

КРИТЕРИИ ПРИМЕНЕНИЯ РОТОРА В ИНТЕГРИРОВАННОМ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРЕ

М. В. Охотников✉, Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов

Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

✉ oxothukob@mail.ru

Основанием для развития авиационной отрасли является непрерывный процесс изменения конструкций, характера работы и условий эксплуатации применяемых электромеханических преобразователей энергии. Дополнительным фактором, подталкивающим к развитию, является расширение за рубежом тренда на гибридные силовые установки, что позволяет повысить уровень электрификации летательного аппарата и сделать очередной шаг к созданию "более электрического самолета". Одним из таких шагов является интеграция электромеханических преобразователей энергии в виде стартер-генератора в авиационный двигатель, что позволит достичь большей компактности, унификации технологий, разрабатываемых при его внедрении, и говорить о повышении уровня прочности элементов интегрируемого преобразователя.

В работе рассматриваются особенности подходов при разработке и изготовлении ротора, стартер-генератора для авиационного двигателя; анализируются конструкция ротора, интегрированного стартер-генератора, а также материалы, входящие в его состав. Приведены расчетные данные нагрузки бандажа и магнитов ротора при его работе. Рассмотрены результаты разгонных испытаний роторов с постоянными магнитами.

Целью проводимых исследований является оценка возможности применения композитного бандажа для интегрированного стартер-генератора, а также анализ возможных повреждений бандажа и постоянных магнитов, используемых в конструкции ротора. В результате проведенных работ получены расчетные и экспериментальные данные, указывающие на возможность применения композитного бандажа для роторов с частотой вращения до 40 000 об/мин; приведен алгоритм оценки запаса прочности, а также проведена экспериментальная апробация исследований. Полученные в результате эксперимента данные показывают возможные дефекты бандажа и магнитов, что позволяет установить технологические причины их возникновения и предотвратить их дальнейшее повторение.

Ключевые слова: интегрированный стартер-генератор, бандаж ротора, балансировка ротора, прочность ротора, магнит, испытательный стенд, оснастка

Для цитирования: Охотников М. В., Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е. Критерии применения ротора в интегрированном стартер-генераторе. *Омский научный вестник*. 2026. № 2 (198). С. 88–95. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-88-95>. EDN: LIDUOK.



© Охотников М. В., Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

CRITERIA OF USING A ROTOR IN AN INTEGRATED STARTER-GENERATOR

М. V. Okhotnikov✉, F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov

Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi St., 32, Ufa, 450076, Russia

✉ oxothukob@mail.ru

The basis for the development of the aviation industry is the continuous process of changing the designs, Type of operation and operating conditions of the applied electromechanical energy converters. An additional factor is the expansion of the trend for hybrid power plants abroad, which allows increasing the level of electrification of the aircraft and providing another step towards creating a "more electric aircraft". One of these steps is the integration of electromechanical energy converters in the form of a starter generator into

an aircraft engine, which allows providing greater compactness, unification of technologies and increasing the strength of the elements of the integrated converter.

This paper examines approaches to the development and manufacture of rotors and starter-generators for aircraft engines. The authors analyse the design of the rotor, integrated starter-generator and the materials; present calculated load data for the rotor shroud and magnets during operation and review the results of acceleration tests of rotors with permanent magnets.

The aim of the research is to evaluate the feasibility of using a composite bandage for an integrated starter-generator, as well as to analyse the potential damage to the bandage and permanent magnets used in the rotor design. The research demonstrates calculated and experimental data indicating the feasibility of using the composite bandage for rotors with rotational speeds of up to 40.000 rpm. Moreover, the authors develop an algorithm for estimating the safety margin and conduct an experimental testing. The results highlight potential defects in the bandage and magnets, identifying the underlying causes and preventing their recurrence.

Keywords: integrated starter-generator, rotor bandage, rotor balancing, rotor strength, magnet, test stand, tooling

For citation: Okhotnikov M. V., Ismagilov F. R., Vavilov V. E. Criteria of using a rotor in an integrated starter-generator. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;2(198):88–95. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-198-88-95>. EDN: LIDUOK. (In Russ.).



© Okhotnikov M. V., Ismagilov F. R., Vavilov V. E., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Актуальность развития авиационных систем в России, направленная на создание «более электрического самолета» [1, 2], провоцирующая введение кардинально новых подходов при разработке электромеханических преобразователей энергии, подтверждается государственной программой Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности», утверждённой постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 303, и транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г., утверждённой распоряжением № 3363-р Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г.¹.

