

## Перспективы применения сверхпроводниковых устройств на борту полностью электрического самолета с гибридной силовой установкой<sup>1</sup>

КОВАЛЕВ К. Л., ПЕНКИН В. Т., ИВАНОВ Н. С., НЕКРАСОВА Ю. Ю., ИЛЬЯСОВ Р. И.,  
ДЕЖИН Д. С., ЖУРАВЛЕВ С. В.

*Рассматриваются перспективы применения сверхпроводниковых электрических машин и сверхпроводящих кабелей на борту полностью электрического самолёта (ПЭС), в том числе и в качестве источников движения летательного аппарата. Показано, что сверхпроводниковые электрические машины по сравнению с машинами традиционного исполнения обладают рядом преимуществ, позволяющих считать их применение в составе бортовых систем прорывной технологией при создании ПЭС. Анализируются возможные схемы электрических силовых установок с точки зрения массогабаритных показателей. Показано, что наибольшими перспективами обладают гибридные силовые установки для создания тяги, приведены возможные структурные схемы таких установок, показаны их достоинства и недостатки с учетом использования в составе распределенной силовой установки. Дан обзор последних разработок в области высокотемпературных сверхпроводниковых электрических машин, включая полностью сверхпроводниковые, удельная масса которых может составлять более 10 кВт/кг.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** полностью электрический самолёт, электрические машины, высокотемпературные сверхпроводники, распределенная система тяги, гибридная силовая установка

**Полностью электрический самолёт: проекты и перспективы.** В исследовательских и опытно-конструкторских организациях авиационной промышленности большое внимание уделяется снижению уровня вредных выбросов и шума воздушных судов. К примеру, такие программы развития авиации, как ACARE Flightpath 2050 и NASA N+3, полагают сократить выбросы CO<sub>2</sub> на 75%, NO<sub>x</sub> на 90% и уменьшить уровень шума на 65% по сравнению с базовым уровнем 2000 г.[1].

Программа «CleanSky 2» [2], реализуемая в рамках европейской инициативы «Горизонт 2020», направлена на развитие исследований и разработок в сфере аэронавтики. Цели программы: создание экологически более чистого авиационного транспорта; повышение безопасности полёта; обеспечение лидерства стран-участниц программы в области авиации.

В Государственной программе РФ «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы» [3] наряду с аналогичными требованиями по снижению шума и вредных выбросов отмечается также необходимость развития гражданского сегмента отечественного самолётостроения, доля которого в денежном выражении к 2025 г. должна составить 3,2%, по сравнению с 0,6% в 2011 г. Доля внутреннего рынка самолетов вместимостью свыше 85 мест, обеспечиваемая поставками отечественных самолетов, вырастет с 30% в 2012 г. до 49% в

2025 г. Таким образом, особенную актуальность приобретают исследования, направленные на использование новейших технологий в составе ближне- и среднемагистральных гражданских воздушных судов.

Значительная часть намеченного может быть достигнута за счет совершенствования технологии производства авиационных двигателей, однако очевидно, что для полного выполнения поставленных целей потребуется переход к новым концепциям построения систем летательного аппарата. Наиболее перспективной сегодня считается концепция полностью электрического самолета (ПЭС).

Под «полностью электрическим самолетом» понимается летательный аппарат (ЛА) с единой централизованной системой электроснабжения, обеспечивающей все энергетические потребности самолета. Концепция ПЭС предполагает использование электрических силовых установок в качестве источников движения, что позволило бы решить задачу создания экологически чистого и экономного авиалайнера.

По предварительным оценкам, создание такого самолета потребовало бы значительно меньших сроков его разработки, изготовления и испытания позволило бы уменьшить стоимость и массу бортовых систем и агрегатов, улучшить летные характеристики и снизить полетную массу, время простоя, расход топлива и технического обслуживания, а также сократить прямые эксплуатационные затраты [4, 5].

<sup>1</sup>Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-19-01269).

Оценка изменения массы ЛА, системы кондиционирования и электроприводов, а также стоимости генерирования энергии и надежности при условии реализации концепции ПЭС проводилась NASA в середине 80-х годов прошлого века. В результате были сделаны выводы о возможном уменьшении у пассажирского ЛА на 350 мест массы оборудования на 30%. У большого военно-транспортного ЛА снижение взлетной массы может достичь 10%. Для ЛА меньших размеров, например истребителей, выгоды от реализации концепции ПЭС не столь велики [6]. По оценкам ЦАГИ, применение электрических силовых установок вместо традиционных авиадвигателей является весьма перспективным на самолетах вместимостью от 4 до 19 пассажиров [7]. Таким образом, основным сектором для применения концепции ПЭС во всем мире считаются среднемагистральные самолёты с пассажироместимостью приблизительно от 5 до 150 мест. При этом следует отметить, что в отличие от малой авиации процесс создания среднего и крупного ПЭС затрагивает все системы на борту и предполагает разработку новых функциональных систем ЛА. В особенности это касается силовых установок.

Основная задача силовых установок с электрическим двигателем аналогична задачам, стоящим перед традиционным маршевым двигателем. Прежде всего это создание тяги, которая позволила бы летательному аппарату перемещаться в атмосфере. Отличительными особенностями электрической силовой установки являются пониженный уровень шума, повышенная надежность, простота конструкции, удобство эксплуатации, снижение или полное отсутствие вредных выбросов, ремонтпригодность, широкие диапазоны частоты вращения.

