

Сравнительная оценка высокоудельных электромеханических преобразователей для применения в качестве интегрированного генератора

Ф.С. Хамзин, М.В. Охотников*

ФГБОУ ВО «Уфимского университета науки и технологий», г. Уфа, Россия

Аннотация. В работе оцениваются типы электромеханических преобразователей, используемые в авиационной промышленности для применения в качестве высокоудельного преобразователя для генерации электроэнергии. По итогу проведенного сопоставления более перспективным для рассмотрения в качестве высокоудельного преобразователя выбрана синхронная электрическая машина с постоянными магнитами, способная при меньшей массе и габаритах добиться более высокого коэффициента полезного действия. Производиться анализ ее составных частей и применяемых материалов с указанием их преимуществ. На основе представленного перечня материалов, выполнен электромагнитный расчет генератора, способного работать при температурах до 350 °С с перегрузкой по мощности, на 25% превосходящей ряд эксплуатируемых авиационных генераторов, при этом его удельная мощность составляет более 8 кВт/кг.

Ключевые слова: авиационный генератор, интегрированный генератор, мощность, постоянные магниты, электротехническая сталь.

*pish@ugatu.su, ohotnikov.mv@ugatu.su

Введение

Тенденции, наблюдаемые в авиационной отрасли XXI века, характеризуются переходом авиационных преобразователей электрической энергии от классического на интегрированное исполнение, что требует от разработчиков авиационных систем расширения фундаментальных подходов и включения в них новых технологических решений при разработке авиационных систем электроснабжения самолета [1–3].

Идея создание перспективной системы генерации электроэнергии на основе высокоудельного интегрированного генератора является основой для развития будущих систем летательного аппарата (ЛА). Это потребует решения целого ряда инженерных задач, включая разработку интегрированного генератора и блока управления (БУ) к нему, что в дальнейшем приведет к модернизации всего авиационного двигателя (АД), а именно к отказу, в связи с утраченной необходимостью, от коробки приводных агрегатов, узлов центральной конической передачи и пр. Помимо этого предстоит решить большой объем задач, связанных с оптимизацией режимов работы такого генератора в новых условиях, предусмотреть мероприятия позволяющие повысить отказоустойчивость и надежность разрабатываемой системы и т.д. При этом конечной целью разрабатываемой интегрированной системы, помимо генерации электроэнергии, остаются требования, устанавливаемые нормативными регламентами КТ-160G, ФАП-21, МР-21.002, Р-4761 и пр., играющими ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективности работы всех систем ЛА. В условиях конкурентного развития авиационной техники со стороны западных компаний и повышения требований к ее характеристикам, разработка и внедрение интегрированных систем становится все более сложной, трудоемкой, но при этом актуальной задачей [2, 4]. Определение параметров проектируемой системы генерации электроэнергии (СГЭ) целесообразно начать с анализа развития сопутствующих факторов, определяющих зависимости для каждого ЛА. Если проанализировать историю развития систем СГЭ ЛА, можно увидеть, как со временем росли фактические значения мощности P авиационных генераторов и их удельные показатели, а также величины напряжений U в бортовой сети. Мощность современных эксплуатируемых авиационных генераторов варьируется в основном в диапазоне от 120 до 150 кВА, а напряжение в бортовой сети от 27 до 270 В согласно ГОСТ

Р 54073-2017, при этом данные требования не менялись уже на протяжении последних трех десятков лет. Так с учетом развития авиационных систем можно предположить, что дальнейшим этапом развития с учетом повышения мощности, генерируемой на борту будет являться напряжение в 540 В, а условия и режимы работы генератора будут контролироваться индивидуальным БУ, совместная работа которых будет представлять из себя отдельный канал генерирования электроэнергии. Уже сейчас современные летательные аппараты все активнее оснащаются электрическими системами управления, мощной авионикой, системами комфорта и безопасности полета, требующие большего уровня мощности бортовой сети. Сейчас, мощность электрической энергии, получаемой с одного двигателя у А380 (с двигателями Trent 900 от Rolls-Royce), составляет 150 кВА, а у В747 (с двигателями General Electric CF6-80) составляет 90 кВА [5]. Применение высоко удельных интегрированных генераторов позволит обеспечить не меньший уровень мощности при снижении массы АД, а вместе с тем и упрощение архитектуры энергоснабжения. Дополнительно применение интегрированного генератора позволит объединить функции генератора, электростартера и контроля в едином модульном узле, что потенциально снижает вес, уменьшает потери и сокращает объем фронтальных электропроводок. Это особенно важно для габаритных параметров и летных характеристик, а также для дальности полетов и экономичности эксплуатации. В условиях высоких требований к безопасности полетов это позволяет повысить готовность к полетам и снизить простои.

