

УДК 621.313
Код ГРНТИ 45.29.31

doi 10.54708/19926502_2025_29310937

Приоритетные направления развития авиационного электромашиностроения: сравнительный анализ финансирования НИОКР ведущих стран

О.А. Юшкова*, И.Р. Гарипов, В.Е. Вавилов

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

Аннотация. Проведен анализ программ развития авиационного электромашиностроения в США, Евросоюзе, Китае и России с целью выявления ключевых технологических трендов, приоритетных направлений научных исследований и стратегий финансирования. Используются данные официальных отчетов NASA, Европейской комиссии, китайских и российских государственных программ. Выявлено, что в США ключевые усилия направлены на создание электрических машин с удельной мощностью свыше 12 кВт/кг, включая двигатели на высокотемпературных сверхпроводниках (16 кВт/кг, КПД 99%). Евросоюз делает ставку на отказ от редкоземельных магнитов, аддитивные технологии и создание безжелезных конструкций, достигая значений КПД до 99% и удельной мощности до 11 кВт/кг. Китай лидирует в массовом производстве электродвигателей, инвестируя в цифровизацию, eVTOL и гибридные самолеты. В России разработки ведутся в рамках стратегии импортозамещения с акцентом на применение высокотемпературных сверхпроводников и создание гибридных силовых установок.

Ключевые слова: авиационное электромашиностроение, НИОКР, электрификация, инновации, энергоэффективность.

*yushkova-usatu@bk.ru

Введение

Современное авиационное электромашиностроение переживает этап активного развития, обусловленный глобальными тенденциями перехода к экологически чистым и энергоэффективным технологиям. Увеличение спроса на электрические и гибридные силовые установки, а также стремление ведущих стран мира к снижению зависимости от традиционного авиационного топлива стимулируют интенсивные научные исследования и технологические разработки в данной области. Важнейшим компонентом масштабных программ по созданию полностью электрических и гибридных летательных аппаратов является разработка перспективных электрических машин, выступающая в качестве одной из ключевых критических технологий данной отрасли. Анализ программ развития электромашиностроения в авиационной сфере в США позволит выявить приоритетные направления развития в этой области.

Программы развития электромашиностроения в авиационной сфере в США

В США реализуется комплекс федеральных программ и частных инициатив по разработке систем распределения энергии с революционными характеристиками, направленных на достижение технологического лидерства в области экологичного воздушного транспорта. Ключевыми участниками этого процесса выступают NASA, Министерство энергетики, DARPA, а также ведущие авиастроительные корпорации. В рамках этих программ особое внимание уделяется созданию высокоэффективных электрических машин.

NASA реализует масштабную программу по разработке электрифицированных авиационных силовых установок (Electrified Aircraft Propulsion, EAP), направленную на кардинальное повышение энергоэффективности и экологичности воздушного транспорта. В рамках этой инициативы с 2009 года ведется комплексная работа по нескольким ключевым направлениям:

создание прорывных технологий электрической тяги, разработка перспективных концепций летательных аппаратов, разработка экспериментальных образцов и специализированных испытательных стендов. Особенностью программы является тесная кооперация NASA с ведущими университетами (включая MIT и Университет Иллинойса), государственными структурами (FAA, DoD) и промышленными гигантами (Boeing, GE Aviation, United Technologies, Empirical Systems Aerospace, Rolls-Royce). С 2014 года, было проведено более 10 исследований по следующим тематикам [1, 2]: криогенные и некриогенные гибридные электрические силовые установки с распределенной силовой установкой; интеграция в планер самолета; системы терморегулирования; гибридно-электрические силовые установки и их системы управления. В табл. 1 представлены некоторые программы NASA, направленные на развитие авиационных технологий. Общий бюджет всех проектов составляет \$407,4 млн, с выделением \$129,5 млн через EAP [3].

Таблица 1. Программы развития авиационных технологий NASA.

Проект	Основной бюджет, млн. \$	EAP, млн. \$	Итого, млн. \$
Программа: Advanced Air Vehicles (AAV)			
Advanced Air Transport Technology	86,7	14,3	101,0
Hybrid Thermally Efficient Core	32,0	4,2	36,2
Revolutionary Vertical Lift Technology	34,6	5,8	40,4
Transformational Tools and Technologies	61,9	6,0	67,9
Итого по AAV	215,2	30,3	245,5
Программа: Transformational Aeronautics Concepts (TAC)			
University Innovation	27,3	4,7	32,0
Convergent Aeronautics Solutions	36,9	6,9	43,8
Итого по TAC	64,2	11,6	75,8
Программа: Integrated Aviation Systems (IAS)			
Electrified Powertrain Flight Demonstration	70,0	–	70,0
Flight Demonstration (X-57 Maxwell)	58,0	17,6	75,6
Итого по IAS	128,0	17,6	145,6
Общий бюджет, млн. \$	407,4	129,5	536,9

Выделение значительных средств на разработку гибридных и электрических двигателей, а также на исследования в области вертикального взлета и новых аэродинамических концепций, отражает стремление снизить зависимость отрасли от ископаемого топлива и минимизировать ее воздействие на окружающую среду.

В рамках EAP NASA активно поддерживает разработку электрических машин для авиации, в частности для гибридных и полностью электрических самолетов. Целью программ является обеспечение уровня удельной мощности электрических машин более 12 кВт/кг. На Рис. 1 представлен электродвигатель мощностью 1,4 МВт (HEMM), разработанный для реализации электрической тяги ближнемагистральных самолетов. Целевыми показателями HEMM являются удельная мощность в 16 кВт/кг и КПД 99%, что обеспечит втрое меньшие потери и массу по сравнению с существующими авиационными двигателями и генераторами. Технология HEMM может быть интегрирована с типичной системой охлаждения самолета и применена к различным типам воздушных судов, требующих мегаваттного уровня электрической мощности [4].

