic Industrial Europe GmbH, Panasonic Electronic Devices Co., Ltd. Capacitor Business Unit "Panasonic Electric Double Layer Capacitors "Gold Capacitor". 2005.

13. Development of UltraBattery. Furukawa Review, No. 43. 2013.

14. Wen DS, Chen HS, Ding YL, et al. Liquid nitrogen injection into water: pressure build-up and heat transfer // Cryogenics. 2006. 46:740-8.

15. Phatiphat Thounthong. Fuel cell high power applications // IEEE Industrial Electronics Magazine. March, 2009.

16. Sajt ScienceDirect.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S10020710800381X>.

17. Mart'ânov A.S., Solomin E.V. Sistema otopleniâ na osnove vetroènergetičeskoj ustanovki i teplovogo akumulâtora // Al'ternativnââ ènergetika i èkologiâ. М.: НИИЭС. 2011. № 2. С. 30-33.

18. Volovič G.I., Kirpičnikova I.M., Solomin E.V., Topol'skij D.V., Topol'skaâ I.G. Development of automation in power engineering using renewable energy sources (O razvitii sredstv avtomatizacii v ènergetike s ispol'zovaniem vozobnovlâemyh istočnikov ènergii) // Al'ternativnââ ènergetika i èkologiâ (Pis'ma v meždunarodnyj naučnyj žurnal). М.: НИИЭС. 2014. № 1(123). С. 54-55.

19. Solomin E.V. O razmešenii vetroènergetičeskih ustanovok na zdaniâh i sooruženiâh // Al'ternativnââ ènergetika i èkologiâ. М.: НИИЭС. 2014. № 09(149). С. 42-45.

20. Voźmilov A.G., Solomin V.E. i dr. Analiz pričin razbalansirovki akumulâtornyh batarej i dr. // Al'ternativnââ ènergetika i èkologiâ. М.: НИИЭС. 2012. № 11(115). С.65-68.

*Транслитерация по ISO 9:1995*

