

Научная статья

УДК 621.45

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185678>

EDN: <https://www.elibrary.ru/FOZKLP>



Анализ теплового состояния стартер-генератора, установленного на вал ротора газотурбинного двигателя

Артур Дмитриевич Кондряков^{1✉}, Михаил Константинович Леонтьев²

^{1, 2} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация

¹ Опытнo-конструкторское бюро им. А. Люльки – филиал ОДК-Уфимского моторостроительного
производственного объединения, Москва, Российская Федерация

¹ tetra1337@mail.ru ✉

² lemk@alfatran.com

Аннотация. Представлена работа по анализу теплового состояния стартер-генератора, установленного на вал газогенератора газотурбинного двигателя. Рассмотрены различные варианты систем охлаждения электрической части стартер-генератора. На основе анализа выделены приоритетные направления в области проектирования систем охлаждения и маслосистем газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: вал ротора газотурбинного двигателя, удельные показатели электрических машин, конструкция интегрированного стартер-генератора, электрическая машина с постоянными магнитами, тепловое состояние стартер-генератора

Для цитирования: Кондряков А.Д., Леонтьев М.К. Анализ теплового состояния стартер-генератора, установленного на вал ротора газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 3. С. 176–184. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185678>

Original article

Thermal State Analysis of the Starter-Generator Installed on the Rotor Shaft Gas Turbine Engine

Artur D. Kondryakov^{1✉}, Mikhail K. Leont'ev²

^{1, 2} Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

¹ A. Lyulka Experimental Design Bureau - branch of the UEC-Ufa Engine-building Production Association,
Moscow, Russian Federation

¹ tetra1337@mail.ru ✉

² lemk@alfatran.com

Abstract

For the engine new functionality creating and improving its specific characteristics, the priority trend consists in its electrification by mounting the lager, compared to the prototype, size on the starter-generator gearboxes into the inner engine crankcase housing on the high-frequency rotor under conditions of higher temperatures, vibrations and other external disturbances.

A structurally integrated starter-generator with permanent magnets and an external version of rotor has a mixed structure that includes elements made of traditional aviation structural materials and elements peculiar to electrical engineering with appropriate special materials. The optimal location of the electric motor herewith is the engine internal oil casing.

A 3D geometric model of the starter generator mounting in the internal area of a gas turbine engine generator was developed. The authors identified the heat sources, which were the electric motor eigenheat generation, heat exchange with adjacent structural parts, and heating from the engine flow part. CAE models were developed in both flat and sector settings to analyze the thermal state. Parameters of the aviation transmission oil were employed as the working fluid. The assessment was performed herewith for the two cases of the system inlet temperature, depending on the oil system design, namely the initial one with the electric pumps addition and the autonomous one.

Distribution of the Temperature fields across the unit parts and its encirclement was obtained, and the graphs of the oil outlet temperature dependence on its required flow rate were plotted. The following conclusions can be drawn based on the computational results:

- 1) When electric motors thermal condition computing, It is advisable to run computations in the sector;
- 2) It is necessary to employ an autonomous oil system to achieve a satisfactory temperature condition, which is possible with synthesis of the critical technology of the third circuit of the adaptive engine with the additional heat exchangers application.

Additionally, it is advisable to consider the application of turbo coolers as a part of the power plant for cooling the circuit of the electrical part.

Keywords: rotor shaft of a gas turbine engine, electric motors specific indices, the integrated starter-generator design, electric motor with permanent magnets, the starter-generator thermal state

For citation: Kondryakov A.D., Leont'ev M.K. Thermal State Analysis of the Starter-Generator Installed on the Rotor Shaft Gas Turbine Engine. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(3):176–184. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185678>

List of figures

Fig. 1. Cross-section view of the electrical motor with permanent magnets

Fig. 2. Electric motor placement in the gas-generator inlet

Fig. 3. CAE-model for the first stage assessment

Fig. 4. CAE-model for the second stage assessment

Fig. 5. Temperature field of the design by the first stage computational result

Fig. 6. The coolant consumption graph by the first stage computational result

Fig. 7. Temperature field of the sector by the second stage computational result

Fig. 8. The coolant consumption graph by the second stage computational result

Введение

Одним из перспективных направлений развития авиационной техники является повышение уровня удельных показателей электрических машин (кВт/кг) и выдаваемой авиационными двигателями электроэнергии на борт в рамках концепций по созданию более электрических силовых установок, таких как NGAD и Tempest [1, 2], вследствие чего улучшаются общие параметры двигателя и планера, увеличивается их взаимная интеграция. Ключевой особенностью в рамках данных концепций является объединение генераторов различного типа тока и стартера в единый агрегат, а также его интеграция во внутреннюю полость авиационного двигателя на вал ротора, в частности в конструкции двигателя Rolls-Royce применяется совмещенная с планетарным редуктором электрическая машина, которая дополнительно позволяет обеспечивать энергообмен между валами и генерировать большее

количество вырабатываемой мощности в сравнении с традиционным конструктивным обликом [3].

