

OVERVIEW OF COOLING SYSTEMS FOR CRYOGENIC ELECTRIC MACHINES

*Iskander Radikovich Garipov^a, Ildus Finatovich Sayakhov, Oksana Alekseevna Yushkova,
Alexey Anatolyevich Zherebtsov, Guzel Salavatovna Zinnatullina, Egor Andreevich Pronin*

Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi str. 32, Ufa, 450076, Russia

^a garipovir@yahoo.com

ABSTRACT

Cryogenic electric machines (CEM) have a wide potential for use in aircraft, shipbuilding and wind power. The introduction of CEM is often due to their high specific power and efficiency, in comparison with traditional EM. The power range of the developed CEM ranges from hundreds of kW to tens of MW. The key aspect for the implementation of cryogenic EM is the development of a cryogenic cooling system. The article presents an overview of the scientific and technical literature on CEM cooling systems. The requirements for CEM cooling systems, including those for aviation purposes, are considered. The analysis of research results related to the issue of cryogenic EM cooling is presented. The main characteristics of cryogenic refrigerators of various types are considered. The main approaches to the implementation of CEM cooling systems with the use of cryogenic refrigerators have been identified.

KEYWORDS

Cryogenic electric machines (CEM); cooling systems; high-temperature superconductors (HTS); cryoresistive conductors; cryogenic refrigerators.

ОБЗОР СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Искандер Радикович Гарипов^a, Ильдус Финатович Саяхов, Оксана Алексеевна Юшкова,
Алексей Анатольевич Жеребцов, Гузель Салаватовна Зиннатуллина, Егор Андреевич Пронин*

Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

^a garipovir@yahoo.com

АННОТАЦИЯ

Криогенные электрические машины (КЭМ) имеют широкий потенциал для применения в авиастроении, судостроении и ветроэнергетике. Внедрение КЭМ зачастую обуславливается их высокой удельной мощностью и КПД, в сравнении с ЭМ традиционного исполнения. Диапазон мощности разрабатываемых КЭМ составляет от сотен кВт до десятков МВт. Ключевым аспектом для реализации криогенных ЭМ разработка системы криогенного охлаждения. В статье представлен обзор научно-технической литературы по системам охлаждения КЭМ.

Рассмотрены требования, предъявляемые к системам охлаждения КЭМ, в том числе авиационного назначения. Представлен анализ результатов исследований, связанных с вопросом охлаждения криогенных ЭМ. Рассмотрены основные характеристики криогенных рефрижераторов различных типов. Выявлены основные подходы к реализации систем охлаждения КЭМ с применением криогенных рефрижераторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Криогенные электрические машины (КЭМ); системы охлаждения; высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП); криорезистивные проводники; криогенные рефрижераторы.

Введение

В настоящее время актуальной научно-технической задачей является создание новых и совершенствование существующих конструктивных схем электромеханических преобразователей энергии. Главной тенденцией является минимизация массогабаритных показателей и совершенствование энергетических характеристик. Вследствие конструктивных ограничений, максимальный КПД традиционных ЭМ составляет 95–97%, при удельной мощности менее 7 кВт/кг. Следующим этапом совершенствования электромеханических преобразователей энергии может стать применение КЭМ. КПД криогенных электрических машин, без учета затрат мощности на систему криогенного охлаждения, может достигать 99%. Следует отметить, что для обеспечения данного показателя требуется разработка холодильных машин, обеспечивающих криогенный уровень температур. При этом системы охлаждения должны быть: высокоэффективными, экономичными, характеризоваться приемлемыми массогабаритными характеристиками и работоспособными во всех эксплуатационных условиях. Разра-

ботка систем подобного рода, является актуальной научно-технической задачей.

1. Криогенные электрические машины

Основные проекты по разработке криогенных электрических машин сосредоточены на их применении в ветроэнергетике, судостроении и авиационной технике [1]. Оценка готовности технологий для реализаций криогенных электрических машин, работающих в составе силовой установки (СУ) летательных аппаратах (ЛА) представлено в [2], в составе судовой силовой установки – [3]. Диапазон мощности, представляющий интерес для судовых силовых установок составляет 40–50 МВт, для авиационных силовых установок, потребный диапазон мощности составляет 1–5 МВт. На рис. 1 представлен необходимый уровень мощности ЭМ в зависимости от класса ЛА. Видно, что для дальнейшего повышения мощности электромеханических приводов, работающих в составе электрических и гибридных СУ, необходима разработка криогенных электрических машин, обеспечивающих высокий уровень удельных параметров (КПД, удельная мощность) [1].



Рис. 1. Мощность ЭМ в зависимости от класса ЛА

Fig. 1. EM power depending on the class of aircraft

Криогенные электрические машины имеют конструктивные особенности, связанные с наличием криостата, предназначенного для обеспечения криогенного уровня температур. Тем не менее, КЭМ можно классифицировать по тем же признакам, что и электрические машины традиционного исполнения: по роду тока, конструкции обмотки, конструкции системы охлаждения.

Обмотка криогенных электрических машин может выполняться с использованием сверхпроводниковых материалов, или криорезистивных проводников – меди или алюминия высокой чистоты. Применение обмоток из криорезистивных проводников ограничено повышенным расходом хладагента, вследствие больших внутренних тепловыделений на активном сопротивлении. В сверхпроводниковых обмотках при протекании постоянного тока и криогенных температурах внутренние потери практически отсутствуют, при этом потери от протекания переменного тока могут быть значительными. Ключевой особенностью сверхпроводниковой обмотки является то, что нулевое сопротивление электрическому току ведет к отсутствию падения напряжения. В результате обмотка переходит в состояние «супермагнита».

Существенным прорывом, повлиявшим на развитие КЭМ, стало открытие явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). В 1987 году был открыт сверхпроводник (СП) YBCO (оксид иттрия-бария-

меди), с критической температурой 92 К [4]. Это первый СП, критическая температура которого была выше температуры кипения жидкого азота (77 К). Позже были синтезированы материалы, работоспособные при температурах 133–138 К. В 2001 году открыт сплав MgB₂ (диборид магния) с рекордной для интерметаллидов температурой перехода в СП состояние 40 К. Это двухзонное соединение стало первым известным науке СП, обладающим сразу двумя СП щелями, что было предсказано теоретически и подтверждено экспериментально. В 2008 году произошло открытие нового класса СП соединений с высокими значениями критической температуры – слоистых соединений на основе железа и элементов V группы (пниктидов) либо Se [5]. Кристаллическая структура всех железосодержащих СП (уже известно 6 семейств) представляет собой чередующиеся слои, в которых атомы железа окружены тетраэдром из атомов As или Se. В 2018 году в компьютерных моделях была предсказана СП сложных гидридов, представляющих собой «легированный» металлический водород при близких к комнатной температуре и давлениях порядка 200 ГПа [6]. На основе этой теоретической разработки в 2019–2020 годах получена СП в гидридах лантана и иттрия при температурах 245–260 К и давлениях порядка 1 млн. атмосфер. Рис. 2 иллюстрирует прогресс в разработке СП-материалов [7].

