

Перспективы применения криогенных электрических машин в авиации

КОВАЛЕВ Л.К., ЛАРИОНОВ А.Е., МОДЕСТОВ К.А., ПЕНКИН В.Т., ПОЛТАВЕЦ В.Н.

Проанализированы возможности использования криогенных электрических машин в авиации. Выявлены такие основные направления, как источники питания мощных бортовых потребителей, электропривод винтов пассажирских и транспортных дозвуковых самолетов, криогенный электропривод малой и средней мощности. Показано, что переход от резистивных электромеханических преобразователей к машинам с нулевым сопротивлением обмоток позволяет существенно улучшить показатель удельной массы. Рассмотрены особенности привода мощных криогенных генераторов и виды компоновки. Проанализированы тенденции снижения шума авиадвигателей и концентрации вредных примесей в выхлопных газах и возможности достижения их улучшенных показателей за счет разрыва жесткой связи «турбина—вентилятор (или воздушный винт)» и перехода к схеме «турбина—генератор—электродвигатель—вентилятор». Показано, что для криогенного электропривода могут применяться машины как на основе обмоток с нулевым сопротивлением, так и на основе объемных керамических материалов или листовых композитов с высокой критической температурой перехода в резистивное состояние и использованием их гистерезисных или диамагнитных свойств. Выявлены рациональные области для применения не только машин мегаваттного, но и киловаттного уровня мощности.

Ключевые слова: криогенные электрические машины, материалы с нулевым электрическим сопротивлением, аэроэлектродвижение, электропривод

Исследования и разработки криогенных устройств различного назначения для электроэнергетики активно ведутся в ведущих научных центрах мира. Прогресс в создании материалов с нулевым электрическим сопротивлением стимулировал рост объема разработок нового электротехнического оборудования на основе иттриевых и висмутовых керамик для применения как в стационарных установках, так и на подвижных объектах [1–3].

Основные направления применения таких материалов в силовом энергетическом оборудовании отражены на рис. 1. Как видно, существенная доля в этом спектре приходится на электрические машины.

Известны разработки криогенных электродвигателей (КЭД) для электромобилей, привода гребных винтов морских судов, ветро- и гидрогенераторов, устройств перемешивания металла в металлургии, экструдеров для протяжки металлических труб [1, 4] и др. Наиболее известные проекты криогенных электрических машин (КЭМ) представлены в табл. 1 [4]. По сравнению с машинами традиционного исполнения они обладают следующими достоинствами: улучшенными массогабаритными параметрами (минимум в 2 раза); более высоким КПД; меньшим значением индуктивных параметров; меньшим уровнем шума; лучшей стабильностью при работе в электросетях. Применение обмоточных материалов с нулевым сопротивлением снижает материалоемкость изделий, способствует

повышению коммерческой нагрузки при использовании на транспортных установках.

Концепция развития аэрокосмической техники требует дальнейшего совершенствования существующего и создания принципиально нового электроэнергетического оборудования с улучшенными массогабаритными и энергетическими показателями. Повышение эффективности электрооборудования должно происходить с учетом возрастающих требований к энергосбережению, экологии и экономии материальных затрат. Решить указанные задачи возможно лишь при использовании новых материалов и технологий, а также интенсивных систем охлаждения.

Можно выделить три направления применения КЭМ в авиационно-космической технике.

Источники питания бортовых потребителей высокой мощности. По прогнозам развития авиационно-космической электроэнергетики мощность единичного генератора для автономной энергетической установки летательного аппарата (ЛА) может достигнуть $10\text{--}20\text{ МВА}$ при напряжении $20\text{--}50\text{ кВ}$. В зависимости от назначения такие генераторы работают в импульсном, повторно-кратковременном или длительном режимах [7, 8, 13].

Синхронные генераторы импульсного и повторно-кратковременного режима работы могут использоваться для питания следующих мощных бортовых потребителей: авиационных комплексов дальнего радиолокационного обнаружения (АК ДРЛО); загоризонтных радиолокационных стан-

Таблица 1

Фирма	Страна	Год завершения	Тип изделия	Мощность, МВА	Частота вращения, мин ⁻¹	Масса, т	КПД, %	ВТСП материал
AMSC	США	2001	Электромотор	3,8	1800	6,8		BSCCO провод
Московский авиационный институт (МАИ)	РФ	2002	Электропривод топливной помпы КРИОПЛАНА	0,0015	12000			Листовой BSCCO
МАИ	РФ	2002	Электромотор	0,1	3000			Объемные YBCO
МАИ	РФ	2006	Привод помпы	0,06	6000			Объемные YBCO
OSWALD+МАИ	ФРГ+РФ	2002	Электромотор	0,5	3000			Объемные YBCO
SIEMENS	ФРГ	2002	Генератор	0,4	1500		96,8	BSCCO провод
AMSC	США	2003	Судовой электродвигатель	5	230			BSCCO провод
SIEMENS	ФРГ	2005	Генератор	4	3600	7	98,7	BSCCO провод
KERI/DOOSAN	Корея	2007	Электромотор	0,08				BSCCO провод
SUMITOMO	Япония	2007	Судовой электродвигатель	0,365	250	4,4		BSCCO провод
AMSC	США	2007	Судовой электродвигатель	36,5	120			BSCCO провод
SIEMENS	ФРГ	2008	Судовой электродвигатель	4	120	<75		BSCCO провод
KERI/DOOSAN	Корея	2011	Электродвигатель	5				BSCCO провод
Converteam/ Zenergy/ EON	ФРГ	2009	Гидрогенератор	1,25	214		>98	BSCCO провод
Converteam/ Zenergy	ФРГ	2010	Ветрогенератор	8	12			BSCCO провод
DTU/ Vestas	Дания	2010	Ветрогенератор					BSCCO провод
AMSC/ TECO Westinghouse	США	2012	Ветрогенератор	10	11	120		BSCCO провод
МАИ	РФ	2015	Двигатель для транспорта	0,2	1500		>98	YBCO провод
МАИ	РФ	2015	Ветрогенератор	1	600		96	YBCO провод