При размещении встроенного электрического генератора во внутренней полости авиационного двигателя ухудшаются его условия эксплуатации в виду повышенных значений температур, что в отрицательном ключе влияет на свойства электро-технических и конструкционных материалов. Обеспечение удовлетворительного температурного состояния интегрированной электрической машины является важной задачей в части обеспечения минимального расхода хладагента и продиктованных нормативной документации запасов прочности, что в конечном счете влияет на удельные показатели электрических машин и авиационного двигателя [4].

В статье рассмотрены вопросы анализа теплового состояния встроенной в демонстратор двигателя электрической машины на УГТ5 в двух постанов-

ках: в плоскости и секторе. Пошагово рассмотрены все этапы выполнения расчета: создание CAD- и CAE-моделей, задание граничных условий, создание сетки, вывод результатов. В качестве граничных условий рассмотрены различные значения расходов хладагента на входе в элементы конструкции в зависимости от конструкции маслосистемы двигателя. Значения полученных результатов позволяют задать вектор направления развития конструктивного облика адаптивного газотурбинного двигателя нового поколения, который предназначен для использования в составе летательного аппарата с высокими значениями чисел Маха до $M_{\Pi} = 3$, а также сформировать требования по возможному использованию дополненных функций возможного канала третьего контура.

Конструкция стартера-генератора, его монтажа и системы охлаждения

В рамках современных разработок в мире по интеграции стартера-генератора на коробки приводов и внутрь газотурбинного двигателя широкое распространение получили бесконтактные электрические машины с постоянными магнитами. При этом предполагается совместная работа данных машин с полупроводниковым преобразователем. Ключевой особенностью бесконтактных электрических машин является отсутствие щеточного узла и наличие возможности регулировки выходных параметров стартера-генератора в широком диапазоне [1]. Поперечный разрез электрической машины с постоянными магнитами представлен на рис. 1.

Статор агрегата представляет собой цилиндрический пруток с центральным отверстием, который выполнен из легированной стали с добавлением кремния, что обеспечивает улучшенные магнитные свойства. Пруток содержит продольные сквозные прорезы с уложенными в них медными электрическими обмотками, которые изолированы от касания о стальной стакан в осевом и радиаль-

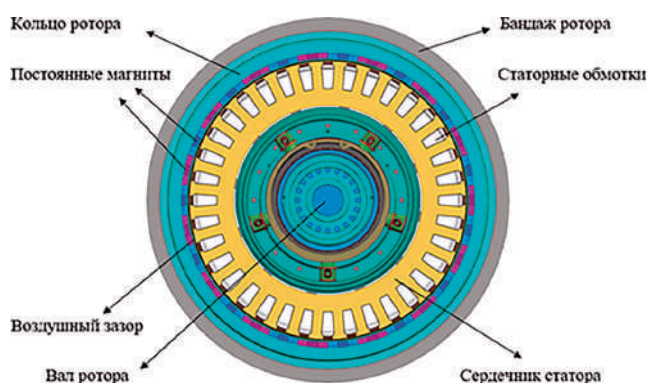


Рис. 1. Поперечный разрез электрической машины с постоянными магнитами

ном направлении тонкими защитными электроизоляционными пластинами. При этом сами прорезы прутка заполнены не полностью, а имеют некоторые пустоты, которые впоследствии можно использовать как дополнительный объем для прокачки хладагента. Также для прокачки хладагента возможно использовать зазор между внутренней или наружной поверхностями стального прутка и корпусом подшипников ротора электрической машины в зависимости от внутреннего или наружного расположения ротора [5].

Размещение электрической машины во внутренней полости газогенератора возможно выполнить в нескольких местах: на роторе высокого давления, в районе диска первой ступени компрессора, в масляной полости промежуточного корпуса, в районе входного кока, во внутреннем корпусе камеры сгорания, опоры турбины. Оптимальным местом расположения стартера-генератора исходной конструкции является внутренняя масляная полость возле промежуточного корпуса компрессора, где обеспечиваются все необходимые температурные условия [6].

Для анализа теплового состояния в составе газогенератора на УГТ5 в программном комплексе “Siemens NX” была создана электронная геометрическая модель монтажа масштабируемого образца электрической машины в оптимальном месте размещения. 3D-компоновка размещения электрической машины в коке газогенератора перед промежуточным корпусом представлена на рис. 2.

