

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПЕЧАТНЫХ КРИОРЕЗИСТИВНЫХ ОБМОТОК ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

О. А. Юшкова, И. Р. Гарипов, И. Ф. Саяхов

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа

В статье представлен обзор литературы по криогенным электрическим машинам. Рассмотрены преимущества и недостатки их разработки и внедрения, проблемы, связанные с использованием высокотемпературных сверхпроводников. Рассмотрены различные подходы к криогенному охлаждению электрических машин, такие как непосредственный контакт хладагента с активными частями электрических машин и охлаждение через контакт активных частей с холодильной машиной. Представлено описание экспериментального стенда для оценки перспектив применения аддитивных технологий в проектировании и производстве обмоток для криогенных электрических машин и методика проведения испытаний печатной обмотки из алюминиевого сплава РС-300 (AlSi10Mg), изготовленной методом SLM-печати. Представлены результаты экспериментальных исследований, в ходе которых установлена зависимость между температурой обмотки, плотностью тока и мощностью тепловыделения. Сравниваются характеристики печатной алюминиевой обмотки с обмоткой из медного провода, изготовленной традиционным образом.

Ключевые слова: система охлаждения, криогенное охлаждение, печатная обмотка, аддитивные технологии, SLM печать, криогенная электрическая машина, AlSi10Mg.

Для цитирования: Юшкова О. А., Гарипов И. Р., Саяхов И. Ф. Перспективы применения 3D-печатных криореистивных обмоток для электрических машин // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 66–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-66-72. EDN: QNWIPM.



© Юшкова О. А., Гарипов И. Р., Саяхов И. Ф., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PROSPECTS FOR APPLICATION OF 3D-PRINTING CRYORESISTANT WINDINGS FOR ELECTRIC MACHINES

O. A. Yushkova, I. R. Garipov, I. F. Sayakhov

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

The article presents a review of the literature on cryogenic electric machines. The advantages and disadvantages of their development and implementation, problems associated with the use of high-temperature superconductors are considered. Various approaches to cryogenic cooling of electric machines are considered, such as direct contact of the coolant with the active elements of the electric machine and cooling through the contact of the active elements of the electric machine with the refrigeration machine. A description of an experimental stand for assessing the prospects for the use of additive technologies in the design and production of windings for cryogenic electric machines and a test methodology for a printed winding made of aluminum alloy RS-300 (AlSi10Mg), manufactured by SLM printing are presented. The results of experimental studies are presented, during which the relationship between the winding temperature, current density and heat dissipation power is established. The characteristics of the printed aluminum winding are compared with a winding made of copper wire manufactured in a traditional way.

Keywords: cooling system, cryogenic cooling, printed winding, additive technologies, SLM printing, cryogenic electric machine, AlSi10Mg.

For citation: Yushkova O. A., Garipov I. R., Sayakhov I. F. Prospects for application of 3D-printing cryoresistant windings for electric machines. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 66–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-66-72. EDN: QNWIPM.



© Yushkova O. A., Garipov I. R., Sayakhov I. F. 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Современные требования к электрическим машинам (ЭМ), используемым в авиационной, космической и транспортной технике, включают повышение энергетической эффективности и снижение удельной массы. Одним из перспективных направлений повышения их энергетической эффективности является применение криогенного охлаждения, при котором снижение температуры их активных частей, особенно обмоток, приводит к уменьшению электрического сопротивления и, как следствие, снижению потерь на нагрев. Это особенно актуально при использовании альтернативных источников энергии, таких как криогенные виды топлива (водород, метан и др.), хладоресурс которых может быть вовлечён в тепловой баланс установки.

Наряду с этим развитие технологий аддитивного производства, в частности послойного лазерного сплавления (SLM — Selective Laser Melting), открывает новые возможности в проектировании и изготовлении конструктивных элементов ЭМ. В первую очередь это касается оптимизации внутренних каналов охлаждения, уменьшения массы и повышения интеграции функциональных элементов. Однако широкое внедрение данной технологии в область ЭМ сдерживается недостаточной изученностью физико-технических характеристик материалов, полученных методом SLM, особенно при криогенных температурах.