Таблица 1

Фирма	Страна	Год завершения	Тип изделия	Мощность, МВА	Частота вращения, мин-1	Масса, т	КПД, %	ВТСП материал
AMSC	США	2001	Электромотор	3,8	1800	6,8	—	BSCCO провод
Московский авиационный институт (МАИ)	РФ	2002	Электропривод топливной помпы КРИОПЛАНА	0,0015	12000	—	—	Листовой BSCCO
МАИ	РФ	2002	Электромотор	0,1	3000	—	—	Объемные YBCO
МАИ	РФ	2006	Привод помпы	0,06	6000	—	—	Объемные YBCO
OSWALD+МАИ	ФРГ+РФ	2002	Электромотор	0,5	3000	—	—	Объемные YBCO
SIEMENS	ФРГ	2002	Генератор	0,4	1500	—	96,8	BSCCO провод
AMSC	США	2003	Судовой электродвигатель	5	230	—	—	BSCCO провод
SIEMENS	ФРГ	2005	Генератор	4	3600	7	98,7	BSCCO провод
KERI/DOOSAN	Корея	2007	Электромотор	0,08	—	—	—	BSCCO провод
SUMITOMO	Япония	2007	Судовой электродвигатель	0,365	250	4,4	—	BSCCO провод
AMSC	США	2007	Судовой электродвигатель	36,5	120	—	—	BSCCO провод
SIEMENS	ФРГ	2008	Судовой электродвигатель	4	120	<75	—	BSCCO провод
KERI/DOOSAN	Корея	2011	Электродвигатель	5	—	—	—	BSCCO провод
Converteam/ Zenergy/ EON	ФРГ	2009	Гидрогенератор	1,25	214	—	>98	BSCCO провод
Converteam/ Zenergy	ФРГ	2010	Ветрогенератор	8	12	—	—	BSCCO провод
DTU/ Vestas	Дания	2010	Ветрогенератор	—	—	—	—	BSCCO провод
AMSC/ TECO Westinghouse	США	2012	Ветрогенератор	10	11	120	—	BSCCO провод
МАИ	РФ	2015	Двигатель для транспорта	0,2	1500	—	>98	YBCO провод
МАИ	РФ	2015	Ветрогенератор	1	600	—	96	YBCO провод

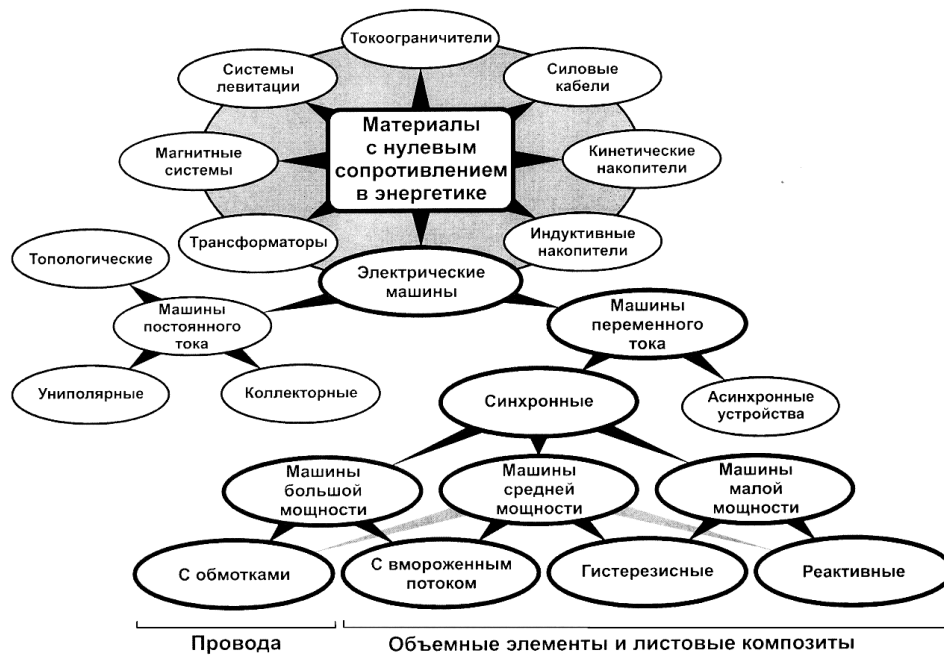


Рис. 1

ций; лазерных систем различного назначения; систем электромагнитного разгона массы; систем радиопротиводействия; СВЧ оружия нелетального поражения.

В частности, в настоящее время для АК ДРЛО требуемое электроснабжение обеспечивается авиационными синхронными генераторами с повышенной мощностью 150–250 кВА, число которых может быть более восьми. Система, обеспечивающая параллельную работу стольких синхронных машин, весьма громоздка, поэтому преимущество одного источника эквивалентной мощности достаточно очевидно. Результаты исследований [6] показали, что из рассмотренного ряда синхронных генераторов с возбуждением от редкоземельных магнитов и других электромеханических преобразователей энергии наиболее перспективными в мегаваттном диапазоне мощности являются высокооборотные криогенные синхронные генераторы (КСГ). Повышение их удельной мощности и энергетических параметров (коэффициента мощности, КПД) может быть достигнуто за счет использования криопроводниковых обмоток и обмоток с нулевым сопротивлением, рациональной конструкции беззубцового статора, а также отсутствия ферромагнитопровода ротора.

Синхронные КЭМ стали разрабатываться изначально как генераторы двух классов [14]: машины с криогенным индуктором и резистивным якорем; полностью криогенные машины.

Недостаток первого проекта – необходимость термоизоляции криогенного индуктора от «тёплого» якоря за счет использования сложной системы криостатирования, что приводит к увеличению не-

магнитного зазора между обмотками ротора и статора.