Тепловые источники, воздействующие на электрическую машину, можно разделить следующим образом: тепловыделение, обусловленное КПД электрической машины, теплообмен со смежными деталями газогенератора, подогрев от проточной части двигателя воздухом с параметрами за вентилятором. Необходимо учитывать мгновенный нагрев электрической части стартера-генератора при подаче напряжения, а также постепенный выход на номинальный режим работы приводных агрегатов масляной системы охлаждения [7]. Для поддержания удовлетворительного температурного состояния электрической машины необходимо

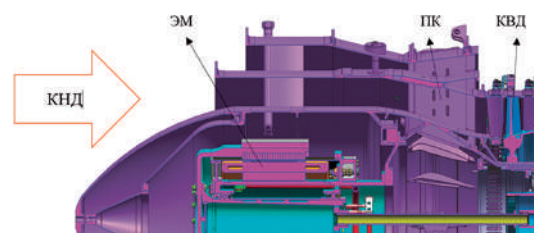


Рис. 2. Компоновка размещения электрической машины в коке газогенератора

использовать электроприводные насосы, которые смогут обеспечить заданный расход хладагента на любом режиме работы двигателя. Для использования электроприводных насосов подачи и откачки хладагента в системе охлаждения возможно два направления:

1) доработка штатной масляной системы газотурбинного двигателя с добавлением электроприводных насосов и использованием штатного маслобака и теплообменника;

2) разработка отдельной автономной системы охлаждения с электроприводными агрегатами и собственными маслобаком и теплообменником [8].

Анализ теплового состояния стартера-генератора

Для оценки теплового состояния интегрированного на вал ротора автономного модуля стартера-генератора было использовано ПО ANSYS Steady-state thermal. Для оценки потребного расхода хладагента для охлаждения электрической части стартера-генератора, исключению перегрева и потерь свойств магнитов, корректировке конструкции и проектированию системы охлаждения, а также создания будущей методики по расчету теплового состояния будущих электрических машин было принято решение выполнить расчеты в два этапа [9].

Первый этап выполнялся в плоскости. Исходная 3D-модель была экспортирована в 2D-чертеж, геометрия которого использовалась для создания тепловой расчетной модели. При этом геометрия была разделена на две группы: группа неподвижных корпусов в непосредственной близости от проточной части, группа ротора и статора. Для создания САЕ-модели использовался метод триангуляции [10].

В качестве граничных условий использовались перечисленные ранее тепловые источники, тип теплообмена, толщины деталей, материалы элементов, их свойства, температура проточной части на входе газогенератора с условиями подогрева за вентилятором ТРДД, тип вещества в каждой замкнутой корпусной полости, ее теплоемкость, тепловыделение электрической части стартера-генератора [11]. САЕ-модель оценочного анализа теплового состояния стартера-генератора представлена на рис. 3.

Согласно САЕ-модели видна неравномерность конструкции и наблюдается цикличность элементов. Для выполнения второго этапа расчета было принято решение выполнять оценку в секторальной геометрии. Из исходной САД-модели был вырезан сектор с электротехническим прутком статора, который включает в себя три паз с электрическими обмотками. Сектор был разбит на элементы,

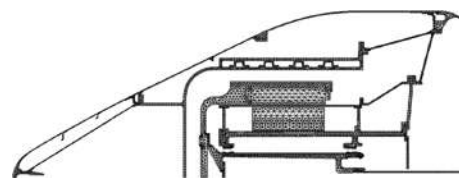


Рис. 3. САЕ-модель оценки первого этапа

каждый из которых соответствует отдельной детали конструкции [12].

При создании САЕ-модели использовался смешанный метод создания сеток. Для деталей простой геометрии использовалась структурированная гексаэдрическая сетка. Для деталей сложной геометрии использовалась неструктурированная тетраэдрическая сетка с локальными уменьшениями размеров элементов и увеличением их количества в областях сложной геометрии. Всего сетка состояла из 378012 элементов с 1293802 узлами. В качестве граничных условий использовались аналогичные первому этапу расчета параметры, но при этом были более широко заданы условия для областей с пазами электротехнического стакана, в которые уложены медные обмотки, и внутренней тепловой рубашки данного стакана [13]. Конечно-элементная модель поверочного анализа теплового состояния электрической машины представлена на рис. 4.