Силовая установка ПЭС может представлять собой:

электродвигатель с питанием от аккумуляторных батарей;

электродвигатель с питанием от аккумуляторных батарей и батареи солнечных либо топливных элементов;

электродвигатель с питанием от аккумуляторных батарей и генератор с приводом от двигателя внутреннего сгорания (ДВС); такая схема носит название гибридной силовой установки (ГСУ).

Расчет суммарной массы электрической силовой установки с батареями литий-полимерных аккумуляторов был выполнен в ЦАГИ в 2015 г. [7]. Результаты расчета показали, что уже при продолжительности полета 2 ч масса такой электрической силовой установки в 3–4 раза превышает массу силовой установки с ДВС и соответствующим запасом топлива. Таким образом, наибольшими перспективами для крупных и средних ЛА обладает

концепция ПЭС с ГСУ, в которой приводной электродвигатель получает энергию от ДВС.

Следует отметить, что реализация предложенной схемы возможна только в том случае, если электрические двигатели по своим массогабаритным параметрам будут превосходить турбопривод. У традиционных авиационных электрических двигателей, выпускаемых серийно, удельная мощность составляет примерно 0,5–2,5 кВт/кг; известны опытные образцы, удельная мощность которых составляет 5 кВт/кг [8]. Однако для турбовентиляторных авиадвигателей этот показатель составляет 3–8 кВт/кг, что практически исключает возможность использования обычных электрических машин с медными обмотками в составе ГСУ.

На рис. 1 показано современное состояние и перспективы повышения удельной мощности авиационных электрических машин [9]. Для примера рассмотрены генераторы аэробуса А-350, имеющие удельную мощность около 2,5 кВт/кг. Учитывая вышеприведенные соображения, этот показатель должен возрасти как минимум в 4 раза и в долгосроч-

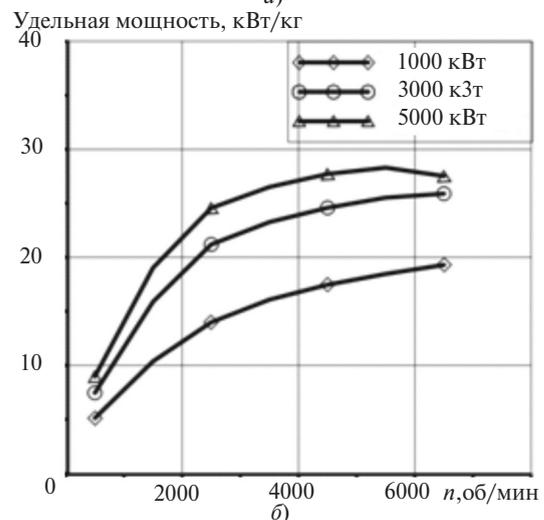


Рис. 1. Удельные мощности электрических машин: а — авиационные электрические машины — сегодня и в перспективе; б — оценка удельной мощности ВТСП машин

ной перспективе составить около 12–15 кВт/кг. Сегодня таких показателей можно достичь при использовании сверхпроводниковых электродвигателей, которые могут иметь удельную мощность 10–15 кВт/кг (рис. 1, б) и удельный момент 35 Н·м/кг, что делает их конкурентоспособными относительно низкооборотных турбин [10]. Таким образом, только применение сверхпроводниковых материалов и систем позволит снять это ограничение и обеспечить возможность создания ПЭС на электрической тяге.

В настоящее время возможности применения концепции ПЭС с гибридной силовой установкой и сверхпроводниковыми электрическими машинами исследуются многими производителями авиационной техники. Так, принцип использования распределенных гибридных силовых установок подробно описан в [11, 12]. В некоторых работах отмечается формулирование общих требований к таким силовым установкам (СУ) [13], что свидетельствует о серьезном интересе разработчиков к рассматриваемой проблеме.

**Гибридные силовые установки для создания тяги ПЭС.** Общая схема гибридной силовой установки показана на рис. 2.

Для электрической связи генератора и двигателя используются контроллеры-преобразователи, а движитель приводится непосредственно от электродвигателя. Применение контроллеров позволяет распределять мощность, вырабатываемую генератором между двигателем и внешними потребителями. Кроме того, такая схема дает возможность использовать дополнительные источники энергии, например буферные аккумуляторные батареи, для компенсации пиковых потреблений мощности, например на взлете ЛА.

Благодаря использованию контроллера, может быть реализовано регулирование частоты вращения двигателя. Однако, учитывая высокое значение передаваемой мощности, электронные преобразователи будут иметь массу и размеры, в несколько раз превышающие массу и размеры электрических машин. Поэтому в некоторых случаях для упрощения системы и снижения ее массы от использования контроллеров можно отказаться.

Установка редуктора между турбиной и генератором рациональна только в случае применения

сверхвысокооборотной турбины, когда прямое соединение ее с генератором невозможно из-за механических напряжений, возникающих в элементах конструкции ротора генератора при высокой частоте вращения. При использовании редуктора следует иметь в виду, что его масса также может быть значительной [12].

Второй вариант ГСУ подразумевает непосредственную связь генератора и электродвигателя (рис. 3). При этом двигатель непосредственно соединен с движителем. Такая схема отличается простотой и лучшими массогабаритными показателями из-за отсутствия преобразователей и контроллеров. Регулировать частоту вращения двигателя в данном случае можно только путем изменения частоты вращения ГТД. Внешние потребители могут питаться посредством отбора мощности от генератора или от отдельного источника. Наличие редуктора позволяет снизить частоту вращения генератора по сравнению с ГТД, что может быть актуально с точки зрения конструктивных особенностей электродвигателя. Это связано с тем, что при непосредственной связи генератора с электродвигателем при высокой скорости ГТД электрическая частота питающего напряжения оказывается значительной и число пар полюсов двигателя заметно возрастает.