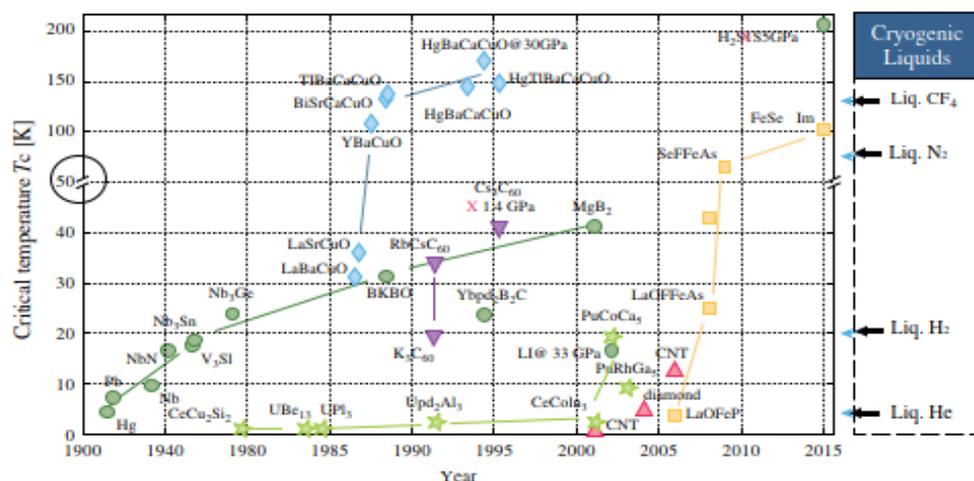


Рис. 2. Прогресс в развитии СП материалов [1]

Fig. 2. Progress in the development of joint venture materials [1]

2. Системы охлаждения криогенных электрических машин

Ключевым аспектом для реализации криогенных ЭМ, помимо выбора материала обмоточного провода является разработка системы криогенного охлаждения. Криогенное охлаждение может осуществляться как для всей машины, так и отдельно для ротора и статора. ЭМ, в которых криогенное охлаждение осуществляется отдельно для ротора и статора обеспечивают наивысший потенциальный КПД и удельную мощность по активной части [1]. Ключевым аспектом для реализации машины подобного рода является разработка сверхпроводников с низкими потерями на переменном токе. Концепция полностью сверхпроводящей ЭМ ЛА может быть реализована с использованием жидкого водорода, как топлива, и сверхпроводников типа MgB_2 [2].

Эксплуатационные затраты, связанные с разработкой инфраструктуры для производства и поддержки жидкого водорода в аэропортах, а также потребность в увеличении

корпусов самолетов выступают основными ограничениями для подобного подхода. Компромиссом между машинами с криогенным и традиционным охлаждением является применение криогенного охлаждения только для обмотки статора или ротора. Криогенное охлаждение ротора ЭМ позволяет максимизировать магнитное поле воздушного зазора, используя на роторе сверхпроводник с постоянным током. При этом переменное магнитное поле создается в статоре, а охлаждение осуществляется традиционным способом. Последний подход нашел широкое распространение.

Наиболее распространенными подходами по реализации криогенного охлаждения являются: прямое охлаждение ротора хладагентом, подаваемым через вращающееся уплотнение; охлаждение ротора с помощью криогенных рефрижераторов, работающих на циклах Брайтона, Стirlingа, Гиффорда-МакМагона и т.д. На рис. 3 представлена зависимость КПД крио-рефрижераторов в зависимости от уровня входной мощности.

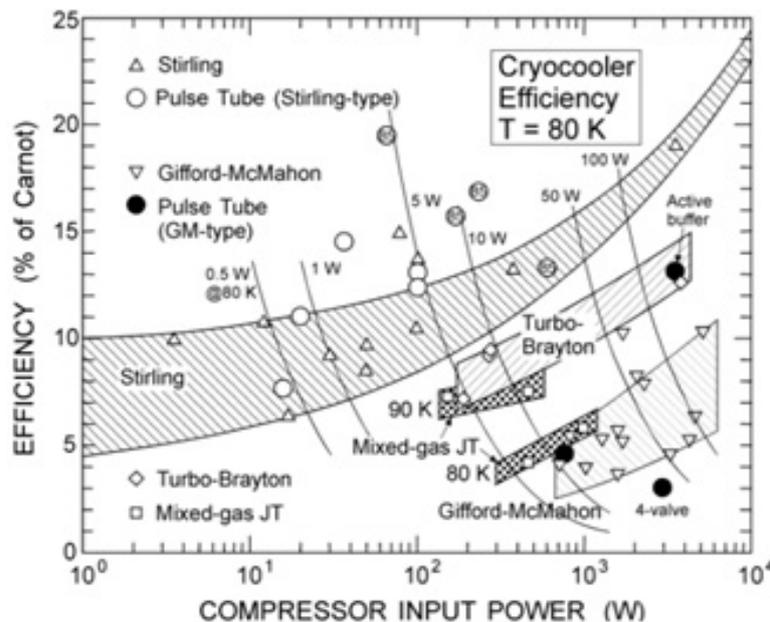


Рис. 3. Зависимость КПД рефрижератора от мощности компрессора [8]

Fig. 3. The dependence of the efficiency of the refrigerator on the power of the compressor [8]

Реализация замкнутой системы охлаждения, требует наличия активного источника холода, в роли которого может выступать криорефрижератор. Использование криорефрижераторов в замкнутой системе охлаждения позволяет минимизировать затраты на эксплуатацию. В зависимости от условий проектирования и существующих ограничений, можно выделить два подхода к реализации криогенного охлаждения. Первый подход подразумевает, что холодная часть криорефрижератора находится в непосредственном контакте с охлаждаемой обмоткой, в данном подходе отвод тепла осуществляется без промежуточного теплоносителя. Независимо от выбранного подхода масса системы криогенного охлаждения должна быть сведена к минимуму. Второй подход предполагает децентрализованное охлаждение, в котором криогенная ЭМ и холодильная установка физически отделены друг от друга, а соединение осуществляется линиями передачи жидкого или газообразного хладагента.

