

ВТСП электрические машины: актуальные проекты и перспективные области применения

КОВАЛЕВ К.Л., ИВАНОВ Н.С., КАДЕРОВ В.А., МАЛЕВИЧ Н.А.

МАИ (НИУ), Москва, Россия

Последнее время всё больше внимания уделяется экологической политике, целью которой является сохранение благоприятной окружающей среды для нынешнего и будущих поколений. В то же время мир нуждается в более мощных источниках электроэнергии для успешной электрификации, поскольку во многих отраслях промышленности достигнуты предельно возможные значения мощностных показателей электрических машин. Одним из решений возникшей проблемы является внедрение высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов в сферу электромеханических преобразователей. Использование высокотемпературных электрических машин является перспективным направлением развития отрасли электромеханики благодаря их значительным преимуществам в виде более высокой эффективности и удельной мощности по сравнению с традиционными электрическими машинами. Переход к ВТСП-машинам позволит удовлетворить растущие потребности в электрических машинах с высокой мощностью и уменьшить углеводородные выбросы в окружающую среду. Особенно перспективными являются авиаотрасль, где важны высокие массогабаритные показатели, ветроэнергетика и морская энергетика. В статье представлен обзор мировых проектов в области сверхпроводниковой энергетики, анализ готовности проектов, а также рассмотрены особенности конструкций некоторых образцов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сверхпроводящие машины, электрические силовые установки, двигатели, генераторы, высокая плотность мощности, ветроэнергетика, авиационная энергетика, морская энергетика

Современные тенденции в электромашиностроении сводятся к увеличению мощности, эффективности и одновременному снижению массы и размеров машин. В целом, это тренд, существующий на протяжении всей истории электромеханики. Однако сегодня этому уделяется особое внимание в силу экологической повестки. Кроме того, создание высокоэффективных электрических двигателей и генераторов различного назначения является ключевой задачей с точки зрения обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации. Различные предприятия и научные центры страны ведут активную работу по созданию таких электрических машин [1]. Однако в ряде случаев достижение показателей, превышающих уже существующие образцы техники, возможно только с применением принципиально новых технологий, к которым относится, в том числе, высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП).

Известно, что современные сверхпроводники (СП) имеют допустимую плотность тока, которая в несколько раз превышает плотность тока медных проводников [2]. Это, в свою очередь, дает возможность увеличения электромагнитных нагрузок электрических машин, их удельной мощности и КПД. Однако применение сверхпроводников в составе электрических машин

требует учета большого количества особенностей, связанных с сильными магнитными полями, нелинейными свойствами СП, криогенными температурами и т.д. [3]. Все это, к сожалению, ограничивает область применения СП электрических машин. Целью исследований является определение наиболее рациональных направлений для внедрения СП электрических машин в различные области техники. Для этого проведены обзор существующих проектов ВТСП электрических машин во всем мире, их классификация по уровням готовности технологии и анализ перспектив развития проектов.

Анализ литературных источников показал, что созданием ВТСП-электрических машин в мире занимается большое количество компаний и научных центров [4–6]. Как известно, проекты в области ВТСП электрических машин появились после 2000 г. За прошедшее время свойства ВТСП-материалов существенно изменились, появились новые, например ВТСП-ленты первого и второго поколения. Началом текущего технологического этапа развития ВТСП-материалов можно считать 2016 г., когда критический ток ВТСП-лент превысил 100 А при температуре 77 К, а длина единичных отрезков стала больше 500 м. Именно поэтому мы сосредоточились на проектах после 2016 г.

В таблице приведены наиболее интересные из рассмотренных проектов и дана их классификация. Как видно, все проекты из списка разбиты на три категории по области применения: ветроэнергетика, морская техника и летательные аппараты. Это является результатом проведенного обзора: большинство проектов сосредоточены именно в этих областях, что обусловлено особенностями машин, в них используемых. Например, генераторы для ветроэнергетики и гребные электродвигатели имеют низкую частоту вращения, определяющую их существенную массу и размеры. Применение ВТСП-обмоток позволяет уменьшить их. Авиационные системы очень чувствительны к массе устройств, именно поэтому применение сверхпроводниковых электрических машин в их составе также является актуальным. Рассмотрим проекты более подробно.

Область ветроэнергетики традиционно считается перспективной для применения ВТСП-электрических машин, так как в случае использования прямого привода от ветроколеса частота вращения генератора мощных ВЭУ составляет единицы мин^{-1} , что определяет существенные размеры генератора. В проектах [7–9, 11, 13, 30] приводятся исследования различ-

ных параметров ВТСП электрических машин для ВЭУ. В работе [11] рассматривается ветрогенератор с ВТСП-обмоткой якоря и возбуждением от постоянных магнитов. Основное исследование в статье посвящено определению влияния размеров магнитной цепи статора на величину и направление вектора магнитной индукции в области ВТСП-катушек и, соответственно, на их критический ток. В работе [7] рассматривается электрическая машина со стационарной ВТСП-обмоткой возбуждения и медной обмоткой якоря. Ротор представляет собой сочетание ферромагнитных и немагнитных участков. Такая конструкция позволила отказаться от вращающихся криостатов и уплотнений. При этом в конструкции использованы индивидуальные криостаты ВТСП-катушек. Для демонстрации предложенных подходов изготовлен образец мощностью 6 кВт при 200 мин^{-1} и 77 К. В статье описаны результаты эксперимента с прототипом, которые, однако, не включают в себя данных о потерях, мощности, соответствии результатов расчета и эксперимента.