Применение высокоудельных генераторов является решением, открывающим перспективы развития авиационных систем, более точного соответствия прогнозируемым нагрузкам, продвижению электрификации бортового оборудования и запасных источников энергии. Растущий уровень электрификации приведет к снижению расхода топлива, а как следствие к снижению углеродного следа авиации [6]. Соответствие требованиям будущих модернизаций авиационной промышленности, перспективы перехода к более электрифицированной инфраструктуре самолетов, включая гибридные и полностью электрические силовые установки, делают развитие высокоудельных авиационных интегрированных генераторов одной из ключевых технологий, способных обеспечить плавный переход и масштабируемость.

Постановка задачи

Оценивая возможную конфигурацию высокоудельного интегрированного генератора, стоит рассмотреть самые распространенные авиационные электромеханические преобразователи энергии (ЭМПЭ). Наибольшее распространение среди них получили синхронные электрические машины с электромагнитным (имеющим обмотку возбуждения) и магнитоэлектрическим (имеющим постоянные магниты) возбуждением, а также асинхронные электрические машины и реактивные электрические машины [7]. Последние выгодно отличаются возможностью эксплуатации при высоких температурах. Среди требований, предъявляемых к данному типу ЭМПЭ, можно выделить: обеспечение высокой надежности, минимальной массы и минимальных габаритных размеров, а также повышенной отказоустойчивости.

Среди перечисленных типов машин, асинхронная электрическая машина с короткозамкнутой обмоткой типа беличьей клетка на роторе и трехфазной распределенной обмоткой на статоре достаточно хорошо зарекомендовала себя в промышленности [8]. Она отличается высокой надежностью, невысокой стоимостью, а также естественной отказоустойчивостью. В то же время асинхронный двигатель при создании магнитного поля потребляет из сети реактивную мощность, что снижает его коэффициент мощности. Наличие на роторе короткозамкнутой обмотки приводит к значительному росту суммарных потерь, невысокому КПД и большому тепловыделению [9]. При высоких линейных токовых нагрузках существенно снижается перегрузочная способность асинхронного двигателя, поэтому для достижения требуемых мощностей необходимо снижение количества витков и увеличение габаритов активной части, если сравнивать с синхронной электрической машиной постоянными

магнитами. Также при высоких линейных токовых нагрузках значительно возрастают потери в роторе, что приводит к необходимости применения жидкостного охлаждения для вращающихся частей двигателя. КПД такой машины составляет порядка 0,95. Температурной границей для ее применения считается 150 °С, а удельные показатели таких машин как правило не превышают 0,2 кВт/кг.

В отличие от асинхронной, принцип действия индукторной электрической машины основан на реактивном моменте, образующимся при вращении магнитного поля вокруг ротора, имеющего магнитную несимметрию [10]. Эта машина не содержит на роторе ни магнитов, ни обмотки, при этом имеет все те же достоинства, что и асинхронный двигатель. Обмотка такой машины является зубцовой, что требует меньше места для вылета лобовых частей, что позволяет обеспечить лучший теплоотвод. Температурной границей ее применения является 800 °С. В то же время у нее еще более низкий коэффициент мощности, чем у асинхронной машины. Имеет на 20–30% больший вес активной части, чем отказоустойчивая синхронная машина с постоянными магнитами. КПД такой машины составляет порядка 0,8.

Синхронная машина может выполняться как с зубцовой, так и с распределенной обмоткой, что дает больше возможностей при ее проектировании. Ротор может иметь как обмотку возбуждения, так и постоянные магниты. Принцип действия такой электрической машины основан на взаимодействии токов статора с вращающимся магнитным полем ротора [11].

