

УДК 621.311.1+ 621.33

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ СПЭНЭ-1

Н.И. Смоленцев, А.М. Казанцев

Приводятся результаты разработки экспериментального образца сверхпроводящего электрокинетического накопителя энергии (СПЭНЭ-1). Накопитель энергии предназначен для работы в составе локальных электрических сетей, электротранспорта и других областях. Работа выполнена в рамках Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0069 от 05.06.2014 г. (RFMEFI57714X0069), заказчик – Министерство образования и науки Российской Федерации.

Ключевые слова: локальная электрическая сеть, накопитель энергии, высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП), источник электроэнергии, интеллектуальная система управления.

В настоящее время во всем мире растет применение системы энергообеспечения с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ): энергии солнца, ветра, биогаза и других. Использование таких источников энергии отвечает социальным и экологическим требованиям, способствует снижению ее себестоимости.

Как правило, возобновляемые источники электрической энергии работают в составе автономных сетей, получившие название локальных электрических сетей (ЛЭС) или интеллектуальных электрических сетей Smart Grid [1–6]. Локальные электрические сети содержат источник электроэнергии, потребителя электрической энергии, накопитель электрической энергии, систему интеллектуального управления режимами работы источника электроэнергии и накопителя энергии. Локальные электрические сети могут быть объединены в многоуровневые сети, получившие название Энернет [7, 8]. Важнейшим элементом в таких электрических сетях является накопитель энергии, выполняющий следующие функции:

- повышает экономическую эффективность сети;
- выравнивает электрическую нагрузку при ее значительных колебаниях;
- служит резервным источником электропитания;
- является коммутирующим элементом в многоуровневых ЛЭС;
- служит средством коммерциализации энергетики.

Накопители энергии могут быть использованы не только в локальных электрических сетях с альтернативными источниками энергии (ветроустановки, солнечные панели и т.д.), но также – в электротранспорте для повышения энергоэффективности силовых устройств (электropоездов, троллейбусов, гибридных силовых установок в автотранспорте и т.д.) [9–12].

Анализ известных технических решений накопителей энергии позволяет сделать следующие выводы [13, 14]:

– наиболее перспективной конструкцией является накопитель энергии с применением пассивного самоцентрирующегося сверхпроводящего подвеса ротора-маховика. В качестве мотора-генератора целесообразно использовать синхронную электрическую машину с постоянными магнитами, а в качестве бесконтактной опоры ротора-маховика – сверхпроводящий, 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 запасенной кинетической энергии до нескольких лет. Данная конструкция накопителя энергии выбрана в качестве базовой.

Принцип работы накопительного устройства на ВТСП основан на эффекте выталкивания магнитного поля из объема сверхпроводника, что эквивалентно диамагнитному «зеркальному» экрану. Это позволяет создать бесконтактный самоцентрирующийся подвес маховика кинетического накопителя энергии. В отличие от управляемого электростатического и магнитного подвесов данный тип подвеса не содержит активных систем регулирования, в частности, следящих систем и регуляторов напряженности магнитного или электрического полей.

Сверхпроводящий бесконтактный подвес характеризуется большой подъемной силой, саморегулированием в осевом направлении подвеса и направлении, перпендикулярном оси подвеса. Кроме того, сверхпроводящий бесконтактный подвес имеет хорошие демпфирующие свойства. Общий вид разработанного накопителя энергии приведен на рис. 1.

Накопитель энергии предназначен для работы в составе локальной электрической сети, содержащей альтернативные источники энергии, и служит для хранения и рекуперации электрической энергии. 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.

