

На правах рукописи



Подгузов Владимир Андреевич

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ
С МАГНИТНЫМ ВТСП ПОДВЕСОМ**

Специальность 2.4.2. – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы».

Научный руководитель: **Ковалев Константин Львович**,
доктор технических наук, с.н.с., заведующий
кафедрой 310 ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты: **Казаков Юрий Борисович**,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электромеханики», ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина».
Курбатова Екатерина Павловна,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханики, электрических и электронных аппаратов» (ЭМЭЭА), ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Защита состоится «18» июня 2024 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.11, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, корп. 57, ауд. 302.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=178356.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.11,



Д.С. Дежин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В связи с развитием высокотехнологичных отраслей промышленности, а также всеобщей компьютеризацией общества повышается нагрузка на энергосистему и, следовательно, повышаются требования к качеству и бесперебойности энергоснабжения. Для обеспечения потребителей качественной электроэнергией требуется обеспечить бесперебойность питания потребителей и резервирование мощности в энергосистеме. В энергосети часто возникают неисправности, причиной которых могут быть повреждения линий электропередач, перегрузки, неисправная работа вспомогательного оборудования. Стоимость перерыва в энергоснабжении для различных потребителей измеряется в широком диапазоне, в зависимости от рода их деятельности и размеров производства. Решением этих проблем является использование накопителей энергии на различных физических принципах, которые позволяют обеспечить резервирование мощности и работают на нагрузку параллельно с сетью. Также накопители могут работать некоторое время автономно, в качестве аварийного источника питания для обеспечения требования бесперебойности электроснабжения.

Электромеханический накопитель энергии (ЭМН) – это устройство для накопления и хранения энергии на основе вращающегося маховика с последующим преобразованием в электрическую энергию в мотор–генераторе.

ЭМН возможно использовать в качестве аварийного источника питания, источника бесперебойного питания для ответственных потребителей, например, медицинских учреждений, информационно–вычислительных центров, объектов атомной промышленности или высокотехнологичных производств. Также ЭМН может использоваться в составе энергосети для «сглаживания» пиков потребления электроэнергии (в дневные часы нагрузка на сеть возрастает по сравнению с ночными часами). ЭМН используются для улучшения показателей энергосистем при кратковременном включении потребителей повышенной мощности (компенсирует пиковые нагрузки) и для повышения устойчивости работы энергоустановок и систем электроснабжения в целом. В этих случаях ЭМН являются рекуператорами энергии между генерирующими установками и потребителями, работающими в нестационарных режимах.

В качестве основных типов подшипников для ЭМН обычно рассматриваются механические, газодинамические, электромагнитные и магнитные. В настоящее время большое внимание уделяется исследованию магнитных опор на основе массивных высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) элементов и постоянных магнитов (ПМ). Такие магнитные ВТСП опоры обеспечивают значительное снижение потерь кинетической энергии при вращении маховика. Как показывают исследования, использование в составе ЭМН магнитного ВТСП подвеса позволяет обеспечить сохранение запасенной энергии практически без потерь.

По показателю удельной энергии и удельной мощности ЭМН находятся между аккумуляторными батареями и сверхпроводниковыми индуктивными накопителями (СПИН). Мощность ЭМН ограничена параметрами мотор-генератора. По удельным показателям ЭМН сопоставимы со СПИН, но значительно дешевле и проще в обслуживании.

К достоинствам ЭМН также можно отнести масштабируемость и модульность. На основе единичного ЭМН могут быть построены «матричные» системы накопления энергии на большие уровни запасаемой энергии и мощности как мобильного, так и стационарного исполнения.

Степень разработанности темы исследования. Отдельные вопросы проектирования и исследования электромеханических накопителей энергии с магнитным ВТСП подвесом описаны в работах многих известных российских ученых, таких как Н. В. Гулиа, Ю. В. Зубков, А. В. Рогоза, Л. К. Ковалев, К. Л. Ковалев, В. Т. Пенкин, Д. С. Дежин, Р. И. Ильясов, П. А. Курбатов, Е. П. Курбатова, В. Н. Полтавец и других, а также зарубежных ученых – Т. Н. Sung, S. C. Han, S. Yamaguchi, M. Namabe и многих других.

Объект исследования. Объектом исследования является ЭМН с магнитным ВТСП подвесом.

Предмет исследования. Предметом исследования является разработка комплексной методики расчета ЭМН, включая расчет мотор-генератора без ферромагнитопроводов статора и ротора, прочностной расчет маховика, магнитной опоры, ВТСП подшипников, а также экспериментальное исследование макетных образцов.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка методик расчета и проектирования, а также экспериментальное исследование ЭМН с подшипниками на основе высокотемпературных сверхпроводниковых элементов и высококоэрцитивных постоянных магнитов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) выполнен обзор литературных данных в области электромагнитных накопителей энергии, показывающий, что ЭМН обладают высокой энергоемкостью, экологичностью, высоким ресурсом и их применение перспективно в качестве аварийных источников питания ответственных потребителей;

2) выбраны рациональные конструктивные схемы ЭМН;

3) созданы методики и проведены расчеты основных узлов ЭМН: мотор-генератора, маховика, магнитной опоры и ВТСП магнитных подшипников;

4) проведены экспериментальные исследования макетных образцов ЭМН с запасенной удельной энергией до 5 МДж.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы математической физики, теории поля, электродинамики, электромеханики и прикладной сверхпроводимости, а также численные

методы решения уравнений в частных производных. Для решения уравнений и построения диаграмм были использованы пакеты *MathCAD* и *MATLAB*, для решения задач методом конечных элементов – *COMSOL Multiphysics*, *Ansys Mechanical*, для эскизного и твердотельного моделирования – *SOLIDWORKS*. Предложенные методики расчета электромеханических накопителей с магнитным ВТСП подвесом, позволяет производить расчет и проектирование ЭМН с запасенной удельной энергией до 5 МДж, результаты расчета по предложенной методике сопоставлялись с результатами экспериментальных исследований электромеханических накопителей с магнитным ВТСП подвесом с запасенной удельной энергией 0,5 МДж и 5МДж.

Научная новизна. При решении задач, поставленных в диссертационной работе, были получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые предложен комплексный подход к разработке ЭМН с ВТСП магнитным подвесом.
2. Разработаны новые конструкции и методики расчета ВТСП магнитных подвесов с постоянными магнитами.
3. Впервые предложено использовать магнитную опору с целью обезвешивания маховика в составе ЭМН для обеспечения его длительной стабильной работы.
4. Разработана новая методика расчета синхронной электрической машины без ферромагнитопровода.
5. Предложена и экспериментально отработана перспективная технология создания многослойного маховика с бандажированием из углеволоконного материала.