В данной работе рассматривается возможность применения в обмотке ЭМ алюминиевого сплава PC-300 (AlSi10Mg), изготовленного методом SLM. Основное внимание уделено экспериментальному исследованию его электрических свойств в широком диапазоне температур. Работа направлена на исследование пригодности данного материала для использования в составе обмоток криогенно охлаждаемых ЭМ, с учётом специфики структуры и свойств, формируемых в процессе аддитивного производства.

Обзор применения криогенного охлаждения в электрических машинах

ЭМ с криогенным охлаждением обладают более высокой эффективностью, меньшей массой и меньшими размерами по сравнению с обычными машинами за счет использования способности проводников проводить большой ток с небольшим сопротивлением при охлаждении ниже определенной критической температуры [1–4].

Исторически основное внимание в разработке криогенных ЭМ уделялось сверхпроводниковым материалам. Низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) исследовались с 1960-х годов, однако их применение оказалось ограниченным вследствие громоздкости и высокой стоимости охлаждающих систем. Открытие высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в конце 1980-х годов упростило требования к охлаждению, но технологические барьеры и высокая стоимость сохраняются [5].

В настоящее время продолжают исследования в области применения резистивных (несверхпроводящих) обмоток, охлаждаемых до криогенных температур. Например, алюминий, несмотря на его более высокое удельное сопротивление по сравнению с медью при комнатной температуре, при охлаждении до 77 К демонстрирует снижение сопротивления в 8–10 раз [6], что делает его более приемлемым проводником для применения в условиях криогенного охлаждения. Более того, в этих

условиях возрастающее сопротивление алюминия по сравнению с медью способствует снижению потерь на вихревые токи в высокочастотных режимах, характерных для авиационных и транспортных ЭМ.

Тем не менее повсеместному внедрению криогенного охлаждения препятствует высокая стоимость, энергоёмкость охлаждающих систем и необходимость теплоизоляции активных компонентов. Для отвода всего 1 Вт тепла при температуре 77 К требуется 12–20 Вт мощности охлаждающей установки, а при 20 К — уже 100–200 Вт [7–9]. Эти параметры делают экономически нецелесообразным внедрение криогенных систем без дополнительной синергии с другими функциональными контурами.

Таким образом, актуальной становится концепция интеграции систем охлаждения ЭМ с существующими на борту источниками холода, такими как криогенное топливо. Например, в [10] описан подход, при котором тепло, выделяемое ЭМ, используется для регазификации метана перед его подачей в камеру сгорания, что позволяет реализовать компактную и энергетически эффективную архитектуру (рис. 1). Аналогичные схемы обсуждаются и для беспилотных авиационных платформ [11–12].

С точки зрения реализации криогенного охлаждения различают два подхода: с непосредственным контактом хладагента с обмотками (рис. 2а) [13–23] и с передачей тепла через тепловой мост (рис. 2б) [24–25]. Первый способ более эффективен по теплообмену и применяется в высокомоощных (>100 кВт) машинах. Второй упрощает компоновку, устраняя необходимость в циркуляции хладагента внутри ЭМ.

Развитие аддитивных технологий, таких как SLM, предоставляет новые возможности для реализации конструкций криогенно охлаждаемых обмоток. SLM позволяет изготавливать проводящие структуры со сложной геометрией и встроенными каналами охлаждения, обеспечивая снижение массы, повышение тепловой эффективности и оптимизацию токопроводящих путей. При этом алюминиевые сплавы, например PC-300 (AlSi10Mg), хорошо поддаются SLM-обработке, имеют малую плотность и достаточную прочность, что делает их перспективными для авиационных приложений.

Настоящее исследование направлено на оценку электрических свойств алюминиевого сплава PC-300 (AlSi10Mg), полученного методом SLM, в диапазоне температур от комнатной до криогенной, с целью определения перспективности применения таких обмоток в составе криогенно охлаждаемых ЭМ с учётом энергетической эффективности, массогабаритных характеристик и технологичности конструкции. Особое внимание уделяется возможности интеграции охлаждающих каналов и снижению потерь на вихревые токи за счёт оптимального соотношения удельного сопротивления и геометрии проводников.

Описание эксперимента

Для исследования перспектив применения аддитивных технологий в проектировании и производстве обмоток ЭМ, работающих в условиях криогенного охлаждения, экспериментальным путем устанавливается зависимость между температурой обмотки T , плотностью тока J и мощностью тепловыделения обмотки Q .