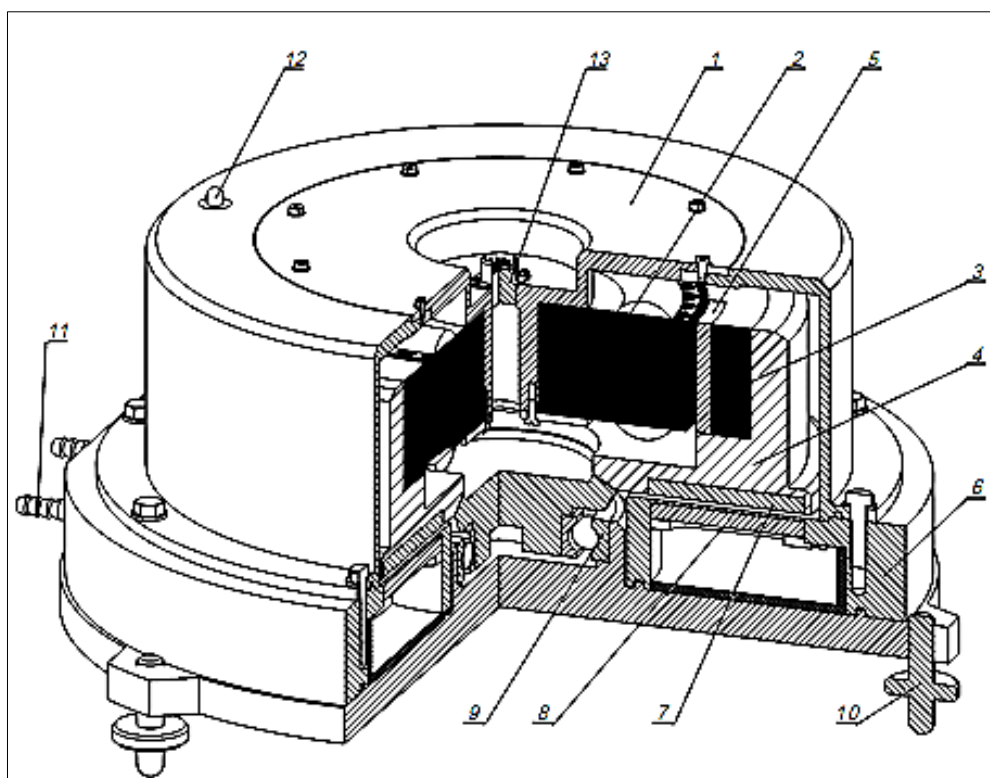


Рис. 1. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии (СПЭНЭ-1):
1 – синхронная электрическая машина, 2 – статор, 3 – магнитопровод статора,
4 – ротор-маховик, 5 – магниты возбуждения, 6 – криостат, 7 – опорные магниты
подвеса, 8 – сверхпроводящие пластины, 9 – подшипник, 10 – опоры,
11 – штуцер системы охлаждения жидким азотом, 12 – ниппель, 13 – разъем

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 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. Накопитель энергии имеет следующие расчетные технические характеристики:

- запасенная энергия.....4 МДж;
- время накопления энергии.....5–6 мин;
- время отдачи энергии.....5–8 мин;
- К.П.Д.95–97 %.

Важнейшей характеристикой накопителя энергии является жесткость и устойчивость бесконтактного сверхпроводящего подвеса ротора-маховика. Расчет электромагнитных полей и сил левитации в сверхпроводящем подвесе зависит от выбора геометрической конфигурации активных элементов сверхпроводящего подвеса – сверхпроводящих элементов и постоянных магнитов.

Выбор той или иной конфигурации определяется требованиями к жесткости подвеса и условиям работы накопителя энергии. Например, в стационарном режиме на подстанции или в динамическом режиме на подвижном основании (электротранспорт, морское судно и т.д.). Схема расположения активных элементов сверхпроводящего подвеса в силовом блоке приведена на рис. 2. Конфигурация сверхпроводящего подвеса и его расчетная схема приведена на рис. 3.

Силовой блок сверхпроводящего подвеса образован 12 секторальными постоянными магнитами и 12 ВТСП элементами секторальной формы.

С теоретической точки зрения расчет жесткости сверхпроводящего подвеса сводится к решению обобщенной задачи Неймана-Дирихле при определенных допущениях [15]:

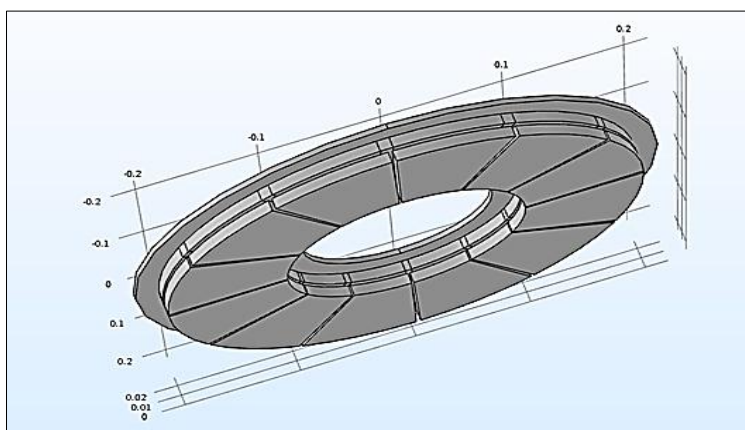


Рис. 2. Моделирование силового блока
в программе COMSOL Multiphysics

- длина основания магнитного подвеса много больше его поперечных размеров, что позволяет перейти к двумерной постановке задачи;
- магнитный момент постоянного магнита (ПМ) коллинеарен вертикально оси подвеса u и постоянен в объеме магнита $M (M_x, M_y) = M(0, M_0)$;

