

УДК 623.438.3–23

doi 10.54708/19926502_2026_30111131

Методология разработки гибридной силовой установки с электромеханическим преобразователем энергии и генератором на постоянных магнитах

М.В. Охотников*, Ф.Р. Исмагилов

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Россия

Аннотация. В статье представлена комплексная методология проектирования гибридных силовых установок для перспективных летательных аппаратов, основанная на применении высокоэффективных электромеханических преобразователей энергии с постоянными магнитами. Проведен сравнительный анализ схемных решений силовых установок, российских и зарубежных разработок. Показан опыт реализации интегрированной силовой установки в области авиационных электрических машин. Особое внимание уделено вопросам определения первичных параметров, оптимизации электромеханических характеристик, а также интеграционным аспектам при создании гибридных силовых установок. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие преимущества предлагаемых решений и определяющие вопросы для дальнейших исследований.

Ключевые слова: преобразователь, генератора, двигатель, стартер, силовая установка.

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

Введение

Гибридные силовые установки (ГСУ) стали одной из ключевых технологических тенденций нашего времени. Они объединяют преимущества традиционных двигателей с эффективностью электрических приводов, что позволяет снизить расход топлива, уменьшить выбросы и повысить устойчивость энергетических систем. В условиях растущих требований к энергоэффективности, обеспечения энергобезопасности и перехода к низкоуглеродной экономике гибридные решения оказываются универсальным инструментом для транспорта, промышленности и энергетики. Сегодня развитие ГСУ сопряжено не только с экономической выгодой, но и с необходимостью адаптации к новым регуляторным требованиям, возрастанию мощности аккумуляторной базы и интеграции возобновляемых источников энергии. ГСУ позволяет обеспечить автономность, маневренность системы, дублирование функций за счет электрификации систем, обеспечить компактность силовых установок, а также снизить зависимость от отдельных видов топлива и пр.

Современные тенденции развития ГСУ, как следует из результатов выставки в Чжухае, Китай, показывают перспективность развития данного направления, которое открывает новые горизонты для беспилотного компактного аэротакси и характеризуется возрастающими требованиями к его энергоэффективности, экологичности и надежности. В этом контексте гибридные электрические системы, сочетающие газотурбинные двигатели (ГТД) или двигатели внутреннего сгорания (ДВС) с электромеханическими преобразователями энергии (ЭМПЭ) на постоянных магнитах, представляют особый интерес.

Компании, такие как AVIC (Aviation Industry Corporation of China) и COMAC (Commercial Aircraft Corporation of China), ведут активные разработки в этой области. К примеру, AVIC представила проект гибридного самолета с использованием как бензинового, так и электрического двигателей, который способен выполнять короткие рейсы с минимальным выбросом углекислого газа [1]. Компании EHang и XPeng Heitech активно работают над созданием новых технологий, позволяющих интегрировать электрические и бензиновые компоненты в одном воздушном судне [2, 3]. Это позволяет не только увеличить дальность полета, но и уменьшить время заправки, обеспечивая более эффективное и экологически чистое перемещение в городах. Данное решение предоставит возможность использовать

преимущества обоих источников энергии: дальность полета будет значительно увеличена по сравнению с чисто электрическими моделями, а время заправки будет сокращено.

Постановка задачи

В целом исполнение ГСУ возможно в нескольких существенно отличающихся друг от друга компоновках и имеющих свое технологическое развитие. Первым является соосное расположение ДВС – ЭМПЭ – привод, как правило этот метод подходит для автотранспортных систем и позволяет реализовать одновременно три функции ЭМПЭ, обеспечить раскрутку двигателя при запуске, генерирование электроэнергии на работающем ДВС и подкрутку ДВС при необходимости повышения тягового момента на приводном валу. В этом случае ГСУ вместо классического ДВС будет являться технологическим мостом при переводе особенного грузового авто на этап повышенной электрификации.

Второе исполнение ГСУ обеспечивает так же взаимную компоновку ДВС или ГТД с ЭМПЭ, который в данном исполнении в основном вырабатывает электроэнергию, а привод (например, винта, находящегося на крыле) размещается отдельно.

