



РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ СПЭНЭ-1

Смоленцев Н.И.¹, Бондарева В.Ю.²

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия
uralcm@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке управляемого накопительного комплекса (НК) электрической энергии для современной распределённой энергетики на основе передовых инновационных технологий. Научная новизна состоит в применении в НК сверхпроводящего электрохимического накопителя энергии СПЭНЭ-1 модульной конструкции. Модульная конструкция является новой и защищена тремя патентами (2791661, 2760784, 2601590). ЦЕЛЬ. Провести экспериментальные исследования, подтвердить основные технические решения, заложенные в конструкцию НК и разработать конструкторско-технологическую документацию (КТД). МЕТОДЫ. При решении поставленных задач применялись экспериментальные методы, подтверждающие теоретические исследования и расчеты узлов и элементов НК, реализованные средствами MatLab®. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, научная новизна, пути и этапы разработки накопителя энергии СПЭНЭ-1 НК. Работы проведены в три этапа. На первом этапе разработаны функциональная структура накопительного комплекса, математическая модель работы накопительного комплекса в составе электрической сети, методы расчета параметров и управления энергетическими потоками в электрических сетях различной топологии, а также ЭКД на экспериментальный образец накопительного комплекса и системы управления. На втором этапе изготовлен экспериментальный образец системы управления накопительным комплексом, и проведена наладка и тестирование экспериментального образца системы управления накопительного комплекса. Разработаны программа и методика проведения испытаний экспериментального образца накопительного комплекса, включая систему управления, подготовлены методические материалы проведения комплексных испытаний экспериментальных образцов и рабочая документация для модернизации испытательной установки. На третьем этапе работы выполнены: а) сборка, наладка и тестирование НК для проведения совместных комплексных испытаний экспериментальных образцов; б) определение оптимальных параметров НК, основных характеристик и диапазона их изменений; в) экспериментальные испытания критических параметров сверхпроводящего подвеса ротора-маховика экспериментального образца накопительного комплекса и его системы управления; г) экспериментальные комплексные испытания экспериментальных образцов; д) корректировка КТД по результатам технологии изготовления и экспериментальных комплексных испытаний. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты, полученные в работе, имеют важное значение для развития распределённой энергетики в РФ. Разработана ЭКД накопительного комплекса и испытательной базы, а также нормативные документы для эксплуатации накопительного комплекса в различных системах электроснабжения. НК может использоваться в тяговых электросистемах электротранспорта, распределённых электрических сетях с альтернативными источниками питания. Особенно эффективно применение разработанного НК в системах электроснабжения, работающих в условиях низких температур, например, Арктики, Космоса.

Ключевые слова: накопитель энергии; ЭНЕРНЕТ; локальная электрическая сеть; распределённая генерация; управление потоками энергии; распределение мощности.

Благодарности: Работа, по результатам которой написана статья, выполнена в рамках гос. задания № 071-03-2024-008 от 19.01.2024 г.

Для цитирования: Смоленцев Н.И., Бондарева В.Ю. Результаты разработки и экспериментальных исследований накопительного комплекса с накопителем энергии СПЭНЭ-1 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 121-131. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131.

RESULTS OF DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STORAGE COMPLEX WITH THE ENERGY STORAGE UNIT SPENE-1

Smolentsev N.I.¹, Bondaryeva V.Y.²

¹Siberian State University of Telecommunications and Information, Novosibirsk, Russia