Для проведения экспериментальных исследований и проверки основных характеристик печат-

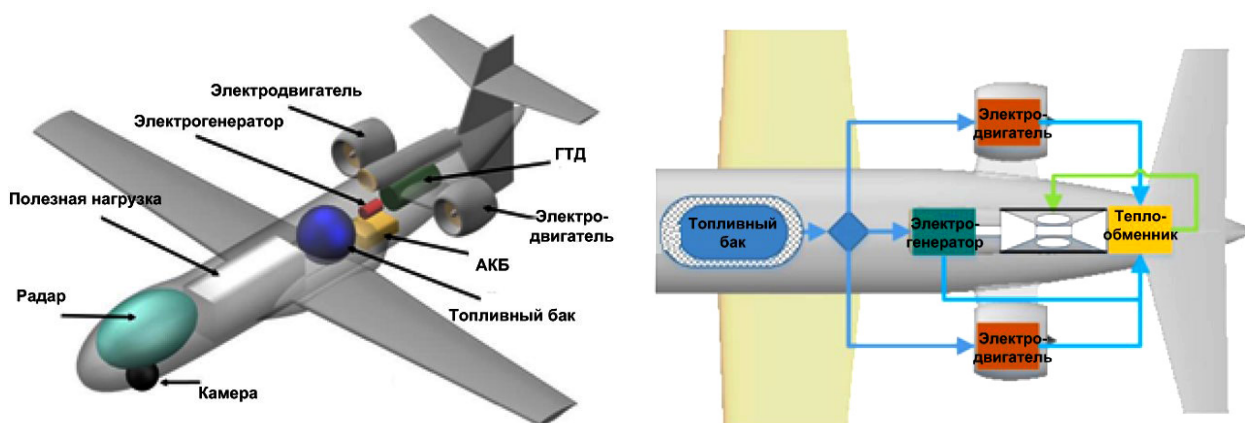


Рис. 1. Облик летательного аппарата с криогенным охлаждением ЭМ:
а — концептуальный облик летательного аппарата;
б — функциональная схема силовой установки
Fig. 1. Appearance of the aircraft with cryogenic cooling of the electric machine: a — conceptual appearance of the aircraft;
б — functional diagram of the power plant

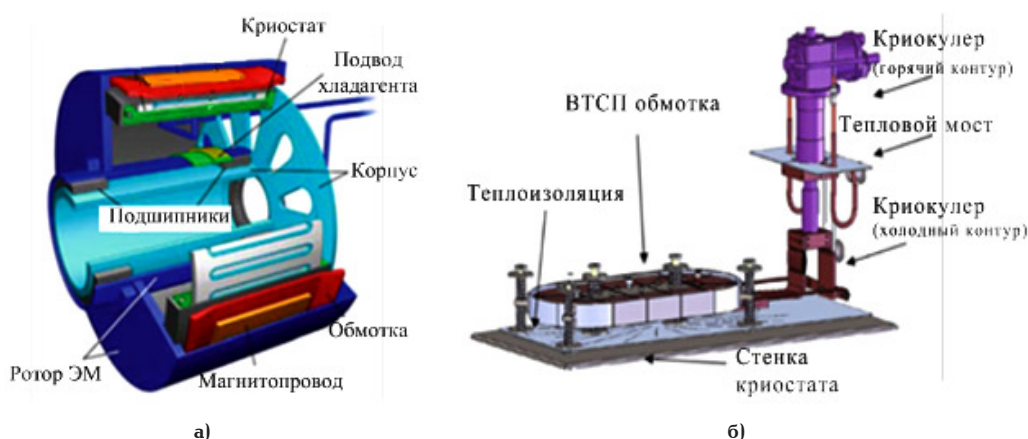


Рис. 2. Схемы криогенного охлаждения ЭМ:
а — с непосредственным контактом хладагента; б — через тепловой мост
Fig. 2. Schemes of cryogenic cooling of an electric machine:
а — with direct contact of the coolant; б — through a thermal bridge

ной обмотки был разработан стенд (рис. 3), содержащий:

- экспериментальный макет для исследования обмотки (далее — макет обмотки);
- емкость для погружения обмотки с изоляцией;
- программируемый источник питания постоянного тока;
- весы электронные Scarlett IS-565;
- мультиметр цифровой APPA 207.

