

УДК 621.313.8

## ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ РОТОРА И КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧАСТЕЙ ИНТЕГРИРОВАННОГО СТАРТЕРА-ГЕНЕРАТОРА

Уразбахтин Р.Р.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа,  
e-mail: urr98@mail.ru

Актуальной задачей современного авиастроения является повышение топливной эффективности и экологичности летательных аппаратов. Эта задача должна быть решена не только в долгосрочной перспективе, но и на текущем уровне развития технологий и материалов. Поэтапное совершенствование летательных аппаратов происходит в рамках концепции более электрического самолета. Единственным видом энергии на борту летательного аппарата при этом станет электрическая энергия. Ключевой технологией в концепции более электрического самолета является интегрированный стартер-генератор, позволяющий осуществлять запуск авиационного двигателя и обеспечивать электроэнергией потребителей на борту летательного аппарата. Применение интегрированного стартера-генератора позволяет отказаться от отбора пневматической и механической мощностей от авиационных двигателей при условии электрификации агрегатов авиационного двигателя и летательного аппарата. Одним из вопросов, который необходимо решить при проектировании и дальнейшем производстве интегрированного стартера-генератора, является подбор материалов для интегрированного стартера-генератора. В статье рассматривается зона размещения интегрированного стартера-генератора в двухконтурном турбореактивном двигателе. Рассматриваются различные материалы постоянных магнитов, формируются рекомендации по выбору постоянных магнитов для интегрированного стартера-генератора. Рассматриваются материалы конструктивных частей интегрированного стартера-генератора. Рассматриваются подшипниковые опоры, которые могут применяться в интегрированном стартере-генераторе, если это предусмотрено конструкцией. На основе анализа современной научно-технической литературы формируются рекомендации по выбору вышеперечисленных материалов в интегрированном стартере-генераторе, делается вывод о реализуемости интегрированного стартера-генератора на текущем уровне развития материалов и технологий.

**Ключевые слова:** более электрический самолет, авиационный двигатель, двухконтурный турбореактивный двигатель, интегрированный стартер-генератор, постоянные магниты, подшипниковые опоры

## MATERIALS SELECTION FOR THE INTEGRATED STARTER-GENERATOR ROTOR AND CONSTRUCTIVE PARTS

Urazbakhtin R.R.

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, e-mail: urr98@mail.ru

An urgent task of modern aircraft industry is to increase the aircraft fuel efficiency and environmental friendliness. This task must be solved not only in the long term, but also at the current technologies and materials development stage. The phased aircraft improvement is taking place as part of the more electric aircraft concept. In this case, the only type of energy on board the aircraft will be electrical energy. A key technology in the more electric aircraft concept is the integrated starter-generator, which allows starting the aircraft engine and providing electricity to consumers on board the aircraft. The integrated starter-generator usage makes it possible to refuse from the pneumatic and mechanical power take off from aircraft engines, provided that the aircraft engine accessories and aircraft systems are electrified. One of the issues that need to be addressed in the design and further production of an integrated starter-generator is the materials selection. The paper considers the integrated starter-generator placement area in a bypass turbojet engine. Various permanent magnets materials are considered, recommendations for the permanent magnet's choice for an integrated starter-generator are formed. The materials of the integrated starter-generator structural parts are considered. Bearing supports are considered, which can be used in an integrated starter-generator, if this is provided for by the design. Based on the analysis of modern scientific and technical literature, recommendations are formed on the choice of the above materials for an integrated starter-generator, a conclusion is made about the integrated starter-generator feasibility at the current materials and technologies development stage.

**Keywords:** more electric aircraft, aircraft engine, bypass turbojet engine, integrated starter-generator, permanent magnets, bearings

Сегодня активно ведется проектирование интегрированных стартеров-генераторов (ИСГ), выполняющих функции запуска авиационного двигателя (АД) и генерирования электроэнергии в бортовую сеть летательного аппарата (ЛА). ИСГ для различных АД проектируются в работах [1–4]. Основным недостатком этих работ является недостаточное рассмотрение взаимного влияния параметров ИСГ и АД. Например, размеры ИСГ выбираются исходя из размеров об-

ласти его размещения в АД, упоминается возможное воздействие на него высоких температур. При этом не рассматриваются колебания валов АД, особенности пуска АД, равенство ресурсов ИСГ и АД и т.д. В связи с этим существует необходимость формирования подходов к проектированию ИСГ, учитывающих все особенности его расположения непосредственно внутри АД.