Практическая значимость работы.

1. Предложена и апробирована новая инженерная методика расчета синхронных электрических машин с немагнитным индуктором и якорем, для уменьшения магнитных потерь и увеличения времени работы ЭМН.
2. Разработана технология создания бесконтактных подшипников на основе ПМ и ВТСП с охлаждением жидким азотом.
3. Разработан единственный в России ЭМН с магнитным ВТСП подвесом с запасаемой энергией до 5 МДж.
4. Проведена коррекция методики определения аэродинамических потерь при вращении маховика в зависимости от его геометрии и окружающей его среды.
5. Проведена верификация теоретических расчетов на основе конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований макетных образцов ЭМН, подтвердившие корректность разработанных методик.
6. Показано, что введенные в конструкцию ЭМН новые технологические решения дали возможность существенно увеличить время хранения запасенной энергии в ЭМН и применять их в различных областях народного хозяйства.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Анализ параметров современных массивных ВТСП материалов и методика выбора их рациональных параметров для использования в составе магнитного подвеса ЭМН.

2. Аналитические методики расчета основных параметров ЭМН, включая расчет бесконтактного подвеса на основе объемных ВТСП элементов и постоянных магнитов, магнитной опоры, аэродинамических потерь, синхронной электрической машины без ферромагнитопровода.

3. Сопоставительный анализ теоретических расчетов по предложенным методикам с экспериментальными данными созданных макетных образцов ЭМН.

4. Результаты экспериментального исследования макетных образцов ЭМН с магнитным ВТСП подвесом с запасаемой энергией до 5 МДж.

Степень достоверности результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы подтверждаются корректным использованием математического аппарата, а также сопоставлением результатов, полученных путем аналитических расчетов, математических и компьютерных моделей с экспериментальными исследованиями.

Апробация работы. Основные результаты обсуждались и докладывались на следующих конференциях: 16-ой международной конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, РФ, 2017 г.); международной научной конференции XLIV «Гагаринские чтения-2018» (г. Москва, РФ, 2018 г.); 17-ой международной конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, РФ, 2018 г.); 18-ой международной конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, РФ, 2019 г.); международной научной конференции XLVII «Гагаринские чтения-2021» (г. Москва, РФ, 2021 г.); международной научной конференции XLVII «Гагаринские чтения» (г. Москва, РФ, 2021 г.); международной конференции по прикладной сверхпроводимости EUCAS 2021 (г. Москва, РФ, 2021 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 23 научных работы, включая 3 статьи в журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и 10 статей в изданиях, индексируемых международными базами Scopus и WoS.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 115 наименований. Общий объем работы составляет 212 страниц машинописного текста, включая 112 рисунков, 27 таблиц и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, определена научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, дана информация о структуре и объеме диссертации.

В первой главе представлен обзор разработок в области создания ЭМН, а также проектов по созданию крупных аварийных источников бесперебойного питания на основе электромеханических накопителей энергии, фото вспомогательной электростанции на основе ЭМН расположенной в США представлено на рисунке 1. Рассмотрены основные направления работ по созданию ЭМН в ведущих мировых научных центрах. Анализ разработок ЭМН показал, что при их создании возможно снижение эксплуатационных расходов, времени технического обслуживания, а также увеличение энергоэффективности и экологичности систем аварийного и бесперебойного электропитания ответственных потребителей наземного назначения и специального транспорта. В настоящее время концепция ЭМН реализована в основном без применения эффекта сверхпроводимости, однако, применение бесконтактных ВТСП подшипников позволяет существенно увеличить время хранения запасенной энергии.



Рисунок 1 – Вспомогательная электростанция компании Veacon power

Во второй главе представлены реализованные разработки кинетических и электромеханических накопителей энергии в зависимости от области их применения. Показано, что главным преимуществом конструкции ЭМН является то, что они обладают хорошей масштабируемостью и модульностью в зависимости от назначения и области их применения. В настоящее время в России и за рубежом реализован ряд конструкций ЭМН различного назначения и мощности, но самыми энергоэффективными являются электромеханические накопители с применением ВТСП магнитных подшипников, один из российских КНЭ с магнитным ВТСП подвесом представлен на рисунке 2. В настоящее время реализованы проекты ЭМН с большим уровнем запасенной удельной энергией, но относительно малым временем хранения запасенной энергии из-за существенных потерь на трение или, наоборот с продолжительным временем хранения запасенной энергии, но при этом, максимальный уровень запасенной удельной энергии не превышает 1 МДж.



Рисунок 2 – Фото КНЭ НИУ МЭИ

В третьей главе описаны математические модели основных и вспомогательных элементов ЭМН с ВТСП магнитным подвесом

Основными конструктивными элементами любого ЭМН с магнитным ВТСП подвесом являются: маховик, опоры/подшипники, мотор-генератор, система охлаждения, система безопасности, корпус ЭМН, система управления, система синхронизации с сетью (при работе на неавтономную нагрузку), система разгона и рекуперации энергии, дающая на выходе ЭМН заданное напряжение и частоту, система подачи и циркуляции криоагента (жидкого азота если в конструкции ЭМН предусматривается использование ВТСП подшипников), система управления активным подвесом (если используется подвес на основе электромагнитов).

На рисунке 3 изображены маховики различной формы для кинетических накопителей.

Потери на трение и пути их уменьшения в механических накопителях. Для всех типов маховиков в режимах заряда и разряда целесообразно снижать потери на трение. Согласно уравнению баланса энергии для ЭМН (1) КПД заряда будет иметь вид, $\eta_3 = W_K / (W_K + W_T)$, а КПД разряда $\eta_p = 1 - (W_T / W_K)$. Если маховик вращается в воздушной среде нормального давления и установлен в обычных опорах качения либо скольжения, то учитываемые посредством η_p , η_3 потери могут оказаться недопустимо большими ($\eta_p \approx 0,7$).