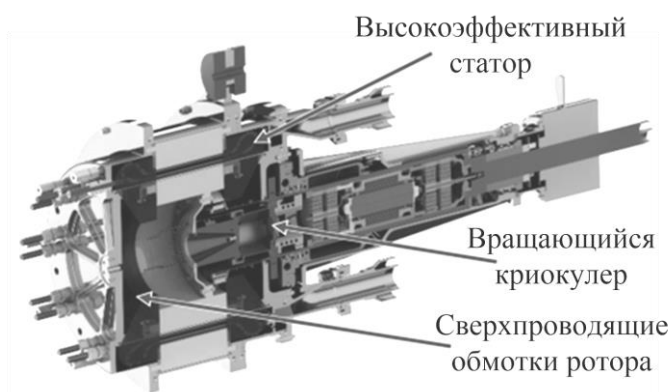


Рисунок 1. Высокоэффективный двигатель с ВТСП проводниками на статоре НЕММ.

В настоящее время ведутся работы по созданию мегаваттных двигателей в Иллинойском университете (1 МВт) [5] и Университете штата Огайо (до 10 МВт) [6], конструкции которых представлены на Рис. 2. Университет Иллинойса разработал двигатель с постоянными магнитами мощностью 1 МВт, удельной мощностью 13 кВт/кг и эффективностью более 96%, частотой вращения 18000 об/мин. Университет штата Огайо разработал асинхронный двигатель мощностью 2,7 МВт с такой же удельной мощностью (13 кВт/кг) и эффективностью более 96%, частотой вращения 2500 об/мин. Центр исследований NASA Glenn представил двигатель мощностью 1,4 МВт и удельной мощностью 16 кВт/кг с эффективностью >98%, частотой вращения 6800 об/мин.

В рамках программы ЕАР также ведутся разработки новых мягких магнитных материалов для повышения эффективности электрических машин и преобразователей; совершенствуются изоляционные материалы с целью повышения теплопроводности; исследуются углеродные нанотрубки для снижения массы кабельных систем; исследуются высокотемпературные сверхпроводники [7].

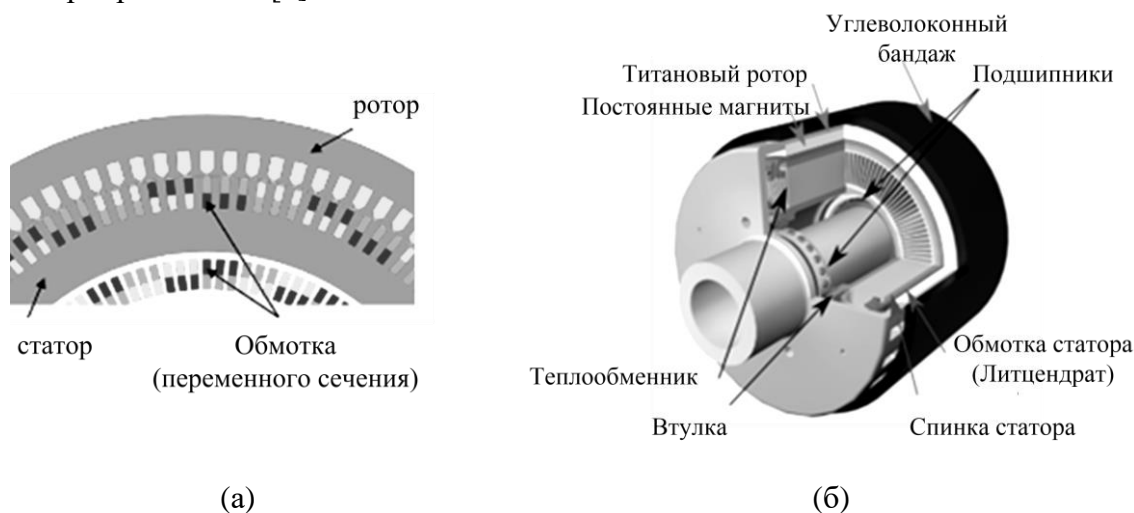


Рисунок 2. Проекты высокоудельных ЭМ, разработанных при поддержке NASA: (а) асинхронная ЭМ [8]; (б) синхронная ЭМ с постоянными магнитами [5].

Американская корпорация по производству сверхпроводников и Superconducting Technologies Inc. (по \$4,5 млн) – оптимизация производства высокотемпературных сверхпроводников на азотном охлаждении. [9]

GE Global Research (\$750 тыс.) – разработка высоковольтной изоляции для SiC-приводов (экономия 5–10% энергии). [9]

NovaTorque (\$800 тыс.) – создание безредкоземельных двигателей с коническим воздушным зазором (КПД > 96%) [9].

Университеты (Карнеги-Меллон, Пердью, Райса, Хьюстонский) – исследования металлических нанокompозитов, проводников с наноуглеродными добавками и сверхпроводящих катушек [9].