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

uralcm@mail.ru

Abstract: The RELEVANCE of the study is to develop a controlled storage complex (SC) of electrical energy for modern distributed energy based on advanced innovative technologies. **OBJECTIVE.** To conduct experimental studies, confirm the main technical solutions incorporated into the SC design and develop design and technological documentation (DTD). **METHODS.** When solving the tasks, experimental methods were used to confirm theoretical studies and calculations of SC units and elements, implemented by MatLab®. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, the ways and stages of developing the SPENE-1 SC energy storage device. The work was carried out in three stages. At the first stage, the functional structure of the storage complex, a mathematical model of the storage complex operation as part of an electrical network, methods for calculating parameters and controlling energy flows in electrical networks of various topologies, as well as the ECD for an experimental sample of the storage complex and the control system were developed. At the second stage, an experimental sample of the storage complex control system was manufactured and the experimental sample of the storage complex control system was adjusted and tested. A program and methodology for testing an experimental sample of the storage complex, including the control system, have been developed; methodological materials for conducting comprehensive tests of experimental samples and working documentation for upgrading the test facility have been prepared. At the third stage of the work, the following was performed: a) assembly, adjustment and testing of the NC for conducting joint comprehensive tests of experimental samples; b) determination of the optimal parameters of the NC, the main characteristics and the range of their changes; c) experimental tests of the critical parameters of the superconducting suspension of the rotor-flywheel of the experimental sample of the storage complex and its control system; d) experimental comprehensive tests of experimental samples; e) adjustment of the KTD based on the results of the manufacturing technology and experimental comprehensive tests. **CONCLUSION.** The results obtained in the work are of great importance for the development of distributed energy in the Russian Federation. The ECD of the storage complex and the test base, as well as regulatory documents for the operation of the storage complex in various power supply systems have been developed. The NC can be used in traction electric systems of electric transport, distributed electric networks with alternative power sources. The application of the developed NC is especially effective in power supply systems operating in low temperature conditions, for example, in the Arctic and space.

Keywords: energy storage; ENERNET; local power grid; distributed generation; energy flow management; power distribution.

Acknowledgments: The work, based on the results of which the article was written, was carried out within the framework of state assignment No. 071-03-2024-008 dated 01/19/2024.

For citation: Smolentsev N.I., Bondaryeva V.Y. Results of development and experimental studies of the storage complex with the energy storage unit SPENE-1. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 121-131. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131.

Введение (Introduction)

Основой накопительного комплекса (НК) является накопитель энергии. Накопитель энергии – новый вид электротехнического оборудования, функции и области применения которого непрерывно расширяются. Перспективным направлением применения НК являются сетевые технологии ЭНЕРНЕТ, где с помощью накопителей энергии и энергетических маршрутизаторов организуется двустороннее движение энергетических потоков в сильно-связанных электрических сетях. Это позволяет регулировать дисбаланс выработанной и потребленной энергии в распределённой энергосистеме в реальном режиме времени, повышать энергосбережение и энергоэффективность [1]. Основой сетевых технологий ЭНЕРНЕТ является пакетный способ передачи электрической энергии, реализуемый с помощью накопителей энергии [2]. Поэтому разработка управляемого НК с перспективным накопителем электрической энергии для современной распределённой энергетики является актуальной задачей.

Известно много типов накопителей энергии, использующих разные физические законы для накопления и сохранения энергии. Особое место среди них занимают сверхпроводящие накопители энергии. Это обусловлено высокими удельными характеристиками накопителей энергии этого типа (удельная энергоемкость и мощность) при азотных температурах и перспективой создания сверхпроводящих накопителей на базе «комнатных» сверхпроводников, экологичностью, широким диапазоном применения [3, 4]. Среди сверхпроводящих накопителей энергии сверхпроводящие электромеханические накопители с бесконтактным подвесом ротора-маховика отличаются технологичностью, управляемостью, высокими удельными характеристиками, широким диапазоном областей применения. Цель данной работы – представить результаты разработки и экспериментальных исследований НК, содержащий сверхпроводящий электромеханический накопитель энергии СПЭНЭ-1 модификации V1 модульной конструкции, обладающий новизной, защищенной тремя патентами (2791661,2760784,2601590). Авторы ставят задачу показать приемлемые подходы к созданию многофункционального НК с перспективным накопителем энергии, определить области его применения, дальнейшие направления работы.

Материалы и методы (Materials and methods)

Работы были проведены в три этапа. На первом этапе НИОКР были разработаны функциональная структура электромеханического накопителя энергии накопительного комплекса (НК), мат. модель функционирования НК в электрической сети, методы расчета параметров и управления энергетическими потоками в электрических сетях различной топологии, а также ЭКД на экспериментальный образец накопительного комплекса и системы управления. На рисунке 1 показан накопитель энергии СПЭНЭ-1 в разрезе.