Энергия потерь трения в расчете на пару подшипников может быть рассчитана, как:

$$W_{T,п} = \varphi_c M_{T,п} = M_{T,п} \int_{t_1}^{t_2} \Omega(t) dt, \quad (1)$$

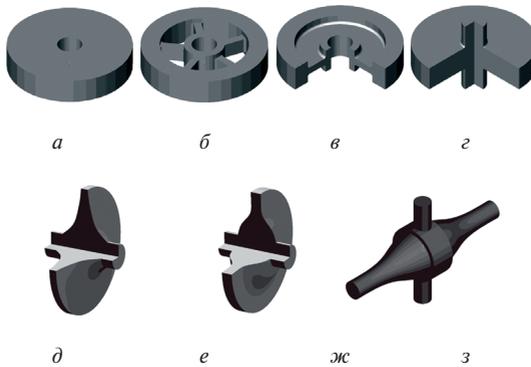


Рисунок 3 – Маховики КНЭ различной формы: а – диск постоянной толщины с малым отверстием в центральной зоне; б – тонкий обод; в – диск с ободом; г – диск постоянной толщины без центрального отверстия; д, е – конический и гиперболический диски без отверстия; ж – диск равной прочности; з – стержень равной прочности

где φ_c – суммарный угол поворота маховика за время $\Delta t = t_2 - t_1$.

Момент трения (для пары подшипников)

$$M_{т.п} = 0,5 \cdot gM \cdot f_{т.п} \cdot d_b, \quad (2)$$

где $f_{т.п}$ – коэффициент трения подшипника; d_b – диаметр вала в опоре; M – масса маховика; $g = 9,81$ м/с².

Для опор качения $f_{т.п} = 0,001 \dots 0,004$, для опор скольжения $f_{т.п} = 0,15 \dots 0,02$ в зависимости от качества подшипника. При заданной угловой скорости $\Omega = 2\pi n$ мощность потерь в двух подшипниках $P_{т.п} = 2\pi n \cdot M$.

Момент потерь аэродинамического трения цилиндрического маховика в кожухе $M_{т.п} = M_{т.ц} + M_{т.д}$ складывается из момента $M_{т.ц}$ на цилиндрической поверхности длиной L и момента $M_{т.д}$ на двух торцевых дисковых поверхностях диаметром $D = 2R$. Соответствующие мощности потерь $P_{т.п}$, $P_{т.д}$ могут быть рассчитаны на основе классической модели течения Куэтта. В случае турбулентного течения расчет с учетом эмпирических коэффициентов, выражения могут быть записаны как:

$$\left. \begin{aligned} P_{т.ц.} &= 2\pi n \cdot M_{т.ц} = 0,458 \cdot D^4 \cdot Ln^3; \\ P_{т.д.} &= 2\pi n \cdot M_{т.д} = 3,82 \cdot 10^2 \cdot C_M \cdot \gamma_a \cdot D^5 n^3, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

причем коэффициент момента аэродинамического сопротивления $C_M = 0,0277 \cdot Re_d^{-0,2} (\delta_t / R)^{-0,2}$, число Рейнольдса для диска $Re_d = \Omega R^2 / \nu_a$; δ_t – торцевой зазор между маховиком и кожухом, L , γ_a , ν_a – плотность и кинематическая вязкость среды, окружающей вращающийся маховик.

Известны также эмпирические формулы для расчета $M_{т.д}$ дисковых маховиков в различных средах, которые можно свести к общему выражению

$$\dot{I}_{т.а} = k_a \cdot 10^{-3} \xi \cdot p_*^z [1 + \lambda(4 + y)] D^{4+y} n^{1+z}, \quad (4)$$

где $p_* = p/p_0$ – относительное давление среды, p_0 – нормальное атмосферное давление; $\xi \approx 0,8$ при наличии кожуха и $\xi = 1$ в отсутствие кожуха; $\lambda = L/D$ – относительная длина.

Для воздушной среды $k_a = 10,6$; $y = 0,4$; $z = 0,7$; для водородной среды $k_a = 1,69$; $y = 0$; $z = 0,5$; для гелиевой среды $k_a = 3,54$; $y = 0$; $z = 0,5$.

Расчет запасаемой энергии ЭМН. Маховик электромеханического накопителя энергии (ЭМН) конструктивно состоит из двух вложенных друг в друга коаксиальных полых цилиндров высотой (осевой длиной) h_m : внутреннего из конструкционной стали плотностью $\gamma = 7850$ кг/м³ и пределом прочности $\sigma = 834$ МПа, выполняющего функцию ступицы, и внешнего из углеволокна плотностью $\gamma = 1600$ кг/м³. Стальная ступица обеспечивает крепление к валу через дисковое ребро. Углеволоконный цилиндр выполняет основную функцию упрочняющего бандажа и является периферийной массой, увеличивающий момент инерции маховика.

В разработанной концепции ЭМН сначала выбираются размеры маховика, исходя из доступной технологии изготовления, возможностей производства, габаритов стандартных заготовок. Номинальная частота вращения n определяется связанными параметрами мотор-генератора: необходимой электрической частотой выходного напряжения в генераторном режиме, и частоты питающего напряжения в двигательном режиме. Как правило, типовыми частотами вращения роторов ЭМН большой мощности являются 8000 и 12000 мин⁻¹. Следует также учитывать, что для увеличения времени хранения запасенной кинетической энергии, магнитные потери (зависящие от частоты вращения (в степени ~1,5–1,7) и потери на трение должны быть минимальны. Для исключения потерь на трение в скользящих контактах, мотор-генератор должен быть бесконтактным.

Функция запасаемой кинетической энергии маховика в зависимости от частоты вращения ротора:

$$W_M(n) = \frac{J_M \Omega^2(n)}{2}. \quad (5)$$

График зависимости запасаемой энергии W_M от частоты вращения n маховика массой m_M и моментом инерции J_M приведен на рисунке 4.

Видно, что величина запасаемой энергии имеет явно выраженный квадратичный характер роста от частоты вращения, поэтому целесообразно выбирать максимально возможную частоту вращения, ограниченную прочностью маховика. Для маховика с рассчитанными параметрами, номинальное значение запасаемой энергии достигается при частоте вращения $n = 8000$ мин⁻¹, но по прочностным показателям данный маховик способен работать и при частоте вращения $n = 24000$ мин⁻¹.

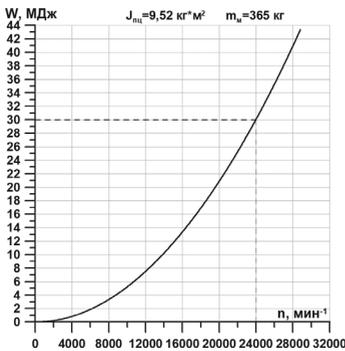


Рисунок 4 – Зависимость запасаемой энергии W от частоты вращения n маховика массой $m_M = 365$ кг и моментом инерции $J_{шц} = 9,52$ кг · м²

Функция разгона маховика до номинальной частоты вращения мотор-генератором задается как:

$$n(t) = \frac{60}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{2P_{МГ}t}{J_M}}. \quad (6)$$

Семейство кривых представлено на рисунке 5 для номинальной, двукратной и половинной мощностей.