И третий вариант, когда ЭМПЭ находится непосредственно внутри ДВС или ГТД, такой вариант экономит габариты итоговой компоновки, позволяет так же реализовать функцию запуска ГТД и генерирования электроэнергии, а приводы, по аналогии со вторым вариантом, могут так же находиться отдельно, например на масляном насосе. Последний метод лучше подходит для разработки электрифицированного двигателя или электрического самолета.

Выбор концепции построения, а отсюда и особенностей разработки ГСУ, определяется проектным схемным решением, по которому предполагается развитие системы в целом.

Одними из ярких примеров ГСУ являются разработка MOBI-One (Hybrid) и Skai (Hybrid), которые реализованы в виде летательных аппаратов [4, 5]. MOBI-One имеет схемное расположение ДВС + генератор + аккумуляторы + привод. Skai имеет возможность вертикального взлета и посадки, при этом в его схеме используются водородные топливные элементы + аккумуляторы и может использоваться привод VTOL (Рис. 1), что позволяет ему работать более эффективно. Под брендом VTOL выпускается ряд модульных приводов по конструкции достаточно сильно выделяющихся на фоне классических электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ), разрабатываемых как в России, так и во всем мире.

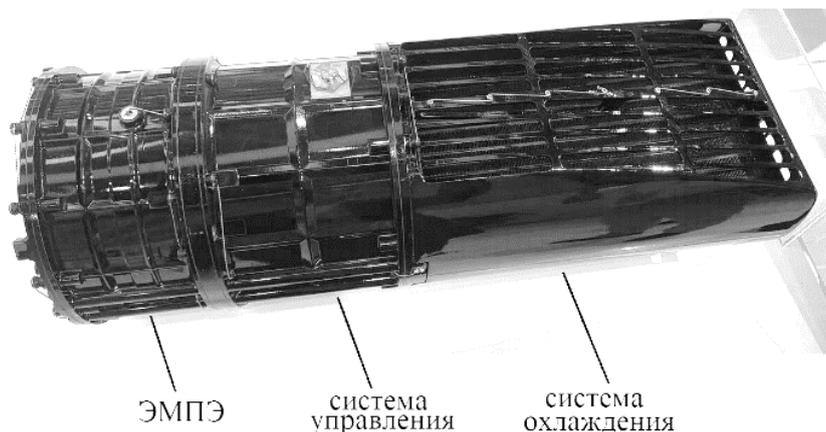


Рисунок 1. Принципиальная схема вариаций рассчитываемой системы.

Как можно заметить, данный привод в отличие от классических ГСУ систем, только начинающих развиваться в России [6], представляет собой соосный единый модуль, объединяющий силовой ЭМПЭ, систему управления и систему охлаждения.

Такой подход позволяет решить ряд возможных проблем, которые могут проявиться при сборке, наладке, ремонте и обслуживании ГСУ при опытной эксплуатации. К таковым можно отнести:

– тарирование системы управления и контроля, которые при данном исполнении выставляются на предприятии изготовителе и не подвергаются влиянию при дальнейших манипуляциях с ЭМПЭ;

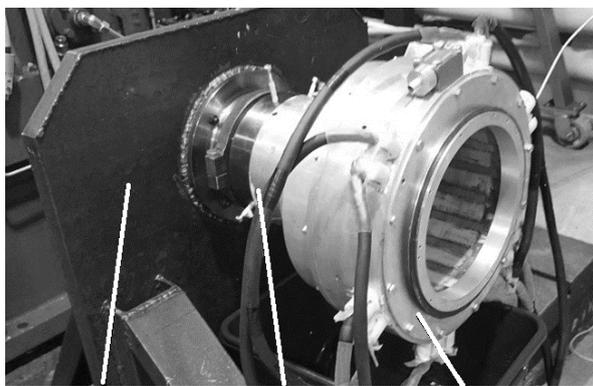
– не требуется выполнять трассировку шинпроводов и систем между модулями ЭМПЭ, все выполняется в едином корпусе, что уже на этапе расчета дает возможность учитывать их взаимное влияние друг на друга и создаваемый в корпусе температурный баланс.