Подвод хладагента к обмотке осуществляется посредством циркуляционного насоса или компрессора.

3. Криогенные рефрижераторы

Криогенное оборудование сверхпроводящих электрических машин должно иметь соответствующий уровень холодопроизводительности, быть надежным и удобным в эксплуатации. Современные азотные и гелиевые ожижители и рефрижераторы представляют собой сложные и громоздкие агрегаты, требующие квалифицированного персонала для периодического обслуживания. Развитие сверхпроводниковых магниторезонансных томографов стимулировало создание компактных криокулеров и освоение их промышленного выпуска. Конструкция двухступенчатого криорефрижератора представлена на рис. 4. Время наработки до сервисного обслуживания может достигать 20000 часов.

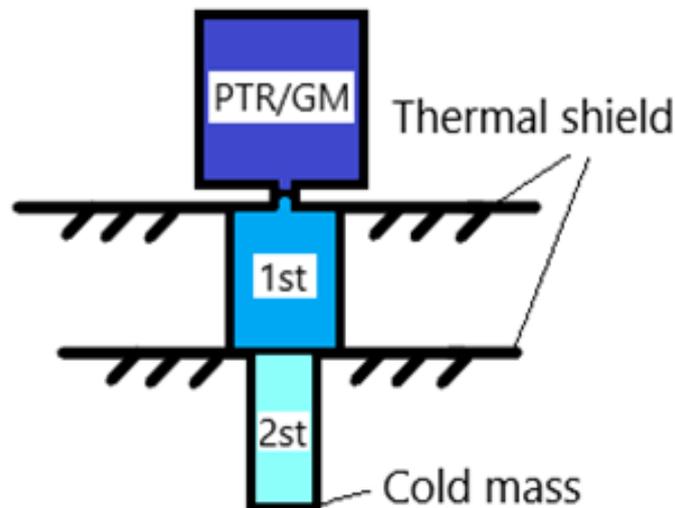


Рис. 4. Конструкция криогенного рефрижератора

Fig. 4. Design of a cryogenic refrigerator

В настоящее время доступны криорефрижераторы с мощностью охлаждения порядка 600 Вт при температуре 80 К. Несколько рефрижераторов могут работать совместно для охлаждения общей емкости, в этом случае может быть достигнут достаточный массовый расход хладагента, питающего криогенную ЭМ. Большинство криорефрижераторов, производимых в настоящее время, имеют достаточно высокую массу для применения в транспортных системах. Коммерчески доступны криорефрижераторы демонстрируют эффективность порядка 10–15% от эффективности Карно, что соответствует затратам мощности порядка 70 Вт для охлаждения 1 Вт потерь при уровне температур в 30 К. Удельный вес криорефрижераторов в настоящее время составляет порядка 3 кг/кВт, при этом для обеспечения работы криорефрижератора так же требуются наличие компрессора и вспомогательных устройств. Масса дополнительного оборудования может увеличивать показатель удельной массы в 5 раз. Тем не менее для летального аппарата с вводом в эксплуатацию в 2030–2035 году необходимо, чтобы удельная масса системы криогенного охлаждения была менее 3 кг/кВт.

Конструкция коммерчески доступных криорефрижераторов, представлена на рис. 4. Существует две основных разновидности криокулеров, работающих по циклу Стирлинга: поршневые и так называемые пульсационные трубы. Их развитие идет по двум направлениям: поршневых криорефрижераторов с механическим приводом Stirling Cryogenic в Голландии (рис. 5, а) и создание мощных пульсационных труб компанией Q-drive (рис. 5, б). Существует подход по реализации криорефрижераторов, работающих по циклу Гиффорда–Макмагона (рис. 5, в), холодопроизводительность которых составляет 200 Вт при 80 К. Компанией SHI был разработан кулер холодопроизводительностью 600 Вт при температуре 80 К (рис. 5, г). Компания Suprower производит широкую номенклатуру компактных криорефрижераторов. (рис. 5, д) [8].

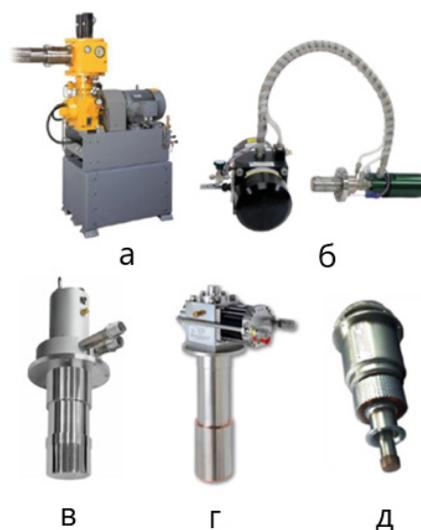


Рис. 5. Конструкции криорефрижераторов

Fig. 5. Design of cryocoolers

В течении последних десятилетий проводятся работы над системами с использованием цикла Турбо-Брайтона на турбомашине [9]. Достоинством криоохлаждатель подобного рода является большой ресурс, в сравнении с поршневым приводом. На основе цикла Брайтона работают газовые холодильные машины, производимые компаниями Linde и Air Liquide, а так же криорефрижераторы, разработанные в МАИ и СПбГПУ.

В табл. 1 приведены основные характеристики криокулеров различных производителей. Сопоставляя характеристики криорефрижераторов различных производителей, можно сделать вывод, что наиболее распространенным на данный момент типом криорефрижераторов, являются машины, работающие по циклу Стирлинга. Криорефрижераторы, работающие на цикле Стирлинга, с пульсационной трубой, потенциально обеспечивают наивысший КПД системы криогенного охлаждения. Главным недостатком криорефрижераторов данного типа является низкий ресурс поршневого узла. Требования высокой холодопроизводительности и повышенного ресурса, предъявляемые к КЭМ, работающим в составе силовых установок транспортных средств, делают целесообразным применение криогенных рефрижераторов, работающих по циклу Турбо-Брайтона.