Недостатком синхронной машины с обмоткой возбуждения является необходимость подачи напряжения на вращающийся ротор посредством щеток и колец. Согласно статистике, наличие контактного узла с щетками и кольцами провоцирует до 80% всех отказов таких машин, наличие вращающегося выпрямителя вносит свои ограничения по температуре эксплуатации. В отличие от нее синхронная машина с постоянными магнитами на роторе лишена этих двух недостатков и позволяет добиться меньшей массы ротора и повышенной среди всех типов машин удельной мощности. Но при этом уровень отказоустойчивости у данной машины ниже. Этот факт объясняется тем, что магнитное поле создается постоянными магнитами на роторе даже при отключении питания от бортовой системы электроснабжения.

Решение задачи

Поскольку синхронная электрическая машина с постоянными магнитами при меньшей массе и габаритах позволяет добиться более высокого коэффициента полезного действия, этот тип машины более перспективен для рассмотрения как электропривода с высоким показателем удельной мощности.

Масса активной части такой машины зависит от частоты вращения, количества пар полюсов, индукции насыщения, охлаждения, типа постоянных магнитов и магнитной системы, схемы соединения обмотки, проводника и материалов магнитной системы.

При рассмотрении интегрированного исполнения генератора можно добиться снижения результирующей массы за счет отказа от вала, подшипниковых щитов и подшипниковых узлов [3, 12]. Таким образом, в итоговой массе генератора, учитываемой в удельных показателях, будет учитываться только масса активной части (Табл. 2).

Если оценивать материалы, из которых изготавливаются синхронные машины с постоянными магнитами, можно отметить, что в авиационной промышленности наиболее распространенной сталью для магнитопровода является сталь 2421 ГОСТ 21427.2-83 с толщиной листа 0,18 мм. Данная сталь имеет индукцию насыщения в диапазоне 1,6–1,8 Тл и плотность 7650 кг/м³. Магнитопровод статора стандартно выполняется шихтованным, что позволяет минимизировать потери на вихревые токи, которые особенно сильно проявляются на высоких частотах перемагничивания. В то же время альтернативой стали 2421 (SiFe) может являться прецизионный магнитно-мягкий сплав железа и кобальта 49К2ФА (CoFe) с толщиной листа 0,2 мм обладающий высокой индукцией насыщения, достигающей до 2,35 Тл. На Рис. 1 показано сравнение кривых намагничивания для этих сталей.

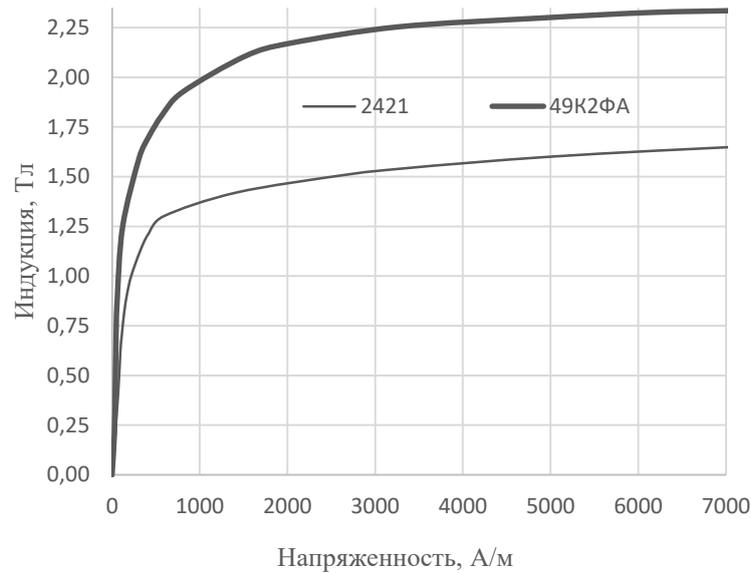


Рисунок 1. Кривые намагничивания.