У генераторов второго класса жидким криоагентом охлаждается агрегат. В такой конструкции появляются дополнительные требования к проводнику с нулевым сопротивлением для обмотки якоря, так как потери на переменном токе промышленной частоты и выше весьма существенны, что ограничивает мощность машины значением 100 кВА [14–16].

Наиболее мощные КСГ с охлаждением жидким гелием при температуре около 5 К на основе проводов из Nb-Ti и Nb₃Sn были созданы именно по схеме с резистивным якорем. Охлаждаемый гелием криогенный ротор для генератора мощностью 5 МВА был разработан в начале 1971 г. фирмой Westinghouse по заказу ВВС США и успешно испытан при частоте вращения 12000 мин⁻¹. В 1976 г. в США был создан авиационный генератор мощностью 20 МВА с частотой вращения 5520–6000 мин⁻¹ (General Electric) [5–8]. Генератор работал на трёхфазный выпрямитель при выходном напряжении постоянного тока 40 кВ.

Дальнейшие исследования как в России, так и за рубежом проведены с применением материалов, имеющих критическую температуру перехода выше 30 К.

Для генераторов с криогенным индуктором и «теплым» якорем прогнозные значения удельной массы составляют 0,1–0,15 кг/кВА, а с криогенными обмотками ротора и статора – менее 0,02 кг/кВА. На рис. 2 показаны характерные зоны зависимостей удельной массы генераторов от мощности для синхронных машин промышленного и авиационного

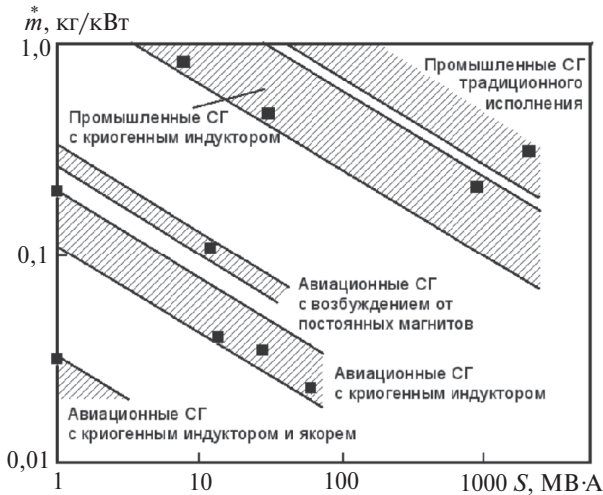


Рис. 2

назначения [9] и отмечены данные по известным генераторам, взятые из [5, 6, 12]. Заштрихованные теоретические области выделены на основании расчетов по соотношению, связывающему удельную массу m^* и мощность генератора S [9]:

$$m^* \gg \langle \gamma \rangle k / [(C n p j_a j_f)^{3/5} / S^{2/5}],$$

где $\langle \gamma \rangle$ – среднее значение плотности конструкционных материалов; k – коэффициент пропорциональности; $C \gg 6 \cdot 10^{-9}$ м/Гн – постоянная Арнольда машины, включающая обмоточные и другие расчетные коэффициенты; n, p – частота вращения ротора и число пар полюсов; j_a, j_f – значения плотности тока в обмотках возбуждения и якоря. Среднее значение плотности конструкционных материалов, определяемое как отношение массы генератора к его объему, составляет величину $\langle \gamma \rangle = 2200 \text{--} 2700 \text{ кг/м}^3$ для авиационных синхронных генераторов (при этом $k = 30 \text{--} 70$) и $\langle \gamma \rangle \gg 7000 \text{ кг/м}^3$ ($k = 300$) для промышленных генераторов [9].

Плотности тока обмоток возбуждения и якоря имеют характерные значения:

$j_f = 100 \text{--} 200 \text{ А/мм}^2$ для проводов из ниобий-титана или станида ниобия при охлаждении жидким гелием и для проводов с критической температурой перехода выше 94 К с жидководородным охлаждением;

$j_a = 20 \text{ А/мм}^2$ при масляном охлаждении и 100 А/мм^2 при охлаждении жидким водородом.

Из рис. 2 следует, что переход к обмоткам с нулевым сопротивлением при криогенном охлаждении позволяет существенно увеличить удельную мощность генератора.

В качестве привода КСГ большой мощности можно рассматривать модернизированные турбореактивные двухконтурные двигатели (ТРДД). Так, в США для промышленной газотурбинной установ-

ки LM 6000 был использован ТРДД CFG-80С2 со снятым вентилятором. Мощность установки составляет 42300 кВт при КПД 41,5%. Отечественный авиадвигатель НК-91 специально разработан для привода генератора мощностью 20 МВт.

Расход топлива и удельная масса авиационных ТРДД в диапазоне 1–40 МВт изменяются слабо и составляют соответственно $G_m = 0,24 \text{--} 0,27 \text{ кг/кВтч}$ и $m^* = 0,11 \text{--} 0,17 \text{ кг/кВт}$. Мощность ТРДД сильно зависит от параметров атмосферы и на высоте 10 км уменьшается практически в 2 раза. Частота вращения свободной турбины уменьшается с увеличением мощности от 20000 мин^{-1} при 1,5 МВт до 3600 мин^{-1} при 40 МВт.

Характерные зависимости массы КСГ мощностью 20 МВА и относительного индуктивного синхронного сопротивления от числа пар полюсов при различной частоте вращения ротора приведены на рис. 3 [9]. Анализ кривых показывает, что перспективными являются высокооборотные четырех- или шестиполюсные генераторы. Двухполюсные машины создают сильное магнитное поле, для защиты от которого внешнего пространства необходим массивный стальной электромагнитный или диамагнитный экран статора, а при числе пар полюсов $p \geq 4$ из-за отсутствия магнитопровода ротора слишком велико межполюсное рассеяние магнитного поля возбуждения. Относительное значение индуктивного сопротивления КСГ лежит в пределах $0,3 \text{--} 0,6$, т.е. в 2–3 раза меньше, чем в синхронных генераторах традиционного исполнения. Поэтому КСГ имеет более жесткую внешнюю характеристику, что снижает требования к системе стабилизации выходного напряжения при изменении параметров нагрузки.