Из графиков видно, что мотор-генератор мощностью 200 кВт обеспечивает заряд/разряд запасенной энергии от частоты вращения $n = 24000$ мин⁻¹ до нуля за заданное время $t = 150$ с. Медленный разгон маховика с рассчитанным

моментом инерции за время $t = 300$ с до номинальной частоты вращения, может быть обеспечен мотор-генератором с потребляемой мощностью 100 кВт. При максимальной частоте вращения, разряд КНЭ до нуля за заданное время $t = 75$ с, может быть обеспечен мотор-генератором мощностью 400 кВт. Это значение максимальной мощности разряда КНЭ, которое может быть выдано при допустимой плотности тока.

Результаты аналитического расчета маховика ЭМН с запасаемой энергией до 30 МДж сведены в таблицу 1.

В результате проверочного численного расчета в пакете *ANSYS Mechanical* были получены картины напряженного и деформированного состояний исследуемого маховика. На рисунке 6,б показана первая расчетная точка

Таблица 1– Сводные результаты аналитического расчета маховика ЭМН с запасаемой энергией до 30 МДж

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Ступица	Бандаж	Маховик
Внешний диаметр полого цилиндра	D	мм	160	480	480
Внутренний диаметр полого цилиндра	d	мм	120	160	120
Толщина стенки полого цилиндра	δ	мм	20	160	180
Осевая длина маховика	h	мм	1110	1110	1110
Масса полого цилиндра	m	кг	76,65	285,7	362,3
Момент инерции	J	кг · м ²	0,3832	9,141	9,525
Запасаемая энергия вращения	W	МДж	1,21	28,87	30,08
Номинальная окружная скорость	V	м/сек	175,9	402,1	603,2
Механическое напряжение на разрыв	σ_r	МПа	402,6	605,4	–
Относительное удлинение	ϵ	%	0,1917	0,1441	–
Удлинение внешнего радиуса	ΔR	мм	0,115	0,1153	0,1768
Удлинение окружности	Δl	мм	0,7227	1,359	1,273
Жесткость обода на разрыв	C	тс/мкм	1,261	8,071	9,332
Предел прочности материала	σ_m	МПа	834	3667	–
Плотность материала	γ	кг/м ³	7800	1600	4725
Удельная энергия	$W_{уд}$	МДж/т	36,89	795,79	83,025
Максимальная окружная скорость	V_{max}	м/сек	192,067	892,07	723,823

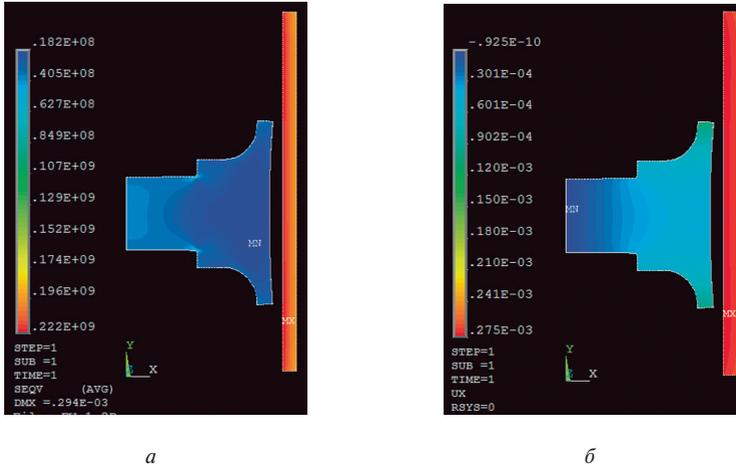


Рисунок 6 – Результаты моделирования:

- а* — картина напряженного состояния маховика (размерность в Паскалях);
б — картина деформации маховика в радиальном направлении (размерность в метрах)

— для частоты вращения 6000 мин^{-1} . Из рисунка видно, что при вращении маховика происходит отслоение наружной стальной оболочки от тела диска. При этом максимальные напряжения приходятся на внутреннюю поверхность стальной оболочки и составляют 222 МПа. В диске наиболее нагруженной является его центральная часть, однако величина напряжений в нем не более 110 МПа при 8000 мин^{-1} , что дает запас прочности 2,7.

Величину радиального перемещения оболочки и диска, а также величину «ухода» оболочки от диска можно определить из графиков рисунка 7. Для оболочки расчеты выполнены на ее внутренней поверхности вдоль линии между точками 3 и 4 (см. рисунок 7,а), для диска - на его наружной поверхности — линия между точками 1 и 2 (см. рисунок 7,а). Из графиков видно, что максимальное перемещение наружной трубы составляет $\sim 0,275 \text{ мм}$, а перемещение диска $\sim 0,1 \text{ мм}$, при этом максимальный «уход» трубы от диска составляет $\sim 0,225 \text{ мм}$. Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что при данной конструкции маховика стальная оболочка должна устанавливаться на диск с натягом более $0,25 \text{ мм}$, чтобы предотвратить отслоение от поверхности диска.

Основными потерями в ЭМН являются потери на трение в опорах и трение ротора о воздух. Из этих соображений опоры для ЭМН рекомендуется делать бесконтактными, например на основе эффекта сверхпроводимости.

Рассматриваемый в работе ВТСП подвес представляет собой цилиндрические подвесы, расположенные в верхней и нижней части маховика.