Развитие авиационной промышленности оказывает мультипликативный эффект на развитие всей российской экономики в целом, создавая предпосылки для повышения эффективности целого ряда смежных отраслей (станкостроение, металлообработка, производство конструкционных материалов и химических веществ, радиоэлектроники и т. д.). Кроме того, трансфер создаваемых в отрасли технологий способствует разработке и применению новых технологических решений в автомобильной промышленности, судостроении, энергетике, ракетно-космической промышленности. Так, процесс разработки интегрированного электромеханического преобразователя энергии потребует привлечения различных отраслей промышленности с одновременным расширением требований к технологии и производству.

Постановка задачи

Одним из основных элементов интегрированно-го стартер-генератора (ИСТГ) является ротор, которому предстоит работать в достаточно сложных и агрессивных условиях в отличие от статора, для

которого есть техническая возможность реализовать принудительное жидкостное охлаждение [3]. Основная сложность при эксплуатации ИСТГ будет заключаться в отсутствии возможности его технического осмотра, обслуживания и оперативной замены, что накладывает на его элементы достаточно высокие требования по прочности в части работоспособности при значительных механических нагрузках в агрессивной среде, характеризующейся наличием масла и высокой окружающей температуры. Так, температура вокруг ИСТГ в камере компрессора высокого давления авиационного двигателя (АД), к примеру, для ПС-90 может достигать 180 °С и определяться конструктивом и характером работы АД, масло при этом, поступая от опор АД, находится в состоянии тумана [4–7].

Варианты решения

Для примера рассмотрим облегченную конструкцию ротора ИСТГ (рис. 1), представляющую цельную ступицу 2, имеющую зацепление с валом 1 АД через шлицевое соединение, а на её поверхности располагаются сегментированные постоянные магниты 3, удерживаемые за счет внешнего бандажа 4, имеющего предварительное натяжение. Облегченность конструкции поясняется отсутствием дополнительных элементов, требуемых при технологической проработке внедряемого изделия, таких как вентилятор, торцевые кольца, ловители и пр.

В качестве материала ступицы можно использовать титан типа ВТ-22 либо его аналоги, характеризующиеся высокой прочностью и относительной лёгкостью. Магниты, исходя из температурных особенностей [4, 5] в области размещения ИСТГ, лучше выбрать КС25АЦ, а бандаж можно выполнить из углеволокна UMT530-12K-EP в паре со связующим веществом ХТ-187 либо SB332 (данные материалы характеризуются высокой температурной

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 № 303 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы". URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201404240025?index=79&rangeSize=20> (дата обращения: 01.12.2025).

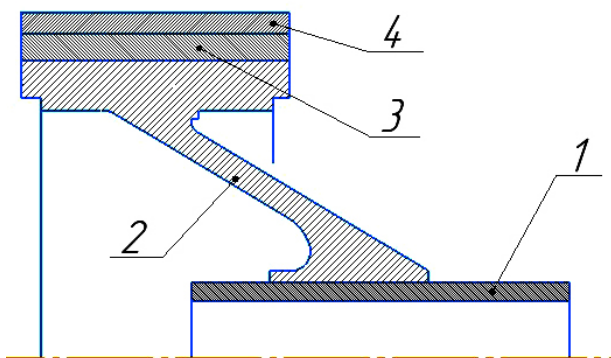


Рис. 1. Ротор интегрированного стартер-генератора
Fig. 1. Rotor of the integrated starter-generator
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

стойкостью и продолжительной работой при температуре до 180 и до 250 °C соответственно)² [8]. Упрощенное исполнение конструкции ротора способствует повышению его прочности и малому количеству вариантов возможных неисправностей данного ротора при эксплуатации ИСТГ, среди которых могут быть: дефект ступицы и ее соединения с валом АД, разбалансировка ротора, снижение параметров магнитов и нарушение целостности бандажа. Оценить прочность элементов ротора можно согласно обобщенному уравнению [9].

$$U_p = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 v_1^2 + v_p^2}},$$

где n — коэффициент запаса прочности в зависимости от средних значений предела текучести σ_1 и напряжения $\sigma_{\text{экв}}$; v_1 — коэффициент вариации предела текучести; v_p — коэффициент вариации давления.

$$n = \frac{\sigma_1}{\sigma_{\text{экв}}}.$$

Как правило, дефект цельной ступицы при прочностном анализе конструкции, предусмотренной в конструкторской документации, показывающий коэффициент запаса прочности не ниже 2х, может быть обусловлен нарушением ее геометрии и означать просчеты в конструктиве при разработке основной компоновки ИСТГ, так как температура в 180 °C и масляная среда не могут привести к возникновению её конструктивных изменений при выполнении из ВТ-22. Материал для бандажа выбирается исходя из предельной окружающей температуры в 180 °C и температуры самой машины [4], которую способно выдерживать связующее вещество. Углеродистый бандаж в данном случае представляет цилиндрическую оболочку, выполненную путем намотки углеродистой нити УМТ530-12К-ЕР, пропитанной связующим ХТ-187, допускающим работу при температурах до 180 °C³. Таким образом, при электромагнитном и тепловом расчетах ИСТГ необходимо учитывать максимально