Реализация указанных исследовательских проектов с общим объемом финансирования свыше 23 миллионов долларов демонстрирует стратегический подход США к развитию критических технологий в электротехнической отрасли. Основные инвестиции направлены на прорывные разработки в области разработки новых материалов (улучшение свойств электротехнической стали, сверхпроводники, нанокompозиты), перспективных конструкций электрических машин и оптимизации производственных процессов. Особое значение имеет параллельная работа над коммерциализацией разработок (через промышленные компании типа GE и AK Steel) и фундаментальными исследованиями (в университетских центрах и университетах), что создает комплексную систему перехода от научных открытий к практическим применениям.

Программы развития электромашиностроения в авиационной сфере Европейского Союза

Европейский Союз также активно инвестирует в НИОКР, стремясь укрепить свои позиции в области инновационных технологий, особенно в авиационной промышленности: реализованы масштабные исследовательские программы FP7 [10], Horizon 2020 [11], Clean Sky 2 [12] и Horizon Europe [13], которые объединяют усилия университетов, промышленных предприятий и стартапов.

Европейские проекты, связанные с разработкой электрических машин, реализованные в рамках программы FP7.

HIGHPSLEEVE (применение углеродного волокна в электрической машине), выделено € 499 998,30. Координатор проекта – Фонд Eurecat (Испания), сроки реализации 2014–2016 гг. [14]. В рамках проекта была разработана инновационная композитная втулка для роторов электродвигателей, способная выдерживать экстремальные нагрузки на частотах вращения до 50 000 об/мин. В отличие от традиционных металлических аналогов, новая втулка из полимерно-матричного композита с углеродным волокном сочетает высокую прочность, малый вес и устойчивость к температурам от –50 до 250 °С. Это решение не только повышает надежность двигателей, но и позволяет уменьшить их габариты без потери мощности.

Европейские проекты, связанные с разработкой электрических машин, реализованные в рамках программы Horizon 2020.

HASTECS (гибридные летательные аппараты; научные исследования в области тепловых и электрических компонентов и систем), выделено € 1 499 825,00. Координатор проекта – лаборатория LAPLACE Национальный политехнический институт Тулузы (Франция), сроки реализации 2016–2021 гг. [15].

Основными достижениями проекта HASTECS являются разработка электродвигателей с удельной мощностью свыше 11 кВт/кг (с учетом устройства охлаждения) и КПД более 97%, а также оптимизация силовой электроники с эффективностью до 99%. В рамках проекта предложен синхронный двигатель с постоянными магнитами, оснащенный ротором с магнитной системой Хальбаха. В статоре применена особая конструкция обмотки из провода Литцендрат. Также была оптимизирована система охлаждения, применена смесь гликоля и воды в качестве хладагента для ротора и статора, а также добавили охлаждающие трубки в пазы статора.

CHYLA (надежный гибридный электрический самолет), выделено € 837328,75. Координатор проекта – Технический Университет в Дельфте (Нидерланды), сроки реализации 2020–2023 гг. [16].

Задачей проекта CHYLA (Credible HYbrid eLectric Aircraft) являлось создание комплексной картины ограничений и технологических барьеров для масштабирования гибридно-электрических решений – от легкой авиации до дальнемагистральных самолетов. Основные цели проекта включают: выявление и анализ «точек перехода», при которых технологии перестают быть эффективными при переходе между классами воздушных судов; оценка влияния

новых решений на эксплуатационную жизнеспособность, экономику и сертификацию; создание базовых моделей для дальнейших исследований, включая сравнение с существующими аналогами.

HEAF (высокоэффективные машины с осевым потоком), выделено € 71429. Координатор проекта – MAGNAX (Бельгия), сроки реализации 2018 гг. [17].

Проект Magnax, осуществленный в 2018 году, с общим финансированием € 71 429,00, из которых € 50 000,00 было предоставлено Европейским Союзом, а оставшаяся сумма профинансирована самой компанией, был направлен на разработку уникальной осевой электрической машины (Рис. 3).

Электродвигатель состоит из двух роторов, статора, выполненного с отдельными сердечниками и катушками. Сердечники с катушками устанавливаются и закрепляются в отливку под давлением деталь «clamshell». Система охлаждения электродвигателя Magnax прямая жидкостная, позволяющая обеспечивать параметры электродвигателя на максимальных режимах работы. Это было реализовано с помощью параллельного потока охлаждающей жидкости, где каждый первый виток обмотки снабжается «холодным маслом». Охлаждение магнитов осуществляется путем направления небольшой струи охлаждающей жидкости непосредственно в осевой зазор [18].

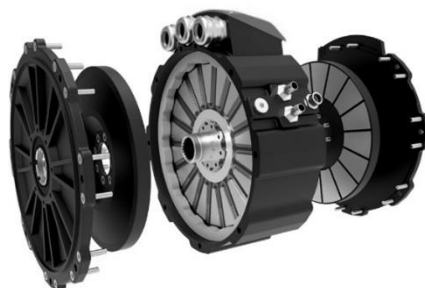


Рисунок 3. Электрическая машина с аксиальным магнитным потоком фирмы MAGNAX.

HIVOMOT (высокая мощность и напряжение работы электродвигателей в авионавтике), выделено € 1001775. Координатор проекта – Ассоциация Центра Технологий CEIT (Испания), сроки реализации 2021–2023 гг. [19].

Проект HIVOMOT направлен на исследование высоковольтных и высокомощных электрических систем для авиации, основой для которых послужило применение высокотемпературных сверхпроводников (HTS). В рамках проекта решались ключевые задачи моделирования высоковольтных систем на большой высоте, включая изучение пробоя изоляции и искрения; разработки изоляции, устойчивой к экстремальным условиям; проектирования HTS-электродвигателей мегаваттного класса с криогенным охлаждением; сравнения сверхпроводящих и традиционных технологий, выявление их применимости для разных мощностей и скоростей. Экспериментальная фаза включала создание масштабного демонстратора двигателя и испытания его компонентов.