- структура объемного сверхпроводящего элемента (ВТСП) считается однодоменной (монокристаллической). В этом случае взаимодействие ПМ и ВТСП будет определяться плотностью критических токов J_S .
- принимается, что толщина биновских токовых слоев δ мала по сравнению с поперечными размерами ВТСП элемента L_S , $\delta \ll L_S$.
- смещения центра масс ротора-маховика в динамическом режиме малы по сравнению с его размерами.

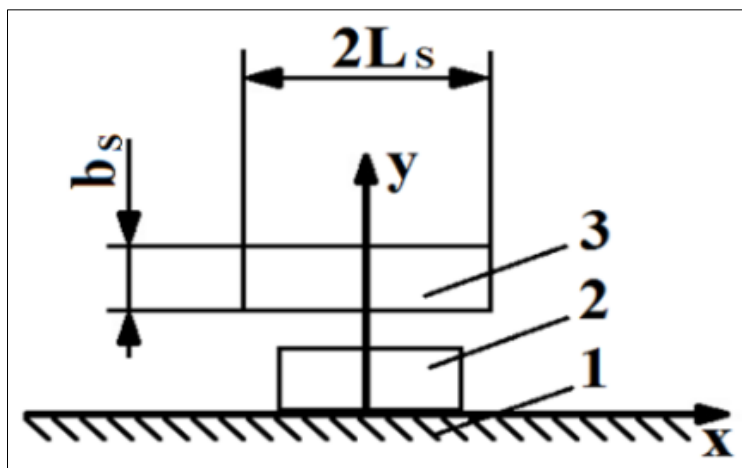


Рис. 3. Конфигурация сверхпроводящего подвеса и его расчетная схема: 1 – ферромагнитного основание, 2 – постоянный магнит (ПМ), 3 – сверхпроводящий элемент (ВТСП)

С учетом вышеназванных допущений и результатов работы [15], были получены выражения для удельной силы левитации по $f_y(x)$ и полной силы $F_y(x)$ для упрощенной двухмерной модели. Затем путем интегрирования по всем 12 сегментам силового блока получена зависимость полной силы $F_y(x)$ от величины смещения x . Результаты расчета приведены на рис. 4.

Среднее значение коэффициента жесткости подвеса составило $C_{cp} = 2,8 \times 10^5$ Н/м. Например, при массе ротора-маховика $m = 40$ кг, его смещение Δh из центра подвеса составит 1,42 мм при величине рабочего зазора $h = 3$ мм. Для исследования динамической устойчивости ротора-маховика при воздействии случайных внешних возмущений было проведено компьютерное моделирование в программе MATLAB/Simulink/Multibody при следующих параметрах внешнего воздействия: дисбаланс центра масс ротора-маховика $d = 8,25 \times 10^{-3}$ м, частота воздействия $f = 5$ Гц, амплитуда – 2 Н/м. Угловая скорость вращения ротора-маховика $\Omega = 12000$ об/мин. Компьютерная модель внешних воздействий представлена на рис. 5.