возможную температуру на поверхности бандажа ротора в 180 °C, которую будут определять потери на трение бандажа о воздух в воздушном зазоре, потери в постоянных магнитах и температура внешней среды [10]. Прочность элементов ротора, характеризующаяся пределом текучести, коэффициентами вариации давления и запаса прочности при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возникал, с соблюдением технологичности выполнения ступицы и соблюдения температурных условий при эксплуатации магнитов будет иметь значения более 1. Критический вопрос по определению прочности остается только к бандажу ротора.

Для проверки прочности бандажа проектируемого ротора ИСТГ спроектирован испытательный ротор с максимальным диаметром по бандажу в 107 мм, диаметром по магнитам в 94 мм, диаметром ступицы ротора в 70 мм, количество полюсов — 6; магниты выполняются цельными, не шихтованными. Для компенсации разности сил, создаваемых в бандаже испытательного ротора, имеющего меньший диаметр по сравнению с проектируемым для ИСТГ на этапе испытаний, потребуется раскручивать испытательный ротор с большей скоростью.

Линейные размеры самого ИСТГ, как можно судить из конструктива камеры компрессора высокого давления АД, значительно ограничены [3] свободным пространством. Малая длина активной части ИСТГ при условии увеличения его мощности потребует повышения частоты вращения, что достаточно затруднительно при непосредственной посадке ротора на вал АД. Следовательно, остается увеличение диаметров ротора и самого ИСТГ. При увеличении диаметра вращающихся частей значительно растет значение механических напряжений в бандаже и, соответственно, возрастает толщина бандажной оболочки ротора. Следовательно, падает величина индукции в воздушном зазоре, а также возрастают потери, связанные с трением ротора о воздух в воздушном зазоре.

Величина бандажной оболочки на испытательном роторе, равная 6,5 мм, совместно с воздушным зазором в 0,4 мм напрямую будет определять величину магнитной индукции и магнитного потока в зазоре.

$$B_\delta = \frac{\Phi_{\delta 0}}{a_i l_i},$$

где B_δ — индукция в воздушном зазоре в области бандажа (Тл); $\Phi_{\delta 0}$ — поток в зазоре; τ — полюсное деление по диаметру ротора; a_i — расчетный коэффициент полюсного перекрытия; l_i — длина воздушного зазора.

В силу суммарного воздушного зазора потери в этой области становятся существенными. Высокие аэродинамические потери могут привести к увеличению температуры постоянных магнитов и падению их характеристик, что недопустимо и занесено анализируется на тепловом расчете.

С учетом этих данных выгоднее выполнять бандаж наименьшей толщины. Снизить толщину позволяет бандаж с более высоким пределом проч-

² ТУ 2257-665-11131395-2009. Композиция эпоксидная антикоррозионная марки ХТ-187. <https://e-ecolog.ru/crc/78.22.61.000.T.000012.03.10?ysclid=mq8s31bfvt490887211> (дата обращения: 01.12.2025).

³ Там же (дата обращения: 01.12.2025).

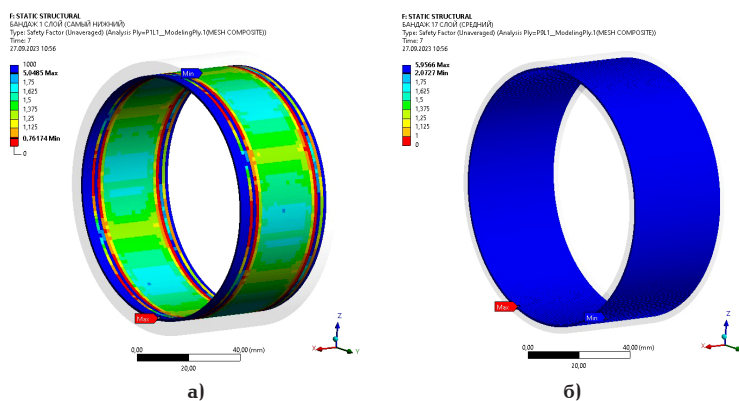


Рис. 2. Анализ прочности бандажа ротора:

а) давление на первые слои бандажа; б) итоговое давление на весь бандаж

Fig. 2. Analysis of the rotor bandage strength:

а) pressure on the first layers of the bandage;

б) total pressure on the entire bandage

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

ности. Следовательно, возникает необходимость зависимого, в первую очередь аналитического расчета электромагнитных параметров, определяемых исходным заданием над проектированием тепловых процессов, зависящих от условий эксплуатации и прочностных показателей бандажа ротора (рис. 2).