Важно отметить, что в литературе встречаются публикации, посвященные оценке экономической эффективности использования ВТСП-генераторов в составе ВЭУ. Например, в [8] приводится сравнение стоимости

Проекты ВТСП электрических машин
Projects of HTS electric machines

Страна	Год	Уровень готовности	Частота вращения, об/мин	Мощность	Температура, К	Применение	Разработчик
Китай	2018	4–5	200	6 кВт	65–77	Ветроэнергетика	[7]
Вьетнам, Франция	2022	2–3	5,9	2–23 МВт	10–20		[8]
Нидерланды	2017	2–3	9,6	10 МВт	20		[9]
Германия	2020	7	15	3,6 МВт	30		[10]
Китай	2021	2–3	9,6	10 МВт	30		[11]
Корея	2016	2–3	8	12 МВт	15		[12]
Китай, Германия	2021	2–3	10	10 МВт	30		[13]
Корея	2016	2–3	213	5 МВт	30	Морская техника	[14]
Япония	2018	2–3	16	1 МВт	77		[15]
Япония	2022	2–3	12,2	420 кВт	??		[16]
Япония	2018	4–5	160	3 МВт	30		[17]
Южная Корея	2019	2–3	190	1 МВт	30		[18]
Австралия	2016	4–5	3600	200 кВт	30		[19]
США	2019	4	6800	1,4 МВт	60	Летательные аппараты	[20]
Норвегия	2022	2–3	3500	2,5 МВт	45–55		[21]
Россия	2022	4–5	6000	90 кВт	77		[22]
Россия	2021	4–5	–	500 кВт	77		[23]
Франция	2020	4–5	5000	50 кВт	30		[24]
Япония	2021	4	500	1 кВт	65		[25]
Япония	2022	2–3	6000	10 МВт	65		[26]
Китай	2023	3	6000	10 МВт	20		[27]
Германия	2020	4	7000	10 МВт	20		[28]
Китай	2022	3	6000	1 МВт	60		[29]

ВТСП-генератора и генератора с постоянными магнитами для ВЭУ. Указывается, что стоимость ВТСП-генератора становится ниже уже при мощности 5 МВт даже с учетом стоимости криокулеров. В статье [31] проведен глубокий анализ экономических аспектов использования ВТСП-ветрогенератора с учетом не только стоимости его изготовления, но и эксплуатации на жизненном цикле. В результате делается вывод, что применение ВТСП-генераторов может быть целесообразно для ветропарка суммарной мощностью более 200 МВт.

Как результат, именно в области ветроэнергетики сегодня существует проект по опытной эксплуатации ВТСП-электрической машины – проект *EcoSwing*, запущенный в рамках программы *EU Horizon 2020* [32]. В рамках данного проекта создан ВТСП-ветрогенератор мощностью 3,6 МВт. Генератор имеет ВТСП-обмотку возбуждения, работающую при температуре 30 К, которая обеспечивается криокулерами на роторе.

В 2020 г. была опубликована статья [10], посвященная исследованию работы генератора в составе ВЭУ. Указывается, что генератор уже в 2020 г. был подключен к сети и обеспечил выработку более 600 МВт·ч в течение 650 ч работы непосредственно на сеть. При этом была достигнута мощность в 3 МВт. В ходе работы была проверена работа криогенной системы и ВТСП-катушек обмотки возбуждения (всего 40 шт.). Все системы показали высокую надежность и обеспечили работу генератора. Однако в ходе работы были зафиксированы и сбои. Например, при наземных испытаниях одна из ВТСП-катушек вышла из строя. Для ее замены был разобран вакуумный криостат, после чего установлена рабочая катушка. Были выявлены особенности системы мониторинга ВТСП-катушек, связанные с наличием помех. Также в ходе работы случилось 3 коротких замыкания в силовом выпрямителе. К сожалению, не удалось найти публикаций о текущем статусе проекта, однако в соответствии с неопубликованной информацией ВТСП-генератор был демонтирован и законсервирован. Тем не менее, в целом проект *Ecoswing* признан состоявшимся. Действительно, в ходе его выполнения продемонстрированы технологические решения, позволившие впервые обеспечить длительную эксплуатацию ВТСП-генератора в составе ветроустановки. Это бесценный опыт, который позволит в дальнейшем увеличить не только технологическое совершенство изделий, но и их экономическую эффективность.

Таким образом, совокупность работ в области ВТСП-генераторов для ВЭУ позволяет сделать вывод о рациональности и технологической возможности создания машин для данного применения и ввода в коммерческую эксплуатацию.

Морские системы также являются привлекательными для использования ВТСП-электрических машин, что обусловлено значительной мощностью двигателей и генераторов крупных судов и их низкой частотой вращения. Уже в начале XXI в. было выполнено несколько

проектов ВТСП-электрических машин для морских систем такими компаниями, как *Kawasaki*, *AMSC*, *Siemens* [33–38]. По данным открытых источников эти проекты были выполнены и некоторые из них установлены на корабли. Так в [38] указывается, что двигатели *Siemens* были установлены на корабль (фрегат F125, Германия), однако данных об опытной эксплуатации, к сожалению, не приводится. Тем не менее, данные проекты были выполнены еще до 2016 г. После 2016 г. выполнялось большое количество теоретических работ [15, 16, 18, 39–43], однако не появилось новых проектов в данной области, которые можно было бы сопоставить с теми, что были выполнены ранее. С одной стороны, это может означать, что работы по исследованию особенностей работы ВТСП-машин при длительной эксплуатации еще ведутся и не могут быть опубликованы авторами по различным причинам. С другой стороны, создание крупных ВТСП-машин для морских систем – сложная и дорогостоящая задача. Скорее всего, данные проекты не запускаются без подтверждения рациональности использования ВТСП-машин в судовых системах в целом. Но не исключен и вариант, когда выполненные работы и полученные результаты в области создания ВТСП электрических машин для судовых систем не публикуются из-за различных ограничений. Таким образом, работы в данной области кажутся крайне перспективными и рациональными, особенно учитывая, что в России в настоящее время нет подобных проектов.