Таблица 1. Технические характеристики криогенных рефрижераторов**Table 1.** Technical characteristics of cryogenic refrigerators

Производитель / Manufacturer	Цикл рефрижератора / Refrigerator cycle	Холодопроизводитель- ность / Cooling capacity	Минимальная тем- пература, К / Minimal temperature, K	Время наработки на отказ, ч / Mean time between failures, h
Cryomech	Гиффорда–Макмагона / Gifford–McMahon	600 Вт при 80 К / 600 W at 80 K	25	10000
Cryomech	Пульсационная труба / Pulsation pipe	130 Вт при 80 К / 130 W at 80 K	9	25000
Sumitomo	Гиффорда–Макмагона / Gifford–McMahon	200 Вт при 80 К / 200 W at 80 K	20	15000
Leybold/Oerl	Гиффорда–Макмагона / Gifford–McMahon	140 Вт при 80 К / 140 W at 80 K	18	–
АО Криогенная техника / JSC Kriogennaya Technica	Гиффорда–Макмагона / Gifford–McMahon	180 Вт при 80 К / 180 W at 80 K	80	–
АО Криогенная техника / JSC Kriogennaya Technica	Гиффорда–Макмагона / Gifford–McMahon	10 Вт при 20 К / 10 W at 20 K	20	–
АО Криогенная техника / JSC Kriogennaya Technica	Стирлинг / Stirling	0,5 Вт при 80 К / 0.5 W at 80 K	80	10000
Chart/Qdrive	Стирлинг / Stirling	1 кВт при 80 К / 1 kW at 80 K	40	126760
Creare	Стирлинг / Stirling	1 кВт при 80 К / 1 kW at 80 K	–	180000
STI	Стирлинг / Stirling	100 Вт при 80 К / 100 W at 80 K	45	1000000
Sunpower	Стирлинг (пульсационная труба) / Stirling (Pulsation pipe)	16 Вт при 80 К / 16 W at 80 K	–	1000000
Stirling SV	Стирлинг/ Stirling	1,3 кВт при 80 К / 1.3 kW at 80 K	45	–
Linde	Турбо Брайтон / Turbo Brighton	0,9 кВт при 20 К / 0.9 kW at 20 K	–	–
Air Liquide	Турбо Брайтон / Turbo Brighton	50 кВт / 50 kW	35	–
МАИ / MAI	Турбо Брайтон / Turbo Brighton	1,3–2,5 кВт при 65 К / 1.3–2.5 kW at 65 K	63,15	30000
СПбГПУ / SPbPU	Турбо Брайтон / Turbo Brighton	10 кВт при 65 К / 10 kW at 65 K	63,15	–

4. Интегрированные системы охлаждения

Рассмотрим подход к охлаждению ЭМ, в котором отвод тепла осуществляется за счет непосредственного контакта обмотки с холодной головкой криорефрижератора. Криорефрижераторы нашли широкое применение в системах магниторезонансной томографии. Наиболее простой способ обеспечения прямого контакта рефрижератора с обмоткой из ВСПП проводника, это охлаждение статорных элементов. Подробнее кондуктивное охлаждение ВСПП-обмоток рассмотрено в [10].

Рис. 6 иллюстрирует охлаждения катушки из ВСПП проводника Nb₃Sn [11], для наглядности отображения контакта кожух с вакуумной изоляцией не отображается. Обмотка из ВСПП-проводника соединена с первой ступенью криорефрижератора. Вторая ступень обеспечивает охлаждения выводных проводов, выполненных из меди. Верхняя нижняя головки, оснащены медными платинами для обеспечения надлежащего охлаждения наиболее удаленной от радиатора части змеевика. Крепление сверхпроводниковой катушки осуществляется сварными секциями из нержавеющей стали.

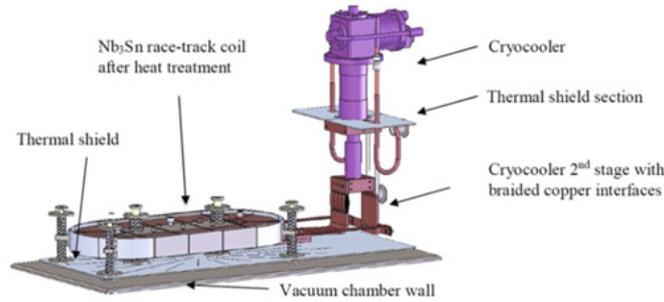


Рис. 6. Конструкция катушки ВТСП проводника с непосредственным контактом с холодной головкой криорефрижератора [11]

Fig. 6. The design of the HTSP coil of the conductor with direct contact with the cold head of the refrigerator [11]

Аналогичный подход использовался для тестов сверхпроводящих катушек ветроэнергетической установки. Охлаждение обмоток, выполненных из MgB_2 (рис. 7), осуществляется за счет прямого контакта с криогенным рефрижератором [12, 13]. При этом для удобства технического обслуживания крепление рефрижератора может осуществляться с промежуточной втулкой или без нее. Конструкция без промежуточной втулки, требует обеспечения хорошего прижимного контакта 1-ой ступень криорефрижератора к объекту охлаждения, и исключения паразитных тепловых потоков между ступенями криорефрижератора. Необходимо уделить внимание мерам предосторожности по недопущению воздуха, который при данной температуре может кристаллизоваться и препятствовать охлаждению обмотки. Для конструкции с промежуточной втулкой, требуется хороший, воспроизводимый тепловой контакт на обеих ступенях криоохладителя. В качестве средства по уменьшению контактного сопротивления может выступать приставка из Индия, либо смазка Ariezon N.

В ходе реализации европейского проекта Suprarower 30 криорефрижераторов охлаждали сверхпроводящие обмотки ротора криогенной ЭМ. Подача гелия к обмоткам производилась посредством расположенного в центре ЭМ компрессора. Конструкция ЭМ Suprarower представлена на рис. 8 [14].

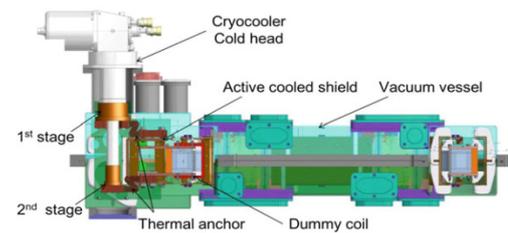


Рис. 7. Катушка из MgB_2 с непосредственным охлаждением от криоохладителя [12]

Fig. 7. A coil made of MgB_2 with direct cooling from a cryocooler [12]

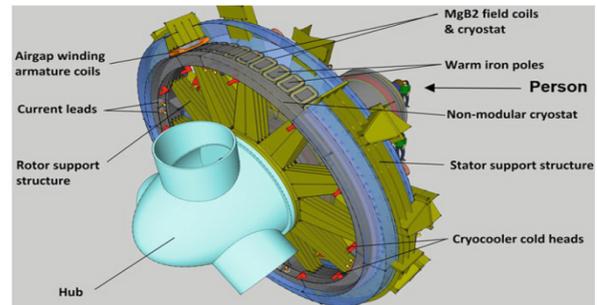


Рис. 8. Схема охлаждения сверхпроводящей обмотки ветрогенератора [14]

Fig. 8. Cooling scheme of the superconducting wind turbine winding [14]

На рис. 9 [15] показан другой подход прямого контакта криорефрижератора с обмоткой возбуждения MgB_2 . Газообразный гелий, подаваемый из компрессора (не показан), проходит через поворотную муфту после чего подается к криоохладителю, и возвращаясь через другую поворотную муфту поступает обратно в компрессор. При этом тепло от ВТСП обмоток отводится с помощью механизма теплопроводности.