PROMINEL (способ производства электродвигателей без железа) выделено € 3149950. Координатор проекта – Alva Industries AS (Норвегия), сроки реализации 2019–2022 гг. [20].

Компания Alva Industries при поддержке европейского проекта PROMINEL разработала инновационную технологию производства безжелезных электродвигателей, которые при той же мощности значительно легче аналогов с железным сердечником. Создан прототип производственной линии с использованием печати углеродного волокна (Fibre Printing), что позволило снизить вес и стоимость двигателей. На Рис. 4 представлена электрическая машина безжелезной конструкции, созданная в рамках проекта.



Рисунок 4. Электрическая машина безжелезной конструкции для БПЛА [20].

AM2SoftMag (аддитивное производство аморфных металлов для получения магнитомягких материалов), € 3 450 856. Координатор проекта – Университет Саарландии (Германия), сроки реализации 2022–2026 гг. [21].

Проект *AM2SoftMag* направлен на повышение энергоэффективности электромагнитных устройств за счет разработки нового поколения магнитомягких материалов, создаваемых методом аддитивной печати. Эти материалы обладают уникальными свойствами: практически нулевыми магнитными потерями, высокими механической прочностью и электрическим сопротивлением, что позволяет снизить потери до 80%. В рамках проекта уже разработаны новые составы сплавов, оптимизированы параметры 3D-печати и созданы прототипы компонентов для электродвигателей. Технология *AM2SoftMag* имеет потенциал кардинально изменить энергопотребление в Европе и мире. На Рис. 5 представлен ротор, разработанный с помощью аддитивных технологий, созданный в рамках проекта.

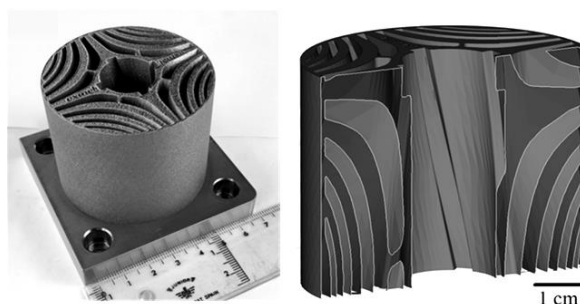


Рисунок 5. Ротор, разработанный с помощью аддитивных технологий [22].

ReFreeDrive (электронные накопители, не содержащие редкоземельных элементов, отличаются низкой стоимостью изготовления), € 5999131,25. Координатор проекта – Фонд Cidaut (Испания), сроки реализации 2017–2021 гг. [23].

Проект *ReFreeDrive* был направлен на разработку нового поколения электроприводов для транспортных средств, полностью исключающих использование редкоземельных магнитов. В рамках проекта были разработаны и оптимизированы две альтернативные технологии двигателей: асинхронный двигатель с медным ротором (рис. 6) и синхронный реактивный двигатель (Рис. 7). Оба решения имеют высокую эффективность, сниженную себестоимость и возможность масштабирования для массового производства в диапазоне мощностей 75–200 кВт.

ISG (Асинхронный стартер генератор), € 136172,5. Координатор проекта – SAFRAN ELECTRICAL & POWER (Франция), сроки реализации 2016-2019 гг. [24]

В рамках проекта разработан и испытан инновационный стартер-генератор для вертолета *LiFeCraft* на основе асинхронной машины. *ISG* обеспечивает совместимость с двумя бортовыми сетями: высоковольтной (270 В постоянного тока, стандарт MIL-STD-704-F) и низковольтной (28 В постоянного тока, стандарт EN2282). Ключевая инновация – адаптация технологий, применяемых в автомобильных стартер-генераторах и ветрогенераторах, для авиации, что ранее не использовалось.



Рисунок 6. Асинхронный двигатель с медным ротором.



Рисунок 7. Синхронный реактивный двигатель.

Отказ от редкоземельных магнитов не только снижает зависимость от критически важных материалов, но и способствует значительному сокращению эксплуатационных расходов, что особенно актуально в условиях глобального перехода к устойчивой авиации.

Европейские НИОКР-проекты в области авиационных электродвигателей, такие как HASTECS, ReFreeDrive, PROMINEL, ISG, AM2SoftMag и HIGHPSLEEVE, демонстрируют стратегию создания экологичных, энергоэффективных решений. Ключевыми достижениями стали отказ от редкоземельных материалов за счет развития асинхронных технологий (ISG), реактивных машин (ReFreeDrive) и безжелезных конструкций (PROMINEL), а также внедрение инновационных производственных методов, включая аддитивное производство (AM2SoftMag) и композитные роторы из углеродного волокна (HIGHPSLEEVE). Эти проекты позволили достичь рекордных показателей эффективности (КПД до 99% в HASTECS) и удельной мощности (11 кВт/кг). Особое внимание уделяется системной интеграции и масштабируемости решений для различных классов воздушных судов, что особенно ярко проявилось в проекте CHYLA.

Программы развития электромашиностроения в Китае

В настоящее время Китай доминирует в производстве электродвигателей для транспортных систем и в разработке высокоэффективных систем, которые обеспечивают связь с накопителем энергии на системном уровне. В период с 2009 по 2023 год Китай направил 230,9 млрд долларов в виде субсидий и другой поддержки в свой внутренний сектор электромобилей [25], причем 25 миллиардов долларов из этой суммы были инвестициями в НИОКР [26].