Еще одним вариантом гибридной силовой установки является схема, аналогичная предыдущей, но с редуктором между электродвигателем и движителем (рис. 4). Особенностью схемы является возможность увеличения частоты вращения электродвигателя. Применение двух редукторов позволяет более гибко выбирать значения частоты вращения генератора и двигателя и получить наибольшее значение удельной мощности при заданной суммарной мощности системы.

Как известно, на современных крупных пассажирских самолетах используется два турбо-реактивных двигателя (ТРД). Например, такая схема реализована на Airbus A320, Boeing 787, SSJ 100 и т.д. Однако при переходе к гибридной силовой установке может оказаться рациональным увеличение числа двигателей. При этом мощность, вырабатываемая генератором, будет равномерно распределяться между всеми двигателями. Пример такой ГСУ показан на схеме рис. 5. В данном случае также возможно применение редукторов для измене-

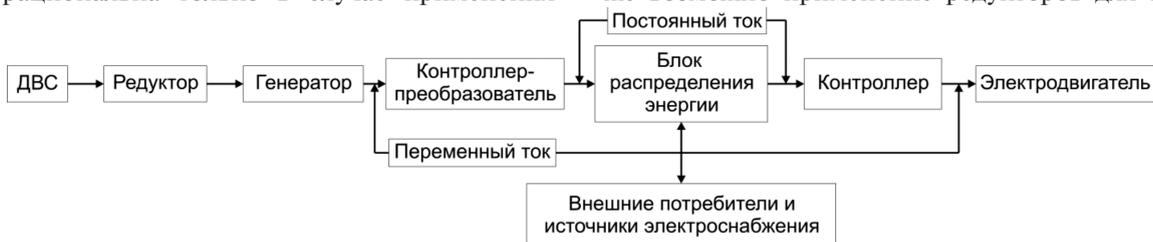


Рис. 2. Общая схема гибридной СУ



Рис. 3. Схема гибридной СУ с непосредственной электрической связью генератора и двигателя

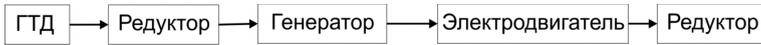


Рис. 4. Схема гибридной СУ с двумя редукторами

ния частоты вращения генератора, двигателя и вентилятора, что расширяет возможности оптимизации их параметров. Такая система носит название гибридной распределенной силовой установки.

Преимущества распределенной ГСУ с электрическим приводом [12–14, 28]:

повышение гибкости в расположении турбоэлектрических генераторов и электродвигателей, обеспечивающих тягу ЛА, что позволяет увеличить доступное пространство и улучшить компоновку;

увеличение подъемной силы при низких скоростях и, как следствие, улучшение взлетно-посадочных характеристик;

снижение уровня шума, поскольку основная мощность отбирается от турбины, а не от выхлопной струи;

в случае выхода из строя одного электродвигателя оставшиеся обеспечивают необходимую самолету мощность, что позволяет избежать дестабилизирующего момента, который наблюдается при отказе двигателя у самолетов традиционной архитектуры;

проектирование устройства управления вектором тяги возможно с использованием обычных легких материалов планера, поскольку отработанный вентилятором воздух является холодным, а не горячим, как при работе от основного двигателя.

Кроме того, на воздушных судах с распределенной тягой в некоторых режимах (например при снижении) часть двигателей может работать в качестве ветрогенераторов. Определенный эффект достигается и при торможении самолета на пробеге по взлетно-посадочной полосе. Это является предметом исследования концерна Airbus (колесо передней стойки шасси самолета А-320) и корпорации «Иркут» (МС-21) [15].

С точки зрения компоновки ГСУ газотурбинные двигатели могут располагаться под крыльями самолета или быть интегрированы в корпусе. Приводя в движение сверхпроводниковые генераторы,

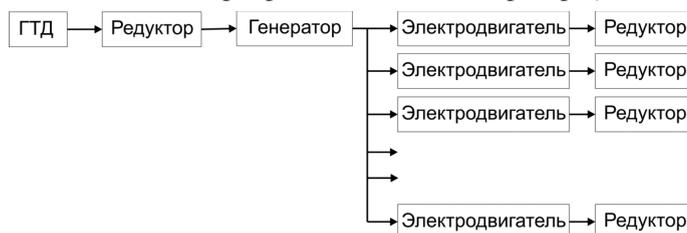


Рис. 5. Гибридная распределенная СУ

один ГТД обеспечит примерно половину требуемой тяги самолета с помощью 8 меньших вентиляторов с электрическим приводом, расположенных в задней части фюзеляжа. Для коммерческого авиалайнера требуется от 5 до 100 МВт тяги в зависимости от его размера.

Однако проведенный в ЦАГИ расчет массы, распределенной на 4 винтомоторные группы ГСУ, показал, что суммарная масса ГСУ (без учета топлива) в среднем в 2 раза больше, чем у аналога с ТВД. При учете запаса топлива на 2 ч полета преимущество традиционной СУ с ТВД по сравнению с гибридной будет достигать 100%, а при продолжительности полета 6 ч – около 50% [7]. Тем не менее, применение ГСУ является возможным и практически осуществимым способом удовлетворения жестких требований по экологичности и шумности, предъявляемых к воздушным судам. Актуальными также остаются вопросы улучшения взлетно-посадочных характеристик.

Таким образом, как отмечалось выше, о серьезной выгоде при применении ГСУ можно говорить при условии значительного снижения массогабаритных показателей входящих в нее электрических элементов.