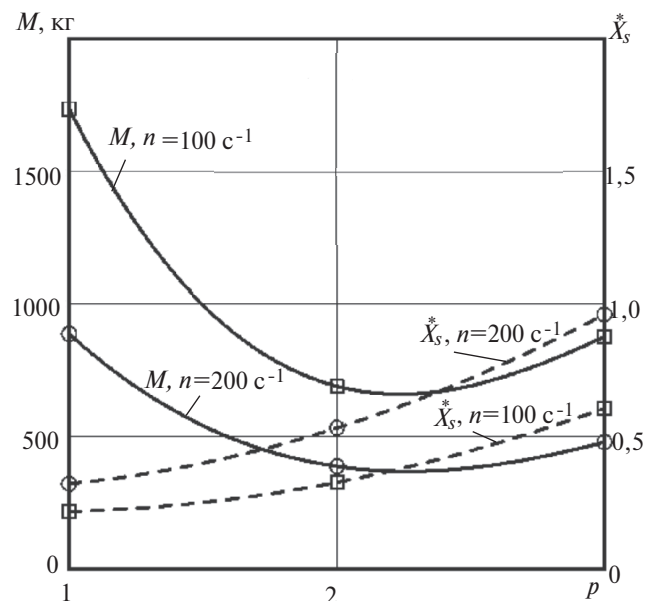


Рис. 3

Максимально допустимая из соображений прочности линейная скорость на поверхности ротора не должна превышать $n = 120$ м/с. Значение конструктивного коэффициента якоря $l_a = 1$ ограничено жёсткостью ротора, имеющего, как правило, многооболочную конструкцию системы криостатирования. Изменение предельной мощности

$P_{пр}$ и удельной массы m^* генератора от частоты вращения ротора n при различном значении числа пар полюсов представлено на рис. 4 [9]. Зависимости построены при конструктивном коэффициенте якоря $l_a = 1$ и значении относительного индуктивного синхронного сопротивления $X_s^* = 0,5$ [9]. Реализуемый диапазон мощности энергоустановки с КСГ ограничен кривой предельной мощности ($P_{пред}$) газотурбинной установки (ГТУ) привода. Из рис. 4 следует, что при мощности 20 МВт КСГ должен иметь $p = 2$ и частоту вращения ротора $n \approx 6000$ – 9000 мин⁻¹.

Прогнозируемые значения удельной массы перспективных приводов для КСГ, построенные путем обобщения опытных данных по отечественным (кривая 1) и зарубежным (кривая 2) авиационным двигательным газотурбинным установкам (ГТУ) [9], показаны на рис. 5. Здесь же приведена обобщенная зависимость частоты вращения свободной турбины привода от мощности. Как следует из приведенных зависимостей, ожидаемые «сухие» значения удельной массы перспективных приводов для КСГ мощностью 20 МВт находятся на уровне 0,1–0,15 кг/кВт для варианта, встроенного в маршевый двигатель ЛА, и 0,05–0,1 кг/кВт для полностью автономной энергоустановки со специальным газотурбинным приводом.

Компоновка электроэнергетической установки с КСГ может быть реализована в двух основных ва-

риантах: в подвесной гондоле атмосферного ЛА с приводом от независимой газотурбинной установки; в фюзеляже или в бортовом отсеке ЛА. Компоновочная схема КСГ с двигательной установкой ЛА может иметь большие размеры и негативно повлиять на характеристики авиадвигателя, поэтому первый вариант наиболее предпочтителен.

В общем случае в состав установки входит привод на базе ТРДД; муфта сцепления; редуктор; генератор; блок электрических преобразователей; система криогенного обеспечения (замкнутого или расходного цикла работы).

Перспективные схемы ЛА с электросиловой двигательной установкой (ЭСДУ). Электропривод винтов в авиации используется главным образом на беспилотных ЛА, бортовым источником энергии которых является аккумуляторная батарея или панели фотоэлементов. Вместе с тем, при устойчивом развитии авиационной техники, ожидаемом удвоении пассажиропотока к 2020 г. и ежегодном увеличении грузовых авиаперевозок актуален вопрос о минимальном нанесении вреда окружающей среде и повышении экономии топлива ЛА. Целевые характеристики, разработанные НАСА для перспективных пассажирских лайнеров, приведены в табл. 2 [13].

Таблица 2

Параметр	Лайнер/двигатель	
	B737/CFM56 (~2015 г.)	B777/GE90 (~2020 г.)
Шум	-32 дВ	-42 дВ
Выброс оксидов NOx	-50 %	-75 %
Расход авиатоплива	-33 %	-40 %
Длина взлётно-посадочной полосы	-33 %	-50 %