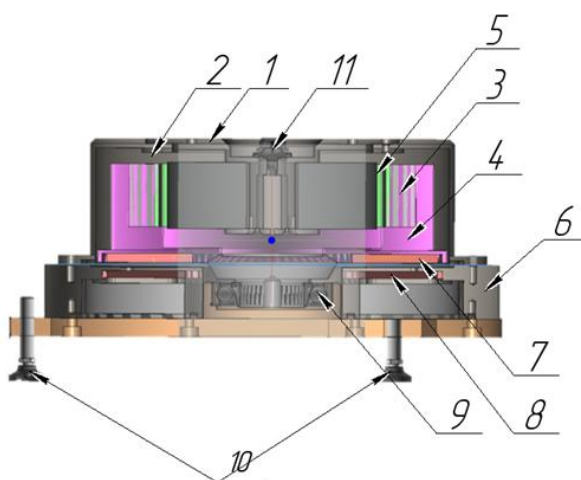


Рис. 1. Накопитель энергии СПЭНЭ-1 в разрезе:
1 – синхронная электрическая машина, 2 – статор,
3 – магнитопровод статора, 4 – ротор-маховик,
5 – магниты возбуждения, 6 – криостат,
7 – опорные магниты подвеса,
8 – сверхпроводящие пластины, 9 – подшипник,
10 – опоры, 11 – разъем

Fig. 1. Energy storage device SPENE-1 in section:
1 – synchronous electric machine, 2 – stator,
3 – stator magnetic circuit, 4 – rotor-flywheel,
5 – excitation magnets, 6 – cryostat, 7 – support
magnets of suspension, 8 – superconducting plates,
9 – bearing, 10 – supports, 11 – connector

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На этом же этапе изготовлены компоненты и основные узлы экспериментального образца накопительного комплекса и системы управления. Проведены теоретические исследования динамической устойчивости, теплового баланса и критических параметров сверхпроводящего подвеса.

На втором этапе НИОКР были поставлены новые задачи и получены следующие результаты: изготовлен экспериментальный образец системы управления накопительным комплексом и проведена наладка и тестирование экспериментального образца системы управления накопительного комплекса. Затем разработаны программа-методика проведения испытаний экспериментального образца НК, включая систему управления, подготовлены методические материалы проведения комплексных испытаний экспериментальных образцов и рабочая документация для модернизации испытательной установки.

Решение задач первого и второго этапов позволило перейти к задачам третьего этапа:

- а) сборка, наладка и тестирование накопительного комплекса для проведения совместных комплексных испытаний экспериментальных образцов;
- б) определение оптимальных параметров НК, основных характеристик и диапазона их изменений;
- в) экспериментальные испытания критических параметров бесконтактного подвеса ротора-маховика экспериментального образца накопительного комплекса и его системы управления;
- г) экспериментальные комплексные испытания экспериментальных образцов;
- д) корректировка конструкторско-технологической документации по результатам технологии изготовления и экспериментальных комплексных испытаний. Состав и блок-схема управления НК приведены на рисунке 2.

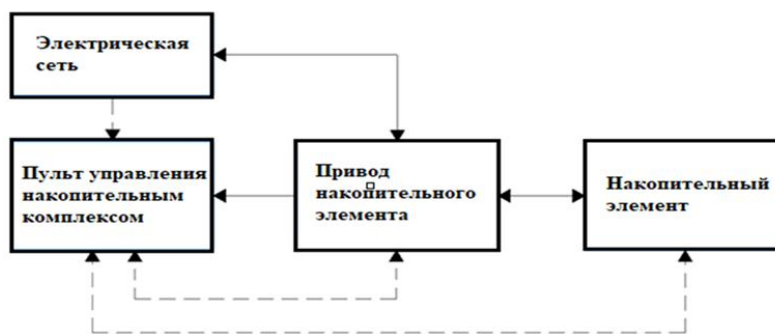


Рис. 2. Блок-схема управления НК

Fig. 2. Block diagram of the storage complex

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Управление вращением ротора-маховика осуществляют с помощью электропривода НК, а управление режимами работы накопителя энергии (заряд-разряд) – с пульта управления накопительным комплексом. Пульт управления предусматривает разные режимы работы НК: ручной, автоматический и интеллектуальный. Для реализации автоматического и интеллектуального режимов работы НК необходимы данные о нагрузке с датчиков электроприемников и программируемые контроллеры, которые позволят управлять подключением НЭ к сети и к потребителю энергии. Контроль за режимами работы НК обеспечивают специальные датчики (скорость вращения, температура и т.д.), которые вмонтированы в конструкцию НЭ. Бесконтактный подвес ротора-маховика в накопительном элементе осуществляется с помощью системы сверхпроводящего подвеса. Для этого используются сверхпроводящие пластины и постоянные магниты.