**Сверхпроводниковые электрические машины и кабели на борту ПЭС.** На рис. 6 показано сравнение массы электрических машин с турбовентиляторными авиационными двигателями в зависимости от мощности. Как было сказано выше, обычные электродвигатели слишком тяжелы, чтобы рассматривать их в качестве возможного решения проблемы создания тяги ЛА. Современные сверхпроводниковые электрические машины в некоторых случаях могут быть сопоставимы по массе с турбовентиляторными двигателями, а полностью сверхпроводниковые в перспективе способны достичь массы, в 3 раза меньшей, чем современные турбовентиляторные двигатели [14, 23, 33].

Сверхпроводниковые электрические машины по сравнению с машинами традиционного исполнения обладают следующими достоинствами [14]:

улучшенными массогабаритными параметрами (минимум в 2 раза);

более высоким КПД;

меньшими значениями индуктивных параметров;

меньшим уровнем шума;

лучшей стабильностью при работе в электросетях.

Как отмечается в докладах компании Airbus [9, 15], применение ВТСП электрических машин и проводных линий уже в ближайшем будущем позволит создать конкурентоспособные ГСУ, а по мере развития источников электроэнергии – полностью

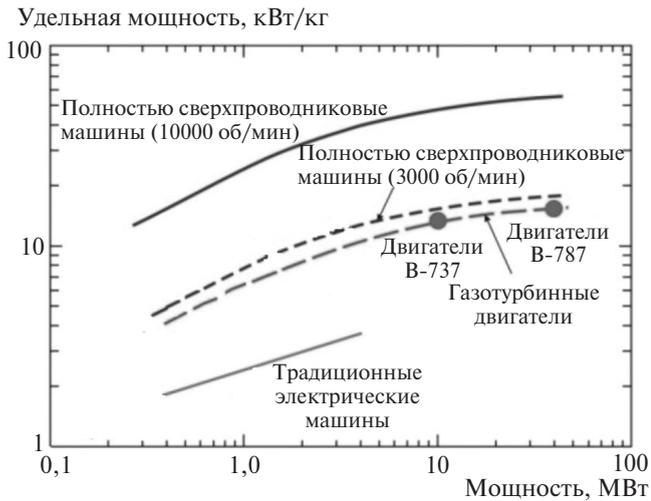


Рис. 6. Сравнительная характеристика электрических машин и газотурбинных двигателей

электрические СУ. Расчетные и экспериментальные оценки показывают, что массовые и габаритные характеристики криогенных электромашин на основе ВТСП материалов могут быть ниже обычных, даже с учетом необходимости криостатирования.

Таким образом, работы по созданию ВСП электрических машин и устройств ведутся во многих странах мира. Так, научно-исследовательский институт в г. Ухань (Китай) продемонстрировал тяговый ВТСП двигатель мощностью 1 МВт [21]. Ротор ВТСП электродвигателя имеет 4 полюса, частота вращения  $500 \text{ мин}^{-1}$ . Сообщается, что двигатель проходит испытания при максимальной нагрузке.

Полностью сверхпроводниковый синхронный генератор мощностью 15 кВА был разработан компаний «Shanghai Superconductor Technology» совместно с Университетом Цинхуа, Пекин (рис. 7). Сверхпроводниковые обмотки генератора как на статоре, так и на роторе изготовлены из YBCO ленты шириной 5 мм. Линейная нагрузка машины при номинальной мощности может достигать 500 А/см. Генератор работает при температурах жидкого азота с отдельным криостатированием ротора и статора. Для соединения холодного ротора и теплого вала применяется теплоизолированная муфта [26].

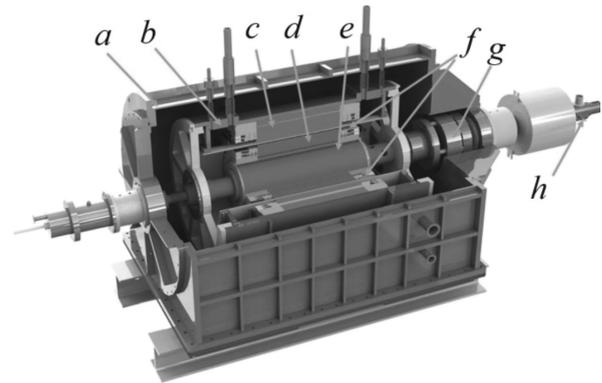


Рис. 7. Полностью сверхпроводниковый синхронный генератор мощностью 15 кВА: *a* – вакуумная камера; *b* – криостат статора; *c* – сердечник статора; *d* – сердечник ротора; *e* – криостат ротора; *f* – теплоизолированная муфта; *h* – соединительные провода

Научно-исследовательский институт науки и техники Кореи представил ВТСП генератор с воздушным сердечником мощностью 10 кВА [20]. На роторе машины используются 4 рейстрекковые катушки, которые охлаждаются неоном до температуры 30 К.

В США при финансировании НАСА был создан опытный образец ВТСП генератора мощностью 3 МВт, частота вращения которого составляет 15000 об/мин [20]. Ротор и статор охлаждаются до криотемператур, в катушке возбуждения используются сверхпроводники, а на статоре находятся обычные медные катушки. Удельная масса генератора около 0,2 кг/кВт. Наилучшим прототипом ВТСП авиационного генератора является индукторный генератор переменного тока, разработанный фирмой General Electric. Его удельная мощность достигает 8 кВт/кг, он выдает в сеть 4 МВА благодаря высокой частоте вращения, достигающей около  $16000 \text{ мин}^{-1}$ . Фирмой American Superconductor был создан низкооборотный двигатель мощностью 36,5 МВт с удельным моментом 38 Н·м/кг. Эту разработку также можно рассматривать в качестве прототипа тягового электродвигателя для ПЭС [21].