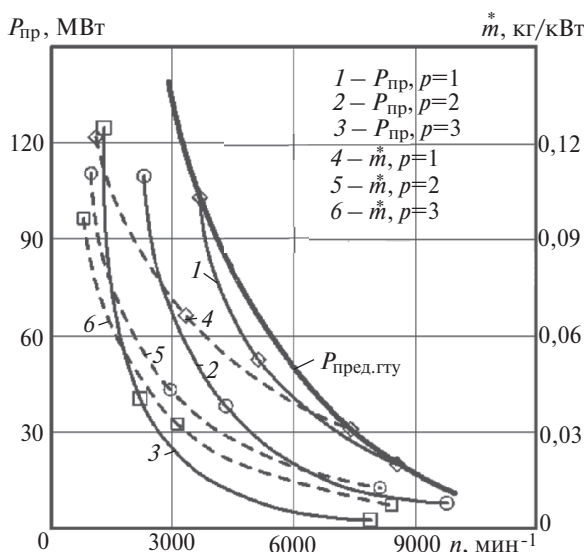


Рис. 4

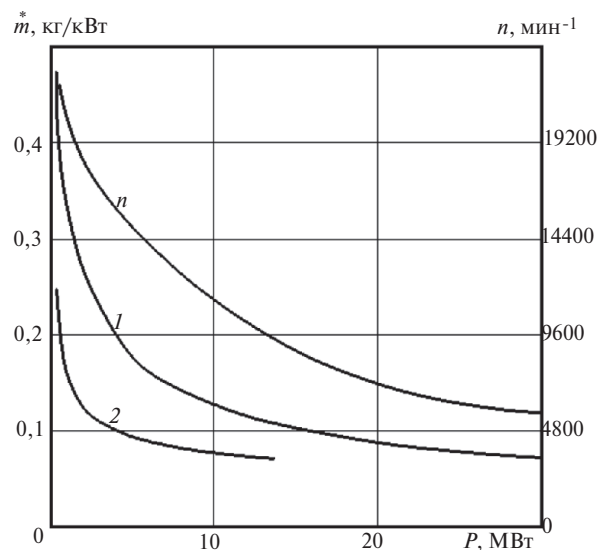


Рис. 5

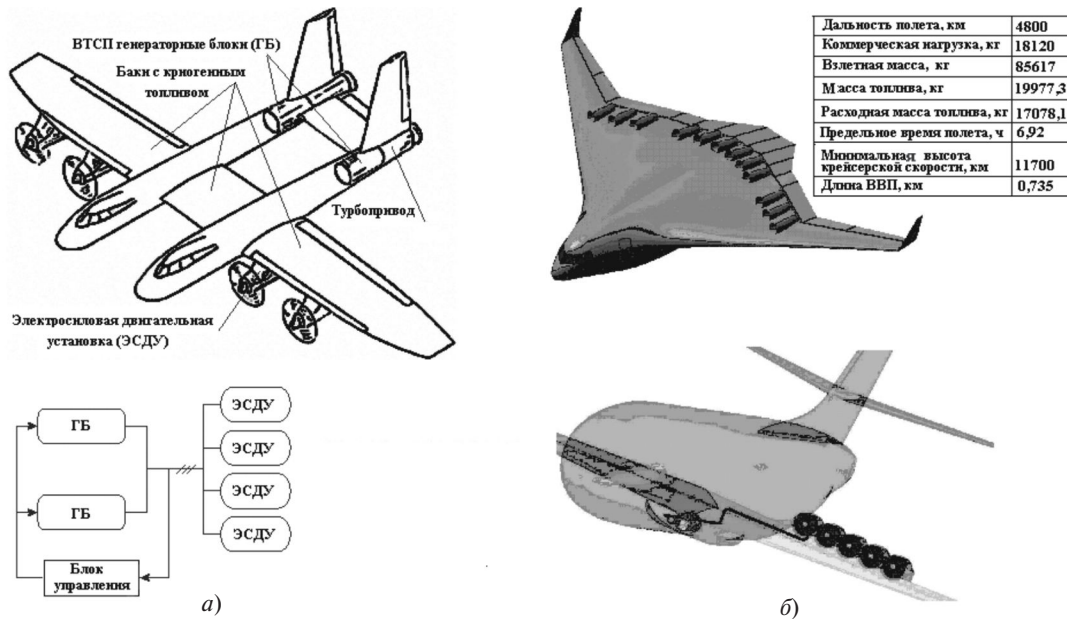


Рис. 6

Перспективной признана технология турбоэлектрического аэродвижения с применением КСГ и КЭД для привода малошумящих тяговых винтов (рис. 6), выдвинутая в МАИ [9] в 1993 г. (рис. 6,а) и интенсивно разрабатываемая в США в настоящее время [13] (рис. 6,б).

Применение схемы «турбина—электрогенератор—электродвигатель—двигатель» вместо традиционной «двигатель—редуктор—двигатель» обеспечивает пониженные выбросы оксида азота, увеличение доступного пространства и гибкость компоновки, а также уменьшение шума и вибраций.

Схема с электроприводом вентилятора может быть реализована, если удельные показатели электродвигателя и источника питания сопоставимы или лучше, чем у турбины. Криогенные машины с резистивным якорем имеют удельные массовые показатели, сравнимые с газотурбинными авиадвигателями, что на порядок лучше по сравнению с авиационными генераторами и общепромышленными электродвигателями. В случае применения обмоток ротора и статора с нулевым сопротивлением ожидается появление КЭМ в три раза более легких.

Возможные схемы криостатирования мощных бортовых КЭМ. Поскольку КЭМ работают при низких температурах, система охлаждения является неотъемлемой частью архитектуры ЛА. Конфигурация и возможности КЭМ зависят от системы охлаждения и главным образом от имеющейся на борту криогенной мощности для отвода тепла. Один из вариантов — применение криокулеров — активных источников холода, работающих по замкнутому циклу криоагента. Они надёжны, но довольно тяжелы для применения в авиации. Самые лёгкие из них имеют удельную массу блока холодной головки

3 кг/кВт. Компрессоры и другое вспомогательное оборудование увеличивают этот показатель в 5 раз. Их эффективность составляет 10–15% цикла Карно, что соответствует 70 Вт/Вт при 30 К [13].

Другая возможность — запас криоагента на борту ЛА на время всего полёта, включая минимальный остаточный запас для исключения размораживания бортовых сосудов Дьюара, пополняемых после каждой посадки. При разомкнутом цикле охлаждения криоагент может храниться в легких дьюарах емкостью 200–220 л. Этого количества достаточно для поддержания в захлажденном состоянии генератора мощностью 20 МВА в течение 5–6 ч — расчетной продолжительности полета атмосферного ЛА. Испаряемость криоагента в современных дьюарах не превышает нескольких процентов в сутки, а масса системы его хранения на борту составит менее 45,4 кг [9]. Если в качестве криоагента применяется жидкий водород, его также можно использовать как топливо после охлаждения КЭМ в соотношении 95% керосина и 5% H₂.