Научно-исследовательским коллективом ФГБОУ ВО УГАТУ проектируется ИСГ

для двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД). ИСГ представляет собой сложное техническое устройство, задача обеспечения отказоустойчивости которого является комплексной. В статье рассматривается выбор материалов постоянных магнитов, конструктивных частей и подшипников опор ИСГ.

В связи с большим объемом информации, касающейся выбора материалов для ИСГ или обеспечения их температурной устойчивости, выбор материалов для ИСГ производится по двум большим группам. В настоящей работе рассматриваются материалы для ИСГ, относящиеся к группе ротора – материалы постоянных магнитов (ПМ), материалы конструктивных частей и подшипниковые опоры для ИСГ.

Целью исследования является выявление особенностей размещения ИСГ непосредственно в ТРДД, обусловленных высокими температурами в области размещения ИСГ, и выбор материалов, которые могут применяться при проектировании и дальнейшем производстве ИСГ ТРДД на основе анализа современной научно-технической литературы.

#### Материалы и методы исследования

Рассмотрим конструкцию ТРДД. Упрощенный вид ТРДД в разрезе с распределением температур изображен на рис. 1. ИСГ размещается в зоне 2 согласно рис. 1.

Температуры, приведенные на рис. 1, являются ориентировочными и приведены для оценки параметров окружающей ТРДД среды. Точное определение температур возможно только для конкретной модели ТРДД. Для каждой модели ТРДД температуры в различных зонах будут отличаться.

При проведении предварительных расчетов на этапе проектирования ИСГ

для определения температуры в зоне его размещения можно воспользоваться формулой

$$T_{03is} = T_{02} \cdot P_K^{\frac{k-1}{k}}, \quad (1)$$

где  $P_K$  – степень повышения давления в компрессоре;  $k$  – показатель адиабаты.

Показатель адиабаты обычно принимают  $k = 1,4$ , а степень повышения давления  $P_K$  в компрессоре низкого давления (КНД) варьируется от 1,5 до 6 [5, 6]. Для некоторых ТРДД давление в КНД может повышаться в 8 раз. Температура на входе в ТРДД принимается  $T_{02} = 288,15K$  исходя из того, что расчет ТРДД производится при условиях старта ЛА в нормальных атмосферных условиях.

На ИСГ длительно может действовать температура около  $350^\circ C$ , что накладывает серьезные ограничения на материалы, применяющиеся в ИСГ. Поэтому требуется подобрать материалы, которые могут функционировать длительное время под воздействием высокой температуры, и разработать методы, позволяющие применять материалы.

ИСГ представляет собой бесконтактную электрическую машину (ЭМ), которая способна работать как в двигательном, так и в генераторном режиме. Исходя из того, что ИСГ представляет собой ЭМ с ПМ, решается задача выбора материалов или обеспечения температурной устойчивости материалов для ИСГ.

Облик пакета ротора ИСГ определяется исходя из того, что ИСГ представляет собой ЭМ с ПМ. Пакет ротора ИСГ крепится непосредственно на РВД ТРДД. Пакет ротора ИСГ с поверхностным монтажом ПМ представлен на рис. 2, а. Такой пакет ротора состоит из магнитопровода, ПМ и бандажа.

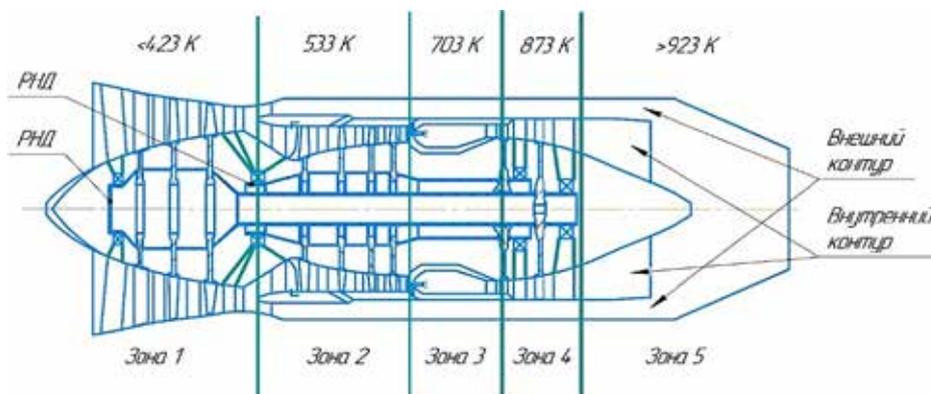


Рис. 1. Конструкция ТРДД с распределением температур:  
РНД – ротор низкого давления, РВД – ротор высокого давления