Прочность бандажной оболочки сохраняется и обеспечивается пятикратный коэффициент запаса по прочности (рис. 2б). В то же время первые слои данного бандажа подвергаются наибольшей нагрузке (рис. 2а), и, следовательно, необходимо проведение детального анализа и исследований характера возможных повреждений данных слоев [11]. Учитывая взаимное влияние приведенных факторов, а именно толщины бандажа на величину магнитной индукции (2), стоит провести отдельное исследование влияния бандажа в рассматриваемых условиях на распределение магнитного потока.

Для объективной оценки конструктивных возможностей проектируемого ИСТГ в прочностной расчет рассматриваемого преобразователя и в разрабатываемую конструкторскую документацию необходимо закладывать конкретные параметры бандажа и требования по их достижению. Сам процесс намотки бандажа на ротор состоит из нескольких этапов, которые помимо подготовительных операций включают требования соблюдения одинаковых условий на всем этапе намотки углеволоконной нити, равномерности ее пропитки, поддержание постоянной температуры как ротора, так и самого волокна со связующим, а также соблюдение условий при его отверждении в печи. Исходя из условий изготовления бандажа и условий конкретного изготовления и соблюдения технологии следует, что его параметры определяются индивидуально. Таким образом, для верификации расчетных данных требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Целью данных исследований является проверка на прочность бандажа ротора, проектируемого ИСТГ с постоянными магнитами. Испытания проводились по сокращенной программе и методике испытаний (ПМИ), направленной на определение прочности бандажа. Оснастка для разгонных испытаний бандажа (ротор) рассчитывается на статическую прочность для обеспечения ее работоспособности во всем диапазоне частот вращения



Рис. 3. Процесс намотки углеволоконного бандажа ротора

Fig. 3. Carbon fiber rotor band winding process

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

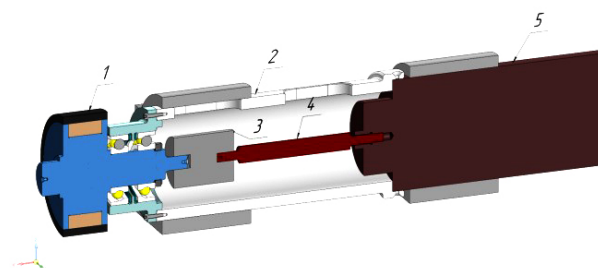


Рис. 4. Общий вид испытательного стенда

Fig. 4. General view of the test stand

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

по предусмотренному КД. Магниты приклеиваются к оснastке на клей Ана term-105. Углеволоконный бандаж в данном случае представляет цилиндрическую оболочку, выполненную путем намотки углеволоконной нити UMT530-12K-EP, пропитанной связующим ХТ-187 (рис. 3). При этом происходит приклеивание бандажа к внешней поверхности магнитов [12].

Бандаж испытывается на стенде (рис. 4). Стенд состоит из оснastки испытательной 1, корпуса 2, муфты компенсационной 3, вала шпинделя 4 и шпинделя 5. Исполнение вала шпинделя 4 игра-

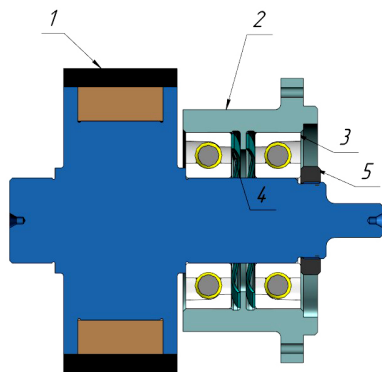


Рис. 5. Общий вид испытательной оснастки
Fig. 5. General view of the test equipment
Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

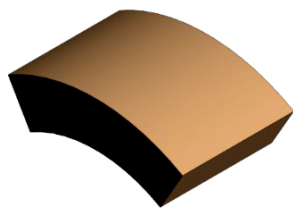


Рис. 6. Имитатор
сегментированного
постоянного магнита
эквивалентной массы
и габаритов
Fig. 6. Simulator of a
segmented permanent magnet
of equivalent mass and
dimensions
Источник / Source:
разработано авторами /
compiled by the authors

ет роль защитного слабого звена на случай непредвиденных обстоятельств, а ее форма обусловлена производственной необходимостью. Ротор испытательной оснастки приводится во вращение от высокоскоростного шпинделя 5 через вал 4 и компенсационную муфту 3. Фиксация корпуса оснастки относительно шпинделя 5 осуществляется за счет корпуса 2.