Авиационная техника является третьим перспективным направлением для внедрения ВТСП-электрических машин [5]. В первую очередь это связано с тем, что получили развитие проекты крупных летательных аппаратов (ЛА) с гибридными силовыми установками [44]. Мощность электродвигателей и генераторов в их составе может превышать 5 МВт. Известны проекты, в которых рассматривается применение ВТСП электрических машин в качестве генераторов [22, 26–29, 45–48]. Например, в статье [28] рассматривается ВТСП-генератор мощностью 10 МВт с частотой вращения 7000 об/мин. Обмотка ротора выполнена из ВТСП-ленты, охлаждается жидким водородом. Обмотка статора медная с жидкостным охлаждением. Авторы отмечают, что выполнены все необходимые расчеты и проведено экспериментальное исследование маломасштабных макетов. Удельная мощность данной машины составила 20 кВт/кг. В Японии ведется разработка ВТСП-генератора мощностью 10 МВт для ЛА в рамках проекта, поддержанного Организацией по развитию новой энергетики и промышленных технологий [49]. Концепция генератора предполагает использование жидкого азота при 65 К для охлаждения ВТСП-обмотки возбуждения и якоря [25, 26, 45]. В частности, приводятся данные о полученных результатах расчета и моделирования генератора. Указывается, что при мощности 10 МВт и частоте вращения 6000 об/мин его удельная мощность может составлять более 20 кВт/кг. Однако в [26] приводится исследование потерь и тре-

буемой холодопроизводительности системы криогенного охлаждения (СКО). Во всех рассматриваемых вариантах ее мощность должна быть более 8 кВт. Обеспечение такой холодопроизводительности на борту ЛА представляется сложной задачей, так как требует использования замкнутой системы для использования жидкого азота при 65 К.

Работы в области создания ВТСП-электродвигателей для гибридных силовых установок (ГСУ) самолетов также ведутся в различных научных центрах [20, 50–54]. В статье [21] приводятся результаты предварительных расчетов ВТСП-двигателя мощностью 2,5 МВт и частотой вращения 3500 об/мин. Удельная мощность машины составила 14,7 кВт/кг, что является неплохим результатом с учетом низкой частоты вращения. Однако стоит отметить большое количество допущений, принятых при расчетах, а также крайне низкий коэффициент мощности.

Интересным является проект *NASA* по разработке ВТСП-электродвигателя 1,4 МВт 6800 об/мин [55, 56]. Машина имеет медный статор и ВТСП-обмотку возбуждения, работающую при 60 К. Данная рабочая температура ВТСП-катушек обеспечивается с помощью криокулеров, расположенных в роторе, что позволяет отказаться от внешней СКО. Расчетная удельная мощность составила более 16 кВт/кг по активной зоне при КПД более 98 %. Также в ходе работы выполнено изготовление ВТСП-катушки ОВ и проведено исследование ее критического тока при термодинамическом циклировании.

Несколько лет назад был запущен проект *Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator (ASuMED)* при поддержке Европейского союза [57]. Особенностью машины является охлаждение жидким водородом и использование в качестве возбуждения намагниченных стоек ВТСП-лент. Мощность машины 1 МВт при частоте вращения 6000 об/мин. В от-

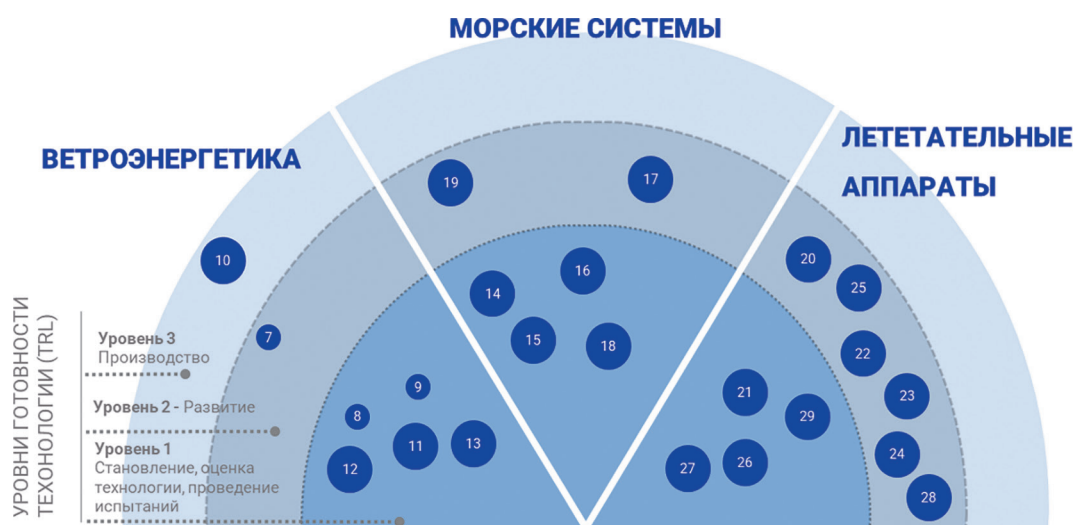
крытых источниках приводится информация о результатах, полученных в области расчета и моделирования потерь переменного тока в ВТСП-катушках, а также о намагничивании стоек ВТСП-лент, но, к сожалению, не приводятся данных о результатах проекта в целом.

В России выполнены проекты ВТСП-электрических машин для ЛА [22, 48]. Более того, создан демонстратор ВТСП-системы, источником в которой является генератор с ВТСП-обмоткой якоря, обеспечивающий 90 кВт·А мощности при 6000 об/мин [58]. Реализация данного проекта позволила не только отработать технологии создания устройств, входящих в систему (ВТСП-генератор, ВТСП-кабель, выпрямитель с криогенным охлаждением, СКО), но и исследовать особенности их совместной работы. Также компанией СуперОкс был выполнен проект по созданию ВТСП-электродвигателя мощностью 500 кВт для ЛА и выполнена его установка на ЛА для отработки технологии ГСУ с применением ВТСП [23].

Таким образом, на основе проведенного анализа можно сделать вывод, что для применения в составе ГСУ перспективных ЛА является актуальным использование ВТСП-машин с частотой вращения до 6000 об/мин и мощностью 1–10 МВт. При этом удельная мощность может достигать 16 кВт/кг и более. Однако дальнейшее увеличение удельной мощности может быть реализовано при использовании ВТСП-обмоток возбуждения и якоря, что требует уменьшения частоты вращения для снижения потерь переменного тока в ВТСП-обмотках. В этом случае актуальным является использование данных машин в качестве непосредственного привода винта самолета.