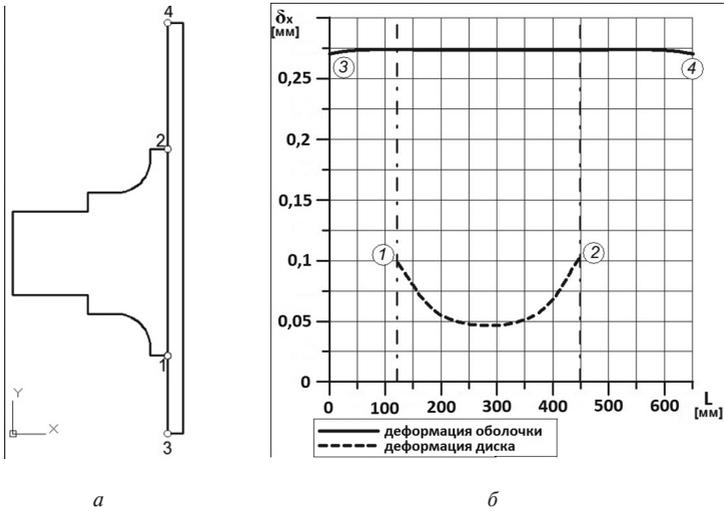
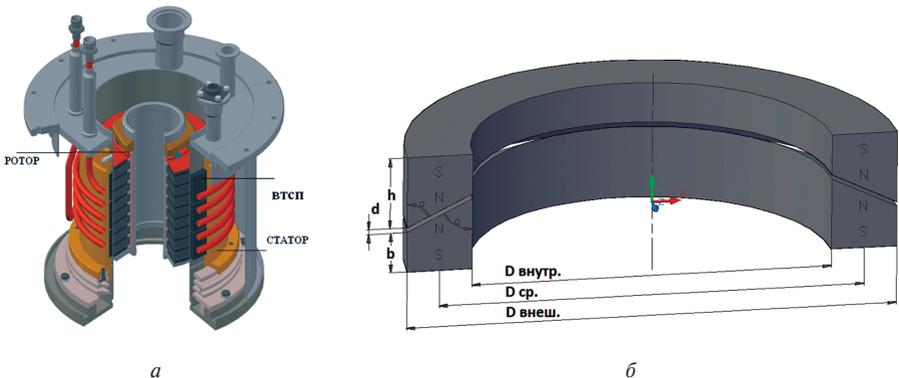


Рисунок 7 – Результаты моделирования:

a – положение точек, приведенных на графиках деформации и напряжения;
б – радиальные перемещения оболочки и диска (для частоты 6000 мин⁻¹)

ВТСП подвес необходим чтобы жестко закрепить ось вращения маховика в вертикальном положении, сохранять равномерный зазор между вращающимися и неподвижными частями ЭМН, а также демпфировать радиальные колебания маховика. Модель ВТСП опоры ЭМН приведена на рисунке 8. Он включает в себя ротор и статор, которые в рабочем положении удерживаются магнитными силами.

Ротор ВТСП подвеса закреплен на валу маховика. На роторе установлены кольцевые Ne-Fe-B магниты. Между магнитными кольцами находятся

Рисунок 8 – Модели: *a* – магнитного подвеса; *б* – магнитной опоры

пластины из магнитомягкого материала (Сталь 10). Магниты и пластины склеены между собой эпоксидным клеем. Соседние кольца намагничены параллельно оси вращения, навстречу друг другу.

Статор состоит из вакуумного кожуха с экранно-вакуумной изоляцией, выполненного из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, кольцевого медного цилиндра с ВТСП элементами и тепловых мостов, предназначенных для распределения тепловых потоков от ВТСП элементов (см. рисунок 8). Охлаждение ВТСП элементов осуществляется путем прокачки жидкого азота через медные трубки, намотанные и припаянные к медному цилиндру (позиция «контур охлаждения» см. рисунок 8,а).

Маховик удерживается осевой магнитной опорой (МО) (см. рисунок 8,б), которая состоит из статора и ротора. Конструкция обеих частей представляет собой стальную обойму с размещенными в ней *Nd-Fe-B* магнитами. Обоймы с магнитами устанавливаются таким образом, чтобы намагниченность магнитов была встречной. Таким образом, опоры отталкиваются друг от друга и удерживают вес маховика. Рабочий зазор между статором и ротором МО составляет 2–4 мм. Для увеличения прочности обойма ротора МО дополнительно усилена углеволокном бандажом.

Расчет несущей способности МО был проведен в программном пакете ELCUT. По результатам серии расчетов были выбраны размеры магнитов: ширина, внутренний и внешний диаметры, угол сопряжения опор. От ширины и диаметров зависит несущая способность опоры (см. рисунок 9).

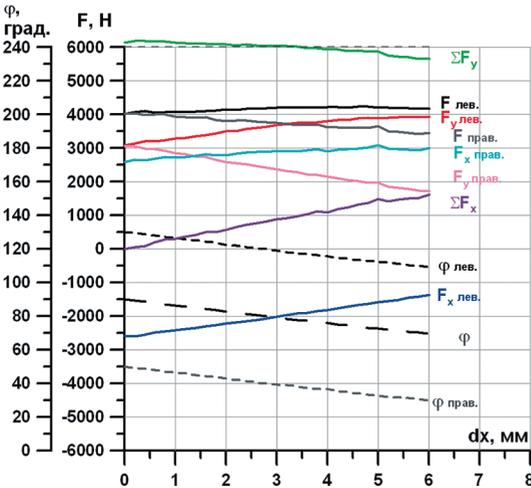


Рисунок 9 – Зависимости вертикальной и горизонтальной компонент силы магнитной левитации от величины горизонтального смещения верхней опоры

Мотор-генератор – это электрическая машина для преобразования кинетической энергии вращающегося маховика в электрическую энергию, а также для раскрутки маховика до заданных оборотов. Для увеличения времени хранения энергии, мотор-генератор следует делать из немагнитного материала (нержавеющая сталь) или вовсе безжелезным (композитные материалы, стекловолокна, пластмассы). Немагнитный материал необходим чтобы избежать потерь на перемаг-

ничивание железа, при вращении маховика в режиме сохранения энергии. Энергетические параметры немагнитной машины на 30% хуже, чем параметры традиционной машины из шихтованной электротехнической стали.

На рисунке 10 приведены результаты расчета мотор-генератора, выполненного в программе Elcut, а параметры мотор-генератора представлены в таблице 2.

Таким образом, в режиме хранения энергии, при отключенной обмотке якоря, потери в мотор-генераторе не превышают 1%, а при работе на полную мощность при частоте вращения 8000 мин^{-1} , КПД накопителя составляет 98,7%.

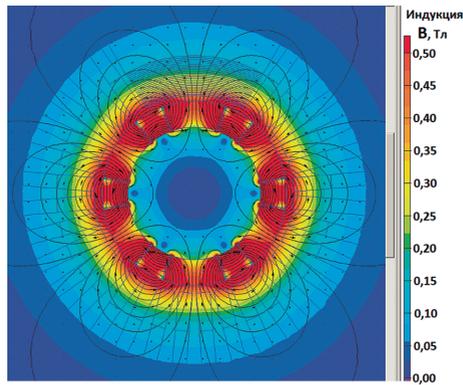


Рисунок 10 – Картина распределения магнитной индукции в мотор-генераторе ЭМН

Таблица 2 – Расчетные параметры мотор-генератора с немагнитным статором

Параметр	Значение
Мощность, кВт	100
Напряжение питания фазное, В	230–380
Номинальный ток, А	156–96
Номинальная плотность тока, А/мм ²	7,84–4,83
Частота вращения, мин ⁻¹	8000–5000
Число фаз обмотки (m)	3
Число полюсов ($2p$)	6
Диаметр расточки статора, мм	220
Включение фаз	Y
Максимальная индукция в зубце/ярме при номинальной нагрузке, Тл	0,24/0,13

В четвертой главе приведена конструктивная схема ЭМН, методика расчета аэродинамических потерь ЭМН с запасенной энергией 0,5 МДж, описаны проведенные расчеты мотор-генератора ЭМН, маховика и магнитного подвеса, проведены экспериментальные исследования ЭМН на захлаживание и холостом ходу. На рисунке 11 представлены маховик и общий вид ЭМН-0,5 МДж.