Для упрощения конструкции стенда на первом этапе испытаний печатных обмоток изменение расхода хладагента не происходит. Охлаждение обмоток осуществляют путем погружения в емкость с жидким азотом. Емкость для погружения обмотки не пополняется хладагентом. Стенд обеспечивает постоянную температуру окружающей среды ($T = -196^\circ\text{C}$) при различных уровнях нагрузки ($J = 10 - 70 \text{ А/мм}^2$). Тепло от обмоток отводится посредством фазового перехода хладагента. Принятое упрощение снижает интенсивность охлаждения, однако не влияет на адекватность результатов эксперимента в связи с малыми размерами макетного образца. Снижение интенсивности охлаждения мо-

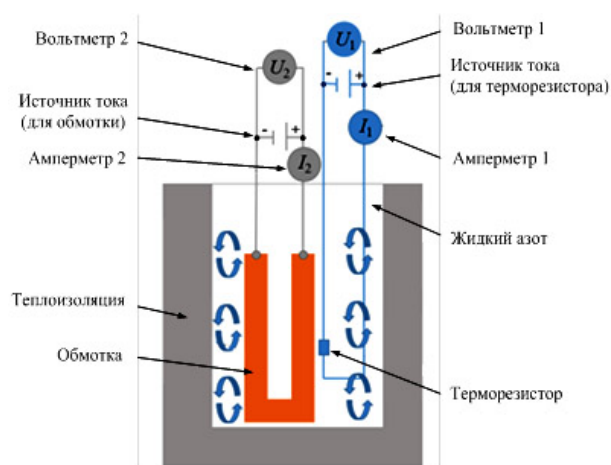


Рис. 3. Схема стенда системы испытания криорезистивных обмоток
Fig. 3. Scheme of the test stand for cryoresistive windings

жет компенсироваться большим объемом используемого хладагента.



а) б)
Рис. 4. Макет обмотки, изготовленной с помощью SLM:
а — макет печатной обмотки; б — макет из провода ПНЭТ-имида
Fig. 4. Winding layout manufactured using SLM:
а — printed winding layout; б — layout made of PNET-imid wire

Термометр сопротивления размещают в макете обмотки в местах с максимальным превышением температуры в соответствии с предварительно проведенным тепло-гидравлическим расчетом. Термометр сопротивления работает следующим образом: от программируемого источника питания АКИП-1128 (A_1 на рис. 3) ток I_1 поступает на медную проволоку, в зависимости от температуры $T_{окр}$ изменяется сопротивление R_1 и напряжение U_1 проволоки. Напряжение и сопротивление связаны через закон Ома для участка цепи ($R_1 = U_1/I_1$). Напряжение замеряется на мультиметре АРРА-207 (U_1 на рис. 3). Температура пересчитывается по сопротивлению, температурный коэффициент составляет $k = 0,003905$ 1/К. Первый датчик температуры располагают в зоне пайки обмотки к выводным проводам, второй — в области лобовой части обмотки. Крепление термпары осуществляется полиамидным скотчем.

Контроль температуры обмотки осуществляют через замеры напряжения в обмотке U_2 на мультиметре АРРА 207 с последующим пересчетом температуры по температурному коэффициенту для меди. За начальную точку для определения зависимости сопротивления от температуры принимают: $T_{об} = 24,1$ °С, $I_2 = 40$ А; $R_2 = 0,1325$ мОм. Данным условиям соответствует напряжение $U_2 = 0,1325$ В. Определение массы испарившегося хладагента осуществляется по показаниям весов Scarlett IS-565 m.

Экспериментальный макет для исследования обмотки сконструирован так, чтобы достоверно повторять одну секцию обмотки статора ЭМ. Конструкция макета печатной обмотки представлена на рис. 4а. Макет обмотки представляет собой катушку из материала РС-300 (AlSi10Mg), изготовленную методом SLM-печати на 3D-принтере производства АО «Лазерные системы». Дополнительно изготовлен образец из провода ПНЭТ-имида для сопоставления (рис. 4б).

Выводы обмоток, изготовленные из провода сечением 50 мм², подключают к источнику питания. Крепление выводов к образцу печатной обмотки осуществляют пайкой. Макет обмотки оснащен двумя терморезистивными датчиками Pt-100. Катушка содержит 1 виток алюминия РС-300 (AlSi10Mg) сечением $S = 3,925$ мм², что эквивалентно 80 виткам из провода ПНЭТ-имида диаметром $D = 0,5$ мм.