Как видно из Рис. 1, при той же напряженности магнитного поля индукция для 49К2ФА примерно на 0,6–0,65 Тл выше. Переход на данный тип стали даст возможность снизить массу магнитопровода на 20–25%. С другой стороны, сплав 49К2ФА имеет большую стоимость и предъявляет больше требований к технологическому процессу обработки. На Рис. 2 показаны удельные потери при частоте перемагничивания в 1 кГц.

Как видно из Рис. 2, удельные потери для 49К2ФА меньше примерно на 20%, при этом сложности в технологическом процессе по его обработке могут свести к нулю данные преимущества, главным образом из-за его хрупкости, при плотности 8120 кг/м³.

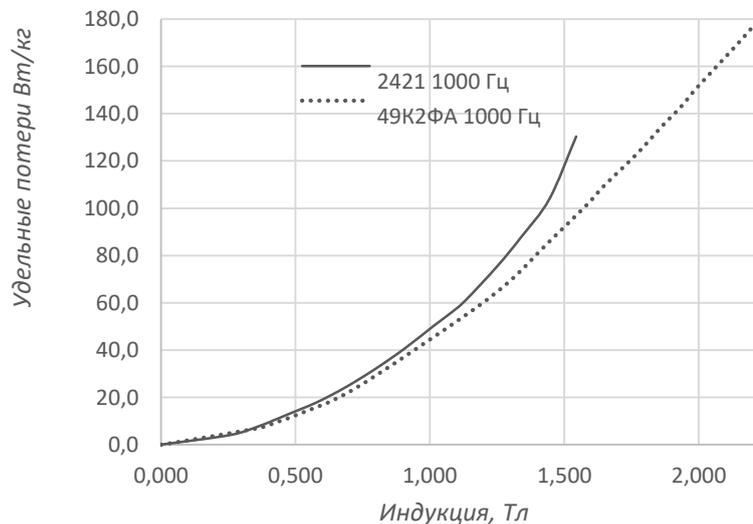


Рисунок 2. Удельные потери при частоте перемагничивания 1 кГц.

$$p = \frac{60f}{n} = 24. \quad (1)$$

Скорректировать оптимальную частоту вращения n ротора можно при выборе режима работы S по ГОСТ ИЕС 60034-1-2014.

На роторе такого генератора возможно использовать высококоэрцитивные постоянные магниты из самария кобальта (SmCo) или неодим железо бора (NdFeB) N45SH [13, 14]. Тепловой коэффициент магнитной индукции у NdFeB в 3,5 выше (12% падения остаточной

индукции у NdFeB против 3,5% у SmCo на 100 °С изменения температуры постоянных магнитов), что приводит к значительному падению энергетических свойств при нагреве. Такие постоянные магниты нерационально применять при больших температурах нагрева. В Табл. 1 показано сравнение характеристик двух типов постоянных магнитов.

Таблица 1. Сравнение магнитов.

Параметр	NdFeB	SmCo
Остаточная магнитная индукция при 20 °С	1,350	1,090
Остаточная магнитная индукция при 140 °С	1,156	1,044
Температурный коэффициент индукции, %/°С	-0,12	-0,035
Максимальная рабочая температура, °С	140	350
Удельная электрическая проводимость, См/м	625 000	1 100 000

Как можно заметить из Табл. 1, зная максимальную температуру, при которой предстоит эксплуатировать генератор, необходимо выбирать между SmCo или NdFeB. При этом несмотря на более высокий температурный коэффициент индукции у SmCo, чем у NdFeB, при температуре до 140°С он имеет остаточную индукцию на 0,11 Тл выше.

Снизить температуру ротора и соответственно магнитов можно уменьшением влияния вихревых токов в магнитопроводе благодаря применению магнитной системы в виде сборки Хальбаха [15]. Таким образом можно добиться исключения магнитопровода из конструкции и снизить металлоемкость ротора. Применение сборки Хальбаха дает возможность при том же уровне индуктивности фазы, а значит и при той же перегрузочной способности и коэффициенте мощности, повысить количество витков, тем самым уменьшить массу активной части. Также сборка Хальбаха создается максимально близко по форме к синусоидальному магнитному полю в зазоре, что обеспечивает высокую плавность хода и отсутствие пульсаций крутящего момента. На статоре для улучшения теплоотвода от активной части целесообразно использовать жидкостное охлаждение, например трансформаторным маслом.