В результате проведения расчетов и моделирования сверхпроводящего подвеса получены значения удельной плотности вертикальной и аксиальной составляющих силы сверхпроводящего подвеса [5]:

$$F_z = 5,8 \text{ кГ/см}^2, F_x = 0,119 \text{ кГ/см}^2$$

Согласно разработанной эскизной конструкторской документации (УРГА.2021235-01.01.00, СА-22-76) изготовлены один из компонентов экспериментального образца накопительного комплекса – «Блок разгона и торможения накопителя энергии» (рис. 3) и «Шкаф управления накопительным комплексом» (рис. 4), состоящий из следующих компонентов:

- шкаф компактный распределительный MEV 80.60.21, IP65, 800x600x210мм;

- программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК 160;
- многоканальный блок питания ОВЕН БП14Б-Д4.2;
- блоки питания MDR-20-24 24В и MDR-10-12 12В, 0,84А;
- комплект автоматических выключателей.



Рис. 3. Компоненты блока разгона и торможения накопителя энергии *Fig. 3. Components of the energy storage acceleration and braking unit*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*



Рис. 4. Шкаф управления накопительным комплексом *Fig. 4. Control cabinet of the storage complex*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

На этом этапе разработана мат. модель функционирования НК в составе электрической сети, а также обоснованы методы расчета технических, энергетических, экономических параметров, сделан анализ и проверка корректности модели, разработаны алгоритмы решения и исследованы его свойства [6, 7].

Также в ходе работы определен ряд унифицированных номинальных характеристик накопителя энергии и диапазон их изменений, определены оптимальные параметры накопителя энергии накопительного комплекса с учетом требований унификации, обозначены основные функции работы НК в системах электроснабжения и области его применения.

Разработана ЭКД на экспериментальный образец накопительного комплекса (УРГА.2021235-01.01.00). В состав документации вошли: пояснительная записка, чертёж общего вида, габаритный чертеж, схема электрическая, функциональная. На этапе разработки конструкторской документации проведено трехмерное моделирование нескольких вариантов конструкций накопителя энергии, а также проведены необходимые расчеты нескольких конструкций синхронного электродвигателя для накопителя энергии.

Проведены работы по изготовлению и сборке экспериментального образца накопительного комплекса. Для проведения первичных испытаний и определения силовых характеристик (силы левитации), полученных от производителя ВТСП-дисков (сверхпроводник состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$), изготовлен и собран основной испытательный макет – макет криостата в нескольких вариантах: 1 диск, 8 дисков, 12 дисков.

Макет ротора-маховика изготовлен в нескольких вариантах: с ферритовым кольцевым магнитом, с неодимовыми магнитными дисками 30*10мм – 6, 12 шт., с неодимовыми квадратными магнитами 12*12*3мм – 24 шт., с неодимовым кольцом, с однонаправленным неодимовым магнитом. Испытания проходил экспериментальный образец накопительного комплекса (УРГА 2021235-01.01.00 (далее – объект испытаний). Объект испытаний представлен в сопровождении следующих документов:

- техзадание на выполнение НИР;
- рабочая документация на испытательную установку (УРГА 2021235-10.00.00, УРГА.2021235-11.00.00);
- конструкторская документация на ЭО НК (УРГА.2021235-01.01.00);
- программа и методика испытаний УРГА.2021235-01.01.00 ПМ;
- нормативная документация, указанная в программе и методике испытаний;
- акт изготовления экспериментального образца накопительного комплекса.

Испытания опытных образцов проводились на модернизированной экспериментальной установке, содержащей в т.ч. вновь созданные модуль испытаний систем управления электрическими машинами и модуль испытаний накопителей энергии:

- предварительная проверка основных технических решений, заложенных в конструкцию экспериментального образца накопителя энергии, и определение направлений доработки конструкторской документации по итогам испытаний.
- подтверждение принципиальной возможности бесконтактного сверхпроводящего подвеса ротора-маховика накопителя энергии и исследование его силовых характеристик в динамическом режиме.
- оценка возможности промышленного производства накопителя энергии с учетом полученных результатов испытаний и технических требований для конкретных областей применения.
- тестирование модернизированной экспериментальной установки, содержащей в т.ч. вновь созданные модуль испытаний систем управления электрическими машинами (УРГА 2021235-10.00.00), модуль испытаний накопителей энергии (УРГА.2021235-11.00.00).