Набор устройств контроля включает в себя: программируемый источник питания постоянного тока; программируемый источник питания; два цифровых мультиметра АРРА 207; электронные весы Scarlett IS-565. Данный набор устройств контроля и измерения позволяет фиксировать параметры

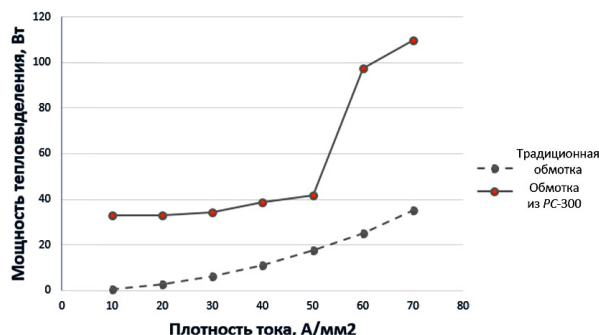


Рис. 5. Сравнение результатов расчета
Fig. 5. Comparison of calculation results

электрической цепи: силу тока I и напряжения, изменения массы хладагента, а также температуры на поверхностях обмотки.

На стенде проводится серия экспериментов, включающих в себя испытания обмоток при плотности тока $J = 10-70$ А/мм² с шагом $\Delta J = 10$ А/мм². В пересчёте на силу тока ($I = J \cdot S$) от источника получим следующие значения: 40 А, 80 А, 120 А, 160 А, 200 А.

При подготовке стенда к работе и проведении испытаний выполняются следующие операции:

— заполненную хладагентом емкость помещают на электронные весы;

— обмотку погружают в емкость с хладагентом, после чего на термометр сопротивления подают ток I_1 , далее визуальным контролем значения напряжения U_1 на вольтметре 1 определяют установившийся режим работы;

— после установления температуры на обмотку подают ток I_2 , после чего измеряют напряжение U_2 на обмотке и массу испарившегося хладагента m .

Перед началом испытаний производят контроль параметров. Во время эксперимента температура окружающего воздуха составляла $T_{окр} = 24,4$ °С, температура азота $T_{азот} = -196$ °С (при $I_1 = 1,5$ А; $U_1 = 0,0039$ В); сопротивление обмотки $R_2 = 0,1325$ мОм (при $T_{об} = 24,4$; $I_2 = 40$ А; $U_2 = 0,1325$ В), масса азота в емкости $m_a = 0,354$ кг. Теплота испарения азота принималась $r = 199,92$ кДж/кг.

Результаты эксперимента

Эксперимент проводился в течение 35 минут. После 5 минут испытаний подачу тока прекращали, а емкость заполняли хладагентом до начального уровня. За счет кипения жидкого азота обеспечивалось постоянство температуры окружающей среды.

С интервалом в 1 минуту производились замеры массы выкипевшего хладагента и напряжения. Результаты исследования представлены на рис. 5.

Холодопроизводительность системы рассчитывалась через значение доли выкипевшего азота:

$$Q = \dot{m} \cdot r,$$

где Q — холодопроизводительность, т.е. количество тепла, которое система отводит в единицу времени (Вт, кВт); $\dot{m}$ — массовый расход, т.е. количество хладагента, которое испаряется в единицу времени (кг/с); r — удельная теплота парообразования (испарения), т.е. количество тепла, необходимое для испарения одного килограмма жидкости при постоянной температуре и давлении (Дж/кг). Удельная теплота испарения азота принималась $r = 199,92$ кДж/кг.

Экспериментальные исследования показали, что при одинаковой плотности тока печатная алюминиевая обмотка, изготовленная методом порошковой металлургии, демонстрирует повышение температуры на 10°C по сравнению с традиционной обмоткой из медного провода. Это обусловлено более высоким удельным электрическим сопротивлением материала, сформированного аддитивным методом, что связано с его микроструктурой и возможной пористостью. В ходе испытаний был зафиксирован значительный локальный перегрев в зоне крепления выводных проводов, что свидетельствует о термических дефектах соединений, влияющих на распределение тепловых полей и требующих дополнительного внимания при проектировании обмоток.

