

Расчет и моделирование стартер-генератора авиационного газотурбинного двигателя

В. В. Королев¹, Е. В. Лисковская
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
¹vvkorolev@etu.ru

Д. А. Павлов
Тольяттинский государственный университет
Тольятти, Россия
Pavlov-DA@yandex.ru

Аннотация. В статье приводятся особенности конструктивного расчета и моделирование двигательного режима стартер-генераторной установки для авиационного газотурбинного двигателя. В качестве электрической машины используется синхронный двигатель с постоянными магнитами. Методика расчета, взятая за основу, позволяет учесть некоторые особенности работы электрической машины в составе системы авиационного двигателя.

Ключевые слова: синхронная машина с постоянными магнитами; газотурбинный двигатель; стартер-генератор

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разрабатываются концепции построения электрических самолетов и вертолетов, которые обладают улучшенными характеристиками по сравнению с обычными летательными аппаратами. Они отличаются наличием системы электроснабжения полностью электрического характера, без присутствия гидравлического и пневматического преобразования энергии. Это приведет к улучшению не только массогабаритных и экологических показателей, но и аэродинамических и летных [1–7].

Таким образом, стоит задача построения энергетической системы летательного аппарата с использованием полностью электрифицированного оборудования и систем. Интегрированные стартер-генераторы в таких системах выполняют роль устройства запуска и электроснабжения «электрического» газотурбинного двигателя, т.е. такого двигателя, у которого все имеющиеся вспомогательные системы (топливные насосы, системы смазки, органы механизации) снабжаются электрической энергией [3–6].

В данной статье рассматривается вопрос проектирования и разработки стартер-генераторной электрической машины для газотурбинного двигателя летательного аппарата, а также моделирование двигательного режима ее работы в программной среде Matlab Simulink.

II. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

В ходе проведенного анализа были установлены следующие конструктивные решения.

- Выбор интегрированного варианта компоновки стартер-генератора, поскольку его применение имеет своим следствием снижение массы и габаритов авиационного двигателя [4–6].
- Выбор синхронной электрической машины с постоянными магнитами в качестве конструктивного исполнения, поскольку данный тип электрической машины имеет большие значения удельной мощности и момента при минимальных массогабаритных характеристиках, а также способность работы на высоких скоростях вращения и в условиях высоких температур [1, 6, 8, 9].
- Проектирование электрической машины с числом пар полюсов, равным минимально возможному значению, поскольку скорость вращения вала в генераторном (продолжительном) режиме задается скоростью вращения вала газотурбинного двигателя ($n_1=65000$ об/мин), и в этом случае число пар полюсов определяет частоту поля статора (и ротора).
- Выполнение статора осуществляется с распределенной обмоткой с целым числом пазов на полюс и фазу и с укороченным шагом.
- Выбор в качестве материала постоянных магнитов сплава самария с кобальтом (SmCo_5), поскольку такие магниты обладают достоинствами магнитных сплавов на основе редкоземельных металлов, а также обладают устойчивостью параметров при высоких температурах [6, 8, 9].
- Выбор ротора типа звездочка с призматическими магнитами, поскольку в сравнении с другими вариантами конструктивного исполнения ротора данный тип не имеет явных недостатков, играющих ключевую роль при использовании в стартер-генераторе, а также конструкция ротора

такого типа получается механически прочной и имеет небольшую удельную массу.

III. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Расчет синхронной машины с постоянными магнитами проводился с учетом особенностей, обусловленных применением данной электрической машины в качестве авиационного интегрированного стартер-генератора, и осуществлялся для генераторного режима работы, поскольку он является продолжительным. Исходные данные, необходимые для расчета, занесены в таблицу.