В результате испытаний впервые в стране проведен эксперимент по проверке динамической левитации ротора-маховика. Ротор-маховик бесконтактно раскручивался с большой скоростью и удерживался в левитирующем состоянии, что подтвердило технические решения, заложенные в конструкции НК. Для проверки основных технических решений, заложенных в конструкцию накопителя энергии изготовлена экспериментальная установка (рис. 5-6), содержащая макет криостата, макет ротора-маховика с квадратными магнитами 10x10x3 мм в количестве 24 штуки, закрепленных на роторе-маховике медными винтами. Ответная часть силового блока содержала 12 ВТСП – элементов размерами Ф30x10 мм и размещалась в криостате.

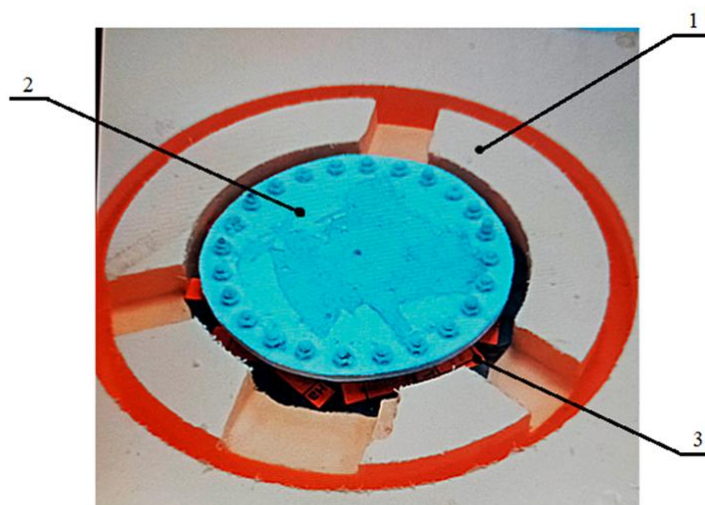


Рис. 5. Схема установки по экспериментальному исследованию бесконтактного подвеса ротора-маховика накопителя энергии (1 – криостат, 2 – ротор-маховик, 3 – силовой блок)

Fig. 5. Scheme of the experimental study of the contactless suspension of the rotor-flywheel of the energy storage device (1 – cryostat, 2 – rotor-flywheel, 3 – power unit)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

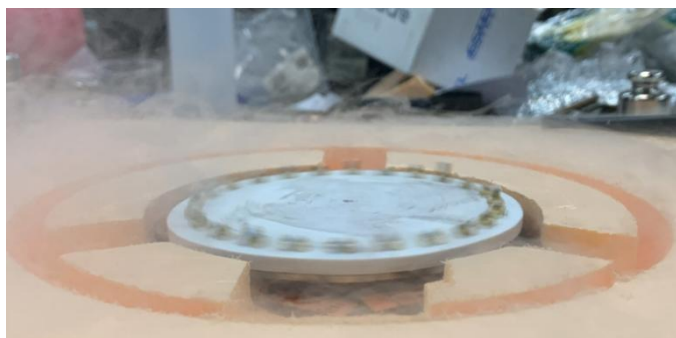


Рис. 6. Проверка принципиальной возможности левитации и динамической устойчивости вращающегося ротор-маховика на экспериментальной установке

Fig. 6. Testing the fundamental possibility of levitation and dynamic stability of a rotating rotor-flywheel on an experimental setup

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Объект испытаний соответствует заявляемому параметру согласно тех. задания на выполнение НИР и предназначен для работы:

- в распределённых электрических сетях с альтернативными источниками энергии;
- в городских, распределительных электрических сетях, силовых сетях электротранспорта;
- в бортовых электрических сетях (судовых, электротранспортных);
- в автономных системах электроснабжения.

Основные технические параметры НК указаны в таблице 1, основные конструктивные требования к ЭО НК – в таблице 2.