Фирмой Siemens в Германии разработан ВТСП генератор мощностью 4 МВА на  $3600 \text{ мин}^{-1}$ .

В Великобритании компанией Airbus совместно с Университетом г. Бат была разработана сверхпро-

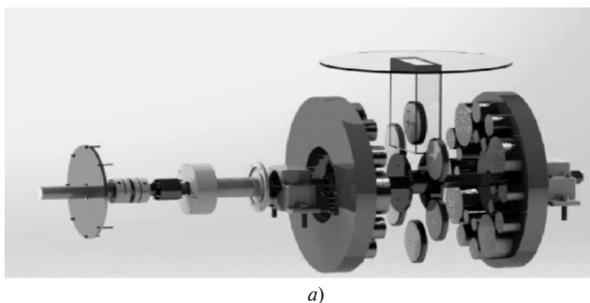


Рис. 8. Полностью сверхпроводящая электрическая машина с осевым магнитным потоком: *a* – общий вид; *б* – ВТСП катушки статора

водникова электрическая машина с осевым магнитным потоком, создаваемым постоянными магнитами (рис. 8). Обмотка статора выполнена в виде двойной галеты из ВТСП ленты второго поколения шириной 4 мм. Мощность машины составляет 8 кВт, частота вращения ротора – 1500 об/мин [23].

В России также ведутся разработки электрических машин на основе ВТСП-2 лент. В рамках программы «Сверхпроводниковая индустрия» в Московском авиационном институте в кооперации с ОАО «НИИЭМ», МГТУ им. Баумана, ИФВЭ, ОАО «ВПО Точмаш» и ГУАП в 2011–2015 гг. были созданы и успешно испытаны экспериментальные прототипы ВТСП электрических машин (двигателей и генераторов) мощностью от 50 до 1000 кВА [18]. Сравнительные параметры представлены в таблице.

| Параметр                            | ГС-50 | ДС-50 | СПСД-200 | СПСГ-1000 |
|-------------------------------------|-------|-------|----------|-----------|
| Мощность, кВт (кВА)                 | 50    | 50    | 200      | 1000      |
| Напряжение фазное, В                | 230   | 220   | 450      | 690       |
| Номинальный ток фазы, А             | 72    | 86    | 170      | 500       |
| Частота вращения, мин <sup>-1</sup> | 150   | 300   | 1500     | 600       |
| Электрическая частота, Гц           | 15    | 20    | 75       | 50        |
| Диаметр рачотки, мм                 | 355   | 284   | 370      | 800       |
| Активная длина, мм                  | 246   | 185   | 300      | 400       |

Во всех прототипах использовались ВТСП обмотки возбуждения (рис. 9), расположенные на роторе, а медные трёхфазные обмотки якоря располагались на статоре.

Статоры машин имеют водяное охлаждение, а роторы со сверхпроводниковыми обмотками охлаждаются жидким или переохлажденным азотом. Для теплоизоляции применялись вращающиеся криостаты. Их недостатки: ограничение макси-



Рис. 9. Катушки возбуждения на основе ВТСП лент 2-го поколения

мальной частоты вращения ротора, сложности создания герметичных скользящих уплотнений и увеличенный немагнитный зазор. Опыт создания вращающихся криостатов показал, что для полностью сверхпроводниковых «безжелезных» электрических машин, имеющих сверхпроводящие обмотки и на роторе, и на статоре, более целесообразно вернуться к общему внешнему криостату.

Внешний вид экспериментальных ВТСП электрических машин мощностью 200 кВт и 1 МВА показан на рис. 10.

В настоящее время в Московском авиационном институте накоплен большой опыт по расчету и проектированию ВТСП электрических машин, что подтверждается рядом патентов сотрудников института и научных статей, например [14,17]. Сегодня наиболее перспективными являются машины с применением ВТСП обмоток на статоре машины. При этом индуктор машины может иметь различное исполнение: с постоянными магнитами, с вращающимися и стационарными ВТСП обмотками возбуждения. Каждый приведенный тип электрической машины имеет свои преимущества. Однако наибольшей удельной мощностью обладает полностью ВТСП электрическая машина с внешним ферромагнитным экраном [25]. Конструктивная схема такой машины приведена на рис. 11.

Как видно из рис. 11, данная машина имеет только один ферромагнитный элемент – внешний магнитный экран. Он предохраняет внешнее про-



а)



б)

Рис. 10. Внешний вид электрических машин на основе ВТСП-2: а – СПСД-200; б – СПСГ-1000