Для совершенствования удельной мощности электрической машины (кВт/кг) и обеспечения работы при удовлетворительных температурах необходимо выбрать предпочтительный тип хладагента. Так как теплоемкость воздуха гораздо ниже жидкостных хладагентов, охлаждение жидкостью является предпочтительным. Размещение электрической машины в масляной полости промежуточного корпуса непосредственно указывает на предпочтение в использовании в качестве хладагента масло, используемое для охлаждения и смазки подшипников. Жидкостные и газовые теплоноси-

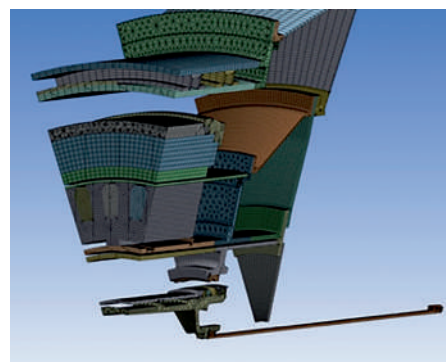


Рис. 4. САЕ-модель оценки второго этапа

тели, такие как керосин, гелий и водород обладают лучшей теплоемкостью, но использование их для прокачки в составе конструкции газотурбинного двигателя приводит к усложнению конструкции и увеличению массы, ухудшению эксплуатационной технологичности, удорожанию разработки [14].

При задании граничных условий для двух этапов расчетов использовались параметры авиационного трансмиссионного масла. Оценка выполнялась для двух случаев маслосистем: штатной доработанной и автономной. При использовании автономной системы масло находится в баке при комнатной температуре. При использовании штатной доработанной системы температура масла на входе в несколько раз превышает комнатную температуру. Проходя через теплообменники масло охлаждается незначительно, снижая свою температуру всего кратно. Отличия между разными температурами на входе в электрические обмотки стартера-генератора в зависимости от выбора типа системы охлаждения значительно определяет будущий облик более электрического двигателя [15].

Результаты анализа и рекомендации для проектирования более электрических двигателей

По результатам первого этапа расчета было получено плоское распределение температуры по деталям разработанной конструкции для двух вариантов системы охлаждения. Как видно из распределения температурных полей, представленных на рис. 5, втулочные корпуса проточной части сильно нагреты из-за влияния подогретого воздуха с параметрами за вентилятором.

Силовой корпус между обечайками проточной части и стартера-генератором изолирует температурное влияние подогретого и сжатого воздуха. Положительно сказывается наличие теплового рубашки между внутренним корпусом статора электрической машины и корпусом опор ротора. Благоприятное влияние оказывает наличие наружного экрана корпуса статора стартера-генератора, который обладает волокнистой структурой, что обеспечивает магнитное влияние самарий-кобальтовых магнитов

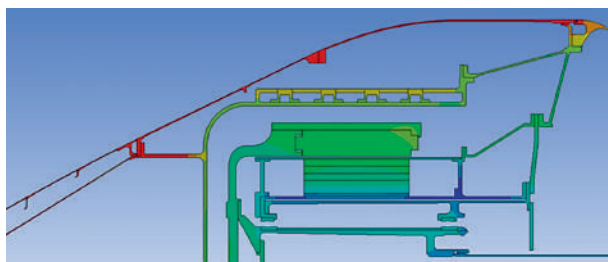


Рис. 5. Температурное поле конструкции по результатам первого этапа расчета

на электрические обмотки. Экран выполнен из композиционных материалов и обладает низкой теплопроводностью, что способствует дополнительному зонированию роторной части электрической машины от статорной [16].

Выполнив усреднение полученных значений температур деталей статора электрической машины по результатам оценочного расчета для двух вариантов систем охлаждения возможно построить график зависимости расхода хладагента от температурных условий на входе в медные обмотки стартера-генератора и выходе из них по формуле:

$$Q = c \cdot m \cdot dT,$$

где Q — количество выделенного тепла; c — теплоемкость хладагента; m — масса хладагента; dT — изменение температуры теплоносителя (разница температур на входе и выходе из системы охлаждения).

Чтобы придать данной формуле расходную характеристику, нужно левую и правую части формулы разделить на время. Тогда слева от знака равенства будет мощность, а справа вместо массы — расход теплоносителя:

— для массового расхода (кг/с)

$$M = Q / (c \cdot dT);$$

— для объемного расхода (м³/с) [17]

$$G = Q / (c \cdot \rho \cdot dT).$$

График зависимости расхода хладагента от температурных условий на входе в медные обмотки стартера-генератора и выходе из них по результатам оценочного расчета представлен на рис. 6.