В качестве обмоточного провода статора возможно использовать прямоугольный провод ПНЭТ-имид с изоляцией на основе полиимидов минимальной диаметральной толщиной 0,003...0,042 мм, с минимальной наработкой 20 000 ч при 220 °С. Ресурс провода ПНЭТ-имид на температурах, соответствующих номинальной работе, превышает 100 тысяч часов. Также полиимидная пленка способна сохранять свои свойства при температуре до 400 °С в течение 12 часов [16].

Для примера рассчитаем генератор, работающий с 25% перегрузкой, в сравнении с А380 (Табл. 2).

Таблица 2. Параметры генератора.

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Мощность, кВт	200	Зубцовый момент, Нм	±0,2
Количество полюсов	6	Тип охлаждения	Охлаждение маслом
Количество пазов	54	Длина активной части, мм	154
Фаз	3 (звезда)	Количество магнитов	15
Шаг обмотки	9	Длина по лобовым, мм	245
Обмоточный коэф.	0,95	Внешний диаметр статора, мм	145
Количество витков в пазу	4	Внутренний диаметр статора, мм	113
Количество параллельных ветвей	3	Внешний диаметр ротора, мм	95
Количество жил в витке	20	Немагнитный зазор, мм	9

Продолжение Табл. 2

Обмоточный провод, мм	ПНЭТ-имид	Толщина бандажа ротора, мм	6,5
Коэффициент заполнения паза	0,46	Толщина стакана статора, мм	1,2
Коэффициент заполнения паза	0,57	Воздушный зазор, мм	1,5
Активное сопротивление при температуре 20°C, мОм	2,1	Магнитопровод статора, кг	8,3
Потокоцепление фазы, мВб	23,1	Масса обмотки и выводов, кг	3,8
Магнитопровод статора	2421, 0,18 мм	Масса магнитов, кг	7,11
Магниты	$SmCo$, $B_r = 1,1$ Тл, $H_{cB} = 770$ кА/м	Магнитопровод ротора, кг	3,1

Исходя из полученного расчета, можно определить, что удельные показатели данного генератора составляют 8,96 кВт/кг при учете интегрированного исполнения, если добавить конструктивные элементы классического исполнения ЭМПЭ (примерно 25% к массе), то удельные показатели составят около 7,17 кВт/кг, что является все также хорошим результатом.

Заключение

В работе проведен анализ научнотехнической литературы по типам электрических машин, применяемых в авиационной промышленности, которые можно рассмотреть на роль высокоудельного интегрированного генератора. На основе очевидных факторов наиболее предпочтительным вариантом является синхронная электрическая машина с постоянными магнитами. В ее пользу свидетельствует простота конструкции, отсутствие необходимости подачи питания на ротор и высокий КПД. В рамках поставленной задачи произведен анализ приоритетной конструкции и выполнен электромагнитный расчет, показавший, что в рамках анализируемой конструкции возможно добиться удельных показателей мощности в 8,96 кВт/кг, при этом увеличив мощность в сравнении с применяемым генератором до 25%.

Литература:

- Schäfer A.W., Barrett S.R., Doyme K., Dray L.M., et al. Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft // Nature Energy. 2019. Vol. 4. No. 2. P. 160–166.
- Bhangu B.S., Rajashekara K. Electric Starter Generators: Their Integration into Gas Turbine Engines // IEEE Industry Applications Magazine. 2014. Vol. 20. No. 2. P. 14–22.
- Охотников М.В. Концепция разработки и внедрения интегрированного авиационного генератора с внешним ротором // Электромеханика. 2024. № 12. С. 45–53.
- Варюхина Е.В., Карпов А.Е., Ключков В.В. Глобальные тенденции технологического развития и стратегическое позиционирование российского авиастроения // Материалы XX Национальной научной конференции с международным участием. 2021. Т. 16. Часть 1. С. 520–525.
- Бортовое оборудование дальнемагистрального высокотехнологичного самолета BOEING 787 DREAMLINER. ФГУП НИАО. Москва, 2005. С. 45.
- Терентьев Е.В. Анализ проблемы повышения энергоэффективности и предложения по снижению расхода топлива гражданских воздушных судов // Вестник науки. 2024. Т. 1. № 6(75). С. 1741–1748.
- Yu L., Zhang Z., Gerada D., Gerada C. Performance Comparison of Doubly Salient Reluctance Generators for High-Voltage DC Power System of More Electric Aircraft. In: 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). IEEE, 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607694.
- Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. Москва: Энергия, 1980. С. 496.