На рисунке приведена диаграмма, отражающая рассмотренные проекты ВТСП-машин (нумерация в соответствии с таблицей и списком литературы).

Можно заметить, что количество проектов резко уменьшается при переходе на более высокий уровень



Анализ мировых проектов с ВТСП

Analysis of global projects with HTS

готовности технологии (УГТ), что связано с большими затратами по изготовлению и испытанию образцов. Интересно, что в области ветроэнергетики за период с 2016 по 2022 гг. появился проект по опытной эксплуатации ВТСП ВЭУ, но было небольшое количество проектов с УГТ 4–5. При этом количество теоретических проектов высоко. В большинстве своем эти проекты направлены на определение оптимальных конструкций крупных ВТСП-генераторов для ВЭУ. Можно сказать, что в области ветроэнергетики актуальность использования ВТСП подтверждена и следующим шагом будет являться коммерческая эксплуатация.

В области ГСУ ЛА наблюдается значительное количество проектов с УГТ 4–5, т.е. направленных на отработку технологий в лабораторных условиях. Наличие в дополнение к этому большого количества теоретических проектов говорит о том, что в ближайшее время возможно появление проектов по опытной эксплуатации ВТСП электрических машин в составе ГСУ ЛА.

Выводы. Применение ВТСП электрических машин, как и других СП-устройств, является актуальным в случаях, когда стоящая задача не может быть решена традиционными методами. Результаты проведенного анализа позволяют определить, в каких случаях будет актуально применение ВТСП-машин:

электрические генераторы для ВЭУ 5–10 МВт, частотой вращения до 30 об/мин.;

электродвигатели морских судов более 1 МВт, частотой вращения до 1000 об/мин.;

электрогенераторы для ГСУ ЛА 5–10 МВт, 6000 об/мин.;

электродвигатели для прямого привода винтов ЛА более 1 МВт, 2000–4000 об/мин.

Для удовлетворения требования по высокой удельной мощности в последнем случае должны быть использованы полностью ВТСП-машины. Однако это требует развития теории и практики применения ВТСП-обмоток переменного тока.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, номер темы FSFF-2023-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов Н.С. и др.** Электрические машины с высоким показателем удельной мощности. – Электротехника, 2022, № 10, с. 2–11.
2. **Critical** Current Characterisation of SuperOx YBCO 2G HTS Superconducting Wire [Электрон. ресурс]. URL: https://figshare.com/articles/dataset/Critical_current_characterisation_of_SuperOx_YBCO_2G HTS_superconducting_wire/13708690/1 (дата обращения 01.06.2023).
3. **Kovalev K. et al.** Multidisciplinary Approach to the Design of Superconducting Electrical Machines. – IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019, DOI:10.1088/1757-899X/581/1/012012.
4. **Luongo C.A. et al.** Next Generation More-Electric-Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors. – Applied Superconductivity, 2009, vol. 19, No. 3, pp. 1055–1068, DOI: 10.1109/TASC.2009.2019021.
5. **Haran K.S. et al.** High-Power Density Superconducting Rotating Machines - Development Status and Technology Roadmap. – Superconductor Science and Technology, 2017, vol. 30, No. 12, DOI: 10.1088/1361-6668/aa833e.
6. **Douine B. et al.** Overview of High Temperature Superconductor Machines. – Электричество, 2021, № 4, с. 25–33.
7. **Wang Y. et al.** Design, Analysis, and Experimental Test of a Segmented-Rotor High-Temperature Superconducting Flux-Switching Generator with Stationary Seal. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, vol. 65, No. 11, pp. 9047–9055, DOI: 10.1109/TIE.2018.2814001.
8. **Hoang T.K. et al.** Levelized Cost of Energy Comparison Between Permanent Magnet and Superconducting Wind Generators for Various Nominal Power. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, No. 7, DOI: 10.1109/TASC.2022.3181996.
9. **Liu D. et al.** Effects of Armature Winding Segmentation with Multiple Converters on the Short Circuit Torque of 10-MW Superconducting Wind Turbine Generators. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2016.2639029.
10. **Song X. et al.** Commissioning of the World's First Full-Scale MW-Class Superconducting Generator on a Direct Drive Wind Turbine. – IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, vol. 35, No. 3, DOI: 10.1109/TEC.2020.2982897.
11. **Xue S. et al.** Stator Optimization of Wind Power Generators with High-Temperature Superconducting Armature Windings and Permanent Magnet Rotor. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, vol. 31, No. 2, DOI: 10.1109/TASC.2020.3037057.
12. **Sung H.J. et al.** Design and Heat Load Analysis of a 12 MW HTS Wind Power Generator Module Employing a Brushless HTS Exciter. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2016.2543838.
13. **Liu Y. et al.** An Electromagnetic Design of a Fully Superconducting Generator for Wind Application. – Energies, 2021, vol. 14, No. 22, DOI: 10.3390/en14227811.
14. **Moon H. et al.** Development of a MW-Class 2G HTS Ship Propulsion Motor. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2016.2536660.
15. **Li Z. et al.** Comparative Study of 1-MW PM and HTS Synchronous Generators for Marine Current Turbine. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2018.2810302.
16. **Takei S. et al.** Double Armature HTS Bulk Synchronous Machine for Contra-Rotating Turbine Generator. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2022.3148696.
17. **Yanamoto T. et al.** Loss Analysis of a 3-MW High-Temperature Superconducting Ship Propulsion Motor. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2018.2815712.
18. **Nam G.D. et al.** Design and characteristic analysis of a 1 MW superconducting motor for ship propulsions. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, vol. 29, No. 5, DOI: 10.1109/TASC.2019.2902872.
19. **Fuger R. et al.** A Superconducting Homopolar Motor and Generator – New Approaches. – Superconductor Science and Technology, 2016, vol. 29, No. 3, DOI: 10.1088/0953-2048/29/3/034001.
20. **Jansen R.H. et al.** High Efficiency Megawatt Motor Preliminary Design. – AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition, 2019, DOI: 10.2514/6.2019-4513.
21. **Mellerud R., Noland J., Hartmann C.** Preliminary Design of a 2.5-MW Superconducting Propulsion Motor for Hydrogen-Powered Aviation. – International Conference on Electrical Machines, ICEM 2022, pp. 1404–1410, DOI: 10.1109/ICEM51905.2022.9910833.
22. **Ivanov N. et al.** Calculation, Design, and Winding Preliminary Tests of 90-kW HTS Machine for Small-Scale Demonstrator of Generating System for Future Aircraft with Hybrid Propulsion System. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2023, vol. 33, No. 2, DOI: 10.1109/TASC.2022.3228704.

