

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Н.И. Смоленцев, С.А. Кондрин

Филиал Южно-Уральского государственного университета г. Миасс

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5775-2903,smolenzev@rambler.ru>

**Резюме:** Рассмотрены физические основы бесконтактного подвеса и его применение, в частности, в сверхпроводящем накопителе энергии и других перспективных устройствах, приборах. Предлагается перспективная конструкция сверхпроводящего электрокинетического накопителя электрической энергии (СПЭНЭ-1). Предложена топология многоуровневой электрической сети, в которой сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии СПЭНЭ-1 выполняет функцию оптимизирующего регулятора энергетических потоков в локальных электрических сетях.

**Ключевые слова:** альтернативная энергетика, сверхпроводящий накопитель энергии, ВТСП-технологии, бесконтактные подвесы, локальные электрические сети (ЛЭС), альтернативная энергетика, оптимизация энергетических потоков.

**Благодарности:** Работа, по результатам которой написана статья, выполнена в рамках Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0069 от 05.06.2014 г. (RFMEFI57714X0069), заказчик – Министерство образования и науки Российской Федерации.

## ELECTROKINETIC SUPERCONDUCTING ENERGY ACCUMULATOR FOR LOCAL ELECTRICAL GRIDS

N.I. Smolentsev<sup>1</sup>, S.A. Kondrin<sup>2</sup>

Branch of South Ural State University (NIU) in Miass, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5775-2903,smolenzev@rambler.ru>

**Abstract:** In this article the importance of using superconducting technologies in power industry together with SMART GRID based on the analysis of program documents and scientific works has been done, which will allow the maximum extent to solve its problems. The physical principles of contactless suspension and its application in the superconducting energy storage and other promising devices and appliances are examined. The perspective of a superconducting electrokinetic storage of electrical energy (SCESE-1) are offered. The topology of a multilevel electrical network in which the superconducting electrokinetic energy storage device SCESE-1 acts as a regulator of optimizing the energy flows in local power grids is proposed.

**Keywords:** alternative energy generation, cryogenic energy storage, high-temperature superconducting technology, contactless magnetic and electrostatic suspension, local electric network, energy flows optimization.

**Acknowledgments:** The work, based on the results of which the article was completed, was

*carried out within the framework of the Agreement on Granting a Subsidy No. 14.577.21.0069 of 05.06.2014 (RFMEFI57714X0069), the order-the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.*

### **Состояние вопроса**

В современной энергетике происходят глобальные изменения основных стереотипов мышления, обусловленные, с одной стороны, истощением углеводородных ресурсов (нефть, газ, уголь, торф), с другой стороны – все возрастающими потребностями в электрической энергии. Увеличение потребления электрической энергии – результат колоссальной электрификации человеческого общества и возрастания численности народонаселения планеты [1].

Все это диктует поиск новых подходов и требований к энергетике. Новая энергетика должна соответствовать экологической безопасности и требованиям современной экономики, среди которых:

- опережающий рост секторов экономики, отличающихся низкой энергоемкостью;
- приближение производства к потребителю продукции;
- использование широкого спектра источников энергии;
- внедрение технологий и оборудования с высокой энергоэффективностью;
- распространение интеллектуальных энергетических сетей и энергoinформационных систем;
- внедрение в технологию получения и использования электроэнергии еще одного звена – накопления и рекуперации электрической энергии [2, 3].

Внедрение технологии накопления электрической энергии целесообразно на всех уровнях напряжения и требует разработки унифицированного накопителя энергии с номинальным рядом технических характеристик, а также систем автоматического (интеллектуального) управления режимами работы накопителя энергии, информационных систем о состоянии энергетических потоков.

Особенное значение решения данных задач актуально для локальных электрических сетей, использующих альтернативные источники энергии, например солнечную или ветровую энергию.

Целью работы является разработка накопителя энергии и методов его применения в локальных электрических сетях.

### **Материалы и методы**

В качестве одного из наиболее перспективных инновационных направлений повышения энергоэффективности энергетики рассматриваются технологии прикладной сверхпроводимости, а именно комплексная разработка и создание производств широкого спектра электротехнического оборудования на основе новейших решений, связанных с применением уникальных материалов – высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Новые сверхпроводящие материалы позволяют решить в энергетике целый ряд проблем и поднять электротехническую отрасль на новый качественный уровень.