Результаты (Results)

Таблица 1

Основные технические параметры НК

	Основные технические параметры	Соответствие ТЗ на НИР
	Функции, выполнение которых должен обеспечивать разрабатываемый научно-технический продукт	
1	Экспериментальный образец электрокинетического накопителя энергии должен обеспечивать повышение энергосбережения и энергоэффективности электрической сети путем накопления, интеллектуального распределения, рекуперации электрической энергии	Соответствует
2	Экспериментальный образец электрокинетического накопителя энергии должен выполнять следующие функции: - обеспечение балансировки и выравнивания графиков нагрузки в сети (накопление электрической энергии в периоды наличия избыточной энергии и выдача в сеть в периоды пиковой нагрузки); - сглаживание резких перепадов колебаний мощности вырабатываемой электроэнергии; - стабилизация работы источников и систем распределенной генерации электрической энергии; - обеспечение бесперебойного питания объектов различного назначения; - обеспечение запаса энергии автономных транспортных средств.	Соответствует
	Количественные параметры, определяющие выполнение научно-техническим продуктом своих функций:	
	Интеллектуальный накопительный комплекс должен разрабатываться в кластерном исполнении. Характеристики: Удельная энергоёмкость: не менее 1 МДж/кг. Удельная мощность: не менее 1 МВт/кг. Коэффициент полезного действия: 96-98%. Средняя наработка на отказ: не менее 50000 часов. Среднее время восстановления не более 1 час. Срок службы – не менее 10 лет. Ресурс до списания – не менее 85000 часов. Средний срок сохраняемости – не менее 10 лет (без учета срока сохраняемости элементов питания).	Соответствует

	Входные воздействия, необходимые для выполнения научно-техническим продуктом заданных функций	
	Электромеханический накопитель энергии – это накопитель, в котором энергия накапливается и сохраняется в виде кинетической энергии вращающегося маховика, а выделяется в виде механической энергии вращения. Входной электрический ток статора вращает ротор- маховик и поддерживает его вращение 24 часа в сутки, 7 дней в неделю, пока накопленная энергия не освобождается через генератор, такой, как обращенный синхронный электродвигатель. Количество запасенной электроэнергии и продолжительность его работы определяются массой маховика и его скоростью вращения.	Соответствует
	Выходные реакции, обеспечиваемые научно-техническим продуктом в результате выполнения своих функций:	
	Для зарядки электромеханического накопителя энергии электрическая машина работает в режиме двигателя, потребляет электрическую энергию от внешнего источника и разгоняет маховик, а при разрядке электрическая машина работает уже в режиме генератора, выделяя электрическую энергию, при этом замедляя маховик.	Соответствует

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 2

Проверка конструктивных требований

№	Конструктивные требования	Соответствие ТЗ на НИР
	Экспериментальный образец электрокинетического накопителя энергии должен включать в себя:	
1	Обращенный синхронный двигатель-генератор	Соответствует
2	ротор-маховик	Соответствует
3	статорные обмотки, выполняющие функции прямого и обратного преобразования электрической энергии в механическую энергию и ее последующей отдачи в сеть	Соответствует
4	системы азотного криостатирования	Соответствует
5	системы вакуумирования	Соответствует
6	системы коммутации	Соответствует
7	системы автоматики и управления	Соответствует
8	Экспериментальный образец электромеханического накопителя энергии должен быть выполнен в модульном исполнении и состоять из:	Соответствует
9	– модуля криостата;	Соответствует
10	– модуля двигателя-генератора, содержащего маховик и опорные постоянные магниты, размещенные на нижней плоскости ротора-маховика и магниты возбуждения синхронного двигателя-генератора, расположенные на внутренней боковой поверхности ротора-маховика.	Соответствует

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обсуждение (Discussions)

Таким образом, подтверждена теоретически и экспериментально работоспособность модульной конструкции СПЭНЭ-1 в составе НК. Результаты, полученные в работе, имеют большое значение для внедрения распределенной энергетики в РФ [8-13]. Разработана ЭКД накопительного комплекса и испытательной базы, а также нормативные документы для эксплуатации накопительного комплекса в различных системах электроснабжения. Полученные результаты соответствуют тенденциям современного развития распределенной энергетики и технологиям накопления электрической энергии. Этот факт подтверждается использованием эффекта сверхпроводимости и перспективой постоянного улучшения качества сверхпроводящих материалов, что открывает большие перспективы для роста технико-экономических показателей НК. Показана работоспособность предложенной конструкции теоретически и экспериментально. Конструкция ориентирована на отечественную технологическую базу и комплектующие, включая сверхпроводящие материалы и другие элементы, что является крупным вкладом в решение проблемы импортозамещения российской экономики. Модульная конструкция накопителя энергии защищена патентами и авторскими

свидетельствами.