23. **Kalitka V.S.** Development of 500 kW Superconducting Motor and Its Test on Flying Laboratory. – EUCAS, 2021.
24. **Colle A. et al.** Test of a Flux Modulation Superconducting Machine for Aircraft. – Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1590, No. 1, DOI: 10.1088/1742-6596/1590/1/012052.
25. **Sasa H. et al.** Experimental Evaluation of 1 kW-class Prototype REBCO Fully Superconducting Synchronous Motor Cooled by Subcooled Liquid Nitrogen for E-Aircraft. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, vol. 31, No. 5, DOI: 10.1109/TASC.2021.3055452.
26. **Sasa H. et al.** Electromagnetic-Thermal Coupled Analysis Considering AC Losses in REBCO Windings of 10 MW Fully Superconducting Synchronous Generators Cooled by Subcooled Liquid Nitrogen for Electric Aircraft. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, No. 6, DOI: 10.1109/TASC.2022.3160660.
27. **Zhou X. et al.** Conceptual Design, AC Loss Calculation, and Optimization of an Airborne Fully High Temperature Superconducting Generator. – Physica C: Superconductivity and its Applications, 2023, vol. 605, DOI: 10.1016/j.physc.2022.1354207.
28. **Filipenko M. et al.** Concept Design of a High-Power Superconducting Generator for Future Hybrid-Electric Aircraft. – Supercond Sci Technol, 2020, vol. 33, No. 5, DOI: 10.1088/1361-6668/ab695a.
29. **Zhou X. et al.** Feasible and Optimal Design of an Airborne High-Temperature Superconducting Generator Using Taguchi Method. – Electronics, 2022, vol. 11, No. 12, DOI: 10.3390/ELECTRONICS11121901.
30. **Koster R., Binder A.** Multi-Objective Optimization of a Direct-Drive Wind Turbine Generator with HTS Excitation Winding. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2022.3143088.
31. **Jung G.E. et al.** A Comparative Analysis of Economics of PMSG and SCSG Floating Offshore Wind Farms. – Energies, 2021, vol. 14(5):1386, DOI: 10.3390/en14051386.
32. **EcoSwing** – Energy Cost Optimization using Superconducting Wind Generators – World's First Demonstration of a 3.6 MW Low-Cost Lightweight DD Superconducting Generator on a Wind Turbine, DOI 10.3030/656024.
33. **Tsukamoto O.** Present Status and Future Trends of R&D for HTS Rotational Machines in Japan. – Physica C: Superconductivity and its Applications, 2014, vol. 504, pp. 106–110, DOI: 10.1016/j.physc.2014.03.018.
34. **Yanamoto T. et al.** Electric Propulsion Motor Development for Commercial Ships in Japan. – Proceedings of the IEEE, 2015, vol. 103, No. 12, pp. 2333–2343, DOI: 10.1109/JPROC.2015.2495134.
35. **Woodruff S. et al.** Testing A 5 MW High-Temperature Superconducting Propulsion Motor. – IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2005, pp. 206–212, DOI: 10.1109/ESTS.2005.1524676.
36. **Kalsi S.** Design of MW-Class Ship Propulsion Motors for US Navy by AMSC. – Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, 2019 [Электрон. ресурс], URL: https://indico.cern.ch/event/760666/contributions/3390601/attachments/1880202/3099643/Navy_Motors-20190715.pdf (дата обращения 01.06.2023).
37. **Nick W., Grundmann J., Frauenhofer J.** Test Results from Siemens Low-Speed, High-Torque HTS Machine and Description of Further Steps Towards Commercialisation of HTS Machines. – Physica C: Superconductivity and its Applications, 2012, vol. 482, pp. 105–110, DOI: 10.1016/J.PHYSC.2012.04.019.
38. **Bauer M. et al.** Technology Trends and Challenges for Superconductor-Based Ship Propulsion. – The 32nd Undersea Defence Technology Conference (UDT), 2019.
39. **Kalsi S.S.** Design of MW-Class Ship Propulsion Motors for US Navy by AMSC, DOI: 10.1109/PES.2006.1709643.
40. **Yanamoto T. et al.** Loss Analysis of a 3-MW High-Temperature Superconducting Ship Propulsion Motor. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2018.2815712.
41. **Torrey D. et al.** Superconducting Synchronous Motors for Electric Ship Propulsion. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, vol. 30, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2020.2980844.
42. **Kalsi S.** Ship Propulsion Motor Employing Bi-2223 and MgB₂ Superconductors. – Research, Fabrication and Applications of Bi-2223 HTS Wires, 2016, DOI: 10.1142/9789814749268_0032.
43. **Yanamoto T. et al.** Loss Analysis of a 3-MW High-Temperature Superconducting Ship Propulsion Motor. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2018.2815712.
44. **Rendón M.A. et al.** Aircraft Hybrid-Electric Propulsion: Development Trends, Challenges and Opportunities. – Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2021, vol. 32, No. 5, pp. 1244–1268, DOI: 10.1007/S40313-021-00740-X/FIGURES/19. DOI
45. **Noda K. et al.** Numerical Simulation of a High-Power Density 10 MW REBCO Superconducting Synchronous Generator Cooled by Sub-Cooled LN₂ for Low AC loss. – Journal of Physics: Conference Series, 2022, vol. 2323, No. 1, DOI: 10.1088/1742-6596/2323/1/012037.
46. **Komiya M. et al.** Design Study of 10 MW RebcO Fully Superconducting Synchronous Generator for Electric Aircraft. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, vol. 29, No. 5, DOI: 10.1109/TASC.2019.2906655.
47. **Colle A., Lubin T., Leveque J.** Design of a Superconducting Machine and Its Cooling System for an Aeronautics Application. – The European Physical Journal Applied Physics, 2021, vol. 93, No. 3, DOI: 10.1051/EPJAP/2020200027.
48. **Dezhin D., Ilyasov R.** Development of fully Superconducting 5 MW Aviation Generator with Liquid Hydrogen Cooling. – EUREKA: Physics and Engineering, 2022, No. 1, pp. 62–73, DOI: 10.21303/2461-4262.2022.001771.
49. **Profile of NEDO** [Электрон. ресурс], URL: <https://www.nedo.go.jp/content/100898872.pdf> (дата обращения 01.06.2023).
50. **Terao Y. et al.** Electromagnetic Design of Superconducting Synchronous Motors for Electric Aircraft Propulsion. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2018.2823503.
51. **Mellerud R., Nøland J., Hartmann C.** Preliminary Design of a 2.5-MW Superconducting Propulsion Motor for Hydrogen-Powered Aviation. – International Conference on Electrical Machines, ICEM, 2022, pp. 1404–1410, DOI: 10.1109/ICEM51905.2022.9910833.
52. **Lee J.-Y. et al.** Design and Characteristic Analysis of an Axial Flux High-Temperature Superconducting Motor for Aircraft Propulsion. – Materials, 2023, vol. 16, No. 9, DOI: 10.3390/MA16093587.
53. **Grilli F. et al.** Superconducting Motors for Aircraft Propulsion: The Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator Project. – Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1590, No. 1, DOI: 10.1088/1742-6596/1590/1/012051.
54. **Terao Y. et al.** Lightweight Design of Fully Superconducting Motors for Electrical Aircraft Propulsion Systems. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, vol. 29, No. 5, DOI: 10.1109/TASC.2019.2902323.
55. **Jansen R.H. et al.** High Efficiency Megawatt Motor Preliminary Design. – AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition, 2019, DOI: 10.2514/6.2019-4513.
56. **Tallerico T.T. et al.** Electromagnetic Redesign of NASA's High Efficiency Megawatt Motor. – AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2020.
57. **Grilli F. et al.** Superconducting Motors for Aircraft Propulsion: The Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator project. – Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1590, No. 1, DOI: 10.1088/1742-6596/1590/1/012051.
58. **Kovalev K. et al.** Superconducting System with 100 kW Output Power for Experimental Research. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2022.3147442.