Электротехническое оборудование и силовые установки на основе эффекта сверхпроводимости смогут повысить показатели эффективности не только в энергетике, но и на железнодорожном и морском транспорте, в космической технике, нефтегазовой отрасли, обрабатывающей промышленности и др. Максимальный результат в энергетике может быть достигнут при сочетании сверхпроводниковых технологий и технологий *SMART GRID* (умные сети) [4]. Отечественные разработки высокотемпературных сверхпроводников находятся на разных стадиях – от фундаментальных исследований до эксплуатационных испытаний прототипов отдельных видов оборудования [5].

Комплекс проблем, вытекающих из вышеназванных тенденций, заставляет энергетиков искать альтернативные источники энергии, способные минимизировать

последствия использования углеводородной энергии на климат планеты. В настоящее время все более широкое применение находят системы энергоснабжения с использованием солнечной энергии, энергии ветра, биогаза и других возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Использование таких источников энергии отвечает социальным и экологическим требованиям, способствует снижению ее себестоимости. Как правило, возобновляемые источники электрической энергии работают в составе автономных сетей, получивших название локальных электрических сетей (ЛЭС).

Локальная электрическая сеть содержит, как правило, следующие основные элементы:

- альтернативный источник электроэнергии (или несколько);
- накопитель электрической энергии;
- блок преобразования и управления режимами работы источника электроэнергии и накопителя энергии;
- систему интеллектуального управления.

Важным элементом ЛЭС является накопитель энергии, выполняющий следующие функции в локальной сети [6,7]:

- повышение экономической эффективности сети;
- выравнивание электрической нагрузки при ее значительных колебаниях;
- использование в ЛЭС в качестве резервного источника электропитания;
- использование в ЛЭС в качестве средства коммерциализации энергетики.

Накопители энергии могут быть использованы не только в локальных электрических сетях с альтернативными источниками энергии (ветроустановки, солнечные панели и т.д.), но и в электротранспорте для повышения энергоэффективности силовых устройств (электропоездов, троллейбусов, гибридных силовых установок в автотранспорте и т.д.).

Анализ известных технических решений кинетических накопителей энергии позволяет сделать следующие выводы:

- наиболее перспективной конструкцией является кинетический накопитель энергии с применением пассивного, самоцентрирующегося, сверхпроводящего подвеса маховика-ротора. В качестве мотора-генератора целесообразно использовать синхронную электрическую машину с постоянными магнитами, а в качестве бесконтактной опоры ротора-маховика – магнитный подвес на основе постоянных магнитов и массивных сверхпроводников (ВТСП);
- применение подвеса данного типа исключает затраты энергии на поддержание вращающегося маховика в левитирующем положении, а использование синхронной электрической машины с постоянными магнитами и ферромагнитным статором делает конструкцию мотора-генератора компактной. Такая конструкция уменьшает потери на перемагничивание в режиме хранения энергии и исключает энергозатраты на создание магнитного поля возбуждения;
- применение бесконтактных магнитных ВТСП подвесов в кинетических накопителях энергии в вакууме существенно уменьшает механические потери за счет сил трения и увеличивает время хранения запасённой кинетической энергии.

Данная конструкция накопителя энергии представляется наиболее перспективной. Бесконтактный подвес в сверхпроводящих материалах известен давно (эффект Мейснера), но с открытием высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) резко возрос интерес к бесконтактному сверхпроводящему подвесу. Это объясняется развитием технологии высокотемпературных сверхпроводящих материалов, электроники, микропроцессорной техники.

Сверхпроводящий подвес находит применение для взвешивания и центрирования быстровращающихся роторов гиродинов и инерциальных маховиков систем ориентации

космических летательных аппаратов, инерционных накопителей энергии, в транспортных системах и т.д. [8].

### Результаты исследования

Сверхпроводящий бесконтактный подвес является пассивным, самоцентрирующимся, не содержит датчиков слежения за пространственным положением чувствительных элементов, силовых регулирующих устройств. Принцип работы бесконтактного сверхпроводящего подвеса основан на эффекте Мейснера или выталкивании внешнего магнитного поля из объема сверхпроводника, что эквивалентно диамагнитному «зеркальному» экрану. Это позволяет реализовать сверхпроводящий, бесконтактный самоцентрирующийся подвес маховика – ротора кинетического накопителя энергии.