Быстрый темп инноваций в процессах китайских производителей электромобилей связан с цифровой автоматизацией методов проектирования. Чтобы создавать виртуальные прототипы и проводить испытания в большем количестве итераций и в более короткие сроки они используют программное обеспечение для моделирования, создавая виртуальные детали и макеты и 3D-печать прототипов [27].

Среди основных производителей электродвигателей в Китае можно выделить следующие компании:

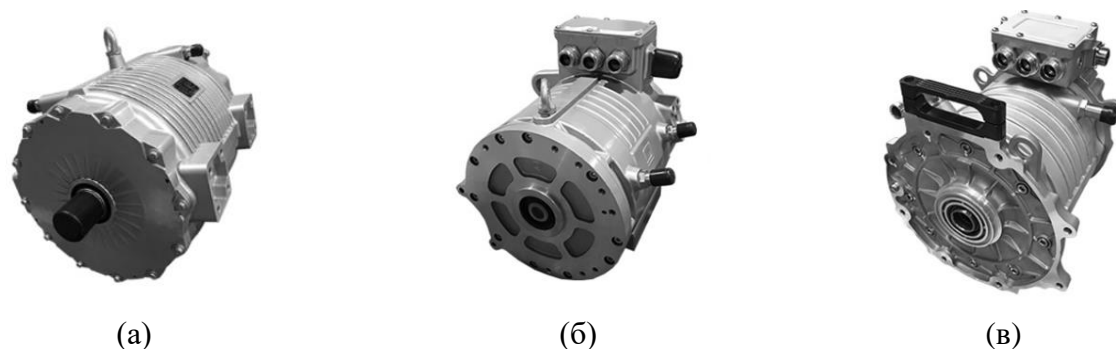
- *Shanghai Electric Machinery Co., Ltd* специализируется на производстве крупных AC/DC двигателей. Продукция экспортируется в более чем 38 стран и широко используется в энергетике и промышленности [28].

- *Zhejiang Wolong Electric Co., Ltd*. Крупнейший производитель промышленных двигателей, включая авиационные системы. Компания выпускает свыше 3000 типов двигателей, включая микроэлектродвигатели и тяговые системы [29]. Рис. 8 иллюстрирует примеры конструкций электродвигателей для автомобильной промышленности.

- *Johnson Electric* Лидер в производстве микроэлектродвигателей и интегрированных систем для авиации, автомобилей и бытовой техники. Компания с головным офисом в Гонконге поставляет высокотехнологичные решения на мировой рынок [30].

- *AVIC Electromechanical Systems Co., Ltd*. Подразделение корпорации AVIC, занимается разработкой электрических машин для авиации, включая двигатели для самолетов и беспилотных аппаратов. Работает над электрическими системами управления и силовыми установками [31].

- *EVT Aerotechnics* Компания основана в январе 2022 года и базируется в городе Нанкин, провинция Цзянсу, Китай. Компания занимается проектированием и производством пассажирских и грузовых электрических самолетов вертикального взлета и посадки (eVTOL) и гибридно-электрических самолетов VTOL для усовершенствованной воздушной мобильности [32]. Компанией разработаны решения в области электродвигателей. Электродвигатели EVT Aerotechnic для авиации полностью закрыты, охлаждаются воздухом, имеют высокую плотность крутящего момента и высокую эффективность.



(a)

(б)

(в)

Рисунок 8. Электродвигатели Zhejiang Wolong Electric Co., Ltd:

(а) электродвигатель легкового автомобиля; (б) электродвигатель грузового автомобиля;
(в) электродвигатель автобуса.

Таким образом Китай является одним из лидеров в области создания средств воздушной аэромобильности, а также их ключевых компонентов, включая электродвигатели. Технологическое лидерство КНР обеспечивается благодаря мерам государственной поддержки инноваций, а также высоким темпам проектирования и производства.

Программы развития электромашиностроения в авиационной сфере в РФ

В Российской Федерации программы развития электромашиностроения в авиационной сфере являются важной частью стратегии технологического прорыва и импортозамещения. Основные усилия сосредоточены на создании энергоэффективных электрических двигателей, генераторов и систем управления для перспективных летательных аппаратов, включая гибридные и полностью электрические самолеты. Ключевые проекты реализуются в рамках государственных программ, таких как «Развитие авиационной промышленности до 2030 года», а также при участии ведущих предприятий, включая «ОДК», «Ростех» и «Объединенную авиастроительную корпорацию» (ОАК). Особое внимание уделяется разработке компактных

и мощных электродвигателей, систем накопления энергии и цифровых технологий управления. Эти инициативы направлены на снижение зависимости от иностранных технологий, повышение экологичности авиации и укрепление позиций России на мировом рынке авиастроения.

НПО «Андроидная техника» – российская компания, основанная в 2005 году, специализируется на разработке антропоморфной робототехники, высокотехнологичных робототехнических систем и электродвигателей. Компанией разработаны решения для привода воздушных винтов с пиковой мощностью 520 кВт. Электродвигатели НПО «Андроидная техника» характеризуются удельной мощностью до 2,61 кВт/кг в номинальном режиме работы и до 6,19 кВт/кг в пиковом [33].

НПО «Андроидная техника» активно сотрудничает с ведущими научными и образовательными учреждениями России, включая Роскосмос, РКК «Энергия», Фонд перспективных исследований, и реализует проекты в области робототехники и авиационного транспорта.