Холодопроизводительность системы охлаждения оценивалась посредством измерения доли испарившегося жидкого азота, который в процессе фазового перехода поглощает энергию, выделяемую как внутренними тепловыделениями в обмотках, так и внешними теплопритоками. Внешние теплопритоки составляли порядка 20–30 Вт, что необходимо учитывать при проектировании и калибровке экспериментального стенда, чтобы отделить собственно тепловыделения обмоток от внешних источников. Установлена количественная зависимость между плотностью тока и необходимым расходом хладагента: увеличение плотности тока в образце, выполненном аддитивным способом, в 7 раз приводит к возрастанию расхода жидкого азота примерно в 2,5 раза. Представленные данные подчёркивают важность точного теплового баланса при проектировании систем криогенного охлаждения.

Заключение

Применение криогенного охлаждения в электрических машинах позволяет значительно повысить их энергетическую эффективность за счёт снижения электрических и тепловых потерь. Однако реализация подобных систем сопряжена с высокой сложностью и затратностью, требует использования специализированных материалов и оборудования, способных работать при экстремально низких температурах.

В настоящей работе разработан экспериментальный стенд для испытаний обмоток, изготовленных аддитивным методом, в условиях, приближенных к реальным криогенным режимам. Результаты показали, что аддитивные алюминиевые обмотки имеют более высокое удельное сопротивление и, как следствие, более выраженный нагрев по сравнению

с традиционными обмотками. Локальные перегревы в зонах соединений выявляют необходимость улучшения технологий монтажа и соединения выводных проводов. Метод измерения холодопроизводительности по доле испарившегося жидкого азота доказал свою применимость, однако требует тщательного учёта внешних теплопритоков для корректного анализа теплового баланса.

Данные результаты подтверждают потенциал аддитивных технологий для производства обмоток в криогенных электрических машинах, однако указывают на необходимость дальнейших комплексных исследований. В частности, требуется изучение поведения таких обмоток при воздействии переменных и импульсных токов с различными методами модуляции (широотно-импульсной, частотно-импульсной), а также оптимизация конструкции и материала для повышения тепловой устойчивости и снижения потерь.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена при поддержке Российской государственной научной организации в рамках научного проекта № 24-29-00177 «Исследование и совершенствование систем охлаждения для повышения удельной мощности электрических машин».

The work has supported by the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 24-29-00177 "Research and improvement of cooling systems to increase the power density of electric machines".

Список источников / References

1. Jansen R. H., Brown G. V., Felder J. L., Duffy K. P. Turboelectric aircraft drive key performance parameters and functional requirements. *Proceedings of AIAA Propulsion & Energy*. Orlando, FL, USA. 2015. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160006295> (accessed: 14.02.2025).
2. Berg F., Palmer J., Miller P., Dodds G. HTS system and component targets for a distributed aircraft propulsion system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017. Vol. 27 (4). P. 1–7. DOI: 10.1109/TASC.2017.2652319.
3. Ковалев А. К., Ларионов А. Е., Модестов К. А. [и др.]. Перспективы применения криогенных электрических машин в авиации // *Электричество*. 2015. № 1. С. 4–13. EDN: TGTGYP.
4. Kovalev L. K., Larionov A. E., Modestov K. A. [et al.]. Perspektivy primeneniya kriogennykh elektricheskikh mashin v aviatsii [Prospects for using cryogenic electrical machines in aircraft engineering]. *Elektrichestvo*. 2015. No. 1. P. 4–13. EDN: TGTGYP. (In Russ.).
5. Ковалев К. А., Дежин Д. С., Иванов Н. С. Оценка перспектив увеличения удельной мощности электрических машин для БЭС и ПЭС // *Вестник РГТУ. имени П. А. Соловьева*. 2015. № 4 (35). С. 9–16. EDN: VJIMVX.
6. Kovalev K. L., Dezhin D. S., Ivanov N. S. Otsenka perspektiv uvelicheniya udel'noy moshchnosti elektricheskikh mashin dlya BES i PES [Possible ways to increase specific power of electrical machines for electric airplanes]. *Vestnik RGATU. imeni P. A. Solovyeva*. 2015. No. 4 (35). P. 9–16. EDN: VJIMVX. (In Russ.).
7. Ковалёв А. К., Ковалёв К. А., Колчанова И. П., Полтавец В. Н. Зарубежные и российские разработки в области создания сверхпроводниковых электрических машин и устройств // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2012. № 6. С. 3–26. EDN: PJCMTH.
8. Kovalev L. K., Kovalev K. A., Kolchanova I. P., Poltavets V. N. Zarubezhnyye i rossiyskiye razrabotki v oblasti sozdaniya