В отличие от управляемого магнитного, данный тип подвеса не содержит активных систем регулирования бесконтактного подвеса, в частности следящих систем и регуляторов величины напряженности магнитного поля, характеризуется большой подъемной силой, саморегулированием в осевом направлении и направлении, перпендикулярном оси подвеса. Кроме того, сверхпроводящий бесконтактный подвес имеет хорошие демпфирующие свойства [9]. Общий вид сверхпроводящего электрокинетического накопителя энергии (СПЭНЭ-1) показан на рис. 1 [10]. Накопитель энергии достаточно компактен, удобен в эксплуатации, удовлетворяет требованию масштабируемости и предназначен для работы в различных областях техники. Например, в составе локальной электрической сети, содержащей альтернативные источники энергии, или в электротранспорте – для хранения и рекуперации электрической энергии.

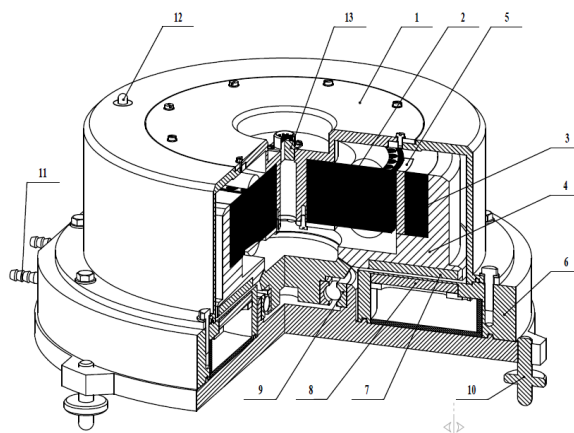


Рис. 1. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии (СПЭНЭ-1):

1 – синхронная электрическая машина; 2 – статор; 3 – магнитопровод статора; 4 – ротор-маховик; 5 – магниты возбуждения; 6 – криостат; 7 – опорные магниты подвеса; 8 – сверхпроводящие пластины; 9 – подшипник; 10 – опоры; 11 – штуцер системы охлаждения жидким азотом; 12 – ниппель; 13 – разъем

Накопитель энергии состоит из обращенной синхронной электрической машины 1 и криостата 6, заполненного жидким азотом. Статор синхронной машины 2 содержит магнитопровод с трехфазной обмоткой 3, ротор-маховик 4 с постоянными магнитами возбуждения 5 и опорными постоянными магнитами 7. На сопряженной поверхности криостата расположены сверхпроводящие пластины 8, охлаждаемые жидким азотом, заливаемым через штуцер 11.

В исходном положении ротор-маховик центрируется с помощью опорного подшипника 9. Внутренняя полость синхронного двигателя вакуумируется с помощью

ниппеля 12. Герметичный разъем 13 соединяет трехфазную обмотку статора синхронной машины с блоком управления режима ее работы. Для нивелирования отклонения накопителя энергии по горизонту служат регулируемые опоры 10.

Накопитель энергии работает следующим образом. При охлаждении сверхпроводящих пластин до температуры жидкого азота возникает эффект Мейснера, в результате которого осуществляется бесконтактный подвес ротора-маховика. При подключении накопителя энергии к источнику трехфазного питания начинается разгон ротора-маховика до номинальной частоты вращения, после чего накопитель энергии отключается от источника питания, а ротор-маховик вращается по инерции, сохраняя накопленную энергию.

Бесконтактный подвес и вакуум обеспечивают длительное сохранение энергии. При переключении обмоток статора на нагрузку накопитель энергии работает в режиме генерации электрической энергии, обеспечивая ее питание.

### Выводы

Накопитель энергии предназначен для работы в составе локальной электрической сети, которая содержит, как правило, следующие элементы (рис. 2):

- источники альтернативной энергии;
- накопитель электрической энергии;
- блок управления режимами работы источника электроэнергии и накопителя энергии;
- систему интеллектуального управления и контроля параметров.