При построении графика по оси X отложим температуру хладагента на входе в активную часть статора электрической машины в зависимости от системы охлаждения в порядке убывания, где самое левое значение является максимальным и соответствует температуре масла на выходе из теплообменника штатной доработанной электроприводными агрегатами маслосистеме газотурбинного двигателя, а самое правое значение соответствует минимальной комнатной температуре, которая

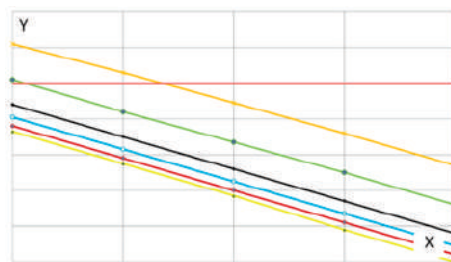


Рис. 6. График зависимости расхода хладагента по результатам первого этапа расчета

является температурой хладагента на входе в автономную систему охлаждения. По оси Y отложим температуру на выходе из системы охлаждения, где минимальное нижнее значение соответствует четырехкратной комнатной температуре, а самое максимальное верхнее соответственно 11-кратной комнатной температуре. При этом горизонтальная красная линия обозначает граничную температуру, которая соответствует коксованию масла и является ограничительной для изоляционных пластин внутри пазов электротехнического стакана. Точки на расходных кривых обозначают температуру на выходе из электрических обмоток статора стартера-генератора, а сами кривые стоят в таком порядке, что самая верхняя прямая соответствует расходу в половину стандартного ведра масла в минуту, а самая нижняя кривая соответствует расходу в четыре стандартных ведра масла в минуту. По результатам первого этапа расчета температурное состояние роторных магнитов остается практически неизменным при любом варианте системы охлаждения и составляет в 5,5 раз меньшее значение, чем средняя температура Кюри для самарий-кобальтовых сплавов [18].

Температурное поле сектора САЕ-модели электрической машины по результатам второго этапа расчета при минимальном расходе в половину стандартного ведра масла в минуту для автономной системы охлаждения представлен на рис. 7.

По результатам второго этапа расчета было получено распределение полей температуры с учетом внутренних конструктивных особенностей для

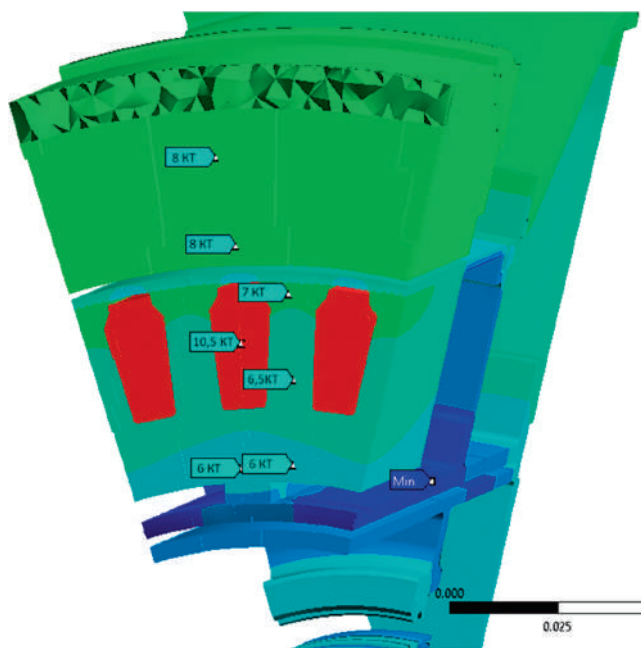


Рис. 7. Температурное поле сектора по результатам второго этапа расчета

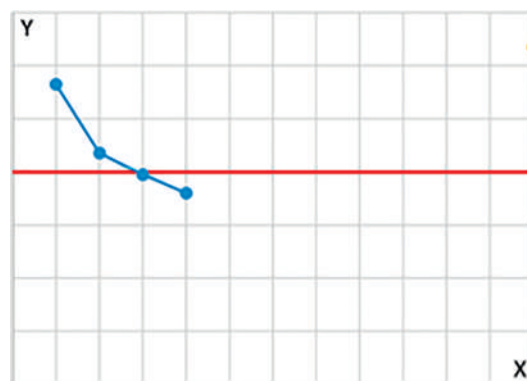


Рис. 8. График зависимости расхода хладагента по результатам второго этапа расчета

двух вариантов системы охлаждения. Выполнив аналогичное первому этапу усреднение полученных значений температурных полей деталей статора электрической машины по результатам поверочного расчета для двух вариантов систем охлаждения возможно построить график зависимости расхода хладагента от температурных условий на входе в медные обмотки стартера-генератора и выходе из них. График зависимости расхода хладагента от температурных условий на входе в медные обмотки стартера-генератора и выходе из них по результатам поверочного расчета представлен на рис. 8.