Поступила в редакцию [30.06.2023]
Принята к публикации [14.07.2023]

Авторы:



Ковалев Константин Львович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой 310 “Электроэнергетика, электромеханические и биотехнические системы”, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия.



Кадеров Владимир Андреевич – аспирант, младший научный сотрудник кафедры 310 “Электроэнергетика, электромеханические и биотехнические системы”, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия.



Иванов Николай Сергеевич – кандидат техн. наук, начальник научно-исследовательского отдела кафедры 310 “Электроэнергетика, электромеханические и биотехнические системы”, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия.



Малевич Никита Александрович – магистрант, инженер кафедры 310 “Электроэнергетика, электромеханические и биотехнические системы”, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия.

Elektrichestvo, 2023, No. 8, pp. 4–12

DOI:10.24160/0013-5380-2023-8-4-12

HTS Electric Machines: Current Projects and Promising Application Fields

KOVALEV Konstantin L. (Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia) – Head of the Electric Power, Electromechanical and Biotechnical Systems Dept., Dr. Sci. (Eng.), Professor.

IVANOV Nikolay S. (Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia) – Head of the Research Division of the Electric Power, Electromechanical and Biotechnical Systems Dept., Cand. Sci. (Eng.).

KADEROV Vladimir A. (Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia) – Postgraduate Student, Junior Researcher of the Electric Power, Electromechanical and Biotechnical Systems Dept.

MALEVICH Nikita A. (Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia) Master's Student, Engineer Master Student of the Electric Power, Electromechanical and Biotechnical Systems Dept.

Recently, increasingly growing attention has been paid to environmental policy, the aim of which is to preserve a favorable environment for present and future generations. At the same time, the world needs more powerful sources of electricity for successful electrification, because the maximum possible values of electrical machine power indicators have already been reached in many industries. One of the solutions to the problem is the introduction of high-temperature superconducting (HTS) materials into the field of electromechanical converters. The use of high-temperature electric machines is a promising line for the development of electromechanical industry due to their significant advantages, in particular, higher efficiency and specific power capacity in comparison with conventional electric machines. The transition to HTS machines will make it possible to meet the growing demand for high-capacity electric machines and reduce hydrocarbon emissions into the environment. The aircraft industry, in which compact mass and dimension indicators are important, wind power, and marine power installations are especially promising application fields. An overview of superconducting energy projects developed around the world is presented, the readiness of the projects is analyzed, and the design features of some samples are discussed.

Key words: *superconducting machines, electric power installations, motors, generators, high power density, wind power, aircraft power engineering, marine power engineering*

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia, topic number FSFF-2023-0005.