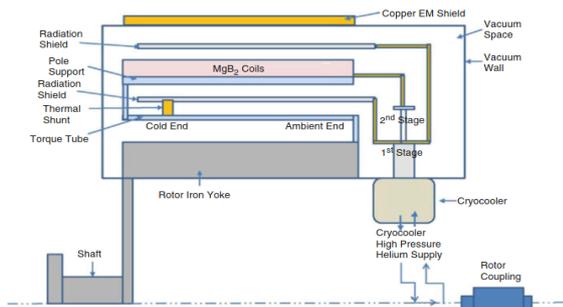


Рис. 9. Схема охлаждения обмотки из MgB₂ [15]

Fig. 9. The cooling circuit of the winding from MgB₂ [15]

Другой подход к реализации системы криогенного охлаждения ветрогенератора мощностью 10 МВт и частотой вращения 10–11 об/мин представлен на рис. 10 [16]. Криорефрижератор находится в непосредственном контакте с вращающейся обмоткой, выполненной из ВТСП материала. Для обеспечения температурного режима обмотки возбуждения в конструкции предусмотрен циркуляционный компрессор, направляющий поток хладагента к удаленному торцу ЭМ.

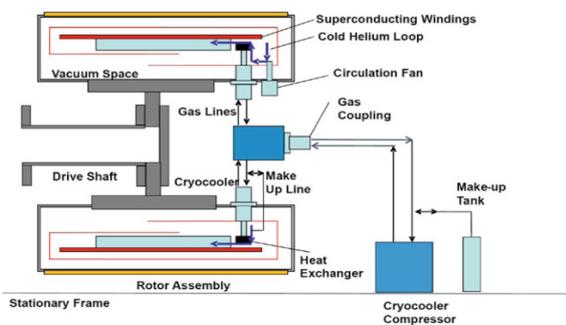


Рис. 10. Система охлаждения низкооборотного ветряного генератора [16]

Fig. 10. Cooling system of a low-side wind generator [16]

Для обеспечения охлаждения проводилось исследование по влиянию гравитационного поля на характеристики криорефрижератора. В результате было определено влияние ориентации криорефрижератора в пространстве на его холодопроизводительность. Дальнейшим развитием подобного подхода является выделение отдельной полости для размещения в криостате. Работы

по разработке подобного охлаждения представлены в работах [16, 17].

Криогенное охлаждение за счет непосредственного контакта ВСП обмотки и холодной части криорефрижератора исследовалось в ходе разработки электрической силовой установки [18]. ЭМ предназначен для выработки 1,4 МВт мощности с КПД >98% и удельной мощностью 16 кВт/кг. Высокая эффективность обеспечивается за счет использования ротора со сверхпроводящими обмотками.

Охлаждение сверхпроводящих обмоток осуществляется за счет использования криорефрижератора с импульсной трубкой, который интегрирован в конструкцию ротора ЭМ. Поперечное сечение высокоэффективного электромеханического привода мощностью 1,4 МВт представлено на рис. 11. Мощность использованного криорефрижератора составляет 2,5 кВт (отображено зеленым) температура на холодном конце рефрижератора составляет 50 К. В качестве рабочего тела в криогенном рефрижераторе используется гелий. Акустические импульсы создаются внутри криогенного рефрижератора за счет поршня, приводимого в действие линейным электродвигателем. Низкие потери в системе криогенного охлаждения обеспечивают высокую эффективность преобразования.

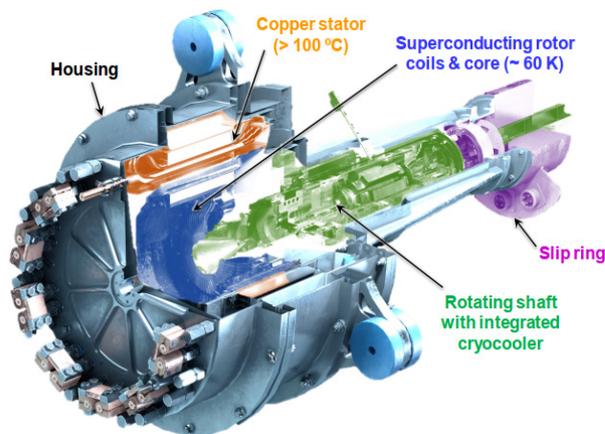


Рис. 11. Поперечное сечение высокоэффективного электромеханического привода [18]

Fig. 11. Cross section of a highly efficient electromechanical drive [18]

5. Децентрализованные системы охлаждения

В децентрализованных системах охлаждения, криогенная ЭМ и холодильная установка физически отделены друг от друга. Принципиальная схема децентрализованного охлаждения представлена на рис. 12, внутри вращающейся ЭМ размещается теплообменник, через который осуществляется циркуляция хладагента. Отвод тепла от хладагента осуществляется удаленной от машины теплоизолированной емкости.

Рис. 13 иллюстрирует емкость для охлаждения хладагента [19]. Внутри изолированной емкости размещается одноступенчатый криогенный рефрижератор, который

с помощью трубопроводов подключается к компрессору. Слева на рисунке представлена конструкция циркуляционного насоса, который предназначен для перекачки газообразного гелия между холодильной камерой и криогенной ЭМ. Холодильная камера совместно с циркуляционным насосом обеспечивают циркуляцию 2–5 г/с и отвод 100 Вт тепла при температуре хладагента на выходе 30 К. Начиная с точки 1 (рис. 13) поток хладагента теплообменник переохладитель размещенный в вакуумном пространстве холодильной камеры. Тепло от горячего потока хладагента передается к рефрижератору. Охлажденный хладагент поступает в подводную магистраль системы охлаждения ЭМ.