Разработанная конструкция электромеханического накопителя энергии с ВТСП магнитным подвесом и мотор-генератором с 3-х фазной обмоткой на неподвижном якоре и индуктором с постоянными магнитами позволяет накапливать энергию $\sim 0,5$ МДж и обеспечивает устойчивую работу энергосистемы как в режиме накопления и хранения энергии, так и в режиме питания нагрузки.

Макетный образец ЭМН-0,5 МДж имеет следующие параметры: максимальный уровень запасаемой энергии – 0,5 МДж; время заряда – 300 с; время разряда при мощности 10 кВт – 25 с; уровень выходного напряжения – 220 ... 240 В; частота выходного напряжения – 50 Гц; частота вращения маховика – 4000-6000 мин⁻¹; масса маховика – 100 кг; КПД – 90 ... 99 %.

Также были проведены комплексные испытания ЭМН-0,5 МДж в рабочих режимах работы при плавном разгоне маховика и его торможении при генераторном режиме ЭМН.

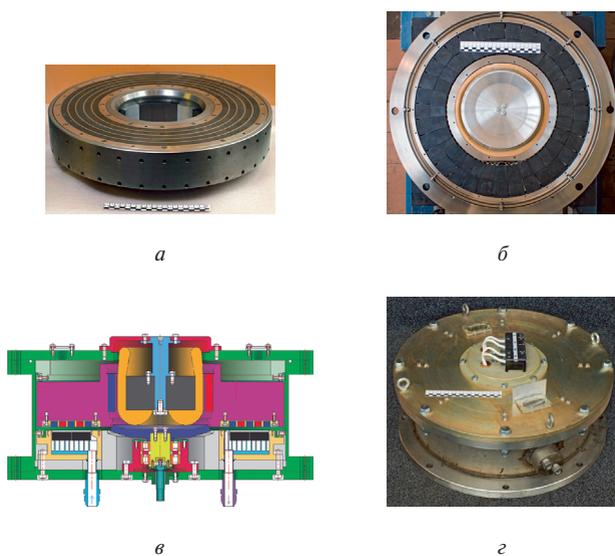


Рисунок 11 – Общий вид ЭМН-0,5 МДж:
a – маховик с ПМ; *б* – криостат с массивными ВТСП элементами;
в – модель ЭМН-0,5 МДж; *г* – ЭМН-0,5 МДж в сборе

На рисунке 12,*а* изображена характеристика захлаживания ВТСП подвеса. На рисунке 12,*б* изображен график выбега ЭМН с магнитным ВТСП подвесом на холостом ходу.

В пятой главе приведено описание, основные параметры, конструктивные особенности ЭМН с запасенной энергией 5 МДж, а также результаты расчета и проектирования и экспериментальных исследований макетного образца с применением вакуумирования корпуса и без.

Основные параметры разработанного опытного образца ЭМН приведены в таблице 3. Схема и фото разработанного электромеханического накопителя энергии с магнитным ВТСП подвесом с запасенной удельной энергией 5 МДж представлена на рисунке 13.

Время работы в режиме генератора 50 с. Отдаваемая в сеть мощность $P = 100$ кВт в диапазоне частот с 8000 до 5000 мин⁻¹, при напряжении $U_{л} = 380$ В.

Также проведены испытания без откачки воздуха из корпуса ЭМН для верификации методики расчета аэродинамических потерь. По полученным результатам экспериментальных исследований (см. рисунок 14) можно сделать выводы, ЭМН сохраняет устойчивость при набросе нагрузки в режиме разгона при прекращении разгона маховика. Из рисунка 15 видно, что разгон маховика происходит достаточно быстро несмотря на то, что мотор-генератор является немагнитной машиной, а масса маховика 600 кг, выбег занимает большое количество времени, даже с учетом того, что на данном этапе испытаний не проводилось вакуумирование корпуса ЭМН, то есть при воздействии аэродинамического трения.

На рисунке 16,*а* показано, что напряжение изменяется прямо пропорционально частоте вращения маховика, если снимать значения напря-

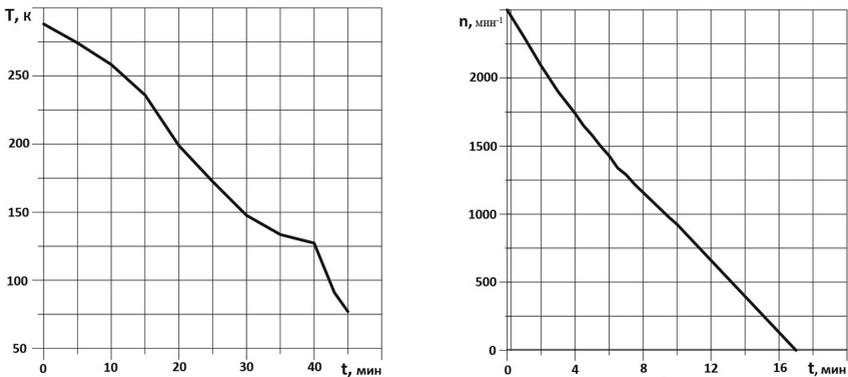
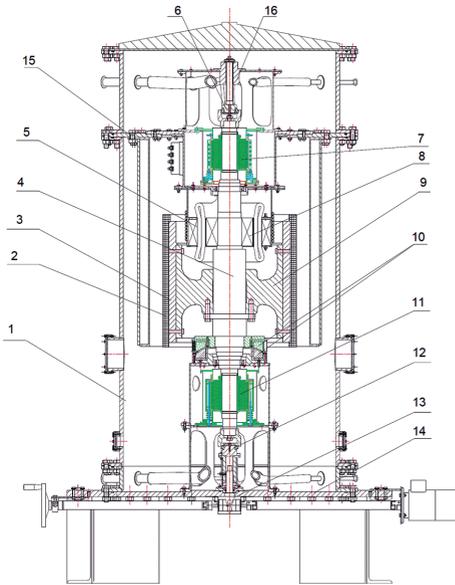