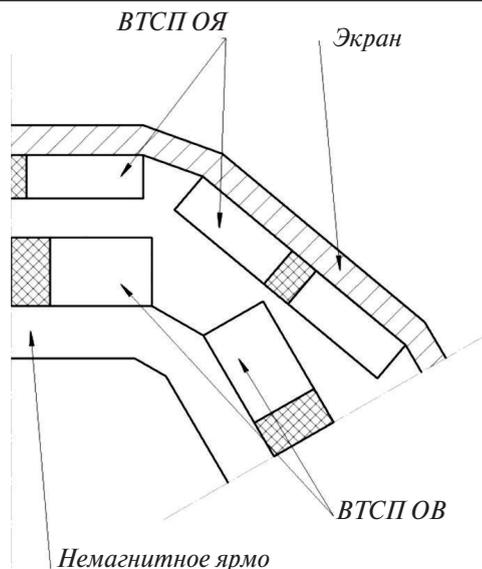


Рис. 11. Конструктивная схема полностью ВТСП электрической машины

странство от сильных магнитных полей и дополнительно служит ярмом статора, несколько уменьшая магнитное сопротивление на пути основного магнитного потока индуктора. Такая конструкция позволяет достичь высоких значений удельной мощности, так как немагнитные участки могут быть выполнены из материалов с низкой плотностью, в том числе с применением современных аддитивных технологий. Снижение магнитной индукции в зазоре машины компенсируется высокими плотностями тока в ВТСП ОВ и ОЯ. Ожидается, что данный тип машин будет обладать удельной мощностью примерно 10 кВт/кг при температуре жидкого азота (77 К) и выходной мощности более 1 МВт.

Помимо СП электрических машин также целесообразно применение бортовых силовых кабелей на основе ВТСП материалов. Это позволит снизить общую массу системы распределения электроэнергии, увеличить передаваемую мощность, уменьшить массу защитных устройств. Согласно расчетам даже небольшим коммерческим пассажирским самолетам потребуется мощность в десятки мегавольт-ампер и для реализации электродвижения. Для передачи такой огромной мощности применение обычных медных кабелей станет невозможным, в то время как высокоэффективные ВТСП кабели уже установлены в электрических сетях и успешно применяются.

Необходимо отметить, что использование в качестве хладагента жидкого азота в случае аварий, связанных с разрушением и коротким замыканием цепей и обмоток, создает вокруг очага разрушения нейтральную среду, практически полностью блокирующую возможность возгорания. Испаряющийся азот может быть использован в системах наддува нейтральным газом надтопливного пространства в

баках, а также как рабочее тело систем пожаротушения во всех пожароопасных отсеках и полостях самолета. Обеспечение стартового охлаждения электромашин и кабелей предполагается обеспечивать прокачкой жидкого азота одновременно с заправкой, поддержание низкой температуры хладагента в полете можно обеспечить бортовыми криогенераторами, весьма близкими конструктивно к используемым длительное время турбохолодильникам систем кондиционирования самолетов. Учитывая тот факт, что воздух за бортом в крейсерском полете дозвукового самолета имеет весьма низкую температуру (до  $-60$  °С), его использование в качестве рабочего тела и хладагента при теплообмене в криогенераторах позволяет поднять энергоэффективность такой схемы.

**Заключение.** Анализ преимуществ ПЭС показывает возможность снижения полетной массы, эксплуатационных расходов, времени технического обслуживания, а также увеличения топливной эффективности. Однако применение концепции ПЭС с гибридной силовой установкой целесообразно только при использовании сверхпроводниковых технологий как для электрических машин, так и для кабелей и устройств системы распределения электроэнергии. Обзор литературы показал, что исследования и разработки бортовых систем и отдельных агрегатов для ПЭС с ГСУ и ВТСП электрическими машинами и кабелями ведутся во многих мировых научных центрах. Установлено, что уже созданные ВТСП электрические машины обладают удельной мощностью более 8 кВт/кг при высокой частоте вращения. Особого внимания заслуживают полностью сверхпроводниковые машины, удельная мощность которых может быть выше 10 кВт/кг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **2011 Flightpath 2050** Europe's Vision for Aviation, European Commission (Publications Office of the European Union).
2. **Clean Sky 2.3rd Call for Proposals (CFP03):**List and Full Description of Topics. <http://cleansky.eu/sites/default/files/documents/Call%20Text%20Document%20-%20CFP03%20List%20and%20Full%20Description%20of%20Topics%20%2804.02%29%20Pre%20Publication.pdf>
3. **Государственная программа** «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы». [http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/GP\\_RAP\\_dop\\_chast\\_bez\\_prilozhenii.pdf](http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/GP_RAP_dop_chast_bez_prilozhenii.pdf)
4. **Брускин Д.Э., Зубакин С.И.** Самолеты с полностью электрифицированным оборудованием. Сер. Электрооборудование транспорта, т. 6. — М.: ВИНТИ, 1986, 108 с.
5. **Тулинова Е.Е., Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Ларионов А.Е.** Обзор разработок полностью электрических самолётов. — Электричество, 2016, №4, с. 15–25.
6. **Гарганеев А.Г., Харитонов С.А.** Техничко-экономические оценки создания самолета с полностью электрифицированным оборудованием. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Томск, 2009.
7. **Дунаевский А.И., Редькин А.В.** Перспективы применения гибридных и электрических силовых установок на самолётах

малой авиации. Концептуальные исследования гражданских воздушных судов/Сб. статей под ред. А.И. Дунаевского. – Труды ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского. М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского», 2015, вып. 2749.

8. **Power ful Ultralight Motor for Electrically Powered Flight.** <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/mobility-and-motors/electromobility-electrically-powered-flight.html>

9. **Lafontan R.** More electrical aircraft. Flying today to prepare tomorrow. More Electrical Aircraft conference (MEA2017), Bordeaux, France, 2017.

10. **Лёвин А.В., Алексеев И.И., Харитонов С.А., Ковалёв Л.К.** Электрический самолёт: от идеи до реализации. М.: Машиностроение, 2010.

11. **Gibson A. R., Hall D., Waters M., Schiltgen B., Foster T., Keith J., Masson P.** The potential and challenge of turboelectric propulsion for subsonic transport aircraft, 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, FL, AIAA 2010-276, 2010.