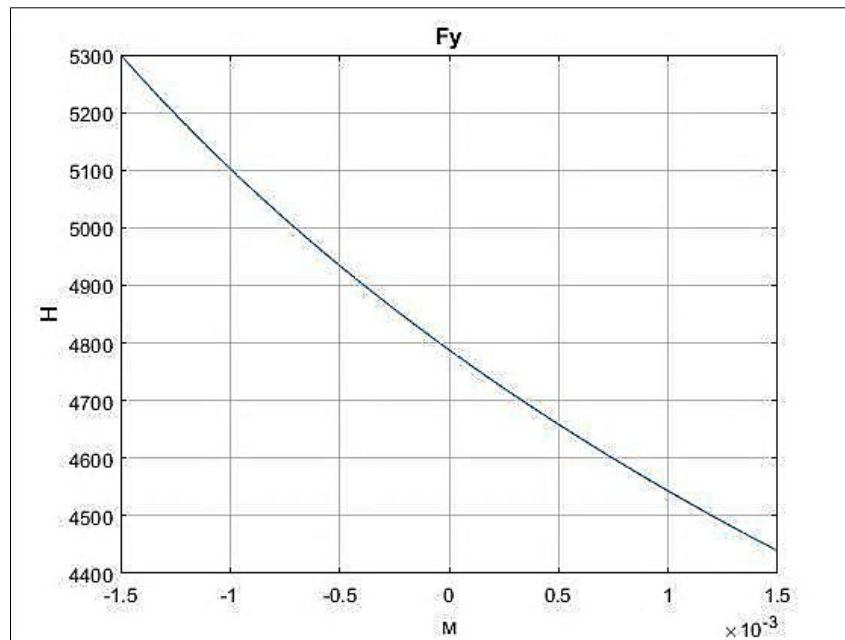


Рис. 4. Расчетная зависимость полной силы левитации ротора-маховика от величины смещения из положения равновесия

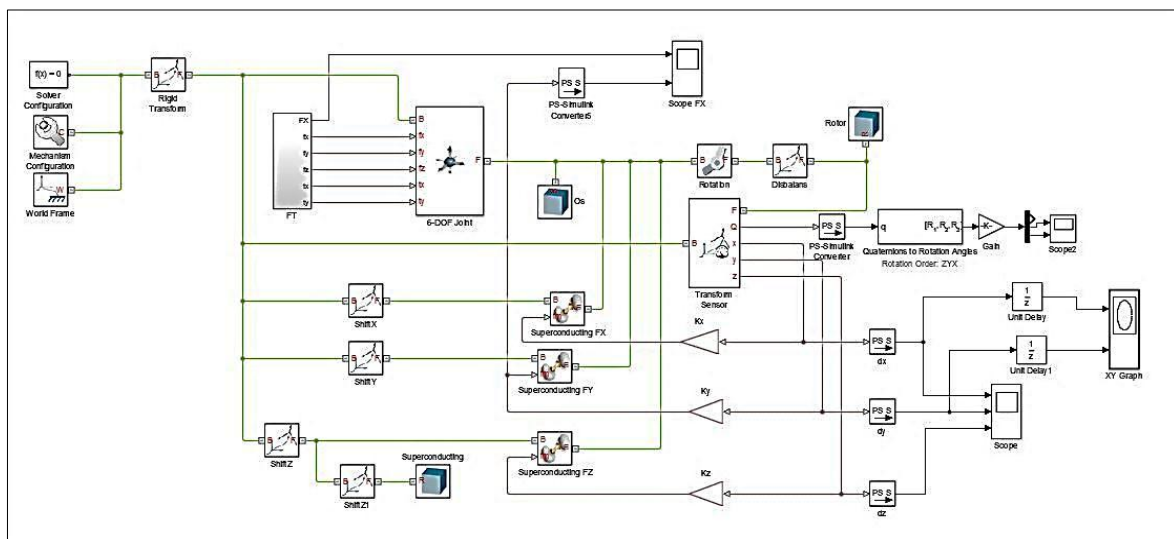


Рис. 5. Компьютерная модель внешних воздействий на вращающийся ротор-маховик при наличии дисбаланса центра масс

Внешние воздействия приводят к колебаниям оси ротора-маховика и изменению номинальных рабочих зазоров между элементами силового блока. Результаты моделирования приведены на рис. 6. Максимальная амплитуда колебаний при заданном дисбалансе центра масс ротора-маховика составляет 1– 1,5 мм, что при рабочем зазоре $h = 3$ мм вполне допустимо.