Рисунок 12 – Зависимости: *а* — падения температуры ВТСП в криостате во время захлаживания; *б* — падения частоты вращения маховика ЭМН с течением времени



а



б

Рисунок 13 – Конструкция ЭМН с магнитным ВТСП подвесом с запасенной энергией 5 МДж:

- а – конструкция: 1 – корпус; 2 – бандаж; 3 – стальная труба; 4 – вал;
 5 – статор мотор-генератора; 6 – опора верхняя; 7 – верхний ВТСП подвес;
 8 – ротор мотор-генератора; 9 – центральный диск; 10 – магнитная опора,
 11 – нижний ВТСП подвес; 12 – опора нижняя подвижная; 13 – арретир;
 14 – фланец нижний; 15 – защитный экран; 16 – фланец верхней опоры;
 б – фото образца ЭМН 5 МДж

Таблица 3 – Основные параметры опытного образца ЭМН с запасенной энергией 5 МДж

Наименование параметра, размерность	Значение
Запасаемая энергия, МДж	5,0
Выходная мощность, кВт	100
Частота питающего напряжения, Гц	300–400
Диапазон выходного напряжения, В	150–350
Частота выходного напряжения с использованием преобразователя, Гц	50
Время заряда, с	300
Время разряда, с	50

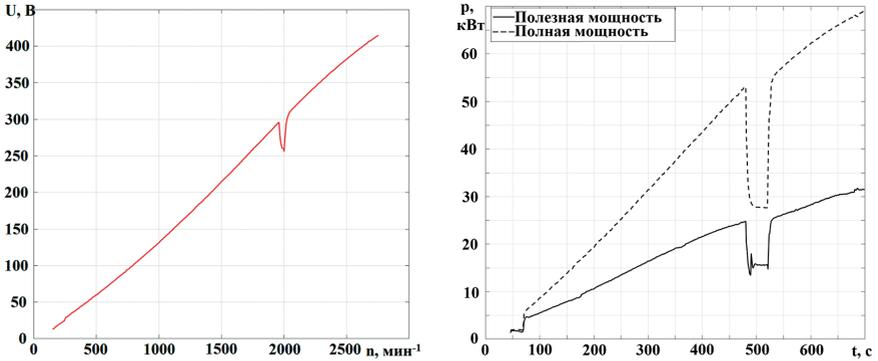


Рисунок 14 – Графики: *a* — напряжение мотор-генератора при разгоне маховика; *б* — зависимость мощности мотор-генератора от времени разгона маховика

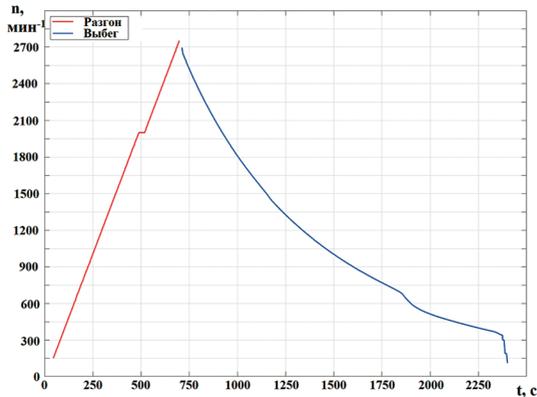


Рисунок 15 – Зависимость скорости вращения маховика от времени при разгоне и при выбеге на холостом ходу

жения непосредственно с обмоток мотор-генератора без использования инвертора.

На графике рисунка 16,б представлена зависимость тока, потребляемого мотор-генератором при разгоне маховика от времени. Два присутствующих провала связаны с прохождением критических частот и проверкой устойчивости работы ЭМН на критической частоте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что ЭМН является перспективной разработкой в области электроэнергетики и электромеханики, позволяющей заменить существующие источники аварийного питания, превосходя их по экономичности, надежности, долговечности и экологичности. ЭМН имеет широкие возможности для применения в различных системах электроснабжения.

2. ЭМН является наиболее простым и эффективным вариантом накопителя, который прост в обслуживании, удельные параметры и срок службы выше, чем у химических источников энергии. Учитывая это можно сказать, что создание и внедрение кинетических накопителей с различной мощностью и накопленной энергии приведет к развитию автономных сетей электроснабжения, а, следовательно, улучшению качества питания потребителей электроэнергии.

3. Проведенный обзор показал, что ЭМН по показателю удельной энергии и удельной мощности находится между АКБ и сверхпроводниковыми индуктивными накопителями, т.к. мощность ЭМН ограничена параметрами мотор-генератора. Также ЭМН обладают следующими преимуществами, по сравнению с другими типами накопления энергии: способность к практически неограниченному циклированию заряд-разряд, хорошая масштабируемость, а также модульность, на основе которой могут быть построены «матричные» системы накопления энергии на любые уровни запасаемой энергии и мощности, стационарного и передвижного исполнения.

4. Из концепции создания ЭМН различного назначения видно, что они могут быть использованы в качестве аварийного источника питания, источника бесперебойного питания ответственных потребителей, для выравнивания суточных нагрузок (день-ночь), а также могут быть использованы для улучшения показателей энергосистем при кратковременном включении потребителей повышенной мощности и рекуперацией энергии между генерирующими установками и потребителями, работающими в нестационарных режимах и на транспорте.

5. Для увеличения времени хранения запасенной энергии, необходимо минимизировать магнитные потери и потери на трение в скользящих контактах. Для исключения вышеперечисленных потерь, мотор генератор ЭМН должен быть выполнен в виде бесконтактной и неферромагнитной электрической машины, таким образом в режиме хранения энергии, при отключенной обмотке якоря, потери в мотор-генераторе не превышают 0,01, а при работе на полную мощность, при частоте вращения 8000 мин^{-1} , КПД составляет 98,7 %.

6. Выбрана рациональная конструктивная схема ЭМН с вертикальным расположением ротора, магнитными ВТСП подшипниками, магнитной опорой и мотор-генератором без ферромагнитопровода.

7. Созданы оригинальные методики расчета основных узлов ЭМН: мотор-генератора, маховика, магнитной опоры и ВТСП магнитных подшипников.

8. Разработаны, рассчитаны, спроектированы и изготовлены экспериментальные образцы ЭМН с запасенной энергией 0,5 МДж и 5 МДж.

9. Экспериментальные исследования созданных маломасштабных макетов ЭМН, позволили полностью верифицировать все использованные методики, при проектировании ЭМН с запасенной удельной энергией, от 0,5 до 5 МДж, а следовательно, при использовании методик для расчета ЭМН различной мощности и различных областей применения, разработанные методики и программы расчета можно рассматривать в качестве аналога «цифровых двойников», что существенно удешевит себестоимость разрабатываемых ЭМН.