При построении графика зависимости расхода хладагента от температурных условий на входе в медные обмотки статора стартера-генератора и выходе из них по оси X отложим расход хладагента, где самое левое значение является минимальным и равно нулю, а самое правое значение соответствует 4,5 стандартным ведрам масла в минуту. По оси Y отложим температуру хладагента на выходе из электрических обмоток статора, где самое нижнее минимальное значение равно пятикратной комнатной температуре, а самое верхнее максимальное значение равно 12-тикратной комнатной температуре. При этом горизонтальная красная линия обозначает граничную температуру, которая соответствует температуре коксования масла и является ограничительной температурой для изоляционных пластин внутри пазов электротехнического стакана стартера-генератора [19]. Единственная точка в правом верхнем углу графика является расчетной для условий работы стартера-генератора со штатной доработанной масляной системой при максимальном расходе хладагента. Левая кривая зависимости отражает влияние расхода масла на температурное состояние электрической машины при автономной системе охлаждения с комнатной температурой хладагента на входе. Штатная масляная система не может обеспечить температуру активной зоны статора ниже предельной температуры применения

материала изоляции статорной обмотки, а автономная масляная система способна обеспечить удовлетворительную температуру только для двух вариантов расхода хладагента.

По результатам двух этапов расчетов и в качестве рекомендаций для проектирования будущих электрических машин для гибридных силовых установок и силовых установок для более электрического самолета можно сделать несколько выводов:

1) при расчете теплового состояния электрических машин методом конечных элементов предпочтительно использовать секторную САЕ-модель, которая учитывает различные внутренние особенности электрической машины и может дать результат близкий к реальным условиям эксплуатации;

2) использование автономной системы охлаждения с низкой температурой на входе обеспечивает удовлетворительные условия для эксплуатации электрической машины при минимальном расходе хладагента. При этом данная система охлаждения может использоваться не только для охлаждения интегрированного стартер-генератора, но и для прочих электрических элементов гибридной силовой установки или силовой установки для более электрического самолета. Наличие дополнительного контура системы охлаждения увеличивает ее массу, что может негативно сказаться на удельных параметрах силовой установки и летательного аппарата. Для достижения лучших показателей эффективности необходимо рассмотреть вариант использования криогенного охлаждения и сверхпроводимой компонентой базы;

3) использование штатной доработанной системы охлаждения не обеспечивает удовлетворительные условия для эксплуатации электрической машины в составе высоконагруженной силовой установки даже при максимальном расходе хладагента;

4) при разработке подшипников, которые не требуют смазки, возможно полностью отказаться от использования штатной масляной системы или трансформировать ее в автономную систему охлаждения электрического контура гибридной силовой установки или силовой установки для более электрического самолета [20].

Выводы

В статье представлена конструкция электрического стартера-генератора с постоянными магнитами и внешним исполнением ротора, его интеграция на вал ротора автономного модуля газотурбинного двигателя. Были построены САД и САЕ-модели в плоской и секторной постановке, куда были заложены свойства новых для области двигателестроения электротехнических материалов, выполнены

оценочный и поверочный расчеты теплового состояния. По результатам расчетов были построены графики зависимости расхода хладагента от температур на входе и выходе из системы, рассмотрены два варианта системы охлаждения активной части электрической машины: доработанная штатная с электроприводными агрегатами и автономная.

Результаты расчетов могут свидетельствовать о том, что для предназначенного для полетов на высоких скоростях числа Маха двигателя со встроенной электрической машиной на входе создаются агрессивные температурные условия, которые при наложении дополнительных тепловых источников требуют значительную доработку штатной масляной системы двигателя для обеспечения заданного расхода хладагента. При разработке адаптивного газотурбинного двигателя нового поколения с технологией третьего контура возможно размещение компонентов доработанной масляной системы по части теплообменников в канале третьего контура. Также целесообразно рассмотреть возможность применения турбохолодильников в составе двигателя, которые уже давно применяются в системе кондиционирования воздуха летательного аппарата. В качестве хладагента для турбохолодильников в будущих разработках целесообразно рассмотреть жидкие хладоносители с более высоким значением теплоемкости, чем авиационные масла и топлива.