«ОКБ Сухого» реализует проект беспилотного летального аппарата с вертикальным взлетом и посадкой С 76. Летательный аппарат, разработанный ОКБ Сухого в сотрудничестве с Московским физико-техническим институтом (МФТИ). Проект стартовал в 2021 году и направлен на создание универсальной платформы для грузовых перевозок и других задач. Ключевые особенности данного проекта: гибридная силовая установка, содержащая поршневой двигатель, работающий на бензине и керосине, и синхронные электрические машины, разработанные совместно с ФГУП «ЦИАМ» [34].

Группа компаний «ИКАР» – ведущий инженерно-производственный холдинг. Является центром разработки и производства авиационных систем и компонентов, а также экспертом в области выполнения инженерно-конструкторских работ для российских и зарубежных заказчиков [35]. Следует отметить, что инженерный центр «ИКАР» представляет собой бывший инженерный центр Airbus. 24–25 октября 2024 года в Москве на Международной конференции по водородной энергетике, ГК «ИКАР» представила совместную разработку с Центром водородных технологий АФК «Система» – грузовой беспилотник на водороде. Также среди разработок компании можно выделить беспилотные летальные аппараты с электродвигателями, осуществляющими привод несущего винта. Привод несущего винта в представленном летательном аппарате осуществляют электрические двигатели мощностью 120–140 кВт.

В 2022 году стало известно о том, что в России компанией «Эколибри» разрабатывается электрический самолет вертикального взлета и посадки. Сообщается, что вместимость перспективного самолета составит до 5 человек. Фонд суверенных технологий вложил 270 млн. руб в разработку и серийное производство самолета с вертикальным взлетом и посадкой Р-75 [36]. Компания занимается разработкой электродвигателя для привода воздушного винта, его мощность составляет 175 кВт, крутящий момент – 825 Н м.

ОДК «Климов» разрабатывает демонстратор гибридной силовой установки мощностью 500 кВт на базе двигателя ВК-650В. Потенциальными объектами применения ГСУ данного класса мощности являются легкие многоцелевые вертолеты, беспилотные летательные аппараты взлетной массой 2–8 т, самолеты местных воздушных линий, аэротакси, летательные аппараты вертикального взлета и посадки [37].

Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ) занимается исследованиями электрической авиации, включая испытания компонентов для распределенной силовой установки с импеллерными движителями. В целом эти проекты поддерживают глобальную тенденцию к развитию электрифицированного авиационного транспорта и его интеграции с технологиями управления обтеканием воздушного потока, что важно для увеличения дальности и надежности полетов в коммерческой авиации [38].

Среди других проектов, реализуемых в РФ, можно выделить совместный проект [39] Фонда перспективных исследований и ЗАО «СуперОкс», направленный на создание прорывных электротехнических решений с использованием эффекта высокотемпературной сверхпроводимости. По состоянию на сегодняшний день компания «СуперОкс» прекратила свое существование. Тем не менее в рамках совместных работ с ФГУП «ЦИАМ» реализовывался проект

летающей лаборатории ЯК-40ЛЛ, с турбоэлектрической силовой установкой. Следует отметить, что генератор для электроснабжения мотора с высокотемпературными сверхпроводниками на статоре разрабатывался при участии специалистов УУНиТ (УГАТУ). Так же ЦИАМ проводит разработку электрических машин, предназначенных для применения в гибридно-электрических силовых установках, в том числе при питании от топливных элементов.

Заключение

На основании представленного анализа финансирования НИОКР в ведущих технологических державах можно выделить следующие критические технологии и приоритетные направления развития авиационного электромашиностроения:

1. Создание и применение инновационных материалов:

- мягкие магнитные материалы с улучшенными характеристиками: исследования NASA направлены на повышение эффективности электрических машин и преобразователей; проект AM2SoftMag (EC) акцентирует внимание на аддитивном производстве аморфных металлов с практически нулевыми магнитными потерями;

- разработка безредкоземельных электрических машин: проект ReFreeDrive (EC) демонстрирует активное стремление к снижению зависимости от редкоземельных элементов через разработку асинхронных и синхронных реактивных двигателей; проект NovaTorque (США) также направлен на создание безредкоземельных двигателей;

- высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП): исследования NASA и проект HIVOMOT (EC) рассматривают перспективность ВТСП для электрических машин и систем распределения энергии, что требует разработки эффективных криогенных систем охлаждения;

- усовершенствованные изоляционные материалы: разработки NASA и GE Global Research (США) направлены на создание материалов с повышенной теплопроводностью и высоковольтной стойкостью;

- композитные материалы: проект HIGHPSLEEVE (EC) демонстрирует применение углеродного волокна для создания легких и прочных роторов;

- проводники с улучшенными характеристиками: Исследования NASA включают применение высокопроводящих медных проводников и углеродных нанотрубок для снижения массы кабельных систем.

2. Внедрение передовых технологий проектирования и производства (цифровое моделирование, аддитивное производство, роботизация):

- аддитивное производство (3D-печать): проект AM2SoftMag (EC) использует 3D-печать для создания магнитомягких компонентов; компания Alva Industries (EC) в рамках проекта PROMINEL разработала технологию безжелезных двигателей с использованием печати углеродного волокна;

- роботизация производственных процессов: Китай демонстрирует высокий уровень внедрения промышленных роботов в производстве электродвигателей.

3. Совершенствование систем охлаждения:

- разработки NASA включают исследования в области систем терморегулирования для электрических силовых установок, включая криогенное охлаждение для ВТСП-двигателей;

- проект HASTECS (EC) оптимизировал жидкостное охлаждение ротора и статора электродвигателя;

- электродвигатель Magnax (EC) использует прямую жидкостную систему охлаждения.