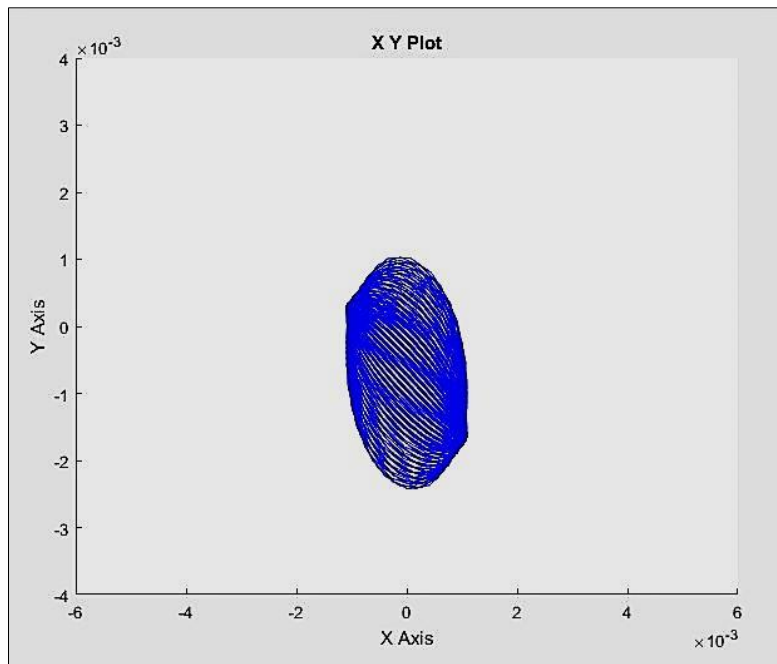


Рис. 6. Амплитуда колебаний ротора-маховика при внешних воздействиях

Заключение. Предложена и обоснована конструкция электрокинетического накопителя энергии с бесконтактным подвесом ротора-маховика. Произведен расчет силовых характеристик бесконтактного сверхпроводящего подвеса и определен его коэффициент жесткости. Произведено компьютерное моделирование ротора-маховика в динамическом режиме с учетом дисбаланса центра масс и случайных внешних возмущений. Из результатов моделирования следует, что жесткость подвеса достаточна для ограничения амплитуды колебаний в пределах рабочего зазора силовых элементов.

Полученные результаты позволяют уточнить и оптимизировать конструкторскую документацию, а также создают расчетную базу для разработки и конструирования подобных устройств с бесконтактным подвесом активного элемента.

Библиографический список

1. Кувшинов, В.В. Некоторые результаты исследования комбинированной установки для фототермопреобразования солнечной энергии / В.В. Кувшинов, В.А. Сафонов // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. – Вып. 3 (31). – С. 158–163.
2. Кирпичникова, И.М. Виброгасители мачт сверхмалых вертикально-осевых ветроэнергетических установок / И.М. Кирпичникова, Е.В. Соломин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2010. – № 14 (190). – С. 78–81.

3. Харченко, В.В. Солнечная электростанция для параллельной работы / В.В. Харченко, В.А. Гусаров, В.А. Майоров, В.А. Панченко и др. // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 2. – С. 37–43.
4. Гашо, Е.Г. Пути и проблемы модернизации распределенных энерготехнологических систем регионов / Е.Г. Гашо // Электрика. – 2011. – № 2. – С. 12–17.
5. Чиндяскин, В.И. Разработка компьютерной модели для расчёта эффективной локальной системы электроснабжения сельских поселений / В.И. Чиндяскин, Е.Ф. Киселева // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2009. – Т. 2. – № 24-1. – С. 88–92.
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. Patterson, B. The new role of buildings in the 21st century. Enernet (Internet of energy). Greenbuild International Conference, New Orleans, USA, October 2014.
8. Смоленцев, Н.И. Локальная электроэнергетическая сеть в технологической платформе Smart Grid / Н.И. Смоленцев, Л.М. Четошникова и др. // Электрика. – 2011. – № 8. – С. 25–28.
9. Смоленцев, Н.И. Накопитель энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для альтернативной энергетики / Н.И. Смоленцев, Л.М. Четошникова и др. // Электрика. – 2011. – № 5. – С. 38–41.
10. Алексеев, Б.А. Применение накопителей энергии в энергетике / Б.А. Алексеев // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2005. – № 2.
11. Магнитные подвесы с использованием объемных ВТСП элементов для перспективных систем высокоскоростного наземного транспорта / Л.К. Ковалев и др. // Труды МАИ. – 2010. – № 38. – С. 39.
12. Смоленцев, Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н.И. Смоленцев // Ползуновский Вестник. – 2013. – № 4-2. – С. 176–181.
13. Смоленцев, Н.И. Разработка накопителя энергии на основе высокотемпературной сверхпроводимости и перспективы его применения в локальных электрических сетях / Н.И. Смоленцев, Л.М. Четошникова, Ю.Л. Бондарев // Ползуновский вестник. – 2015. – № 1. – С. 73–77.
14. Смоленцев, Н.И. Сверхпроводящие накопители энергии в современной энергетике. Монография / Н.И. Смоленцев. – Миасс: ЭТФ. – URL: http://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=643063/2015. – 31 с.
15. Ковалев, Л.К. Сверхпроводниковые магнитные опоры с объемными ВТСП элементами / Л.К. Ковалев, С.М. Конев, С.А. Ларионов, В.Н. Полтавец // Электричество. – 2003. – № 6.

[К содержанию](#)