- sverkhprovodnikovyykh elektricheskikh mashin i ustroystv [Foreign and Russian developments in the sphere of creation of superconducting electrical machines and devices]. *Izvestiya Akademii nauk. Energetika. Proceedings of the Russian academy of Sciences. Power Engineering*. 2012. No. 6. P. 3–26. EDN: PJCMTH. (In Russ.).
6. Guo Y., Majoros M., Cantemir C. G. [et al.]. Experimental study of two-phase cryogenic cooling of aluminum stator conductors using a single slot test configuration. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2024. Vol. 1301 (1). P. 012161. DOI: 10.1088/1757-899X/1301/1/012161.
7. Biasion M., João Fernandes F. P., Branco P. J. d. C., Vaschetto S. [et al.]. A Comparison of Cryogenic-Cooled and Superconducting Electrical Machines. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2021. P. 4045–4052. DOI: 10.1109/ECCE47101.2021.9595182.
8. Гарипов И. Р., Ахмедзянов Д. А. Системы терморегулирования перспективных дозвуковых летательных аппаратов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2023. Т. 27, № 2 (100). С. 100–118. DOI: 10.54708/19926502_2023_272100100. EDN: AAGXHZ.
- Garipov I. R., Akhmedzyanov D. A. Sistemy termoregulirovaniya perspektivnykh dozvukovykh letatel'nykh apparatov [Thermal management systems for advanced subsonic aircrafts]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. Vestnik UGATU*. 2023. Vol. 27, no. 2 (100). P. 100–118. DOI: 10.54708/19926502_2023_272100100. EDN: AAGXHZ. (In Russ.).
9. Grilli F., Pardo E., Stenvall A., Nguyen D. N. Computation of losses in HTS under the action of varying magnetic fields and currents. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2014. Vol. 24 (1). P. 78–110. DOI: 10.1109/TASC.2013.2259827.
10. Sibilli T., Senne C., Jouan H. [et al.]. Synergistic hybrid-electric liquid natural gas drone: S.H.I.E.L.D. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2020. Vol. 92, no. 5. P. 757–768. DOI: 10.1108/AEAT-10-2019-0211.
11. Çınar H., Kandemir I., Donato T. Current Technologies and Future Trends of Hydrogen Propulsion Systems in Hybrid Small Unmanned Aerial Vehicles. *Hydrogen Electrical Vehicles*. Wiley & Sons Ltd, 2023. P. 75–109. ISBN 978-1-394-16638-1.
12. Гарипов И. Р., Саяхов И. Ф., Юшкова О. А. [и др.]. Обзор систем охлаждения криогенных электрических машин // Materials. Technologies. Design. 2023. Т. 5, № 1 (11). С. 13–26. DOI: 10.54708/26587572_2023_511113. EDN: KEVOXT.
- Garipov I. R., Sayakhov I. F., Yushkova O. A. [et al.]. Obzor sistem okhlazhdeniya kriogennykh elektricheskikh mashin [Overview of cooling systems for cryogenic electric machines]. *Materials. Technologies. Design*. 2023. Vol. 5, no. 1 (11). P. 13–26. DOI: 10.54708/26587572_2023_511113. EDN: KEVOXT. (In Russ.).
13. Montoya R. A., Delgado S., Castilla J. [et al.]. Methods to simplify cooling of liquid helium cryostats. *HardwareX*. 2019. Vol. 5. DOI: 10.1016/j.ohx.2019.e00058.
14. Karagusov V. I., Levin S. L., Svjatij V. V., Goshlja R. Ju. Superfluid helium cryostat for sensitive elements cooling. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 152 (4). P. 439–445. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.615.
15. Dyson R. W., Jansen R. H., Duffy K. P., Passe P. J. High efficiency megawatt machine rotating cryocooler conceptual design. *2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)*. 2019. P. 1–15. DOI: 10.2514/6.2019-4515.
16. Duffy K., Passe P., Dyson R. [et al.]. High Efficiency Megawatt Motor (HEMM) Cryocooler Linear Motor – Analysis and Test. *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*. 2020. DOI: 10.2514/6.2020-3601.
17. Xiao J., Zhao Y., Dutta R., Haran K. Rotating Cryocooler Performance for Superconducting Rotor. *2023 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*. 2023. DOI: 10.1109/PECI57361.2023.10197681.