Испытательная оснастка (рис. 5) в данном случае спроектирована исходя из условий технологичности и, в свою очередь, состоит из испытательного ротора 1, корпуса 2, двух радиально-упорных подшипников 3, пружинных колец 4 и центральной стягивающей гайки 5.

Нагрузка на бандаж, сопротивление которого будет проверяться в ходе испытаний, будет создаваться за счет сегментированных постоянных магнитов (рис. 6), которые под действием центробежных сил будут стремиться растянуть бандаж изнутри, как это следует из результатов моделирования (рис. 2а).

Усилие, с которым магниты будут давить на бандаж, можно рассчитать, как

$$F_{ц} = \frac{mv^2}{R},$$

где $F_{ц}$ — центробежная сила (Н); m — масса магнита (кг); v — скорость движения (м/с); R — радиус ротора (м).

На бандаж будет оказываться усилие, равное 920 МПа на каждом полюсе.

Запас прочности можно оценить по пределу текучести:

$$k_{\sigma_T} = \frac{\sigma_T}{\sigma_A},$$

где σ_T — предел текучести материала; σ_A — действующие напряжения $k_{\sigma_T} = 1,4...2$ нормативное значение коэффициента запаса по пределу текучести.

Предел текучести бандажа из углеволокна, согласно расчетам, будет составлять 1050 МПа.

В качестве критерия оценки прочности однонаправленного слоя при послойном анализе прочности используется критерий Хилла:

$$H_{cr} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1 \sigma_2} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{1,2}}{\tau_{1,2}} \right)^2 = 1,$$

где σ_1 , σ_2 и $\tau_{1,2}$ — предельные напряжения в слое в направлении параллельно и перпендикулярно волокнам и при сдвиге в плоскости слоя соответственно.

Для оценки прочности композитов используются коэффициент запаса прочности RF , показывающий, во сколько раз допускаемые напряжения превышают действующие, и обратный коэффициент запаса прочности IRF , показывающий во сколько раз действующие напряжения меньше допускаемых.

$$RF = \frac{1}{\sqrt{H_{cr}}},$$

$$IRF = \sqrt{H_{cr}}.$$

В обоих случаях разрушение имеет место при $RF = 1$ или $IRF = 1$.

Допускаемый коэффициент запаса прочности для композитных конструкций по критерию Тсаи — Хилла [13]:

$$2 \leq [RF] \leq 3 \text{ или } 0 \leq [IRF] \leq 1.$$

В данном расчете принимается, что $[RF] \geq 1,4$.

Условный предел текучести с допуском на величину пластической деформации при нагрузке на бандаж будет означать величину наименьшего напряжения, при котором бандаж деформируется без заметного увеличения растягивающего усилия⁴. Если на эксперименте используются стальные имитаторы магнитов, а не реальные магниты, стоит учитывать и компенсировать их разность в весе вследствие различной плотности материала.

Сам образец ротора испытательной оснастки с намотанным бандажом показан на рис. 7.

Для объективности и исключения влияния дополнительных внешних факторов испытательный ротор, по аналогии с проектируемым ротором, при необходимости должен подвергаться шлифовке бандажа (для выравнивания поверхности,

⁴ ГОСТ 1497—84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 01.01.1986 г. Москва: Издательство стандартов, 1997.



Рис. 7. Ротор испытательной оснастки с намотанным бандажом

Fig. 7. Test rig rotor with wound bandage

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

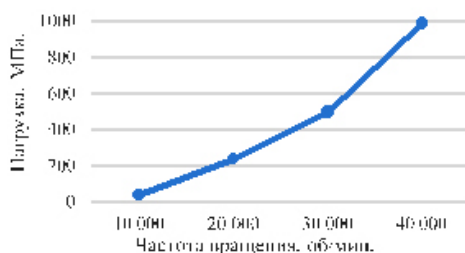


Рис. 8. Характеристика усилий в бандаже

Fig. 8. Bandage force features

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

снятия излишек материала, приведения внешнего диаметра в соответствие с КД) и балансироваться по ГОСТ ИСО 1940—1—2007⁵. Для повышения надежности балансировку нужно производить по классу точности балансировки G0,4.

Согласно разработанному ПМИ, при испытаниях ротора производится ступенчатое, по 10 000 об/мин, увеличение частоты вращения от 0 до 40 000 об/мин с остановкой на каждом этапе на 3 мин. Величина частоты вращения принималась исходя из анализа частот вращения валов АД от разных производителей и выбиралась максимальной для оценки возможности применения роторов данного типа при проектировании не только ИСТГ для АД, но и для гибридной силовой установки. Усредненная характеристика усилий в бандаже при испытаниях приведена на рис. 8.