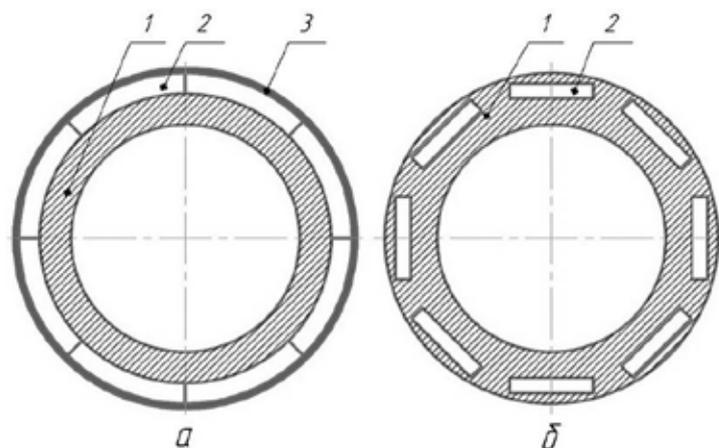


Рис. 2. Пакет ротора ИСГ: 1 – магнитопровод, 2 – ПМ, 3 – бандаж

Пакет ротора ИСГ с инкорпорированными ПМ представлен на рис. 2, б. Такой пакет ротора состоит только из магнитопровода и ПМ. Возможные конструкции пакета ротора ИСГ представлены на рис. 2.

Выполнение магнитопровода будет рассмотрено подробнее в будущей работе автора. В настоящей работе отметим, что магнитопровод необходим для обеспечения замыкания магнитного потока и обеспечения механической прочности ротора ИСГ. ПМ образуют постоянный магнитный поток. Бандаж необходим в случае поверхностного монтажа ПМ, чтобы обеспечить их надежное крепление на роторе. В случае поверхностного монтажа ПМ на них действуют центробежные силы, под действием которых они могут оторваться от магнитопровода. Соответственно, бандаж предотвращает отрывание ПМ от магнитопровода. В конструкции ротора ИСГ с инкорпорированными ПМ фиксируются за счет конструкции магнитопровода, в связи с чем бандаж не применяется.

Группа материалов ротора ИСГ формируется из материалов магнитопровода пакета ротора ИСГ, ПМ, бандажа, материалов конструктивных частей (например, стопорных шайб). Дополнительно в группе материалов ротора рассматриваются подшипниковые опоры, которые могут подразумеваться конструкцией ИСГ. Выполнение магнитопровода будет рассмотрено в будущей работе в связи с ограниченностью объема статьи.

Далее в статье решается задача выбора или обеспечения работоспособности материалов для ИСГ.

#### Постоянные магниты для ИСГ

Характеристикой ПМ, позволяющей оценить их способность функционировать при высоких температурах, является темпе-

ратура Кюри. ПМ могут функционировать только при температурах ниже температуры Кюри, при этом по мере приближения к температуре Кюри свойства ПМ ухудшаются. Для ИСГ необходимо выбирать ПМ, температура Кюри которых выше 300 °С. При этом необходимо учитывать, что ПМ будут нагреваться не только от окружающей среды, но и от наводящихся в них вихревых токов. Охлаждение ПМ ИСГ затруднено, так как они крепятся на роторе высокого давления (РВД) ТРДД.

Свойства ПМ с изменением температуры могут меняться двумя способами: единоразово или динамически [4]. Разовое изменение может произойти при уменьшении коэрцитивной силы, обусловленном ростом температуры, или из-за структурных изменений материала ПМ (окисления, увеличения размера зерен). В первом случае свойства ПМ можно восстановить за счет перемагничивания ПМ, во втором случае свойства ПМ ухудшаются безвозвратно.

Динамические изменения свойств ПМ описываются коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta$  для остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы соответственно. За начальную температуру ПМ примем температуру  $T_1$ , за конечную температуру – температуру  $T_2$ . Тогда коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  при изменении температуры от  $T_1$  до  $T_2$  определяются как

$$\alpha = \frac{B_r(T_2) - B_r(T_1)}{B_r(T_1) \cdot (T_2 - T_1)},$$

$$\beta = \frac{H_c(T_2) - H_c(T_1)}{H_c(T_1) \cdot (T_2 - T_1)},$$

где  $B_r$  – остаточная магнитная индукция при соответствующей температуре;  $H_c$  – коэрцитивная сила ПМ при соответствующей температуре.