12. **Luongo C.A., Masson P.J., Nam T., Mavris D., Kim H.D., Brown G.V., Waters M., Hall D.** Next generation more-electric aircraft: a potential application for HTS superconductors. – IEEE Trans. Appl. Supercond., 19, 2009, 1055–1068.

13. **Brown G.V.** Weights and efficiencies of electric components of a turboelectric aircraft propulsion system, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, 2011, FL 225.

14. **Ковалев Л.К., Ларионов А.Е., Модестов К.А., Пенкин В.Т., Полтавец В.Н.** Перспективы применения криогенных электрических машин в авиации. – Электричество, 2015, № 1.

15. **Berg R.** Superconducting and cryogenic technology for aircraft propulsion systems. European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2015). France, Lyon, 2015.

16. **Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конеев С.М.-А., Пенкин В.Т., Полтавец В.Н., Ильясов Р.И., Дежин Д.С.** Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников/Под ред. Л.К. Ковалева, К.Л. Ковалева, С.М.-А. Конеева. М.: Физматлит, 2010, 396 с.

17. **Dezhin D.S., Kovalev K.L., Verzhbitskiy L.G., Kozub S.S., Firsov V.P.** Design and Testing of 200 kW Synchronous Motor with 2G HTS Field Coils IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032007.

18. **Kovalev K.L., Poltavets V.N., Pyasov R.I., Verzhbitskiy L.G., Kozub S.S.** 1 MVA HTS-2G Generator for Wind Turbines IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032018.

19. **Junetal Z.** The study and test for 1 MW high temperature superconducting motor, Proc. of the Applied Superconductivity Conference, paper 4LB-03, 2012.

20. **Kimet A. et al.** Performance analysis of a 10kW superconducting synchronous generator. – IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 25, No. 3, Article 5202004, June 2015.

21. **Сверхпроводники для электроэнергетики.** РИЦ «Курчатовский институт». Информационный бюллетень, т. 5, вып. 3, июнь 2008.

22. <http://www.energyland.info/analytic-show-9615>

23. **Min Zhang, Jie Sheng, Jay Patal, Weijia Yuan, Fred Eastham, Xing Dong, Frederick Berg.** Development of a 8 kW HTS

Axial Flux Machine for Electric Aircraft Propulsion. –EUCAS, 2017.

24. **Qu T., Li Y., Song P., Hao C., Wu Q., Zhu J.** Design study of a 10 kW-Class fully superconducting synchronous generator. –EUCAS, 2017.

25. **Kiruba S. Haran et al.** High power density superconducting rotating machines—development status and technology roadmap. – Superconductor Science and Technology, vol. 30, No. 12.

[28.06.2018]

*Авторы: Ковалев Константин Львович окончил в 1993 г. Московский инженерно-физический институт. В 2005 г. защитил докторскую диссертацию по сверхпроводниковым электрическим машинам. Заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института (МАИ).*

*Пенкин Владимир Тимофеевич окончил Московский авиационный институт в 1983 г. Кандидатскую диссертацию защитил в МАИ в 1991 г. Профессор кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.*

*Иванов Николай Сергеевич окончил МАИ в 2011 г. В 2014 г. защитил кандидатскую диссертацию. Старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.*

*Некрасова Юлия Юрьевна окончила МАИ в 2007 г. В 2009 г. защитила кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.*

*Ильясов Роман Ильдусович окончил МАИ в 2003 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Магнитный подвес на основе объёмных высокотемпературных сверхпроводников для высокоскоростного наземного транспорта». Доцент кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.*

*Дежин Дмитрий Сергеевич окончил в 2005 г. МАИ. В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию. Старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.*

*Журавлев Сергей Владимирович окончил МАИ в 2002 г. Кандидатскую диссертацию «Линейные синхронные двигатели с редкоземельными постоянными магнитами» защитил в 2005 г. Доцент кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.*

## Prospects for Using Superconducting Devices in a Fully Electrical Aircraft Equipped with a Hybrid Power Installation

**KOVALEV Konstantin L.** (Moscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russia) – Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

**PENKIN Vladimir T.** (MAI, Moscow, Russia) Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**IVANOV Nikolai S.** (MAI, Moscow, Russia) – Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

**NEKRASOVA Yuliya Yu.** (MAI, Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**IL'YASOV Roman I.** (MAI, Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**DEZHIN Dmitry S.** (MAI, Moscow, Russia) – Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

**ZHURAVLEV Sergei V.** (MAI, Moscow, Russia) Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The article discusses the prospects of using superconducting electrical machines and superconducting cables in a fully electrical aircraft (FEA), also as aircraft propulsion sources. It is shown that in comparison with conventional electrical machines, superconducting electrical machines have a number of advantages, which allow one to consider their application in the composition of on-board systems as a breakthrough technology in constructing FEAs. The article analyzes possible arrangements of electric power installations from the viewpoint of their overall mass and dimension indicators. It is shown that hybrid power installations are the most promising in terms of creating propulsion force. Possible structural diagrams of such installations are given, and the advantages and drawbacks are shown taking into account their use as part of a distributed power installation. The article gives a review of the latest developments in the field of high-temperature superconducting electrical machines, including fully superconducting ones, the specific (per unit mass) power capacity of which may be higher than 10 kW/kg.