Как видно из рис. 8, величина нагрузки возрастает при повышении частоты вращения до 920 МПа, что создается за счет собственной массы бандаж и магнитов. Характеристика не превышает предельно расчетного значения, что подтверждается успешным результатом испытаний, при котором целостность бандаж сохранилась.

В результате удачного завершения испытаний, поверхность бандаж должна сохранять свою однородность и не иметь следов повреждения бандаж. В ином случае, если не произошло непосредствен-

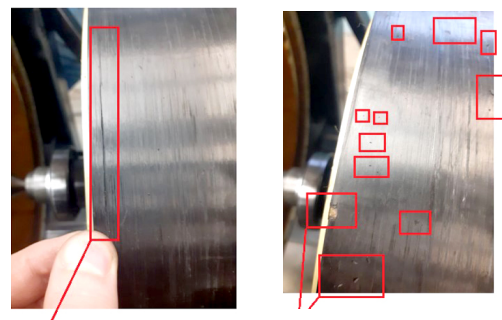


Рис. 9. Дефекты бандаж:

а) расслоение бандаж; б) разрыв волокон

Fig. 9. Bandage defects:

а) delamination of the bandage; б) fiber rupture

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

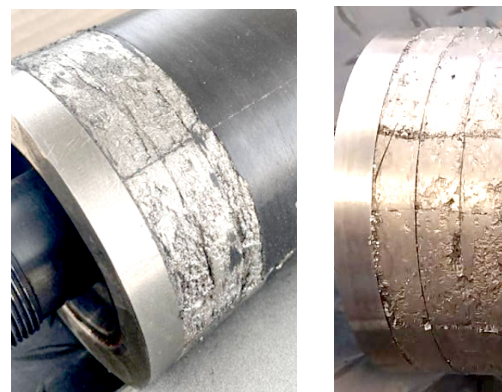


Рис. 10. Характер повреждения магнитов ротора:

а) повреждения магнитов, приклеенных к ротору; б) повреждения магнитов, не приклеенных к ротору

Fig. 10. Type of the damage of the rotor magnets:

а) damage of magnets glued to the rotor; б) damage of magnets not glued to the rotor

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

ного разрушения бандаж, возможно наблюдать наличие следующих дефектов бандаж ротора, характеризующихся расслоением бандаж (рис. 9а), что может говорить о нарушении технологического процесса намотки бандаж с мелкими дефектами отслоения, а также местным разрывом волокон (рис. 9б), указывая на начинающийся процесс разрушения бандаж [14, 15].

Это означает, что бандаж выдержал кратковременный ресурс, определенный ПМИ, но, вероятно, начался динамический процесс деградации бандажной оболочки, что необходимо исследовать отдельно.

На рис. 10а показан характер повреждения магнитов под бандажом, наблюдаемый после среза бандаж и снятия углеволоконного бандаж с постоянных магнитов, произошедших вследствие отслоения верхнего слоя магнитов; магниты при этом оставались приклеенными к ротору. Характер данных повреждений подтверждается результатами высокой механической напряженности,

⁵ SO 21940-11:2016. Mechanical vibration — Rotor balancing. Part 11: Procedures and tolerances for rotors with rigid behavior.

которую оказывают магниты на первые слои бандажа. Это может говорить о подвижности бандажа при испытаниях либо движении магнитов [15]. На рис. 10б показан характер повреждения магнитов при аналогичных условиях, но в данном случае магниты на ротор не были приклеены.

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать заключение о возможности применения углеволоконного бандажа при учете прочих внешних факторов для роторов высокоскоростных интегрированных стартер-генераторов и гибридных силовых установок. В то же время стоит учитывать конструктивные особенности проектируемых электро-механических преобразователей энергии и максимальные механические напряженности в полости бандажа.

По результатам разгонных испытаний испытательного ротора было определено, что бандаж, выполненный из UMT530-12K-EP и XT-187 толщиной 6,5 мм, выдержал нагрузки в 900 МПа, определенные по ПМИ, и может использоваться в конструкции проектируемых изделий. Необходимо учитывать требуемый запас прочности. В данном случае он составлял 1,4, что важно для определения состояния магнитов по итогу испытаний. Характер возможных повреждений магнитов под бандажом, проявляющийся после испытаний, может оказать влияние на картину поля. Учитывая, что бандаж ротора при приведенных условиях занимает 96 % суммарного воздушного зазора ИСТГ между полюсом статора и магнитом ротора и магнитная проницаемость углеволоконного бандажа отличается от воздуха, следует провести отдельное исследование по распределению магнитного потока в суммарном воздушном зазоре ИСТГ и его влиянии на величину индукции.

Финансирование / Funding

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24-29-00675 «Разработка фундаментальных научных основ высокоэффективного электро-механического преобразователя энергии с повышенными удельными характеристиками и элементов гибридной силовой установки».