– производить замену модуля в случае выхода его из строя на уже подготовленный аналогичный модуль, требующий лишь его подключения и закрепления на стандартизированное посадочное место.

Требуемый уровень мощности ГСУ в данном случае будет определяться конфигурацией проектируемого летательного аппарата, его массой и уровнем мощности, потребляемой вспомогательным оборудованием.

При этом удельный показатель мощности составляет в районе 2–4 кВт/кг, что обуславливается главным образом классическим исполнением ЭМПЭ. Оценка надежности и условия эксплуатации для такого преобразователя будут ограничены главным образом внешними воздействующими факторами (ВВФ), величина которых нормируется согласно КТ-160.

В качестве варианта интегрированного исполнения можно рассмотреть вариант с размещением ЭМПЭ внутри ГТД (Рис. 2).



Испыт. станд. Опорта ЭМПЭ

Рисунок 2. Интегрированное исполнение ГСУ.

Рассматриваемый вариант ЭМПЭ разработан специалистами ПИШ «Моторы будущего» в Уфимском университете науки и технологий при совместной работе со специалистами ОДК Авиадвигатель. При данном исполнении ротор предполагается устанавливаться на вал ГТД, а статор на его внутренней поверхности корпуса, что позволяет обеспечить соосность ротора и статора без применения дополнительных корпусных элементов, таких как щиты и подшипниковые узлы. Данное исполнение в зависимости от рассматриваемого двигателя позволяет добиться прироста удельной мощности более 10 кВт/кг. Минимальная проектная мощность интегрируемого ЭМПЭ данного типа будет зависеть от модели двигателя, для которого он проектируется. Так, для General Electric SF6-80 минимальная мощность, для которой стоит рассматривать возможность интеграции составляет 90 кВА, для General Electric GE90 – 120 кВА, а для Trent 1000 TEN – 250 кВА; эти значения соответствуют мощности генераторов, устанавливаемых на коробках приводных агрегатов этих двигателей. При интеграции ЭМПЭ в ГТД появляется возможность отказаться от вала, части корпусных элементов, подшипниковых узлов и т.д., что способствует снижению массы разрабатываемого ЭМПЭ в сравнении с его классическим видом. Помимо этого, данное решение позволяет уменьшить массогабаритные показатели самого ГТД. Однако при рассмотрении данного типа ГСУ, помимо классических ВВФ по КТ-160, дополнительно

появляется влияние динамики ГТД и эксплуатационных условий внутри камеры, в которую интегрируется ЭМПЭ [7], в отличие от предыдущего варианта.

Данные особенности и возможность их вариации явно выделяют перспективность данного направления, что подтверждается увеличивающимся с каждым годом объемом инвестиций в эту сферу, что подтверждают исследования, посвященные технологии гибридных самолетов.

К ограничениям интегрированного исполнения ГСУ следует отнести возможное наличие металлических частиц от лабиринтных уплотнений стоек двигателя и подшипников внутри камеры, куда интегрируется ЭМПЭ, а также масла в большом объеме, которое при накоплении в воздушном зазоре между ротором и статором, за счет трения последнего, способно вызвать локальный разогрев более 200 °С, что подтверждено опытным путем. При этом замена и ремонт в данном исполнении потребуют разбора всего ГТД. Локализовать данный момент можно лишь механическим перекрытием зазора и созданием в нем повышенного давления воздуха.

Решение задачи

Разработка современных классических ЭМПЭ на сегодня производится с использованием классических отработанных методик расчетов и проектирования, на основе программных комплексов ANSYS и MotorCAD, в которых имеется возможность анализа электромагнитных параметров, теплового и прочностного состояния преобразователя [7]. К сожалению, из всего множества возможных вариантов, определяемых исходя из имеющихся данных и технического задания (ТЗ), к рассмотрению принимаются часть наиболее вероятных, определяемых опытом команды, занимающейся расчетами и проектированием, Рис. 3.