9. Rubino S., Bojoi R., Cavagnino A., Vaschetto S. Asymmetrical twelve-phase induction starter/generator for more electric. In: 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2016. P. 1–8. DOI: 10.1109/ECCE.2016.7854889.
10. Zhao E., Song S., Li Y., Ma R., Liu W. Design and Initial Testing of an Integrated Switched Reluctance Starter/Generator System for Unmanned Aerial Vehicle. In: 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2018. P. 1918–1923.
11. Shoujun S., Weiguo L., Schaefer U. Thermal analysis of a 30kW Switched Reluctance Starter/Generator system used in aircraft // 2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. 2009. P. 331–336. DOI: 10.1109/POWERENG.2009.4915170.
12. Okhotnikov M.V., Vavilov V.E., Ismagilov F.R., Khamzin F.S. Thermal Stability of Integrated Electrical Machines. In: 2025 11th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR). Changzhou, China, 2025. P. 198–202. DOI: 10.1109/EECR64516.2025.11077319.
13. Редкоземельные магниты SmCo (Самарий-Кобальт) [электронный ресурс]. URL: <http://ferrite.ru/products/magnets/smco/>.
14. Магниты NdFeB (неодим-железо-бор) [электронный ресурс]. URL: <http://ferrite.ru/products/magnets/ndfeb/>.
15. Казначеев С.А., Зименкова Т.С., Краснов А.С. Сравнительный анализ вариантов сборок магнитных полюсов на основе массива Хальбаха // Транспортные системы и технологии. 2017. Т. 3. №1. С. 47–57. DOI: 10.17816/transsyst20173147-57.
16. Корицкого Ю.В., Пасынкова В.В., Тареева Б.М. Справочник по электротехническим материалам. Москва: Энергоатомиздат, 1987. Т. 2. С. 463.

Благодарности:

Работа проведена в рамках научного проекта № 24-29-00675, выполненного при поддержке Российского научного фонда.

Об авторах:

ХАМЗИН Фаниль Салаватович, аспирант, инженер каф. электромеханики, ПИШ «Моторы будущего», Уфимский университет науки и технологий, Россия, hamzinfan@yandex.ru.

ОХОТНИКОВ Михаил Валерьевич, к.т.н., доц. каф. электромеханики, ПИШ «Моторы будущего», Уфимский университет науки и технологий, Россия, ohotnikov.mv@ugatu.su.

Metadata:

Title: Comparative assessment of high-performance electromechanical converters for application as an integrated generator.

Author 1: Fanil Salavatovich Khamzin, Postgraduate Student, Advanced Engineering School “Motors of the Future”, Ufa State University of Science and Technology, 32 Zaki Valadi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, hamzinfan@yandex.ru.

Author 2: Mikhail Valerievich Okhotnikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electromechanics, Advanced Engineering School “Motors of the Future”, Ufa State University of Science and Technology, 32 Zaki Valadi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, ohotnikov.mv@ugatu.su.

Abstract: The paper evaluates the types of electromechanical converters used in the aviation industry for application as a high-performance converter for generating electricity. Based on the comparison, a synchronous electric machine with permanent magnets is chosen as the most promising high-performance converter, as it can achieve a higher efficiency with less weight and size. The paper analyzes its components and materials used, highlighting their advantages. Based on the list of materials presented, an electromagnetic calculation was performed for a generator capable of operating at temperatures up to 350 °C, with a power overload exceeding that of a number of existing aircraft generators by 25%, while its specific power is more than 8 kW/kg.

Keywords: aircraft generator, integrated generator, power, permanent magnets, electrical steel.