The research was carried out with the support of the Russian Science Foundation as part of the scientific project No. 24-29-00675 "Development of the fundamental scientific basis for a high-efficiency electromechanical energy converter with improved specific characteristics and elements of a hybrid power plant".

Список источников / References

1. Garcia J. R., Ortega J. A., Aldabas E., Romeral L. Moving Towards a More Electric Aircraft. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2007;22(3):3–9. <https://doi.org/10.1109/MAES.2007.340500>.
2. Greenwood E., Brentner K., Rau R., Ted Gan Z. F. Challenges and opportunities for low noise electric aircraft // *International Journal of Aeroacoustics*. 2022;21(5-7):1–67. <https://doi.org/10.1177/1475472X221107377>.
3. Охотников М. В. Концепция разработки и внедрения интегрированного авиационного генератора с внешним ротором // *Электротехника*. 2024. № 12. С. 48–53. <https://doi.org/10.53891/00135860-2024-12-48-53>. EDN: FTDKUX.

Okhotnikov M. V. The concept of developing and implementing an integrated aircraft generator with an external rotor. *Elektrotehnika*. 2024;12:48–53. <https://doi.org/10.53891/00135860-2024-12-48-53>. EDN: FTDKUX. (In Russ.).

4. Дубровский В. А., Каблов Е. Н., Герасимов В. В. Испытание и исследование монокристаллических лопаток I ступени турбины двигателя ПС-90А // *Авиационная промышленность*. 1994. № 9-10. С. 11–15. EDN: ZPYXLV.

Dubrovsky V. A., Kablov E. N., Gerasimov V. V. Testing and investigation of the first stage rotor monocrystalline blades for ПС-90А turbine engine. *Aviatsionnaya Promyshlennost'*. 1994;9-10:11–15. EDN: ZPYXLV. (In Russ.).

5. Gieras J. F. Permanent magnet motor technology: design and applications. CRC Press, 2010. 612 p.

6. Вавилов В. Е., Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Каримов Р. Д. Высокотемпературные электро-механические преобразователи энергии с возможностью интеграции в авиационный двигатель. Перспективы и проблемы создания // *Авиакосмическое приборостроение*. 2015. № 9. С. 48–56. EDN: UJXBGF.

Vavilov V. E., Ismagilov F. R., Khayrullin I. Kh., Karimov R. D. High temperature electromechanical energy converters that can be integrated in to aircraft engine. Prospects and design problems. *Aerospace Instrument-Making*. 2015;9:48–56. EDN: UJXBGF. (In Russ.).

7. Rjckard R. Sectnde, Robert P. Macosko, David S. Repas Integrate Enginegenerator concept for aircraft electric secondary power national aeronautics and space administration // Washington, D. C., June 1972, NASATM X2579, pp 22.

8. Daniel I. M., Ishai O. Engineering Mechanics of Composite Materials. Oxford University Press, 2006. 462 p. ISBN 978-0-19-515097-1.

9. Труханов В. М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытаний опытных образцов. Москва: Машиностроение. 2003. 320 с.

Trukhanov V. M. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem tipa podviznykh ustanovok na etape proyektirovaniya i ispytaniy opytnykh obratsov. Moscow, 2003. 320 p. (In Russ.).

10. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D. [et al.]. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009;56(3):871–882. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2011622>.

11. Du G., Xu W., Zhu J., Huang N. Rotor Stress Analysis for High Speed Permanent Magnet Machines Considering Assembly Gap and Temperature Gradient. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2019;34(4):2276–2285. <https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2939220>.

12. Jaatinen P. Design and control of a permanent magnet bearingless machine. Lappeenranta, 2019. 73 p.

13. Гриневич Д. В., Яковлев Н. О., Славин А. В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7 (79). С. 92–111. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111>. EDN: KENLSM.

Grinevich D. V., Yakovlev N. O., Slavin A. V. The criteria of the failure of polymer matrix composites (review). *Trudy VIAM*. 2019;7(79):92–111. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111>. EDN: KENLSM. (In Russ.).

14. Lei Zu, Hui Xu, Bing Zhang, Debao Li, Huabi Wang, Bin Zi Filament-wound composite sleeves of permanent magnet motor rotors with ultra-high fiber tension, *Composite Structures*, Volume 204, 2018, pp. 525-535, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.119>.

15. Adams R. D., Cawley P. A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints. *NDT International*. 1988;21(4):208–222. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(88\)90333-1](https://doi.org/10.1016/0308-9126(88)90333-1).

Вклад авторов:

М. В. Охотников. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса в области раз-

работки интегрированных стартер-генераторов для авиационных двигателей, оценка конструктивных подходов при разработке и изготовлении ротора, анализ нагрузки бандажа и магнитов ротора при работе, оценка возможности применения композитного бандажа, анализ возможных повреждений бандажа и постоянных магнитов, формулирование выводов по результатам расчётных и экспериментальных данных, подготовка текста статьи.