Рисунок 3. Принципиальная схема вариаций рассчитываемой системы.

В то же время без опытной реализации, исследовательских испытаний и наработок команды расчетчиков проанализировать переходные и аварийные режимы в проектируемом ЭМПЭ для ГСУ, а также вариации критических частот и влияющую на ЭМПЭ динамику ротора достаточно затруднительно. Факторы, связанные с применением перспективных технологий (внедряемых технологических решений), а также оригинальных конструктивных решений, затрудняют применение классических методик оценки показательной работы ГСУ и ограничивают итоговый результат выбранного варианта, который, как правило, зависит от опыта команды расчетчиков и имеющегося у них опыта в данной области. В области разработки ГСУ к перспективным технологическим решениям можно отнести применение композитных материалов, прессованных обмоток, высокотемпературных постоянных магнитов и т.д. Сложности, сопровождающиеся их применением, обусловлены нестабильностью получаемых параметров, зависящих от множества факторов, оценить которые при классическом расчете параметров ЭМПЭ достаточно сложно.

Так, оценка показателей качества композитных бандажей на данный момент производится путем усреднения данных прочности полученных при экспериментальном исследовании образцов. Так, согласно проведенным исследованиям, подтверждается эффективность выбора в качестве бандаж углеродоконной нити УМТ530-12К-ЕР со связующим ХТ-187, прошедшими испытания в интегрированном ЭМПЭ при температуре до 200 °С. При этом данные исследования не позволяют, к примеру, оценить деградацию композита при продолжительной нагрузке.

Применение прессованных обмоток позволяет повысить коэффициенты заполнения паза обмоткой, однако появляются факторы по расчету геометрии охлаждающих контуров, которые необходимо учитывать в переходных режимах, что показано в исследуемой модели ЭМПЭ, в которой были использованы трехслойные катушки из провода ПНЭТ-имид, нагревавшиеся в процессе испытаний до 170 °С. С другой стороны, данные переменные добавляют объем оценочных факторов главным образом по геометрии охлаждающих каналов при оценке переходных режимов и т.д.

Все это можно объединить в единый комплекс мультидисциплинарных задач, определяющих влияние параметров из разных систем друг на друга. В этой ситуации может помочь применение программирования, роль которого будет заключаться не только в итоговом управлении функциями ЭМПЭ, но и в проведении численного анализа возможных вариаций, оставшихся без внимания при проработке вариантов проектирования, просчете рисков и оценке надежности работы создаваемого ЭМПЭ в зависимости от ВВФ еще на этапе анализа, расчетов и проектирования. Среди перспективных инструментов для решения данной задачи можно выделить моделирование параметров с помощью цифровых двойников [8], которые можно применить для анализа не принятых к расчетам вариантов возможных технических решений и анализа итоговых данных выбранного варианта ЭМПЭ ГСУ. Основой для реализации данной возможности является математическая модель электромагнитного состояния ЭМПЭ:

$$\begin{cases} U_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ U_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega L_d i_d \\ M = \frac{3}{2} p_n (L_d - L_q) i_d i_q \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_c \\ P = -\frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \end{cases}, \quad (1)$$

где u_d и u_q – проекции фазного напряжения статора на d_q -оси.

$$U_m^2 = u_d^2 + u_q^2, \quad (2)$$

U_m – амплитуда фазного напряжения якоря; i_d и i_q – проекции тока статора на продольную и поперечную оси; I_m – амплитуда фазного тока якоря; R – активное сопротивление статорной обмотки; L_d и L_q – индуктивности статора по d_q -осям, в рассматриваемой СМППМ принято, что $L_d \approx L_q = L$; ω – угловая частота вращения поля; $\omega = p_n \omega_r$; p_n – число пар полюсов; ω_r – частота вращения ротора; $\omega_r = 2\pi n / 60$; Φ – магнитный поток, создаваемый магнитами; M – электромагнитный момент; J – момент инерции; M_c – момент сопротивления; P – активная мощность генератора, равная мощности нагрузки P_H , при допущении что потери в инверторе равны нулю.