## Характеристики высокотемпературных ПМ для ИСГ [7–10]

Марка ПМ	Остаточная индукция $B_r$ , Тл, не менее	Коэрцитивная сила по индукции, $H_{cb}$ , кА/м, не менее	Коэрцитивная сила по намагниченности, $H_{cp}$ , кА/м, не менее	Максимальная рабочая температура, °С
КС 25 ДЦ	0,92	617	1440	600
N35АН	1,17	860	2785	240
S32C	1,12	820	2070	350
ЮНДКТ5БА	1,06	119	–	550
S26Н	1	716	1989	330

При проектировании ИСГ необходимо предупредить возможность возникновения разового изменения свойств ПМ и учитывать динамическое изменение свойств ПМ на различных режимах работы ИСГ и ТРДД.

Наиболее высокими характеристиками обладают ПМ на основе сплава NdFeB, но они обладают невысокой температурой Кюри (до 310 °С). Для высокотемпературных применений активно исследуются ПМ на основе сплава SmCo, температура Кюри которых достигает до 900 °С. Также перспективным является применение в ИСГ ПМ на основе сплавов на основе сплава Sm-Co-Fe-Cu-Zr. В таблице приводятся свойства ПМ, потенциально претендующих на роль ПМ ИСГ.

Для ПМ, функционирующих при высоких температурах, возможно повышение температурной устойчивости за счет применения специальных покрытий, выполненных из никеля или вольфрама [11]. При высоких температурах происходит ускоренное окисление ПМ, что может приводить к образованию трещин на ПМ. Для роторов ИСГ с поверхностным монтажом ПМ эта проблема может быть решена путем применения бандажа. Здесь необходимо учитывать, что применение металлического бандажа приведет к повышению потерь на вихревые токи, а бандажи из композитных материалов менее устойчивы к длительному воздействию высоких температур. Коэффициент теплового расширения бандажа должен быть приблизительно равен коэффициенту теплового расширения ПМ.

*Материалы конструктивных частей ИСГ*

Как любая ЭМ, ИСГ содержит в своей конструкции конструктивные и активные части. Конструктивные части участвуют в формировании финального облика ИСГ, участвуют в обеспечении его работы, но при этом не принимают непосредственного участия в процессах преобразования электрической энергии. Конструктивными частями ИСГ могут являться корпус, втул-

ка под пакет ротора, каркасы для крепления трубопроводов системы охлаждения и т.д.

Температуры в некоторых областях ТРДД составляют 800–900 °С, при этом отдельные элементы конструкции ТРДД способны длительное время функционировать при этих температурах. Для выполнения конструктивных элементов ТРДД существует ряд жаропрочных сталей и высокотемпературных сталей.

Для изготовления роторов ТРДД могут применяться, например, стали перлитного класса 20Х3МВФ и 26ХН3М2ФАА, характеризующиеся высокой температурной стабильностью при длительной эксплуатации. Для изготовления крепежа в ТРДД применяются релаксационностойкие стали, например, марок 25Х2МФА и 20Х1М1Ф1ТР. Для изготовления компрессоров ТРДД могут применяться коррозионностойкие стали, например, 14Х17Н2 и 20Х13.

Очевидно, что температуры конструктивных частей ИСГ не превышают температуры конструктивных частей ТРДД. Поэтому сортамент современных материалов позволяет выбрать стали, удовлетворяющие требованиям к конструктивным частям ИСГ.

*Подшипниковые опоры ИСГ*

Задача выбора подшипниковых опор, обладающих высокой температурной стабильностью, может быть неактуальна при проектировании ИСГ, так как возможно конструктивное исполнение ИСГ на РВД ТРДД, при котором ИСГ не будет иметь собственных подшипниковых опор. Ранее было отмечено, что роторы ТРДД подвержены колебаниям. Расположение пакета ротора ИСГ на РВД ТРДД теоретически может усилить колебания РВД. Соответственно, для стабилизации РВД в месте размещения ИСГ может потребоваться введение дополнительных подшипниковых опор.

С учетом высоких температур в зоне размещения ИСГ перспективным является применение керамических подшипников.

Для обеспечения высокой температурной устойчивости детали керамических подшипников могут покрываться, например, фосфатом марганца. Для подшипниковых опор, функционирующих при высоких температурах, также перспективно применение твердой смазки на основе, например, дисульфида молибдена.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты проведенного исследования показали, что для ИСГ возможно подобрать, при необходимости, подшипниковые опоры, которые будут функционировать при длительном воздействии на них высоких температур. Также результаты проведенного исследования показали, что существуют материалы, из которых возможно изготовить конструктивные части ИСГ.