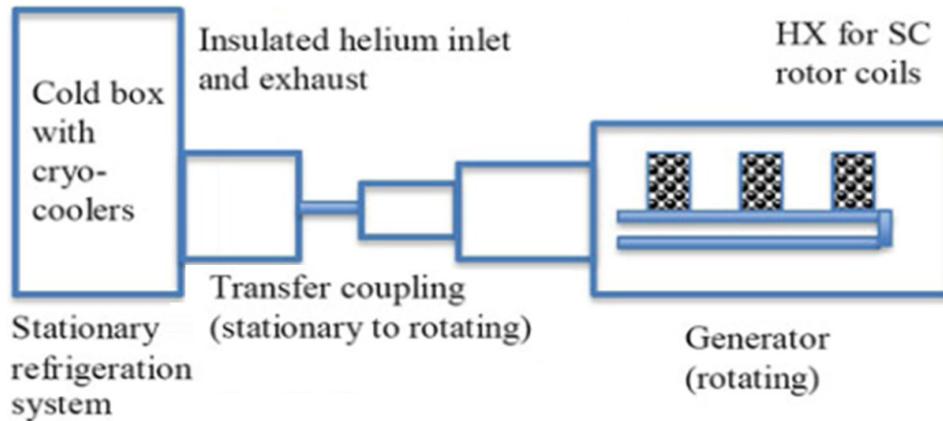


Рис. 12. Схема децентрализованного охлаждения [19]

Fig. 12. The scheme of decentralized cooling [19]

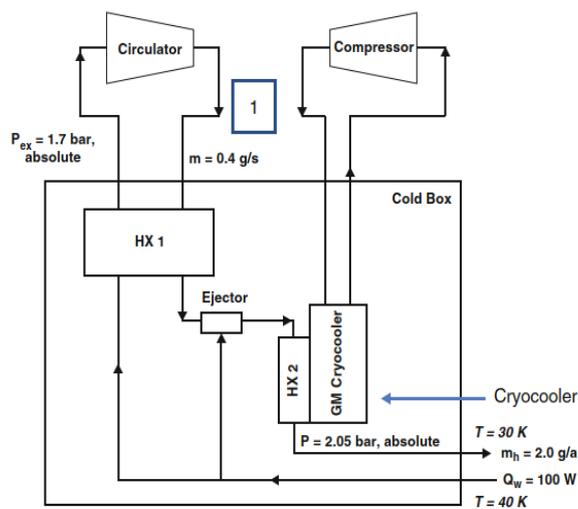


Рис. 13. Принципиальная схема холодильной камеры [19]

Fig. 13. Schematic diagram of the refrigerating chamber [19]

Существуют альтернативы и различные версии этой конструкции. В некоторых циркуляционный насос располагается внутри холодильной камеры, что обеспечивает компактность системы. В некоторых конструкциях в качестве криорефрижератора используется емкость с большим запасом хладагента, а теплообменник переохладитель отсутствует. Примером подобных решений могут быть исследования [20–22].

На рис. 14 показана холодильная камера с четырьмя одноступенчатыми криорефрижераторами, и четырьмя циркуляционными насосами для подачи газообразного гелия в обмотку возбуждения криогенной ЭМ [22], Matsue. Подводящие и отводящие магистрали трубопровода установлены стационарно. Аналогичная конструкция холодильной камеры использовалась в проекте «Hydrogenie». На рис. 15 показаны охлаждающая головка и насосы, размещенные на крышке холодного бокса с присоединенными к ним транспортировочными трубопроводами. Холодный бокс подобной конструкции прошел испытания на работе с номинальной мощностью 1,2 МВт.

Каналы охлаждения сверхпроводящей обмотки генератора, спроектированного в рамках программы «Hydrogenie», представлены на рис. 16. Еще один подход к реализации системы криогенного обеспечения предложен компанией Stirling SV. Она состоит

из двух криорефрижераторов, изготовленных компанией Stirling SV. Каждый рефрижератор имеет холодопроизводительность порядка 100 Вт при температуре 25 К, при этом реальная холодопроизводительность системы составляет 170 Вт [22]. Однако очевидные недостатки конструкции с поршневым насосом стали препятствием для внедрения системы в промышленном применении.



Рис. 14. Система охлаждения с удаленной холодильной камерой [20]

Fig. 14. Cooling system with remote refrigerating chamber [20]

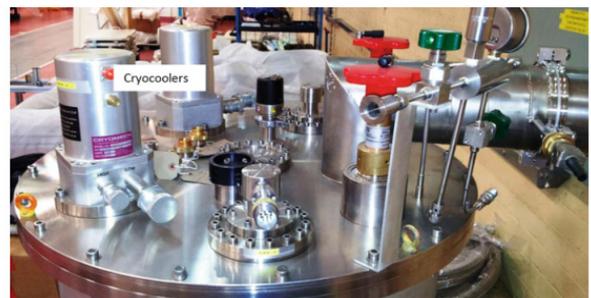


Рис. 15. Верхняя крышка холодильной камеры [21]

Fig. 15. Upper lid of the refrigerator compartment [21]

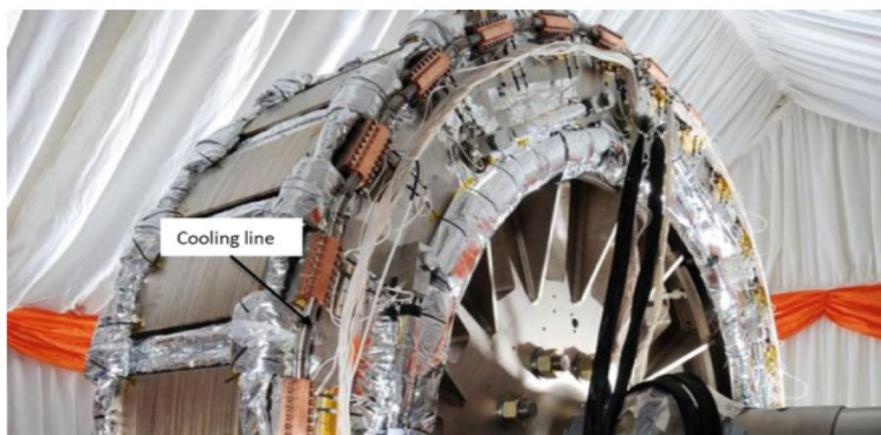


Рис. 16. Сверхпроводящая обмотка проекта «Hydrogenie» с каналами охлаждения [23]

Fig. 16. Superconducting winding of the Hydrogenie project with cooling channels [23]

На рис. 17 представлена конструкция ветряной турбины с криогенной ЭМ и холодильной камерой, разрабатываемой в рамках проекта «Superconductivity for Large Scale Wind Turbines» [23]. Обмотка возбуждения изготавливается из сверхпроводящего материала NbTi. Температура на катушках поддерживается в диапазоне от 4,2 К до 4,9 К, за счет их погружения в гелий. Потребный на охлаждение объем хладагента подается из внешней холодильной камеры.