Сложности решения мультидисциплинарного подхода при разработке ЭМПЭ ГСУ сейчас связаны с:

- большим объемом рутинных задач, которые можно было бы автоматизировать с помощью современных возможностей программирования;

- сложностью моделирования всей системы ГСУ, обусловленной большим объемом ВВФ, влияющих друг на друга:

– относительными результатами оценки вариантов развития событий при внедрении новых технологических решений, верифицируемых сейчас лишь при практической реализации;

– ограниченностью стандартных подходов и протоколов, зачастую не имеющих совместимости;

– сложностью оценки переходных процессов при возникновении короткого замыкания, износа изоляции обмоток, повреждения механических частей, возникновения внешнего короткого замыкания, вызванного другими электрическими устройствами либо каналами генерирования.

Отдельным вопросом при создании новых систем с ГСУ стоит моделирование скачков напряжения при коротком замыкании, что является важной частью анализа надежности и безопасности. Возможность получения данных результатов позволит разработать эффективные меры защиты, повысить устойчивость систем и снизить риск повреждения ЭМПЭ ГСУ. Таким образом, программирование, позволяющее реализовать полноформатные цифровые двойники с отображением мульти дисциплинарных зависимостей, будет являться ключевым инструментом для реализации всех возможностей, испытывающих затруднение при реализации направления создания подобных систем.

На сегодня в России уже реализуются проекты высокооборотных ЭМПЭ (до 30 000 об/мин) с КПД 96–98%, разрабатываются термостойкие магнитные системы на основе Sm2Co17, сохраняющих свойства до 350 °С [9] и развиваются методы жидкостного охлаждения обмоток.

Международный опыт компаний NASA, Siemens, Safran показывает попытки создания генераторов мощностью до 1 МВт с удельной мощностью 5–7 кВт/кг [10], разработки интегрированных двигатель-генераторных модулей и применения высокотемпературных сверхпроводников.

Таким образом ключевыми проблемами при разработке перспективных ГСУ остается обеспечение устойчивой работы при комбинированных нагрузках, что требует новых подходов к проектированию и управлению.

Заключение

Таким образом, можно сделать выводы, что концепцию разрабатываемой ГСУ помимо планируемой области эксплуатации и задаваемой мощности определяют:

- допустимые массогабаритные показатели;
- требуемый уровень генерируемой мощности;
- тип приводного двигателя;
- условия интеграции и т.д.

Результаты, определяемые по итогу формирования концепции ГСУ, показывают, что итоговым исполнением можно добиться повышенного момента и тягового усилия, параллельно обеспечивая электроэнергией потребители вторичных систем. При исполнении для летательного аппарата, с уже имеющимся в России уровнем технологий, можно добиться мощности 300 кВт.

1. Разработанная методология позволяет создавать ГСУ с удельными характеристиками, конкурирующими с мировыми аналогами

2. Комплексный подход к проектированию обеспечивает улучшение основных показателей на 15–25%

3. Перспективным направлением является внедрение цифровых двойников для прогнозирования ресурса.

4. В итоге можно сделать вывод, что при разработке методологии расчета классических ЭМПЭ ГСУ необходимо учитывать опыт западных компаний, вводить цифровые двойники в дополнение к классическому расчету ЭМПЭ на MotorCAD.

Применение ГТД в данном случае является лишь технологическим этапом для повышения уровня электрификации разрабатываемых ГСУ.