Ф. Р. Исмагилов. Проведение обзора подходов при разработке стартер-генератора для авиационного двигателя, разработка конструкции ротора интегрированного стартер-генератора с сегментированными постоянными магнитами и углеволоконным бандажом, выбор материалов (титан ВТ-22, магниты КС25ДЦ, углеволокно UMT530-12К-EP со связующим ХТ-187), анализ прочности элементов ротора, анализ результатов разгонных испытаний роторов с постоянными магнитами.

В. Е. Вавилов. Разработка методики и программы испытательных исследований прочности бандажа ротора, проектирование испытательного ротора и испытательной оснастки, организация и проведение разгонных испытаний ротора ступенчатым увеличением частоты вращения от 0 до 40 000 об/мин, анализ экспериментальных данных по нагрузке на бандаж, исследование возможных дефектов бандажа (расслоение, местный разрыв волокон), формулирование технологических причин возникновения дефектов для предотвращения их повторения.

Authors' contribution:

Mikhail V. Okhotnikov. Setting the aim and objectives, analysing the problem in the development of integrated starter-generators for aircraft engines, evaluating design approaches in the development and manufacture of the rotor, analysing the load on the rotor bandage and magnets during operation, assessing the possibility of using a composite bandage, evaluating possible damage to the bandage and permanent magnets, formulating conclusions based on the results of calculated and experimental data, preparing the text of the article.

Flyur R. Ismagilov. Conducting a review of approaches to developing a starter-generator for an aircraft engine, developing the design of a rotor for an integrated starter-generator with segmented permanent magnets and a carbon fiber bandage, selecting materials (VT-22 titanium, KS25DC magnets, UMT530-12K-EP carbon fiber with XT-187 binder), analysing the strength of rotor elements, evaluating the results of acceleration tests of rotors with permanent magnets.

Vyacheslav E. Vavilov. Development of a methodology and program for testing the strength of a rotor bandage, design of a test rotor and test equipment, organization and implementation of acceleration tests of the rotor by stepwise increasing the rotation speed from 0 to 40.000 rpm, analysing experimental data on the load on the bandage, evaluating possible defects of the bandage (delamination, local rupture of fibers), formulating technological causes of defects to prevent their recurrence.

Информация об авторах:

ОХОТНИКОВ Михаил Валерьевич, кандидат технических наук, директор Передовой инженерной школы «Моторы Будущего» Уфимского университета науки и технологий (УУНиТ), г. Уфа.

SPIN-код: 1559-1370

AuthorID (РИНЦ): 1006412

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4538-598X>

AuthorID (SCOPUS): 57201555771

ResearcherID: O-5118-2017

e-mail: oxothukob@mail.ru

ИСМАГИЛОВ Флюр Рашитович, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Передовой инженерной школы «Моторы Будущего» УУНиТ, г. Уфа.

SPIN-код: 4349-7897

AuthorID (РИНЦ): 332890

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-9815>

AuthorID (SCOPUS): 56462457100

e-mail: 1010ifr@mail.ru

ВАВИЛОВ Вячеслав Евгеньевич, доктор технических наук, заместитель директора ООО «ЭТК», г. Уфа.

SPIN-код: 4825-0915

AuthorID (РИНЦ): 694504

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-6974>

AuthorID (SCOPUS): 55768854800

ResearcherID: N-9748-2017

e-mail: s2_88@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 09.12.2025; одобрена после рецензирования 27.02.2026; принята к публикации 11.06.2026.

Information about the authors:

OKHOTNIKOV Mikhail Valer'yevich, Candidate of Technical Sciences, Director of the "Motors of the Future" Advanced Engineering School, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 1559-1370

AuthorID (RSCI): 1006412

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4538-598X>

AuthorID (SCOPUS): 57201555771

ResearcherID: O-5118-2017

e-mail: oxothukob@mail.ru

ISMAGILOV Flyur Rashitovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Director of the "Motors of the Future" Advanced Engineering School, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 4349-7897

AuthorID (RSCI): 332890

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-9815>

AuthorID (SCOPUS): 56462457100

e-mail: 1010ifr@mail.ru

VAVILOV Vyacheslav Evgen'yevich, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director of ETK LLC, Ufa.

SPIN-code: 4825-0915

AuthorID (RSCI): 694504

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-6974>

AuthorID (SCOPUS): 55768854800

ResearcherID: N-9748-2017

e-mail: s2_88@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 09.12.2025; approved after reviewing 27.02.2026; accepted for publication 11.06.2026.