Список источников

1. Кузьмичев Р.В., Левин Д.В., Мисютин Р.Ю., и др. Авиационные генераторы повышенной мощности // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 6. С. 39-46.
2. Сычёв А.В., Равикович Ю.А., Борисов Д.А. Стендовые испытания электрической винтомоторной группы как первый этап в создании гибридной силовой установки // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22. № 3. С. 99-107. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-99-107
3. Дадоян Р.Г., Уразбахтин Р.Р., Спирыкина Я.В. и др. О выборе топологии интегрированного стартера-генератора для двухконтурного турбореактивного двигателя // Электротехника. 2022. № 12. С. 48-52. DOI: 10.53891/00135860_2022_12_48
4. Тутаев Г.М., Безбородов Е.С. Анализ возможности применения тепловых моделей асинхронных двигателей для оценки теплового состояния машины двойного питания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23. № 4. С. 47-53. DOI: 10.14529/power230405
5. Kuptsov V., Fajri P., Trzynadlowski A., et al. Electromagnetic Analysis and Design Methodology for Permanent Magnet Motors Using MotorAnalysis-PM Software // Machines. 2019. Vol. 7. No. 4: 75. DOI: 10.3390/machines7040075

6. Кондраков А.Д. Концепция электрификации авиационного двигателя // Авиация и космонавтика: Сборник тезисов 21 Международной конференции (21–25 ноября 2022; Москва). М.: Изд-во «Перо», 2022. С. 129–130.
7. Mykhailenko T., Nemchenko D., Douaissia O.H.A., et al. Approaches to the Simulation of Thermal Hydraulic Processes in the Oil System Elements of Gas Turbine Engine // Bulletin of NTU “KhPI”. Series Power and heat engineering processes and equipment. 2017. No. 10(1232), pp. 79–84. DOI: 10.20998/2078-774X.2017.10.11
8. Oyori H., Kuwata G., Morioka N. A Study on the More Electric Architecture for Aircraft and Propulsion (MEAAP) Concept // IHI Engineering review. 2019. Vol. 52. No. 1, pp. 20–28.
9. Валиуллин К.Р., Тушев С.И. Математическая модель нагрева асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на основе эквивалентной тепловой схемы // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22. № 4. С. 67–76. DOI: 10.14529/power220408
10. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н. Основы работы в ANSYS 17. М.: ДМК-Пресс, 2017. 210 с.
11. Tărăbuță D., Pătrașcu M., Tămaș M. Thermal analysis using Ansys Software Package // Acta Electrotechnica. 2017. Vol. 58. No. 1-2. Special Issue. pp. 191–198.
12. Appadurai M., Raj E.F.I., Venkadeshwaran K. Finite element design and thermal analysis of an induction motor used for a hydraulic pumping system // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. Part 7, pp. 7100–7106. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.944
13. Bhambere M.B., Chaudhari S.S. Numerical analysis of heat transfer from perforated fins of an induction motor housing // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. Vol. 1259 International Conference on Advances in Mechanical Engineering (26–28 May 2022; Nagpur, India): 012011. DOI: 1088/1757-899X/1259/1/012011
14. Кондраков А.Д., Леонтьев М.К. Электрические силовые установки летательных аппаратов // Перспективы развития двигателестроения: Сборник трудов Международной научно-технической конференции им. Н.Д. Кузнецова (21–23 июня 2023; Самара). Самара: Изд-во Самарского университета, 2023. Т. 1. С. 60–63.
15. Michaelis S. Aircraft Clean Air Requirements Using Bleed Air Systems // Engineering. 2018. Vol. 10. No. 04, pp. 142–172. DOI: 10.4236/eng.2018.104011
16. Мишууров К.С., Паярель С.М., Курносов А.О. и др. Исследование основных свойств стеклотекстолитов для печатных плат и оценка влияния климатических воздействий на показатели их диэлектрической проницаемости // Труды ВИАМ. 2021. № 6(100). С. 74–81. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-74-81
17. Фокеева Л.Х., Хуснуллина Т.А., Каримова И.М. Расчет гидравлической циркуляционной установки: Методическое пособие. Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2007. 52 с.
18. Шишулин А.В., Федосеев В.Б., Шишулина А.В. Изменение температуры Кюри в пористом материале // Письма в журнал технической физики. 2020. Т. 46. № 14. С. 6–8. DOI: 10.21883/PJTF.2020.14.49657.18281
19. Щеглов Н.В. Современные виды изоляции. Часть 6. Изоляция силовых электрических кабелей. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. 68 с.
20. Равикович Ю.А., Киянский Т.Н., Амелькин А.С. и др. Силовые деформации корпуса подшипника при нестационарных тепловых потоках // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 3. С. 65–68.