Литература:

1. Reshetnikova M.S. China's aviation industry: From follower to competitor in the global aerospace market // RUDN Journal of Economics. 2024. Vol. 32 No. 3. P. 489–502.
2. EHang. EHang 216: The Autonomous Aerial Vehicle for Urban Air Mobility [webpage]. 2021. URL: <https://www.ehang.com>.
3. XPeng Heitech. The Future of Autonomous Urban Air Mobility: Innovating Air Taxis [webpage]. 2023. URL: <https://www.xpeng.com>.
4. Airspace Experience Technologies (ASX) MOBi-One V3 [webpage]. URL: <https://www.iflyasx.com>.
5. Alaka'i Technologies Skai [webpage]. URL: <https://evtol.news/alakai-technologies-skai>.
6. Едигарев А.Д., Люцков В.А., Сайпушев Б.А. и др. Электрический двигатель для привода движителя летательного аппарата в составе демонстратора гибридной силовой установки // Вестник УГАТУ. 2023. Т. 27. № 2(100). С. 139–147 [Edigarev A.D., Lyutskov V.A., Saipushev B.A., et al. Electric motor for aircraft drive as a part of the demonstrator of hybrid power plant // Vestnik UGATU. 2023. Vol. 27. № 2(100). P. 139–147 (in Russian)].
7. Охотников М.В. Концепция разработки и внедрения интегрированного авиационного генератора с внешним ротором // Электротехника. 2024. № 12. С. 48–53 [Okhotnikov M.V. The concept of developing and implementing an integrated aircraft generator with an external rotor // Elektrotehnika. 2024. No. 12. P. 48–53 (in Russian)].
8. Будаев А.А., Третьяков Е.А. Компьютерное моделирование возможных неисправностей в электрической части электровоза на основе технологии цифрового двойника // Вестник РГУПС. 2025. № 1. С. 121–132. [Budaev A.A., Trtyakov E.A. Computer modeling of possible malfunctions in the electric part of an electric locomotive on the basis of digital twin technology // Vestnik RGUPS. 2025. No 1. P. 121–132 (in Russian)].
9. Охотников М.В., Лисовин И.Г., Вавилов В.Е., Исмагилов Ф.Р. О возможности внедрения интегрированного-стартер генератора в корпус газотурбинного двигателя // Электротехника. 2023. № 12. С. 3–7. [Okhotnikov M.V., Lisovin I.G., Vavilov V.E., Ismagilov F.R. About the possibility of introducing an integrated starter-generator into the body of a gas turbine engine // Elektrotehnika. 2023. No. 12. P. 3–7 (in Russian)].
10. Калитка В.С., Васильев Д.В. К вопросу использования высокотемпературных сверхпроводников для создания перспективных электрических машин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. Т. 21. № 1. С. 26–39. [Kalitka V.S., Vasilkov V.D. On the issue of using high-temperature superconductors to create advanced electric machines // Elektrotekhnicheskiye i Informatsionnyye Kompleksy i Sistemy. 2025. Vol. 21. No. 1. P. 26–39 (in Russian)].

Благодарности:

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

Об авторах:

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

ИСМАГИЛОВ Флюр Рашитович, д.т.н., проф., каф. электромеханики, ПИШ «Моторы будущего», Уфимский университет науки и технологий, Россия, pish@ugatu.su.

Metadata:

Title: Methodology for developing a hybrid power plant with an electromechanical energy converter and a permanent magnet generator.

Author 1: Mikhail Valerievich Okhotnikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electromechanics, Research Institute of Future Motors, Ufa University of Science and Technology, ohotnikov.mv@ugatu.su.

Author 2: Flur Rashitovich Ismagilov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electromechanics, Research Institute of Future Motors, Ufa University of Science and Technology, pish@ugatu.su.

Abstract: The article presents a comprehensive methodology for designing hybrid propulsion systems for advanced aircraft, based on the use of high-efficiency electromechanical energy converters with permanent magnets. A comparative analysis of the circuit solutions for propulsion systems, as well as Russian and foreign developments, is conducted. The article also demonstrates the experience of implementing an integrated propulsion system in the field of aviation electric machines. Special attention is given to the determination of primary parameters, the optimization of electromechanical characteristics, and the integration aspects of creating hybrid propulsion systems. The article presents the results of experimental studies that confirm the advantages of the proposed solutions and identify issues for further research.

Keywords: converter, generator, engine, starter, power plant.