Полностью сверхпроводящая машина разрабатывалась в проекте ASuMED [24]. Для реализации предложенной концепции исследователи применили отдельные крио-

статы для ротора и статора. Это решение позволило выбрать оптимальную конструкцию как для статорной, так и роторной обмоток. В качестве изоляции вакуумной полости от полости с хладагентом использовались феррофлюидные уплотнения. Роторный криостат обеспечивал отвод 150 Вт тепла от сверхпроводящих катушек. В качестве хладагента ротора использовался гелий при температуре 25 К и давлении 2 атм. Принципиальная схема криостата ротора представлена на рис. 18. В качестве хладагента для статора ЭМ использовался жидкий водород.

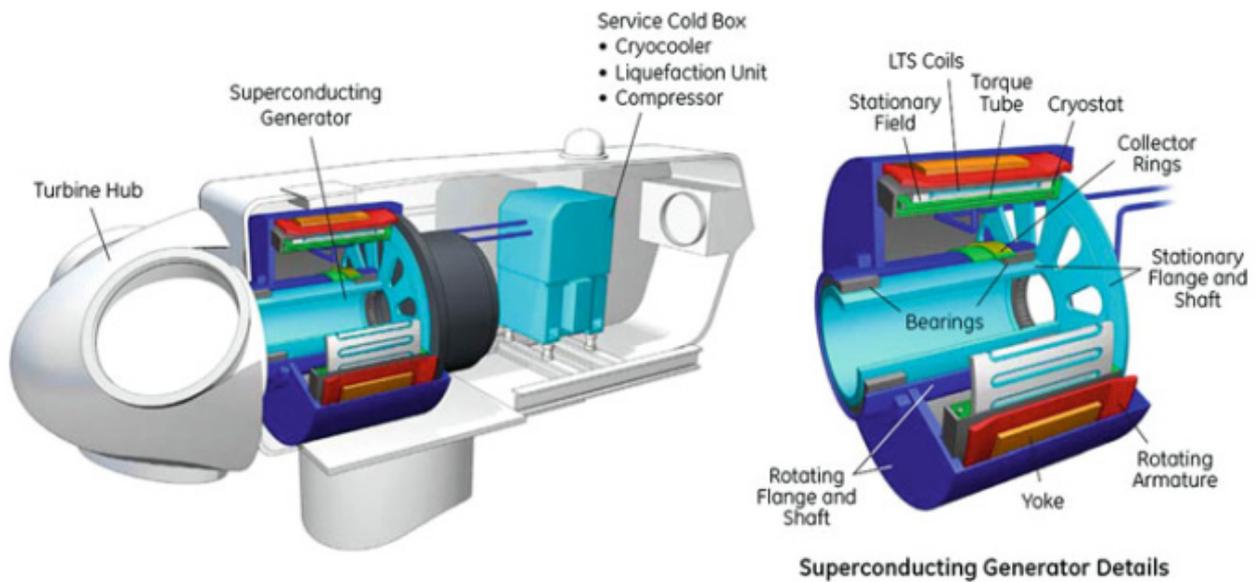


Рис. 17. КЭМ, расположенная в гондole ветротурбины [23]

Fig. 17. The CEM located in the gondola of the wind turbine [23]

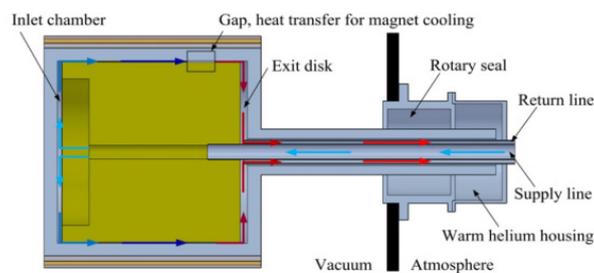


Рис. 18. Схема криостата ротора ASuMEB [24]

Fig. 18. ASuMED rotor cryostat diagram [24]

В ходе реализации проекта ASuMED было проведено исследование по интеграции систем криогенного охлаждения ЭД с системами ЛА. В результате исследований компанией Air Liquid был разработан криорефрижератор массой 200 кг (без учета силовой электроники и рамы) (рис. 19). В качестве стока для системы охлаждения использовался воздух. Потребная мощность криорефрижератора составляла 1 кВт при температуре 25 К.

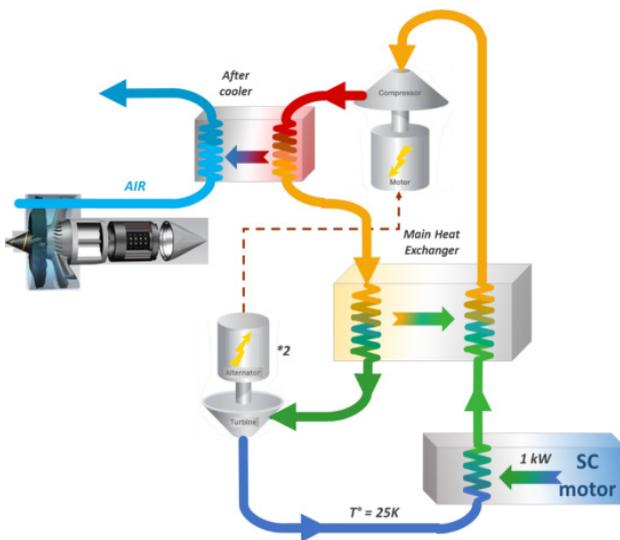


Рис. 19. Схема криогенной системы охлаждения [24]

Fig. 19. Diagram of the cryogenic cooling system [24]

Вывод

Применение криогенных ЭМ в ветроэнергетике, судостроении и авиации имеет технико-экономическое обоснование. Для применения КЭМ в качестве силовых установок ЛА с вводом в эксплуатацию в 2030–2035 году необходимо, чтобы удельная масса системы криогенного охлаждения была менее 3 кг/кВт и холодопроизводительностью более 1 кВт. Уровень параметров, предъявляемых к криогенным системам охлаждения, может быть обеспечен за счет использования в системах охлаждения криогенных рефрижераторов, работающих по циклу Стирлинга и циклу Брайтона. Последний за счет отсут-

ствия поршневой группы может обеспечивать ресурс порядка 30000 часов.

На основе проведенного анализа открытых источников выявлено два основных подхода к реализации систем охлаждения криогенных электрических машин: охлаждение за счет непосредственного контакта криокулера с активными элементами ЭМ и децентрализованная система охлаждения с отводом тепла через промежуточный хладагент. Для интегрированных систем охлаждения отдельного рассмотрения требует вопрос по обеспечению продолжительной работы криокулеров под воздействие внешних факторов. Тем не менее интегрированные системы потенциально обеспечивают лучшие массогабаритные характеристики системы охлаждения так как не требуют наличия трубопроводов, обеспечивающих циркуляцию промежуточного теплоносителя. Существенным преимуществом децентрализованной системы охлаждения является возможность обеспечения лучшей эргономичности конструкции, что является актуальным для транспортных систем.