REFERENCES

1. **Ivanov N.S. et al.** *Elektrotehnika. – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2022, No. 10, pp. 2–11.
2. **Critical** Current Characterisation of SuperOx YBCO 2G HTS Superconducting Wire [Electron. resource], URL: https://figshare.com/articles/dataset/Critical_current_characterisation_of_SuperOx_YBCO_2G HTS_superconducting_wire/13708690/1 (Date of appeal 01.06.2023).
3. **Kovalev K. et al.** Multidisciplinary Approach to the Design of Superconducting Electrical Machines. – IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019, DOI:10.1088/1757-899X/581/1/012012.
4. **Luongo C.A. et al.** Next Generation More-Electric-Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors. – Applied Superconductivity, 2009, vol. 19, No. 3, pp. 1055–1068, DOI: 10.1109/TASC.2009.2019021.
5. **Haran K.S. et al.** High-Power Density Superconducting Rotating Machines - Development Status and Technology Roadmap. – Superconductor Science and Technology, 2017, vol. 30, No. 12, DOI: 10.1088/1361-6668/aa833e.
6. **Douine B. et al.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 4, pp. 25–33.
7. **Wang Y. et al.** Design, Analysis, and Experimental Test of a Segmented-Rotor High-Temperature Superconducting Flux-Switching Generator with Stationary Seal. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, vol. 65, No. 11, pp. 9047–9055, DOI: 10.1109/TIE.2018.2814001.
8. **Hoang T.K. et al.** Levelized Cost of Energy Comparison Between Permanent Magnet and Superconducting Wind Generators for Various Nominal Power. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, No. 7, DOI: 10.1109/TASC.2022.3181996.
9. **Liu D. et al.** Effects of Armature Winding Segmentation with Multiple Converters on the Short Circuit Torque of 10-MW Superconducting Wind Turbine Generators. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2016.2639029.
10. **Song X. et al.** Commissioning of the World's First Full-Scale MW-Class Superconducting Generator on a Direct Drive Wind Turbine. – IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, vol. 35, No. 3, DOI: 10.1109/TEC.2020.2982897.
11. **Xue S. et al.** Stator Optimization of Wind Power Generators with High-Temperature Superconducting Armature Windings and Permanent Magnet Rotor. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, vol. 31, No. 2, DOI: 10.1109/TASC.2020.3037057.
12. **Sung H.J. et al.** Design and Heat Load Analysis of a 12 MW HTS Wind Power Generator Module Employing a Brushless HTS Exciter. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2016.2543838.
13. **Liu Y. et al.** An Electromagnetic Design of a Fully Superconducting Generator for Wind Application. – Energies, 2021, vol. 14, No. 22, DOI: 10.3390/en14227811.
14. **Moon H. et al.** Development of a MW-Class 2G HTS Ship Propulsion Motor. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2016.2536660.
15. **Li Z. et al.** Comparative Study of 1-MW PM and HTS Synchronous Generators for Marine Current Turbine. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2018.2810302.
16. **Takei S. et al.** Double Armature HTS Bulk Synchronous Machine for Contra-Rotating Turbine Generator. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2022.3148696.
17. **Yanamoto T. et al.** Loss Analysis of a 3-MW High-Temperature Superconducting Ship Propulsion Motor. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2018.2815712.
18. **Nam G.D. et al.** Design and characteristic analysis of a 1 MW superconducting motor for ship propulsions. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, vol. 29, No. 5, DOI: 10.1109/TASC.2019.2902872.
19. **Fuger R. et al.** A Superconducting Homopolar Motor and Generator – New Approaches. – Superconductor Science and Technology, 2016, vol. 29, No. 3, DOI: 10.1088/0953-2048/29/3/034001.
20. **Jansen R.H. et al.** High Efficiency Megawatt Motor Preliminary Design. – AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition, 2019, DOI: 10.2514/6.2019-4513.
21. **Mellerud R., Noland J., Hartmann C.** Preliminary Design of a 2.5-MW Superconducting Propulsion Motor for Hydrogen-Powered Aviation. – International Conference on Electrical Machines, ICEM 2022, pp. 1404–1410, DOI: 10.1109/ICEM51905.2022.9910833.
22. **Ivanov N. et al.** Calculation, Design, and Winding Preliminary Tests of 90-kW HTS Machine for Small-Scale Demonstrator of Generating System for Future Aircraft with Hybrid Propulsion System. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2023, vol. 33, No. 2, DOI: 10.1109/TASC.2022.3228704.
23. **Kalitka V.S.** Development of 500 kW Superconducting Motor and Its Test on Flying Laboratory. – EUCAS, 2021.
24. **Colle A. et al.** Test of a Flux Modulation Superconducting Machine for Aircraft. – Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1590, No. 1, DOI: 10.1088/1742-6596/1590/1/012052.
25. **Sasa H. et al.** Experimental Evaluation of 1 kW-class Prototype REBCO Fully Superconducting Synchronous Motor Cooled by Subcooled Liquid Nitrogen for E-Aircraft. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, vol. 31, No. 5, DOI: 10.1109/TASC.2021.3055452.
26. **Sasa H. et al.** Electromagnetic-Thermal Coupled Analysis Considering AC Losses in REBCO Windings of 10 MW Fully Superconducting Synchronous Generators Cooled by Subcooled Liquid Nitrogen for Electric Aircraft. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, No. 6, DOI: 10.1109/TASC.2022.3160660.
27. **Zhou X. et al.** Conceptual Design, AC Loss Calculation, and Optimization of an Airborne Fully High Temperature Superconducting Generator. – Physica C: Superconductivity and its Applications, 2023, vol. 605, DOI: 10.1016/j.physc.2022.1354207.
28. **Filipenko M. et al.** Concept Design of a High-Power Superconducting Generator for Future Hybrid-Electric Aircraft. – Supercond Sci Technol, 2020, vol. 33, No. 5, DOI: 10.1088/1361-6668/ab695a.
29. **Zhou X. et al.** Feasible and Optimal Design of an Airborne High-Temperature Superconducting Generator Using Taguchi Method. – Electronics 2022, 2022, vol. 11, No. 12, DOI: 10.3390/ELECTRONICS11121901.
30. **Koster R., Binder A.** Multi-Objective Optimization of a Direct-Drive Wind Turbine Generator with HTS Excitation Winding. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2022.3143088.
31. **Jung G.E. et al.** A Comparative Analysis of Economics of PMSG and SCSG Floating Offshore Wind Farms. – Energies, 2021, vol. 14(5):1386, DOI:10.3390/en14051386.
32. **EcoSwing** – Energy Cost Optimization using Superconducting Wind Generators – World's First Demonstration of a 3.6 MW Low-

Cost Lightweight DD Superconducting Generator on a Wind Turbine, DOI 10.3030/656024.