Жидкий водород как топливо является наилучшим для агрегатирования КСГ с газовой турбиной (например, авиадвигатель НК-88) [9]. При этом КСГ с нулевым сопротивлением обмоток ротора и статора может иметь обмотку якоря из провода с относительно невысокими требованиями к потерям на переменном токе, которые отводятся за счёт испарения жидкого водорода с его последующим сжиганием в турбине. Экологический аспект здесь характеризуется так называемым «нулевым выбросом», поскольку продукт сгорания — чистая вода. Проблемой является компактное хранение водорода на борту из-за малой плотности жидкости 70 кг/м³.

Криогенный электропривод на базе КЭМ малой и средней мощности. Рассмотренные выше КЭМ относятся к мегаваттному классу по мощности и ориентированы на применение обмоток на роторе и статоре. Вместе с тем успехи в разработке объемных керамик с высокой критической температурой перехода и композитов на их основе открывают возможности для применения КЭМ малой и средней мощности в системах электропривода, в частности для криогенных топливных помп [17], что является абсолютно новым направлением. С появлением таких материалов возникла задача их возможного применения в электромеханике, которую пытаются решить в России и за рубежом. Все предыдущие разработки касались мощных электрических машин с криогенными обмотками постоянного тока. Инициатива создания КЭМ на основе объемных иттриевых керамик ($YBa_2Cu_3O_x$, $T_k = 92-94$ К), а затем на основе листовых композитов из висмутовой керамики ($Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$, $T_k = 108$ К) принадлежит коллективу ученых МАИ под руководством проф. Л.К. Ковалева и восходит к 1988 г. Использование керамических материалов с нулевым электрическим сопротивлением и критической температурой выше 92–94 К в электромеханических преобразователях связано со следующими физическими свойствами: гистерезисные потери при перемагничивании; диамагнетизм (эффект Мейсснера–Оксенфельда); способность захватывать магнитный поток при охлаждении в магнитном поле ниже критической температуры, позволяющая формировать криомагниты, аналогичные постоянным магнитам, с индукцией $3\text{ё}12$ Тл.

Использование каждого свойства предполагает применение в качестве криоагента жидкого азота ($T_{\text{кип}} = 77$ К) или более высококипящих криогенных жидкостей в погружных конструкциях КЭМ. Первоначально применение объемных керамических материалов в электромеханике привело к разработке класса гистерезисных машин с криопроводниковой резистивной многофазной обмоткой статора и керамическим ротором [10]. Обладая рядом достоинств, таких как отсутствие одностороннего тяжения ротора, независимость постоянного момента вращения на валу от нагрузки, этот класс двигателей характеризуется низким значением коэффициента мощности. Проблема была решена с разработкой реактивных электродвигателей с композитным ротором [10]. Благодаря чередующимся стальным и керамическим пластинам такой ротор имеет ферромагнитные свойства в одном направлении и диамагнитные в ортогональном.

Дальнейшие исследования с целью увеличения удельной мощности электродвигателей привели к разработке машин с постоянными магнитами и керамическими элементами на роторе [10]. Работы

МАИ обусловили интерес к указанным классам электрических машин с объемными ВТСП элементами в ведущих зарубежных исследовательских центрах.

В отличие от мощных машин [6] бортовые электрические машины малой и средней мощности имеют некоторые особенности, устранить которые можно, применив криогенное охлаждение. Эти особенности следующие:

а) увеличенное активное сопротивление обмоток и как следствие увеличенное отношение активных сопротивлений и индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток к индуктивному сопротивлению взаимной индукции. Это не позволяет пренебрегать активными сопротивлениями обмоток статора, особенно в машинах переменного тока, как это часто делается при теоретических исследованиях и расчетах крупных машин.

КЭМ с охлаждением статорной резистивной обмотки и керамическим ротором гистерезисного или реактивного типа лишены этого недостатка, поскольку при температуре жидкого азота 77 К сопротивление меди уменьшается в несколько раз, а в жидком водороде в 500 раз, и при электромагнитном расчете им можно пренебречь;

б) машины малой мощности выполняются, как правило, ненасыщенными в магнитном отношении с целью уменьшения МДС и, соответственно, электрических потерь, чтобы не использовать системы интенсивного охлаждения, либо стремления получить большую линейность выходных характеристик.

Криогенное охлаждение статора с резистивной обмоткой позволяет существенно улучшить массогабаритные параметры машин при мощности до 2 кВт (в 5–6 раз для гистерезисных и в 10–12 раз для реактивных машин и электродвигателей с постоянными магнитами и керамическими элементами ротора при азотном охлаждении);

в) с уменьшением габаритов и номинальной мощности электрических машин, как правило, ухудшаются их энергетические показатели. КПД находится в диапазоне 0,2–0,4, а коэффициент мощности машин переменного тока $\cos j < 0,7$; КЭД реактивного типа и машины с постоянными магнитами и керамическими элементами ротора имеют эти показатели, близкие к единице.

Выводы. 1. Анализ перспектив использования КЭМ на борту ЛА показал, что основное направление применения КСГ мегаваттного класса в импульсном или повторно-кратковременном режимах работы – источники питания мощных потребителей.

2. На основе анализа массогабаритных характеристик бортовых КЭМ и авиационных быстроходных газотурбинных установок со свободной турби-

ной определены рациональные значения чисел пар полюсов генератора $p = 2 \div 3$ и частоты вращения $n = 6000 \div 9000$ мин⁻¹. При кратковременных режимах работы на больших высотах (более 20 км) в качестве привода могут использоваться турбины, работающие на продуктах сгорания высококипящих криогенных компонентов ракетного топлива.