Результаты работы по созданию НК демонстрировались на ряде выставок, где получили высокие награды, в частности: XXVI Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий, Москва, 28.03-30.03. 2023, Золотая медаль. Международный военно-технический форум «Армия-22», Москва, Диплом. Международный военно-технический форум «Армия-23», Москва, Диплом. Выставка «Экспотехностраж». Сибирский округ войск национальной гвардии РФ, Новосибирск, Экспоцентр, 2022-2023гг. Диплом. Конкурс на лучший проект в сфере информационных технологий в интересах обороны и безопасности 2023 г. Архимед 22, 23, Интерполитех 22, 23, где отмечены золотой медалью и дипломами. Результаты работы представлены в 2023 г. на конкурс лучших проектов МО РФ, где получили 3 место.

Заключение (Conclusions)

Основным преимуществом предлагаемого решения является высокая адаптивность его применения в энергосистемах различных регионов России с учетом специфики их природно-климатических условий, применяемых технологий ресурсосбережения. Накопительный комплекс может использоваться в системах электроснабжения различного назначения как многофункциональный регулятор, например, для решения задач повышения надежности, энергосбережения, качества электроэнергии. Также может использоваться в тяговых электросистемах электротранспорта, распределённых электрических сетях с альтернативными источниками питания. Особенно эффективно применение разработанного НК в системах электроснабжения, работающих в условиях низких температур, например, Арктики, Космоса. Полученные результаты позволили сформулировать формулу направлений дальнейших работ по совершенствованию конструкции накопителя энергии:

1. Материалы. Использование высокотемпературных сверхпроводников или других передовых материалов, обладающих сверхпроводящими свойствами, для создания надежного накопителя энергии.

2. Дизайн. Разработка инновационного дизайна, который позволит эффективно накапливать и хранить энергию в сверхпроводящем состоянии.

3. Охлаждение. Обеспечение необходимых условий охлаждения для поддержания сверхпроводящего состояния материалов, что позволит сохранить высокую энергетическую эффективность, снизить потери в токопроводах и теплопритоках через стенки криостата, повысить технико-экономические показатели НК.

4. Контроль и мониторинг. Внедрение современных систем контроля и мониторинга, которые позволят эффективно управлять процессом зарядки, хранения и выдачи энергии.

5. Эффективность. Работа над повышением эффективности накопителя, уменьшение потерь и повышение стабильности работы, что сделает его привлекательным для крупномасштабного использования.

Эта формула учитывает ключевые аспекты при создании сверхпроводящих накопителей энергии, что может привести к разработке инновационных устройств, способных революционизировать хранение и использование энергии в будущем.

Литература

1. Смоленцев, Н. И. Энернет. Состояние и перспективы / Н. И. Смоленцев, А. Н. Игнатов, Д. С. Иргибаева // Современные проблемы телекоммуникаций: Материалы Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 22–23 апреля 2021 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2021. – С. 409-413.

2. Патент № 2825222 С1 Российская Федерация, МПК. H02J 4/00 (2024.01); H02J 7/00 (2024.01) Пакетный способ передачи энергии: № 2023119435: заявл. 21.07.2023: опубл.22.08.2024 / Н. И. Смоленцев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики".

3. Lee, S., Kim, J., Im, S., An, S., Kwon, Y.-W., & Auh, K. H. (2023). Consideration for the development of room-temperature ambient-pressure superconductor (LK-99). *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, 33(2), 61–70.

4. Патент № 2791601 С1 Российская Федерация, МПК H02K 55/00, H02K 7/02, H02K 26/00. Электромеханический накопитель энергии: № 2022113364: заявл. 18.05.2022: опубл. 13.03.2023 / Н. И. Смоленцев, Ю. Л. Бондарев, А. В. Никитин;

5. Разработка накопительного комплекса для систем энергоснабжения различного назначения/ Н. И. Смоленцев, А. Н. Игнатов, Д. С. Иргибаева, А. В. Никитин // Современные

проблемы телекоммуникаций: Материалы Российской научно-технической конференции, Новосибирск, 20–21 апреля 2022 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2022. – С. 727-733.

6. Смоленцев Н.И., Четошникова Л.М., Игнатов А.Н. Управление электромеханическим накопителем энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(6):75-84.

7. Смоленцев Н.И., Четошникова Л.М. Топология электрической сети и способ передачи электрической энергии. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(4):95-103. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-95-103>.

8. Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф., Холкин Д., Дацко К. Распределённая энергетика в России: потенциал развития. — М.: Энергетический центр Московской школы управления «Сколково», 2019. – 89 с.