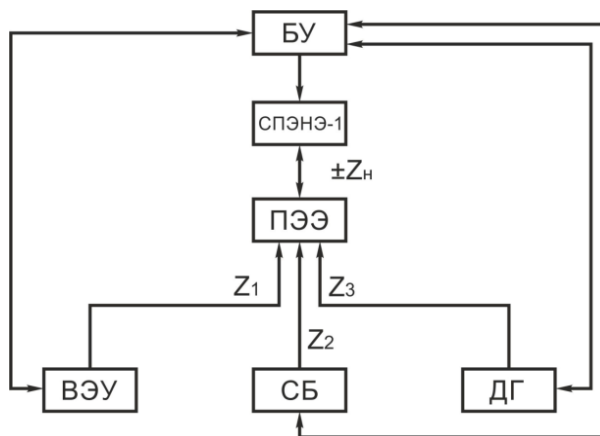


Рис. 2. Функциональная схема локальной электрической сети с накопителем энергии:

БУ – блок интеллектуального управления режимами работы источника электроэнергии и накопителя энергии; ПЭЭ – потребители электрической энергии; ВЭУ – ветроэлектростанция; СБ – солнечная батарея; ДГ – дизель-генератор;  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_n$  – энергетические потоки; СПЭНЭ-1 – сверхпроводящий электромеханический накопитель энергии

Локальная электрическая сеть с накопителем энергии работает следующим образом [11]. Потребители электрической энергии (ПЭЭ) подключены одновременно к различным источникам питания, в частности к ветроэнергетической установке (ВЭУ), солнечной батарее (СБ), дизель-генератору (ДГ). В блок управления поступают данные о текущих энергетических потоках  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ , а также данные о состоянии накопителя энергии СПЭНЭ-1. В зависимости от выбранного закона оптимизации по тому или иному параметру или группе параметров микропроцессор, встроенный в блок управления, оптимизирует распределение энергии между источниками энергии, накопителем энергии,

потребителями энергии таким образом, чтобы сохранялся постоянный баланс между потребленной и выработанной электрической энергией в любой момент работы локальной электрической сети.

Выбор режимов работы локальной сети во многом определяется особенностями конкретных потребителей: суточными, недельными и сезонными графиками электрической нагрузки, структурой и оборудованием существующих систем энергоснабжения, технической возможностью подключения к централизованным сетям. Кроме того, при выборе схемных решений необходимо учитывать характеристики собственно энергетической установки и других элементов схемы, климатические условия региона, возможности резервирования электрической мощности и многое другое.

В любой ЛЭС целесообразно использование накопителей энергии, позволяющих выровнять графики нагрузок в разные периоды суточного и сезонного спроса на электрическую энергию.

Применение накопителей энергии также позволит коммерциализировать производство электроэнергии, что повысит эффективность работы энергетических компаний и качество электроснабжения потребителей за счет компенсации недостаточной пропускной способности элементов системы, управления реактивной мощностью, регулирования напряжения, снижения стоимости электроэнергии и т.п.

#### **Заключение**

Таким образом, вопросы математического анализа и моделирования энергетических потоков в локальной сети имеют очень важное значение. Их решение позволит, при наличии соответствующего программного обеспечения, реализовать интеллектуальное управление работой элементов ЛЭС с целью оптимизации по заданным параметрам. В таком режиме можно достичь высоких технико-экономических показателей работы ЛЭС в сравнении с централизованными источниками, и преодолеть углеводородную зависимость энергетики.

#### **Литература**

1. Energy Technology Perspectives. In support of the "Group of Eight" of the Action Plan. Scenarios and Strategies to 2050. OECD / IEA, the WWF Russia (перевод на русский язык, ред. Часть 1. А. Кокорин, часть 2. Т. Муратова). – М.: 2007. – с.586.
2. Rasmussen C.N. Energy storage for improvement of wind power characteristics. -In: 2011 IEEE PowerTech (19-23 June 2011, Trondheim, Norway). - с.23-29.
3. 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. P. 2119–2125.
4. Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н.И. Смоленцев // Ползуновский вестник. 2013. № 4-2. С.176–181.
5. Прогноз научно-технологического развития России: 2030 Энергоэффективность и энергосбережение / под. ред. Л.М. Гохберга, С.П. Филиппова. Москва: Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2014. 52с.
6. Четошникова Л.М. Снижение колебаний энергии в локальных сетях с распределенной энергией / Л.М. Четошникова, Н.И. Смоленцев, С.А. Четошников, А.Н. Смоленцев // Электрика. 2013. № 5. С.37–39.
7. Смоленцев Н.И. Накопитель энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для альтернативной энергетики / Н.И. Смоленцев, Л.М. Четошникова // Электрика. 2011. № 5. С.38–41.
8. Полущенко О.Л. Роторная система с магнитными опорами на основе объемных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) / О.Л. Полущенко, Н.А. Нижельский, М.А.

Сысоев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 3. С.59–66.