3. Анализ удельных характеристик современных ГТД и перспективных КЭМ показал, что на их базе могут быть созданы энергоустановки мощностью 10 ÷ 20 МВА с удельной «сухой» массой примерно 0,126 кг/кВт.

4. КЭМ мегаваттного уровня мощности в качестве генераторов и двигателей длительного режима работы целесообразны для применения в системах аэроэлектродвижения.

5. Обоснована перспектива нового направления бортового применения КЭМ мощностью в диапазоне 1 ÷ 30 кВт для криогенного электропривода на основе машин с объемными и листовыми керамическими элементами ротора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сверхпроводники** для электроэнергетики. — Информационный бюллетень. <http://perst.issph.kiae.ru/supercond>
2. **Gubser D.U.** US Navy's Superconductivity Programs. Scientific Curiosity to Fleet Utility. — IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum (ESNF), October 2010, No. 14, pp. 1–6.
3. **Wolsky A.** HTS Rotating Machines—Challenges and Perspective Applications. — International Energy Agency, USA, 15 December, 2006, 243 p.
4. **Prusseit W.** Supraleiterindustrie in Deutschland - status und perspektiven. — Seminar «Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatur-Supraleitern», 20–21 February 2008, Wasserwerk, Bonn (Deutschland).
5. **Дмитриев В.С., Смольская Н.К.** Сверхпроводниковые генераторы с высокой удельной мощностью за рубежом. — М.: Информэлектро, 1982, 26 с.
6. **Специальные** электрические машины, в 2-х кн./Под ред. Б.Л. Алиевского. — М.: Энергоатомиздат, 1993, 368 с.
7. **Oberly C.E.** Air Force Application of Lightweight Superconducting Machinery. — IEEE Transaction on Magnetics, 1977, vol. 13, No. 2, pp. 260–268.
8. **Oberly C.E., Kozlowski G., Fingers R.T.** Implications of high temperature superconductors for power generator. — Advances in Cryogenic Engineering (Materials), 38A, 479, 1992, p. 72.
9. **Пенкин В.Т.** Разработка синхронных электрических машин с композитными и объемными сверхпроводниками в роторе: Автореф. докт. дис. — М.: Московский авиационный институт, 2012, 31 с.
10. **Ковалев Л.К., Пенкин В.Т., Ковалев К.Л., Конеев С.М.-А., Полтавец В.Н., Ильясов Р.И., Дежин Д.С.** Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. — М.: Изд-во Физматлит, 2010, 396 с.
11. **Сверхпроводниковые** электрические машины и магнитные системы / Под ред. Б.Л. Алиевского. — М.: Московский авиационный институт, 1993, 340 с.

12. **Barnes P.N., Sumption M.D., Rhoads G.L.** Review of high power density superconducting generators: Present state and prospects for incorporating YBCO windings. — Cryogenics 45 (2005), pp. 670–686.

13. **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 Transactions on Applied Superconductivity, 2009, vol. 19, No. 3, pp. 1055–1068.

14. **Чубраева Л.И.** Генераторы нетрадиционного исполнения. — Л.: Наука, 1991, 246 с.

15. **Brunet T., Tixador P., Nithart H.** Cryogenic conception for full superconducting generators: realization of superconducting armature and cryostat. — Cryogenics, 1988, vol. 28, pp. 751–755.

16. **Muta I., Tsukaji H., Tsutsui Y. et al.** Fully superconducting AC generator with brushless excitation system. — Int. Conf. on Magnetic Technology (MT-11), Tsukuba (Japan), 1989, Report ND-05, 6 p.

17. **Kovalev L.K., Ilushin K.V., Penkin V.T., Kovalev K.L., Poltavets V.N., Koneyev S. M.-A., Larionoff A.E., Larionoff S.A., Modestov K.A., Akimov I.I., Logviniouk V.P., Verzhbitsky L.G., Trifonov Ye.Ye., Dew-Hughes D.** The Pump for Liquid Cryogen with HTS Electrical Drive. — Proc. of EUCAS'03, pp. 887–890, Sorrento (Italy), 14–18 Sept. 2003.

[10.07.14]

Авторы: Ковалев Лев Кузьмич окончил факультет «Энергомашиностроение» Московского высшего технического училища им. Н.Э. Баумана в 1964 г. и механико-математический факультет Московского государственного университета в 1968 г. В 1996 г. защитил докторскую диссертацию по авиационно-космической электроэнергетике в Московском авиационном институте (МАИ). Скончался в 2014 г.

Ларионов Анатолий Евгеньевич окончил в 1974 г. факультет «Системы управления летательных аппаратов» МАИ. В 1995 г. защитил кандидатскую диссертацию по сверхпроводящим магнитным системам. Старший научный сотрудник, доцент кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Модестов Кирилл Андреевич окончил в 1998 г. факультет «Системы управления летательных аппаратов» МАИ. Защитил в 2005 г. в МАИ кандидатскую диссертацию по сверхпроводниковым электрическим машинам. Старший научный сотрудник, доцент кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Пенкин Владимир Тимофеевич окончил в 1983 г. факультет «Системы управления летательных аппаратов» МАИ. В 2012 г. защитил докторскую диссертацию по сверхпроводниковым электрическим машинам. Профессор кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Полтавец Владимир Николаевич окончил в 1966 г. факультет «Двигатели летательных аппаратов» МАИ. Защитил в 1979 г. в МАИ кандидатскую диссертацию. Ведущий научный сотрудник МАИ.