4. Интеграция электрических машин в гибридные и полностью электрические силовые установки:

- программы NASA (EAP) и европейские проекты (HASTECS, CHYLA) направлены на разработку и демонстрацию гибридных и электрических силовых установок для различных типов летательных аппаратов;

- разработка стартер-генераторов на основе асинхронных машин (проект ISG, EC) для гибридных вертолетов.

Дальнейший прогресс в отрасли будет определяться способностью сочетать высокие энергетические характеристики с экономической эффективностью и экологической безопасностью решений. Наибольшие перспективы могут быть связаны с конвергенцией технологических подходов – объединением американских разработок в области сверхпроводимости, европейских экологических решений, китайской масштабируемости производства и российских специализированных решений для импортозамещения. Критически важным станет создание международных стандартов и нормативной базы, которые позволят ускорить внедрение прорывных технологий при обеспечении необходимого уровня безопасности. Успешная реализация этих направлений позволит не только достичь целевых показателей по энергоэффективности и экологичности, но и создать новую парадигму авиационного транспорта, где электрические и гибридные силовые установки займут доминирующее положение. Это потребует скоординированных усилий государства, бизнеса и научного сообщества, а также формирования новых моделей международного сотрудничества в условиях технологической конкуренции.

Литература:

1. Electric Machines. URL: <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/technology/electric-machines/> (accessed: 10.02.2025).
2. High-Efficiency Megawatt Motor (HEMM) [webpage]. URL: <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/technology/hemm/> (accessed: 10.02.2025).
3. Electrified Aircraft Propulsion (EAP) [webpage]. URL: <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/> (accessed: 10.02.2025).
4. Jansen R.H., Bowman C.L., Jankovsky A., et al. Overview of NASA electrified aircraft propulsion (EAP) research for large subsonic transports. Proceedings of 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Atlanta, GA, July 10–12. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017. 4701 p. DOI: 10.2514/6.2017-4701.
5. Jansen R. H., Bowman C.L., Clarke S., et al. NASA electrified aircraft propulsion efforts // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 2019. Vol. 92. No. 5. P. 667–673.
6. Woodworth A. NASA's electric aircraft propulsion research: Yesterday, today and tomorrow // Power Electronics for Aerospace Applications' Propulsion, Nottingham, UK, 18–19th July 2023. NASA Administration, 2023.
7. NASA. Soft Magnetic Materials [webpage]. URL: <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/technology/soft-magnetic-materials/>.
8. Filatyev A., Golikov A.A., Erofeev A.I., et al. Research and development of aerospace vehicles with air breathing electric propulsion: Yesterday, today, and tomorrow // Progress in Aerospace Sciences. 2023. Vol. 136. Art. 100877. DOI: 10.1016/j.paerosci.2022.100877.
9. Next generation electric machines – Project Descriptions [webpage]. URL: <https://www.energy.gov/eere/ammto/next-generation-electric-machines-project-descriptions> (accessed: 10.02.2025).
10. European Commission. Seventh Framework Programme (2007 to 2013) [webpage]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/seventh-framework-programme-2007-to-2013.html> (accessed: 05.03.2025).
11. European Commission. Horizon 2020 [webpage]. URL: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-2020_en (accessed: 05.03.2025).
12. European Union Aviation Safety Agency (EASA). Clean Sky [webpage]. URL: <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/technology-and-design/clean-sky> (accessed: 05.03.2025).
13. European Commission. Horizon Europe [webpage]. URL: https://commission.europa.eu/funding-tenders/find-funding/eu-funding-programmes/horizon-europe_en (accessed: 05.03.2025).
14. Implementation carbon fibres for rotor of high speed rotating electric machine [webpage]. URL: <https://trimis.ec.europa.eu/project/implementation-carbon-fibres-rotor-high-speed-rotating-electric-machine> (accessed: 05.03.2025).