9. Ерошенко С. А., Карпенко А. А., Кокин С. Е., Паздерин А. В. Научные проблемы распределённой генерации // Известия вузов: Проблемы энергетики, 2010. №11–12. С. 126–133.

10. Хохлов А. Развитие распределённой генерации приведет к кардинальным изменениям в архитектуре электроэнергетики России. Энергетика и промышленность России. 2017, № 11

11. «Дорожная карта» «ЭНЕРДЖИНЕТ» Национальной Технологической Инициативы. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (дата обращения 11.04.2024 г.).

12. Тягунов М. Г., Викулов А. Н. Возобновляемая энергетика в распределённых энергосистемах. Московский энергетический институт (НИУ) СОК №7. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (дата обращения 11.04.2024 г.).

13. Цифровой переход в электроэнергетике России: экспертно-аналитический доклад. / под общ. ред. В.Н. Княгинина и Д.В. Холкина. М., ЦСР, 2017.

Авторы публикации

Смоленцев Николай Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры технической электроники СибГУТИ. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5775-2903>. uralcm@mail.ru.

Бондарева Вероника Юрьевна – студентка Политехнического института Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ (НИУ)). nik4.b@mail.ru

References

1. Smolentsev, N. I. Enernet. State and prospects / N. I. Smolentsev, A. N. Ignatov, D. S. Irgibaeva // Modern problems of telecommunications: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, April 22-23, 2021. - Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 2021. - С. 409-413.

2. Patent No. 2825222 C1 Russian Federation, МПК. H02J 4/00 (2024.01); H02J 7/00 (2024.01) Packet method of energy transfer: No. 2023119435: avt. 21.07.2023: published on 22.08.2024 / N. I. Smolentsev; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Siberian State University of Telecommunications and Informatics”.

3. Lee, S., Kim, J., Im, S., An, S., Kwon, Y.-W., & Auh, K. H. (2023). Consideration for the development of room-temperature ambient-pressure superconductor (LK-99). Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology, 33(2), 61-70.

4. Patent No. 2791601 C1 Russian Federation, МПК H02K 55/00, H02K 7/02, H02K 26/00. Electromechanical energy storage device: No. 2022113364: avt. 18.05.2022: publ. 13.03.2023 / N. I. Smolentsev, Y. L. Bondarev, A. V. Nikitin;

5. Development of storage complex for power supply systems for different purposes / N. I. Smolentsev, A. N. Ignatov, D. S. Irgibaeva, A. V. Nikitin // Modern problems of telecommunications: Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, April 20-21, 2022. - Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 2022. - С. 727-733.

6. Smolentsev, N.I.; Chetoshnikova, L.M.; Ignatov, A.N. Control of the electromechanical energy accumulator (in Russian) // Izvestia vysokikh uchebnykh uchebnykh obrazovaniye. ENERGY PROBLEMS. 2019;21(6):75-84.

7. Smolentsev, N.I.; Chetoshnikova, L.M. Topology of an electric network and a method of electric energy transmission. Izvestiya vysokikh uchebnykh uchebnykh obrazovaniye [Izvestia of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2019;21(4):95-103. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-95-103>.

9. Eroshenko S. A., Karpenko A. A., Kokin S. E., Pazderin A. V. V. Scientific problems

of distributed generation // Izvestiya Vuzov: Problems of Power Engineering, 2010. №11-12. С. 126-133.

10. Khokhlov A. Development of distributed generation will lead to cardinal changes in the architecture of the Russian power industry. *Energetika i promyshlennosti Rossii*. 2017, № 11

11. “ENERGYNET Roadmap” of the National Technological Initiative. [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (date of circulation 11.04.2024).

12. Tyagunov M. G., Vikulov A. N. Renewable energy in distributed energy systems. Moscow Power Engineering Institute (NIU) SOK No. 7. [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (accessed on 11.04.2024).

13. Digital transition in the electric power industry of Russia: expert-analytical report. / Edited by V.N. Knyaginina and D.V. Holkin. MOSCOW, CSR, 2017.

Authors of the publication

Nikolay I. Smolentsev – Siberian State University of Telecommunications and Information, Novosibirsk, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-5775-2903>. *uralcm@mail.ru*.

Veronika Y. Bondareva – South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. *nik4.b@mail.ru*.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **13.07.2024 г.**

Отредактировано **16.09.2024 г.**

Принято **22.10.2024 г.**