33. **Tsukamoto O.** Present Status and Future Trends of R&D for HTS Rotational Machines in Japan. – *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2014, vol. 504, pp. 106–110, DOI: 10.1016/j.physc.2014.03.018.

34. **Yanamoto T. et al.** Electric Propulsion Motor Development for Commercial Ships in Japan. – *Proceedings of the IEEE*, 2015, vol. 103, No. 12, pp. 2333–2343, DOI: 10.1109/JPROC.2015.2495134.

35. **Woodruff S. et al.** Testing A 5 MW High-Temperature Superconducting Propulsion Motor. – *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2005, pp. 206–212, DOI: 10.1109/ESTS.2005.1524676.

36. **Kalsi S.** Design of MW-Class Ship Propulsion Motors for US Navy by AMSC. – *Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference*, 2019 [Electron. resource], URL: https://indico.cern.ch/event/760666/contributions/3390601/attachments/1880202/3099643/Navy_Motors-20190715.pdf (Date of appeal 01.06.2023).

37. **Nick W., Grundmann J., Fraunhofer J.** Test Results from Siemens Low-Speed, High-Torque HTS Machine and Description of Further Steps Towards Commercialisation of HTS Machines. – *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2012, vol. 482, pp. 105–110, DOI: 10.1016/J.PHYSC.2012.04.019.

38. **Bauer M. et al.** Technology Trends and Challenges for Superconductor-Based Ship Propulsion. – *The 32nd Undersea Defence Technology Conference (UDT)*, 2019.

39. **Kalsi S.S.** Design of MW-Class Ship Propulsion Motors for US Navy by AMSC, DOI: 10.1109/PES.2006.1709643.

40. **Yanamoto T. et al.** Loss Analysis of a 3-MW High-Temperature Superconducting Ship Propulsion Motor. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2018.2815712.

41. **Torrey D. et al.** Superconducting Synchronous Motors for Electric Ship Propulsion. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, vol. 30, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2020.2980844.

42. **Kalsi S.** Ship Propulsion Motor Employing Bi-2223 and MgB₂ Superconductors. – *Research, Fabrication and Applications of Bi-2223 HTS Wires*, 2016, DOI: 10.1142/9789814749268_0032.

43. **Yanamoto T. et al.** Loss Analysis of a 3-MW High-Temperature Superconducting Ship Propulsion Motor. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2018.2815712.

44. **Rendón M.A. et al.** Aircraft Hybrid-Electric Propulsion: Development Trends, Challenges and Opportunities. – *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2021, vol. 32, No. 5, pp. 1244–1268, DOI: 10.1007/S40313-021-00740-X/FIGURES/19.

45. **Noda K. et al.** Numerical Simulation of a High-Power Density 10 MW REBCO Superconducting Synchronous Generator Cooled By Sub-Cooled LN₂ for Low AC loss. – *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2323, No. 1, DOI: 10.1088/1742-6596/2323/1/012037.

46. **Komiya M. et al.** Design Study of 10 MW Rebeco Fully Superconducting Synchronous Generator for Electric Aircraft. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, No. 5, DOI: 10.1109/TASC.2019.2906655.

47. **Colle A., Lubin T., Leveque J.** Design of a Superconducting Machine and Its Cooling System for an Aeronautics Application. – *The European Physical Journal Applied Physics*, 2021, vol. 93, No. 3, DOI: 10.1051/EPJAP/2020200027.

48. **Dezhin D., Ilyasov R.** Development of fully Superconducting 5 MW Aviation Generator with Liquid Hydrogen Cooling. – *EUREKA: Physics and Engineering*, 2022, No. 1, pp. 62–73, DOI: 10.21303/2461-4262.2022.001771.

49. **Profile of NEDO** [Electron. resource], URL: <https://www.nedo.go.jp/content/100898872.pdf> (Date of appeal 01.06.2023).

50. **Terao Y. et al.** Electromagnetic Design of Superconducting Synchronous Motors for Electric Aircraft Propulsion. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2018.2823503.

51. **Mellerud R., Nøland J., Hartmann C.** Preliminary Design of a 2.5-MW Superconducting Propulsion Motor for Hydrogen-Powered Aviation. – *International Conference on Electrical Machines, ICEM*, 2022, pp. 1404–1410, DOI: 10.1109/ICEM51905.2022.9910833.

52. **Lee J.-Y. et al.** Design and Characteristic Analysis of an Axial Flux High-Temperature Superconducting Motor for Aircraft Propulsion. – *Materials*, 2023, vol. 16, No. 9, DOI: 10.3390/MA16093587.

53. **Grilli F. et al.** Superconducting Motors for Aircraft Propulsion: The Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator Project. – *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1590, No. 1, DOI: 10.1088/1742-6596/1590/1/012051.

54. **Terao Y. et al.** Lightweight Design of Fully Superconducting Motors for Electrical Aircraft Propulsion Systems. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, No. 5, DOI: 10.1109/TASC.2019.2902323.

55. **Jansen R.H. et al.** High Efficiency Megawatt Motor Preliminary Design. – *AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition*, 2019, DOI: 10.2514/6.2019-4513.

56. **Tallerico T.T. et al.** Electromagnetic Redesign of NASA's High Efficiency Megawatt Motor. – *AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)*, 2020.

57. **Grilli F. et al.** Superconducting Motors for Aircraft Propulsion: The Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator project. – *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1590, No. 1, DOI: 10.1088/1742-6596/1590/1/012051.

58. **Kovalev K. et al.** Superconducting System with 100 kW Output Power for Experimental Research. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2022, vol. 32, No. 4, DOI: 10.1109/TASC.2022.3147442.

Received [30.06.2023]

Accepted [14.07.2023]