15. Hybrid Aircraft; academic reSearch on Thermal and Electrical Components and Systems [webpage]. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/715483> (accessed: 05.03.2025).
16. Credible HYbrid eLEctric Aircraft [webpage]. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/101007715> (accessed: 05.03.2025).
17. High-Efficiency Axial Flux Machines [webpage]. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/808061> (accessed: 05.03.2025).
18. Magnax Venture Portfolio [webpage]. URL: <https://www.magnax.com/venture-portfolio> (accessed: 05.03.2025).
19. High power and VOLTage operation of electric MOTors in aeronautics [webpage]. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/101008067> (accessed: 05.03.2025).
20. Production Method for Ironless Electric Motors [webpage]. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/873397> (accessed: 05.03.2025).
21. High power and VOLTage operation of electric MOTors in aeronautics [webpage]. URL: <https://hivomot.eu/> (accessed: 05.03.2025).
22. Additive Manufacturing of Amorphous Metals for Soft Magnetics [webpage]. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/101046870> (accessed: 05.03.2025).
23. Rare Earth Free e-Drives featuring low cost manufacturing [webpage]. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/770143> (accessed: 05.03.2025).
24. Induction Starter Generator [webpage]. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/685630> (accessed: 05.03.2025).
25. The Chinese EV Dilemma: Subsidized Yet Striking [webpage]. URL: <https://www.csis.org/blogs/trustee-china-hand/chinese-ev-dilemma-subsidized-yet-striking> (accessed: 10.03.2025).
26. Economic Security and Technology [webpage]. URL: <https://www.csis.org/economic-security-and-technology> (accessed: 10.03.2025).
27. China using industrial robots at 12x US rate [webpage]. URL: <https://asiatimes.com/2023/09/china-using-industrial-robots-at-12x-us-rate/> (accessed: 10.03.2025).
28. Shanghai Electric Machinery Co., Ltd. [webpage]. URL: https://www.shanghai-electric.com/group_en/djcgcal/ (accessed: 10.03.2025).
29. Provide more advanced, reliable and energy-saving product solutions [webpage]. URL: <https://en.wolong.com.cn/industry-applications/electric-transport/electric-vehicles> (accessed: 10.03.2025).
30. Johnson Electric [webpage]. URL: <https://www.johnsonelectric.com/en> (accessed: 10.03.2025).
31. AVIC Electromechanical Systems Co. Ltd. ESG Ranking [webpage]. URL: https://www.csrhub.com/CSR_and_sustainability_information/AVIC-Electromechanical-Systems-Co-Ltd (accessed: 10.03.2025).
32. EVT-AEROTECHNICS [webpage]. URL: <http://www.evt-aerotec.cn/> (accessed: 10.03.2025).
33. НПО «Андроидная техника» [электронный ресурс]. [SPO “Android Technics” [webpage] (in Russian)]. URL: <https://npo-at.com/> (accessed: 10.03.2025).
34. Синхронная электрическая машина: чем уникален тяжелый транспортный БПЛА С-76 ОКБ Сухого [электронный ресурс]. [Synchronous electric machine: What makes the Sukhoi Design Bureau's S-76 heavy transport UAV unique [webpage] (accessed: 10.03.2025; in Russian)]. URL: <https://russian.rt.com/russia/article/1361790-elektrodvigatel-ed-76-bpla-sukhoi-s-76> (дата обращения: 10.03.2025).
35. ГРУППА КОМПАНИЙ «ИКАР» [электронный ресурс]. [“IKAR” group of companies [webpage] (accessed: 10.03.2025; in Russian)] URL: <https://ikarcenter.ru/> (дата обращения: 10.03.2025).
36. Эколибри [электронный ресурс]. [Ecolibri [webpage] (accessed: 10.03.2025; in Russian)] URL: <https://xn--90anbffr2h.xn--p1ai/> (дата обращения: 10.03.2025).
37. ОДК ведет стендовые испытания гибридной силовой установки для аэротакси и беспилотников [электронный ресурс]. [United Engine Corporation is conducting bench tests of a hybrid

power plant for air taxis and drones [webpage] (accessed: 10.03.2025; in Russian)]. URL: <https://www.interfax.ru/russia/969772> (дата обращения: 10.03.2025).

38. Специалисты ЦАГИ модернизируют технологию изготовления самолетов с распределенной силовой установкой [электронный ресурс]. [Specialists of Zhukovsky Central Institute of Aerodynamics are modernizing the technology for manufacturing aircraft with distributed propulsion systems [webpage] (accessed: 10.03.2025; in Russian)]. URL: <https://a-contract.ru/publikacii/specialisty-cagi-modernizirujut-tehnologiju-izgotovlenija-samoljotov-s-raspredelennoi-silovoi-ustanovkoi> (дата обращения: 10.03.2025).

39. Лаборатория перспективных сверхпроводниковых материалов [электронный ресурс]. [Laboratory of Advanced Superconducting Materials [webpage] (accessed: 10.03.2025; in Russian)]. URL: <https://fpi.gov.ru/about/laboratories/laboratoriya-perspektivnykh-sverkhprovodnikovyx-materialov/> (дата обращения: 10.03.2025).

Об авторах:

ЮШКОВА Оксана Алексеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»; yushkova-usatu@bk.ru.

ГАРИПОВ Искандер Радикович, аспирант кафедры электромеханики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»; garipovir@yahoo.com.

ВАВИЛОВ Вячеслав Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»; s2_88@mail.ru.

Metadata:

Title: Priority directions for the development of aviation electrical engineering: a comparative analysis of R&D funding from leading countries

Author 1: Oxana Alexeevna Yushkova, PhD in Engineering, Docent, Associate Professor of the Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, yushkova-usatu@bk.ru, ORCID 0009-0007-2446-4538, Web of Science ResearcherID O-6498-2017, Scopus Author ID 56708635300.

Author 2: Iskander Radikovich Garipov, postgraduate student of the Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, garipovir@yahoo.com, ORCID 0000-0001-7966-8967, Scopus Author ID 57447078200.

Author 3: Vyacheslav Evgenievich Vavilov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, s2_88@mail.ru, ORCID 0000-0001-5695-6974, Web of Science ResearcherID N-9748-2017, Scopus Author ID 55768854800.

Abstract: An analysis of the development programs for aviation electrical engineering in the USA, the European Union, China and Russia was carried out in order to identify key technological trends, priority areas of scientific research and financing strategies. Data from official reports by NASA, the European Commission, and Chinese and Russian government programs was used. It was found that in the United States, key efforts are aimed at creating electric machines with a specific power of over 12 kW/kg, including engines on high-temperature superconductors (16 kW/kg, 99% efficiency). The European Union is betting on abandoning rare-earth magnets, additive technologies, and creating iron-free structures, achieving values of efficiency up to 99% and a specific power of up to 11 kW/kg. China is a leader in the mass production of electric motors, investing in digitalization, eVTOL, and hybrid aircraft. In Russia, developments are carried out within the framework of an import substitution strategy with an emphasis on the use of high-temperature superconductors and the creation of hybrid power plants.

Keywords: aircraft electrical engineering, R&D, electrification, innovation, energy efficiency.