9. Ковалев Л.К. Магнитные подвесы с использованием объемных ВТСП элементов для перспективных систем высокоскоростного наземного транспорта / Л.К. Ковалев, С.М. Конев, В.Н. Полтавец, М.В. Гончаров, Р.И. Ильясов // Труды МАИ. 2010. № 38. С.39.

10. Смоленцев Н.И. Разработка накопителя энергии на основе высокотемпературной сверхпроводимости и перспективы его применения в локальных электрических сетях / Смоленцев Н.И., Четошникова Л.М., Бондарев Ю.Л. // Ползуновский вестник. 2015. № 1. С.73–77.

11. Смоленцев Н.И. Выбор и обоснование математической модели оптимизации энергетических потоков в многоуровневых локальных электрических сетях / Н.И. Смоленцев, С.А. Четошников // Ползуновский вестник. 2015. № 3. С.134–141.

#### Авторы публикации

**Смоленцев Николай Иванович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика» Электротехнического факультета Южно-Уральского государственного университета. E-mail: smolentsev@rambler.ru.

**Кондрин Сергей Александрович** – соискатель ученой степени к.т.н. на кафедре «Автоматика» Электротехнического факультета Южно-Уральского государственного университета. E-mail: kondrinsa@mail.ru.

#### References

1. Energy Technology Perspectives. In support of the "Group of Eight" of the Action Plan. Scenarios and Strategies to 2050. OECD / IEA, the WWF Russia (Translation into Russian, ed., Part 1. A. Kokorin, part 2. T. Muratova). - Moscow: 2007. - p.586.

2. Rasmussen C.N. Energy storage for improvement of wind power characteristics. -In: 2011 IEEE PowerTech (19 -23 June 2011, Trondheim, Norway). - p.23-29.

3. 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. P. 2119–2125.

4. Smolentsev N.I. Energy accumulators in local electrical networks / N.I. Smolentsev // Polzunovsky Herald. - 2013. - No. 4-2. - P.176-181.

5. The forecast of scientific and technological development of Russia: 2030 Energy efficiency and energy saving / under. Ed. L.M. Gohberg, S.P. Filippov. - Moscow: Ministry of Education and Science of the Russian Federation, National Research University "Higher School of Economics", 2014. - 52c

6. Cetoshnikova LM Reduction of energy oscillations in local networks with distributed energy. Cetoshnikova, N.I. Smolentsev, S.A. Cetoshnikov, A.N. Smolentsev // Electrics. - 2013. - No. 5. - P.37-39.

7. Smolentsev N.I. Energy storage on the basis of high-temperature superconductors (HTSC) for alternative energy / N.I. Smolentsev, LM Cetoshnikova // Electrics. - 2011. - No. 5. - P.38-41.

8. Polushchenko OL Rotary system with magnetic bearings based on volumetric high-temperature superconductors (HTSC) / O.L. Polushchenko, N.A. The Nizhny Novgorod, M.A. Sysoev // News of Higher Educational Establishments. Mechanical engineering. - 2011. - No. 3. - P.59-66.

9. Kovalev L.K. Magnetic suspensions with the use of volumetric high-temperature superconductors for advanced high-speed land transport systems / L.K. Kovalev, S.M. Konev, V.N. Poltavets, M.V. Goncharov, R.I. Ilyasov // Proceedings of the MAI. - 2010. - No. 38. - P.39.

10. Smolentsev N.I. Development of energy storage on the basis of high-temperature superconductivity and the prospects for its application in local electrical networks / Smolentsev NI, Cetoshnikova LM, Bondarev Yu.L. // Polzunovsky Herald. - 2015. - No. 1. - P.73-77.

11. Smolentsev N.I. Choice and justification of the mathematical model of optimization of energy flows in multilevel local electrical networks / NI. Smolentsev, S.A. Cetoshnikov // Polzunovsky Herald. -

**Authors of the publication**

**Smolencev Nikolaj Ivanovich** – Cand. Sci. (Techn.), docent of department Automation of Electrical Engineering Faculty of South Ural State University. Email: smolenzev@rambler.ru.

**Kondrin Sergej Aleksandrovich** – competitor of a scientific degree of Cand. Sci. (Techn.) at the department Automation of Electrical Engineering Faculty of South Ural State University.

E-mail: kondrinsa@mail.ru.

***Поступила в редакцию***

***01 ноября 2016 г.***