18. Redmond J. H., Bott F. W. Development of cryogenic electric motors. SAE Technical Paper 640023. 1964. DOI: 10.4271/640023.
19. Chao G., Jiabao W., Shoudao H., Yaojing F. Characteristic analysis of the cryogenic permanent magnet synchronous motor for the submerged LNG pump. *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEMS.2017.8056434.
20. Chengliu Ai., Yuanfeng Hu., Haifeng W. Main losses study of cryogenic induction motor for submerged liquid natural gas pump. *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2015. P. 133–136. DOI: 10.1109/ICEMS.2015.7385014.
21. Guechi M., Desevaux P., Baucour P. [et al.]. Spray cooling of electric motor coil windings. *Journal of Computational Multiphase Flows*. 2016. Vol. 8 (2). P. 95–100. DOI: 10.1177/1757482X16653895.
22. Ping S., JinCheng F., Wei D. [et al.]. Study on Radial Oil Spray Cooling of end Windings with Hairpin Motors. DOI: 10.2139/ssrn.4718093.
23. Ghahfarokhi P. S., Podgornovs A., Kallaste A. [et al.]. Oil Spray Cooling with Hairpin Windings in High-Performance Electric Vehicle Motors. *2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)*. 2021. 9376390. DOI: 10.1109/IWED52055.2021.9376390.
24. Kim Y., Ki T., Kim H. [et al.]. High temperature superconducting motor cooled by on-board cryocooler. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011. Vol. 21 (3). P. 2217–2220. DOI: 10.1109/TASC.2010.2094597.
25. Atrey M. D. Cryocoolers: Theory and Applications. Springer Nature, 2020. 236 p.
- ЮШКОВА Оксана Алексеевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), старший научный сотрудник Передовой инженерной школы (ПИШ) «Моторы будущего» Уфимского университета науки и технологий (УУНИТ), г. Уфа.
SPIN-код: 8797-3363
AuthorID (РИНЦ): 725096
ORCID: 0009-0007-2446-4538
AuthorID (SCOPUS): 56708635300
ResearcherID: O-6498-2017
Адрес для переписки: yushkova-usatu@bk.ru
- ГАРИПОВ Искандер Радикович**, аспирант, инженер ПИШ «Моторы будущего» УУНИТ, г. Уфа.
SPIN-код: 6803-6722
AuthorID (РИНЦ): 1134606
ORCID: 0000-0001-7966-8967
AuthorID (SCOPUS): 57447078200
Адрес для переписки: garipovir@yahoo.com
- САЯХОВ Ильдус Финатович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ПИШ «Моторы будущего» УУНИТ, г. Уфа.
SPIN-код: 7833-684
AuthorID (РИНЦ): 918578
ORCID: 0000-0001-8545-9862
AuthorID (SCOPUS): 57195195950
ResearcherID: O-3928-2017
Адрес для переписки: isayakhov92@mail.ru
- Прозрачность финансовой деятельности:** авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.
- Статья поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 18.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.

YUSHKOVA Oksana Alekseyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Motors of the Future Advanced Engineering School, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 8797-3363

AuthorID (RSCI): 725096

ORCID: 0009-0007-2446-4538

AuthorID (SCOPUS): 56708635300

ResearcherID: O-6498-2017

Correspondence address: yushkova-usatu@bk.ru

GARIPOV Iskander Radikovich, Postgraduate, Engineer at the Motors of the Future Advanced Engineering School, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 6803-6722

AuthorID (RSCI): 1134606

ORCID: 0000-0001-7966-8967

AuthorID (SCOPUS): 57447078200

Correspondence address: garipovir@yahoo.com

SAYAKHOV Ildus Finatovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Motors of the Future Advanced Engineering School, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 7833-684

AuthorID (RSCI): 918578

ORCID: 0000-0001-8545-9862

AuthorID (SCOPUS): 57195195950

ResearcherID: O-3928-2017

Correspondence address: isayakhov92@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 25.03.2025; approved after reviewing 18.06.2025; accepted for publication 25.06.2025.