Prospects for Using Cryogenic Electrical Machines in Aircraft Engineering

L.K. KOVALEV, A.E. LARIONOV, K.A. MODESTOV, V.T. PENKIN and V.N. POLTAVETS

The possibilities of using cryogenic electrical machines in aircraft engineering are analyzed. Main application lines, such as sources of power supply to large on-board loads, electric drives for the propellers of passenger and transport subsonic aircrafts, and small- and medium-capacity cryogenic electric drives, are revealed. It is shown that a shift from resistive electromechanical converters to machines with zero resistance of the windings makes it possible to achieve an essentially better value of the specific mass indicator. The specific features of drives for large-capacity cryogenic generators and the kinds of their layout are considered. The trends in decreasing noise from aircraft engines and the concentration of harmful impurities in exhaust gases, and the possibilities of improving their indicators by breaking the rigid «turbine-fan (or propeller)» link and making a shift to the «turbine-generator-electric motor-fan» system are analyzed. It is shown that a cryogenic electric drive can be constructed using machines made on the basis of either windings with zero resistance or windings made of bulk ceramic materials or sheet composites with a high critical temperature of transition in resistive state and with the use of their hysteresis or diamagnetic properties. Rational application fields for machines not only of the megawatt, but also of the kilowatt power capacity levels are revealed.

Key words: cryogenic electrical machines, materials with zero resistance, aereoelectrical propulsion, electric drive

REFERENCES

1. **Super** conductors: <http://perst.issph.kiae.ru/supercond>
2. **Gubser D.U.** US Navy's Superconductivity Programs. Scientific Curiosity to Fleet Utility. — IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum (ESNF), October 2010, No. 14, pp. 1–6.
3. **Wolsky A.** HTS Rotating Machines—Challenges and Perspective Applications. — International Energy Agency, USA, 15 December, 2006, 243 p.
4. **Prusseit W.** Supraleiterindustrie in Deutschland - status und perspektiven. — Seminar «Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatur-Supraleitern», 20–21 February 2008, Wasserwerk, Bonn (Deutschland).
5. **Dmitriyev V.S., Smol'skaya N.K.** *Sverkhprovodnikovye generatory s vysokoi udel'noi moshchnost'yu za rubezhom* (Superconducting Generators with Higher Specific Power Abroad). Moscow, Publ. «Informelektro», 1982, 26 p.
6. **Spetsial'nye elektricheskkiye mashiny. V dvukh kn./Pod red. B.L. Aliyevskogo** (Special Electrical Machines. Two books/Edit by B.L. Aliyevskii). Moscow, Publ. «Energoatomizdat», 1993.
7. **Oberly C.E.** Air Force Application of Lightweight Superconducting Machinery. — IEEE Transaction on Magnetics, 1977, vol. 13, No. 2, pp. 260–268.
8. **Oberly C.E., Kozlowski G., Fingers R.T.** Implications of high temperature superconductors for power generator. — Advances in Cryogenic Engineering (Materials), 38A – 479, 1992, p. 72.
9. **Penkin V.T.** *Razrabotka sinkhronnykh elektricheskikh mashin s kompozitnymi i ob'yemnymi sverkhprovodnikami v rotore. Avtoref. Dokt. Dis.* (Development of synchronous electrical machines with composite and bulk superconductors in the rotor. Abstract of Doctoral dissertation in technical sciences). Moscow, Publ. of Moscow Aviation Institute, 2012, 31 p.
10. **Kovalev L.K., Penkin V.I., Kovalev K.L. Koneyev S.M.-A., Poltavets V.N., Il'yasov R.I. Dezhin D.S.** *Elektricheskkiye mashiny i ustroystva na osnove massivnykh vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov* (Electrical Machines and Devices on Basis of Massive High-temperature Superconductors). Moscow, Publ. «Fizmatlit», 2010, 396 p.
11. **Sverkhprovodnikovye elektricheskkiye mashiny i magnitnye sistemy/Pod red. B.L. Aliyevskogo** (Superconducting Electrical Machines and Magnetic Systems/Edit by B.L. Aliyevskii. Moscow, Publ. of Moscow Aviation Institute, 1993, 340 p.
12. **Barnes P.N., Sumption M.D., Rhoads G.L.** Review of high power density superconducting generators: Present state and prospects for incorporating YBCO windings. — Cryogenics 45 (2005), pp. 670–686.
13. **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 Transactions on Applied Superconductivity, 2009, vol. 19, No. 3, pp. 1055–1068.
14. **Chubrayeva L.I.** *Generatory netraditsionnogo ispolneniya* (Generators Unconventional Performance). Leningrad, Publ. «Nauka», 1991, 246 p.
15. **Brunet T., Tixador P., Nithart H.** Cryogenic conception for full superconducting generators: realization of superconducting armature and cryostat. — Cryogenics, 1988, vol. 28, pp. 751–755.
16. **Muta I., Tsukuji H., Tsutsui Y. et al.** Fully superconducting AC generator with brushless excitation system. — Int. Conf. on Magnetic Technology (MT-11), Tsukuba (Japan), 1989, Report ND-05, 6 p.
17. **Kovalev L.K., Ilushin K.V., Penkin V.T., Kovalev K.L., Poltavets V.N., Koneyev S. M.-A., Larionoff A.E., Larionoff S.A., Modestov K.A., Akimov I.I., Logviniouk V.P., Verzhbitsky L.G., Trifonov Ye.Ye., Dew-Hughes D.** The Pump for Liquid Cryogen with HTS Electrical Drive. — Proc. of EUCAS'03, pp. 887–890, Sorrento (Italy), 14–18 Sept. 2003.

Authors: Kovalev Lev Kuz'mich — Doctor Techn. Sci. He died in 2014.

Larionov Anatolii Evgen'yevich (Moscow, Russia) — Cand. Techn. Sci., Senior Scientist at the Department, Moscow Aviation Institute (MAI).

Modestov Kirill Andreyevich (Moscow, Russia) — Cand. Techn. Sci., Senior Scientific Researcher at the Department, MAI.

Penkin Vladimir Timofeyevich (Moscow, Russia) — Doctor Techn. Sci., Professor, MAI.

Poltavets Vladimir Nikolayevich (Moscow, Russia) — Cand. Techn. Sci., Leading Scientific Researcher, MAI.