10. Для увеличения устойчивости ВТСП опор, необходимо уменьшать величину магнитного зазора и температуру ВТСП элементов. Их уменьшение целесообразно во всем диапазоне и ограничивается лишь техническими и технологическими факторами.

11. Для эффективного функционирования сверхпроводника, необходимо обеспечить минимальный температурный перепад между ВТСП элементами и криоагентом.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК:

1. *Занегин С.Ю., Зубко В.В., Иванов Н.С., Ковалев К.Л., Подгузов В.А.* Экспериментальное и численное исследование потерь в ВТСП катушках переменного тока // *Электротехника*. 2022. № 6. С. 65–70.
2. *Подгузов В.А., Русанов Д.В., Голованов Д.В.* Кинетический накопитель энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2022. № 1. С. 169–174.
3. *Подгузова М.А., Шевцов Д.А., Шишов И.М., Подгузов В.А., Машуков Е.В.* Влияние паразитных параметров трансформатора гальванической развязки на процессы переключения драйверов силовых транзисторных ключей // *Практическая силовая электроника*. 2023. № 2 (90). С. 41–45.

Научные статьи в журналах, входящих в международные системы цитирования Scopus и WoS:

1. *Zanegin S.Y., Zubko V.V., Podguzov V.A., Zanegin Y.A.* DC and AC Testing of HTS Coils for Magnetolectric Generator // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2023, 33(6), 5203506.
2. *Zanegin S.Y., Zubko V.V., Ivanov N.S., Kovalev K.L., Podguzov V.A.* Experimental and Numerical Study of AC Losses in HTS Coils of AC Electric Machines // *Russian Electrical Engineering*, 2022, 93(6), pp. 424–429.
3. *K. Kovalev, N. Ivanov, S. Zhuravlev, M. Zdorova, A. Shirokov, N. Malevich, V. Kaderov, O. Kharkina, V. Podguzov, S. Zanegin, Y. Zanegin, V. Merkushev, A. Sukhanov, D. Shishov, V. Zubko*, Superconducting System with 100 kW Output Power for Experimental Research // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2022, 32(4).
4. *Podguzov V.A., Rusanov D.V., Golovanov D.V.*, Suspended Kinetic Energy Storage Based on High-Temperature Superconductors // *Russian Aeronautics*, 2022, 65(1), p.p. 193–199.
5. *Kovalev K., Ivanov N., Podguzov V., Zanegin S., Zhuravlev S.* Modelling and experimental research of machine with annular HTS winding using equivalent magnetic permeability *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2043(1), 012003.
6. *Kovalev K., Ivanov N., Zhuravlev S., ...Kuznetsov G., Podguzov V.* Calculation, design and test results of 3 kW fully HTS electric machine // *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2021, 587, 1353892.
7. *Zanegin S., Ivanov N., Zubko V., ...Shishov D., Podguzov V.* Measurements and analysis of ac losses in HTS windings of electrical machine for different operation modes//*Applied Sciences (Switzerland)*, 2021, 11(6), 2741.

8. *Sergey Zanegin, Nikolay Ivanov, Vasily Zubko, Konstantin Kovalev, Aleksey Alekseev, Vladimir Podguzov*, Maxim Ovdienko, Anton Varyukhin, Losses analysis of HTS racetrack coil carrying a distorted sinusoidal current // Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2021, p.p. 297–300.

9. *Zanegin S., Ivanov N., Zubko V., ...Shishov I., Podguzov V.*, Losses analysis of HTS racetrack coil operating in an external magnetic field // Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2020, 9278514.

10. *Podguzov V., Kovalev K., Zhuravlev S., Rusanov D., ...Zanegin S.*, Experimental research of stator with HTS ring winding // Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2020, 9278433.

В пунктах 1–3 перечня публикаций, личный вклад автора заключается в проведении экспериментальных исследований для верификации теоретических расчетов и в подготовке части статей с описанием эксперимента. В пунктах 4–13, личный вклад автора заключается в проведении экспериментальных и теоретических исследований и подготовке статей с описанием эксперимента.

Доклады и материалы конференций

1. *Ковалев К.Л., Подгузов В.А., Полтавец В.Н., Рusanov Д.В.* Кинетический накопитель энергии с запасенной энергией 0,5 МДж на основе магнитного ВТСП подвеса // В книге: *Авиация и космонавтика - 2017. тезисы.* Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2017. С. 188–189. Издательство: Типография «Люксор».

2. *Рusanov Д.В., Подгузов В.А.* Кинетический накопитель энергии // В сборнике: *Молодёжь и будущее авиации и космонавтики. 10-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов: аннотации конкурсных работ.* 2018. С. 135–136.

3. *Рusanov Д.В., Подгузов В.А.* Кинетический накопитель энергии // В книге: *Авиация и космонавтика - 2018. Тезисы 17-ой Международной конференции.* 2018. С. 206–208.

4. *Рusanov Д.В., Подгузов В.А.* Кинетический накопитель энергии с подвесом на основе высокотемпературных сверхпроводников // В книге: *Гагаринские чтения - 2018. Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции.* 2018. С. 317–319.

5. *Rusanov D.V., Podguzov V.A., Ilyasov R.I.* Principal analysis of hybrid power systems with hts electrical machines // В книге: *18th International Conference "Aviation and Cosmonautics – 2019" Abstracts.* Тезисы. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2019. С. 416.

6. *Русанов Д.В., Подгузов В.А., Ильясов Р.И.*, Принципиальный анализ гибридных силовых установок на основе сверхпроводниковых электрических машин // В книге: 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2019». Тезисы. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2019. С. 107.

7. *Русанов Д.В., Подгузов В.А.*, Концепции более электрического и полностью электрического самолетов // В книге: Гагаринские чтения - 2019. Сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной научной конференции. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2019. С. 474–475.

8. *Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Журавлев С.В., Подгузов В.А., Здорова М.В., Кадеров В.А., Широков А.А.* ВТСП электрические машины и устройства для гибридных силовых установок // В книге: 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». Тезисы 19-ой Международной конференции. Москва, 2020. С. 211–212.

9. *Подгузова М.А., Подгузов В.А.* Кинетический накопитель энергии // В книге: XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодёжной научной конференции. Москва, 2021. С. 505–506.

10. *Дежина И.Н., Подгузов В.А.* Методика расчета полностью сверхпроводниковой электрической машины // В книге: XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодёжной научной конференции. Москва, 2021. С. 488.