С ПМ ситуация является более сложной. С одной стороны, существуют ПМ, способные функционировать при температурах до 650°C. С другой стороны, такие ПМ обладают невысокими характеристиками, что заставляет проектировщиков рассматривать магниты SmCo на роль ПМ для ИСГ. При этом необходимо решать задачу охлаждения ПМ ИСГ с учетом их расположения на РВД ТРДД. Разработка ПМ, устойчивых к высоким температурам и сохраняющих при этом высокие характеристики, является одной из важных задач современного материаловедения. Также перспективным является улучшение характеристик ПМ на основе сплава Sm-Co-Fe-Cu-Zr.

Выбор ПМ – сложная инженерная задача для исследователей, вовлеченных в проектирование ИСГ, так как при ее решении надо учитывать необходимость исключения возможности единоразового изменения свойств ПМ, динамическое изменение свойств ПМ и решить вопрос охлаждения ПМ.

#### Заключение

Реализация ИСГ с точки зрения ПМ, материалов конструктивных частей ИСГ и подшипниковых опор возможна на современном этапе развития технологий. При этом совершенствование свойств ПМ приведет к повышению эффективности ИСГ, что в перспективе дополнительно повысит целесообразность его разработки.

В следующей части статьи автором будет рассматриваться выбор материалов для проектирования и дальнейшего изготовления

активных частей ИСГ. Также будет предложена конструкция обмотки для ИСГ ТРДД.

Результаты исследования в области ПМ для ИСГ показали, что важной инженерной задачей при проектировании ИСГ является проектирование системы охлаждения ИСГ. Эта задача усложняется тем, что пакет ротора ИСГ расположен непосредственно на РВД ТРДД, а возможности жидкостного охлаждения ограничены резервуарами с жидкостями на борту ЛА. Поэтому в будущих работах автора будет решаться задача проектирования системы охлаждения ИСГ ТРДД.

*Работа выполнена в рамках гранта в форме субсидий в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых, тема «АП-ЭМ-02-21-ГБ».*

#### Список литературы

1. Bhangu B.S., Rajashekara K. Electric Starter Generators: Their Integration into Gas Turbine Engines. IEEE Industry Applications Magazine. 2014. Vol. 20. No. 2. P. 14–22.
2. Zhang G.H., Ma C.Q., Sun H.Y., Zhang L.F., Liu L., Wang K. Optimization design of interior PM starter-generator. 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2017. P. 1–5.
3. Bojoi R., Cavagnino A., Tenconi A., Vaschetto S. Control of Shaft-Line-Embedded Multiphase Starter / Generator for Aero-Engine. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. No. 1. P. 641–652.
4. Cavagnino A., Li Z., Tenconi A., Vaschetto S. Integrated Generator for More Electric Engine: Design and Testing of a Scaled-Size Prototype. IEEE Transactions on Industry Applications. 2013. Vol. 49. No. 5. P. 2034–2043.
5. Кулагин В.В., Кузьмичев В.С. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Инновационное машиностроение, 2013. 336 с.
6. Мамедов Б.Ш., Штанько П.К. Расчет степени повышения давления осевых компрессоров воздушно-реактивных двигателей // Технологический аудит и резервы производства, 2016. № 2 (1). С. 13–18.
7. ООО «ПОЗ-Прогресс». Продукция. Постоянные магниты. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.poz-progress.ru/index.php?page=products&pid=15> (дата обращения: 28.07.2022).
8. ООО «ПОЗ-Прогресс» / XVIII Международная конференция по постоянным магнитам // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 2. С. 16–17.
9. ООО «АМТ&С». Постоянные магниты промышленного применения. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.amtc.ru/production/magnit/> (дата обращения: 28.07.2022).
10. НПО «ЭРГА». Продукция. Постоянные магниты. Самарий-кобальтовые магниты SmCo. [Электронный ресурс]. URL: <https://erga.ru/catalog/postoyannye-magnity/samariy-kobaltovye-magnity-smco/> (дата обращения: 28.07.2022).
11. Chen C., Walmer M., Liu S. Thermal stability and the effectiveness of coatings for sm-co 2: 17 high-temperature magnets at temperatures up to 550c. IEEE Transactions on Magnetics. 2004. Vol. 40. No 4. P. 2928–2930.