**Key words:** fully electrical aircraft, electrical machines, high-temperature superconductors, distributed propulsion system, hybrid power installation

#### REFERENCES

1. **2011 Flightpath 2050** Europe's Vision for Aviation, European Commission (Publications Office of the European Union).
2. **Clean Sky 2.3rd Call for Proposals (CFP03): List and Full Description of Topics.** <http://cleansky.eu/sites/default/files/documents/Call%20Text%20Document%20-%20CFP03%20List%20and%20Full%20Description%20of%20Topics%20%2804.02%29%20Pre%20Publication.pdf>
3. **Gosudarstvennaya programma «Razvitiye aviatsionnoi promyshlennosti na 2013–2025 gody»** («State program Development of aviation industry for 2013–2025») [http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/GP\\_RAP\\_dop\\_chast\\_bez\\_prilozhenii.pdf](http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/GP_RAP_dop_chast_bez_prilozhenii.pdf)
4. **Bruskin D.E., Zubakin S.I. Samolety s polnost'yu elektrifitsirovannym oborudovaniyem. Ser. Elektrooborudovaniye transporta, t. 6.** (Aircraft with fully electrified equipment. Ser. Electric equipment of transport. T. 6). Moscow, All-Russian Institute of Scientific and Technical Information, 1986, 108 p.
5. **Tulinova Ye.Ye., Kovalev K.L., Ivanov N.S., Larionov A.Ye. Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)**, 2016, No. 4, pp. 15–25.
6. **Garganeyev A.G., Kharitonov S.A. Tekhnika-ekonomicheskiye otsenki sozdaniya samoleta s polnost'yu elektrifitsirovannym oborudovaniyem** (Technical and economic assessment of the creation of aircraft with fully electrified equipment). Reports of Tomsk State University of Control Systems and Electronics, 2009.
7. **Dunayevskii A.I., Red'kin A.V. Perspektivy primeneniya gibridnykh i elektricheskikh silovyykh ustanovok na samoletakh maloi oviatsii. Kontseptual'nye issledovaniya grazhdanskikh vozdushnykh sudov** (Prospects for the use of hybrid and electric power plants on small aircraft. Conceptual studies of civil aircraft). Proc. of the Central Aerogidrodinamicheskoye Institut (CAI) named N.Ye. Zhukovskii, iss. 2749. Moscow, CAI named N.Ye. Zhukovskii, 2015.
8. **Power full Ultralight Motor for Electrically Powered Flight.** <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/mobility-and-motors/electromobility-electrically-powered-flight.html>
9. **Lafontan R.** More electrical aircraft. Flying today to prepare tomorrow. More Electrical Aircraft conference (MEA2017), Bordeaux, France, 2017.
10. **Levin A.V., Alekseyev I.I., Kharitonov S.A., Kovalev K.L. Elektricheskii samdet: ot idei do realizatsii** (Electrical aircraft: from idea to realization). Moscow, Mashinostroeniye, 2010.
11. **Gibson A. R., Hall D., Waters M., Schiltgen B., Foster T., Keith J., Masson P.** The potential and challenge of turboelectric propulsion for subsonic transport aircraft, 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, FL, AIAA 2010-276, 2010.
12. **Luongo C.A., Masson P.J., Nam T., Mavris D., Kim H.D., Brown G.V., Waters M., Hall D.** Next generation more-electric aircraft: a potential application for HTS superconductors. – IEEE Trans. Appl. Supercond., 19, 2009, 1055–1068.
13. **Brown G.V.** Weights and efficiencies of electric components of a turboelectric aircraft propulsion system, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, 2011, FL 225.
14. **Kovalev L.K., Larionov A.Ye., Modestov R.A., Penkin V.I., Poltavets V.N. Elektrichestvo – in Russia. (Electricity)**, 2015, No. 1.
15. **Berg R.** Superconducting and cryogenic technology for aircraft propulsion systems. European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2015). France, Lyon, 2015.
16. **Kovalev L.K., Kovalev K.L., Koneyev S.M.-A., Penkin V.I., Poltavets V.N., Il'yasov R.I., Dezhin D.S. Elektricheskkiye mashiny i ustroystva na osnove massivnykh vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov** (Electric machines and out-of-date facilities based on massive high-temperature superconductors). Moscow, Fizmatlit, 2010, 396 p.
17. **Dezhin D.S., Kovalev K.L., Verzhbitskiy L.G., Kozub S.S., Firsov V.P.** Design and Testing of 200 kW Synchronous Motor with 2G HTS Field Coils IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032007.
18. **Kovalev K.L., Poltavets V.N., Ilyasov R.I., Verzhbitskiy L.G., Kozub S.S.** 1 MVA HTS-2G Generator for Wind Turbines IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032018.
19. **Junetal Z.** The study and test for 1 MW high temperature superconducting motor, Proc. of the Applied Superconductivity Conference, paper 4LB-03, 2012.
20. **Kimet A. et al.** Performance analysis of a 10kW superconducting synchronous generator. – IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 25, No. 3, Article 5202004, June 2015.
21. **Sverkhprovodniki dlya elektroenergetiki** (Superconductors for electric power industry). Russian Scientific Centre «Kurchatov Institute». Information bulletin, tom 5, iss. 3, June 2008.
22. <http://www.energyland.info/analitic-show-9615>
23. **Min Zhang, Jie Sheng, Jay Patal, Weijia Yuan, Fred Eastham, Xing Dong, Frederick Berg.** Development of a 8 kW HTS Axial Flux Machine for Electric Aircraft Propulsion. – EUCAS, 2017.
24. **Qu T., Li Y., Song P., Hao C., Wu Q., Zhu J.** Design study of a 10 kW-Class fully superconducting synchronous generator. – EUCAS, 2017.
25. **Kiruba S. Haran et al.** High power density superconducting rotating machines—development status and technology roadmap. – Superconductor Science and Technology, vol. 30, No. 12.