References

1. Kuz'michev RV, Levin DV, Misyutin RY, et al. Higher power electric generators for aircraft application. *Aerospace MAI Journal*. 2011;18(6):39–46. (In Russ.).
2. Sychev AV, Ravikovitch YuA, Borisov DA. Bench tests of an electric engine-propeller group, as the first stage in the creation of a hybrid power plant. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023;22(3):99–107. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-99-107
3. Dadoyan RG, Urazbakhtin RR, Spiriyakina YaV. On choosing the topology of an integrated starter generator for a dual-circuit turbojet engine. *Elektrotehnika*. 2022(12):48–52. (In Russ.). DOI: 10.53891/00135860_2022_12_48
4. Tutaev G, Bezborodov E. Analysis of the possibility of applying thermal models of asynchronous motors to assess the thermal state of a doubly-fed machine. *Bulletin of the South Ural State University. Series “Power Engineering”*. 2023;23(4):47–53. (In Russ.). DOI: 10.14529/power230405
5. Kuptsov V, Fajri P, Trzynadlowski A, et al. Electromagnetic Analysis and Design Methodology for Permanent Magnet Motors Using MotorAnalysis-PM Software. *Machines*. 2019;7(4):75. DOI: 10.3390/machines7040075
6. Kondryakov AD. Concept of aircraft engine electrification. *Materialy XXI Mezhdunarodnoi konferentsii “Aviatsiya i kosmonavtika” (November 21–25, 2022; Moscow)*. Moscow: Pero; 2022. p. 129–130. (In Russ.).
7. Mykhailenko T, Nemchenko D, Douaissia OHA, et al. Approaches to the Simulation of Thermal Hydraulic Processes in the Oil System Elements of Gas Turbine Engine. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series Power and heat engineering processes and equipment*. 2017(10):79–84. DOI: 10.20998/2078-774X.2017.10.11
8. Oyori H, Kuwata G, Morioka N. A Study on the More Electric Architecture for Aircraft and Propulsion (MEAAP) Concept. *IHI Engineering review*. 2019;52(1):20–28.
9. Valiullin KR, Tushev SI. Mathematical model of heating an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor based on an equivalent thermal circuit. *Bulletin of the South Ural State University series “Power Engineering”*. 2022;22(4):67–76. (In Russ.). DOI: 10.14529/power220408

10. Fedorova NN, Val'ger SA, Danilov MN. *Fundamentals of work in ANSYS 17*. Moscow: DMK-Press; 2017. 210 p. (In Russ.).
11. Tărăbuță D, Pătrașcu M, Tămaș M. Thermal analysis using Ansys Software Package. *Acta Electrotechnica*. 2017;58(1-2):191-198.
12. Appadurai M, Raj EFI, Venkadeshwaran K. Finite element design and thermal analysis of an induction motor used for a hydraulic pumping system. *Materials Today: Proceedings*. 2021;45:7100-7106. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.944
13. Bhambere MB, Chaudhari SS. Numerical analysis of heat transfer from perforated fins of an induction motor housing. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. Vol. 1259 *International Conference on Advances in Mechanical Engineering (May 26-28, 2022; Nagpur, India)*: 012011. DOI: 1088/1757-899X/1259/1/012011
14. Kondryakov AD, Leont'ev MK. Electric power plants of aircraft. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii im. N.D. Kuznetsova "Perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya" (June 21-23, 2023; Samara)*. Samara: Samarskii universitet; 2023. Vol. 1. p. 60-63. (In Russ.).
15. Michaelis S. Aircraft Clean Air Requirements Using Bleed Air Systems. *Engineering*. 2018;10(04):142-172. DOI: 10.4236/eng.2018.104011
16. Mishurov KS, Payarel SM, Kurnosov AO, et al. Study of the main properties of glass fiber laminates for printed circuit boards and assessment of the influence of climatic influences on the indicators of their dielectric constant. *Proceedings of VIAM*. 2021(6):74-81. (In Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-74-81
17. Fokeeva LKh, Khusnullina TA, Karimova IM. *Calculation of a hydraulic circulation unit*. Almet'yevsk: Almet'yevsk State Petroleum Institute; 2007. 52 p.
18. Shishulin AV, Fedoseev VB, Shishulina AV. Variation of the curie temperature in porous materials. *Technical Physics Letters*. 2020;46(7):680-682. (In Russ.). DOI: 10.1134/S106378502007024X
19. Shcheglov NV. *Modern types of insulation. Part 6. Insulation of electrical power cables*. Novosibirsk: NGTU; 2013. 68 p. (In Russ.).
20. Ravikovich YuA, Kiansky TN, Amelkin AS, et al. Power deformations of a bearing housing at non-stationary thermal flows. *Aerospace MAI Journal*. 2009;16(3):65-68.

Статья поступила в редакцию / Received 29.01.2025
Одобрена после рецензирования / Revised 18.06.2025
Принята к публикации / Accepted 14.07.2025