Можно отметить, что в настоящее время существует множество подходов к реализации систем охлаждения криогенных ЭМ. Растущее предложение на рынке коммерческих криокулеров может стать движущей силой для развития КЭМ. Предполагается, что в будущем решения будут вырабатываться на основе комбинированных подходов, описанных в данной статье. На формирование этих решений будут влиять особенности конструкции ЭМ и используемый тип хладагента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haran K. S., Kalsi S., Arndt T., Karmaker H. High power density superconducting rotating machines – development status and technology roadmap // *Superconductor Science and Technology*. 2017. V. 30, No. 12. Article number 123002. DOI: 10.1088/1361-6668/aa833e.
2. Masson P. J., Luongo C. A. HTS machines for applications in all-electric aircraft // *IEEE*. 2007. P. 1–6. DOI: 10.1109/PES.2007.385622.

3. Kalsi S. S., Gamble B. B., Snitchler G., Ige S. O. The status of HTS ship propulsion motor developments // IEEE. 2006. P. 5. DOI: 10.1109/PES.2006.1709643.
4. Гинзберг Д. М., Заварицкий Н. В. (ред.). Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников. М.: Мир, 1990. 543 с.
5. Subedi A., Zhang L., Singh D. J., Du M. H. Density functional study of FeS, FeSe, and FeTe: Electronic structure, magnetism, phonons, and superconductivity // Physical Review B. 2008. V. 78, Iss. 13. Article number 134514. DOI: 10.1103/PhysRevB.78.134514.
6. Bi T., Zarifi N., Terpstra T., Zurek E. The search for superconductivity in high pressure hydrides // arXiv:1806.00163. 2018. DOI: 10.1016/B978-0-12-409547-2.11435-0.
7. Somayazulu M., Ahart M., Mishra A. K., Geballe Z. M., Baldini M., Meng Y., Struzhkin V. V., Hemley R. J. Evidence for superconductivity above 260 K in lanthanum superhydride at megabar pressures // Physical review letters. 2019. V. 122, No. 2. Article number 027001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.027001.
8. Weisend II J. G., Jeong S. Cryocoolers Theory and Applications. Springer, 2020. 236 p.
9. Костюк В. В., Каторгин Б. И., Фирсов В. П., Ковалёв К. Л., Равикович Ю. А., Антюхов И. В., Тимусев С. Ф., Верещагин М. М., Холобцев Д. П., Ерилов Ю. И., Балабошко Н. Г., Гапеев Ю. А., Лесовников А. С., Сычков А. Е., Модестов К. А. Система криообеспечения высокотемпературной сверхпроводимости устройств (СКР 001) // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-8-1647.
10. Stautner W. Special topics in cryostat design Cryostat Design. Cham: Springer, 2016. P. 195–218.
11. Stautner W., Sivasubramaniam K., Laskaris E. T., Mine S., Rochford J., Budenheim E., Amm K. Acry-free 10 T high-field magnet system for a novel superconducting application // IEEE transactions on applied superconductivity. 2010. V. 21, Iss. 3. P. 2225–2228. DOI: 10.1109/TASC.2010.2087308.
12. Sun J., Sanz S., Neumann H. Conceptual design and thermal analysis of a modular cryostat for one single coil of a 10 MW offshore superconducting wind turbine // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. V. 101, No. 1. Article number 012088. DOI: 10.1088/1757-899X/101/1/012088.
13. Sun J., Ramalingam R., Sanz S., Neumann H. Preliminary test of the prototype modular cryostat for a 10 MW offshore superconducting wind turbine // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 171, No. 1. Article number 012121. DOI: 10.1088/1757-899X/171/1/012121.
14. Muñoz G. S., Azcarraga J. M. M., Perez J. G.-T., Ereno P. I., Apinaniz S. A. Direct-action superconducting synchronous generator for a wind turbine // Patent USA 13520121. Publ. 07.11.2012.
15. Kalsi S. S. Superconducting Wind Turbine Generator Employing MgB2 Windings Both on Rotor and Stator // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2013. V. 24, Iss. 1. P. 47–53. DOI: 10.1109/TASC.2013.2291275.
16. Sivasubramaniam K., Zhang T., Lokhandwalla M., Laskaris E. T., Bray J. W., Gerstler B., Shah M. R., Alexander J. P. Development of a high speed HTS generator for airborne applications // IEEE Transactions on applied superconductivity. 2009. V. 19, Iss. 3. P. 1656–1661.
17. Stautner W. Cryocoolers for superconducting generators. Cryocoolers. Cham: Springer, 2020. P. 121–154. DOI: 10.1007/978-3-030-11307-0_6.
18. Jansen R. H., Jesus-Arce Y. D., Kascak P., Dyson R. W., Woodworth A., Scheidler J. J., Edwards R., Stalcup E. J., Wilhite J., Duffy K. P., Passe P., McCor-mick S. High efficiency megawatt motor conceptual design // Joint Propulsion Conference. 2018. Article number 4699. DOI: 10.2514/6.2018-4699.
19. Laskaris E. T., Ackermann R. A., Wang Y. Cryogenic cooling refrigeration system for rotor having a high temperature super-conducting field winding and method // Patent 6438969 USA. Publ. 11.07.2002.
20. Takahashi M., Iwai S., Miyazaki H., Tosaka T., Tasaki K., Hanai S., Ioka Sh., Takigami H., Watanabe K., Awaji S., Oguro H., Tsuchiya Yu. Design and test results of a cryogenic cooling system for a 25-T cryogen-free superconducting magnet // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017. V. 27, Iss. 4. P. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2017.2673762.
21. Trollier T., Tanchon J., Icart Y., Ravex A. High capacity 30 K remote helium cooling loop // AIP conference proceedings – American Institute of Physics. 2014. V. 1573, Iss. 1. P. 1461–1466. DOI: 10.1063/1.4860879.
22. Костюк В. В., Каторгин Б. И., Фирсов В. П. Криообеспечение ВСТП электродвигателей и электрогенераторов. Инновационные технологии в энергетике. М.: Наука, 2010.
23. Fair R., Lewis C., Eugene J., Ingles M. Development of an HTS hydroelectric power generator for the hirschaid power station // Journal of Physics: Conference Series. 2010. V. 234, No. 3. Article number 032008. DOI: 10.1088/1742-6596/234/3/032008.