ТАБЛИЦА I Исходные данные для расчета синхронной машины с постоянными магнитами

	Параметр	Значение
1	Номинальная отдаваемая мощность, P_2 , кВт	3
2	Номинальное линейное (фазное) напряжение, $U_{1л}$ ($U_{1ф}$), В	380 (220)
3	Частота вращения, n , об/мин	65 000
4	Коэффициент мощности, $\cos\phi$ (отстающий)	0,85
5	Количество фаз статора (соединение звездой), m_1	3
6	Внутренний диаметр втулки ротора, d_n , мм	20

Параметры, полученные в ходе проведенного расчета: внутренний диаметр сердечника статора 78,9 мм; наружный диаметр ротора (внутренних радиальных ПМ) 76,9 мм; односторонняя длина воздушного зазора 1 мм; средняя высота постоянного магнита, 17,5 мм; ширина постоянного магнита 38,2 мм; высота спинки ротора 17 мм; длина втулки ротора 63,1 мм; высота спинки сердечника статора 10,8 мм; ширина паза сердечника статора 2,8 мм; ширина зубца статора 2,4 мм; высота паза статора 5,4 мм; наружный диаметр сердечника статора 111,3 мм; число пазов на полюс и фазу 4; число зубцов (пазов) статора 48; номинальный фазный ток 5,35 А; магнитная индукция в воздушном зазоре 0,827 Тл; магнитный поток в воздушном зазоре при холостом ходе 2,102 мВб; активное сопротивление обмотки статора 0,143 Ом; суммарные потери 1200 Вт; полная масса 4,54 кг.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Моделированию подлежит двигательный режим работы разрабатываемого стартер-генератора.

Уравнение напряжений для обмотки статора, на основании которого составляется математическая модель работы стартер-генератора, имеет вид

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_1 + j\omega_{0эл} \bar{\Psi}_1,$$

где U_1 – вектор напряжения, приложенного к обмотке статора; $R_1 I_1$ – вектор падения напряжения в активном сопротивлении обмотки статора; $j\omega_{0эл} \Psi_1$ – вектор ЭДС вращения; $d\Psi/dt$ – вектор ЭДС самоиндукции, появляющейся в переходных процессах и связанный с изменением потокосцепления обмотки статора.

Математическая модель электромагнитных процессов в установившемся режиме может быть представлена в виде системы уравнений для проекций обобщенных векторов на оси вращающейся системы координат d-q (при этом трехфазная обмотка статора заменена двумя неподвижными относительно d-q системы координат эквивалентными обмотками)

$$\begin{cases} u_{1d} = R_1 i_{1d} + \frac{d}{dt} \Psi_{1d} - \omega_{0эл} \Psi_{1q} \\ u_{1q} = R_1 i_{1q} + \frac{d}{dt} \Psi_{1q} + \omega_{0эл} \Psi_{1d} \\ \Psi_{1d} = L_{1d} i_{1d} + \Psi_{2d} \\ \Psi_{1q} = L_{1q} i_{1q} \\ \Psi_2 = \Psi_{2d} \end{cases}$$

где u_{1d} и u_{1q} – проекции пространственного вектора напряжения, приложенного к обмотке статора (U_1) на оси d и q; i_{1d} и i_{1q} – проекции пространственного вектора тока в фазной обмотке статора на оси d и q; Ψ_{1d} и Ψ_{1q} – проекции пространственного вектора полного потокосцепления обмотки статора на оси d и q; Ψ_2 и Ψ_{2d} – полное потокосцепление ротора и проекция пространственного вектора потокосцепления ротора на ось d; L_{1d} и L_{1q} – полные индуктивности обмоток статора по осям d и q; R_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора; $\omega_{0эл}$ – угловая скорость вращающейся системы координат d-q в электрическом пространстве, равная (в установившемся режиме) угловой частоте напряжения питания статора (т.е. скорости поля статора в электрическом пространстве)

$$\omega_{0эл} = 2\pi f_1 = p\pi\omega_0,$$

где f_1 – частота напряжения питания статора, Гц; p_n – число пар полюсов обмотки статора; ω_0 – синхронная скорость (скорость поля статора в физическом пространстве, а также ротора в установившемся режиме).

Основное уравнение механики привода

$$p\omega = \frac{1}{Jp} (M_{эм} - M_c),$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент синхронного двигателя; J – момент инерции привода; M_c – момент нагрузки, включающий в себя момент нагрузки на валу и момент потерь вращения двигателя; ω – скорость ротора в физическом пространстве; $p=d/dt$.

Модель разрабатываемого стартер-генератора для двигательного режима в программной среде Matlab Simulink представлена на рисунке.

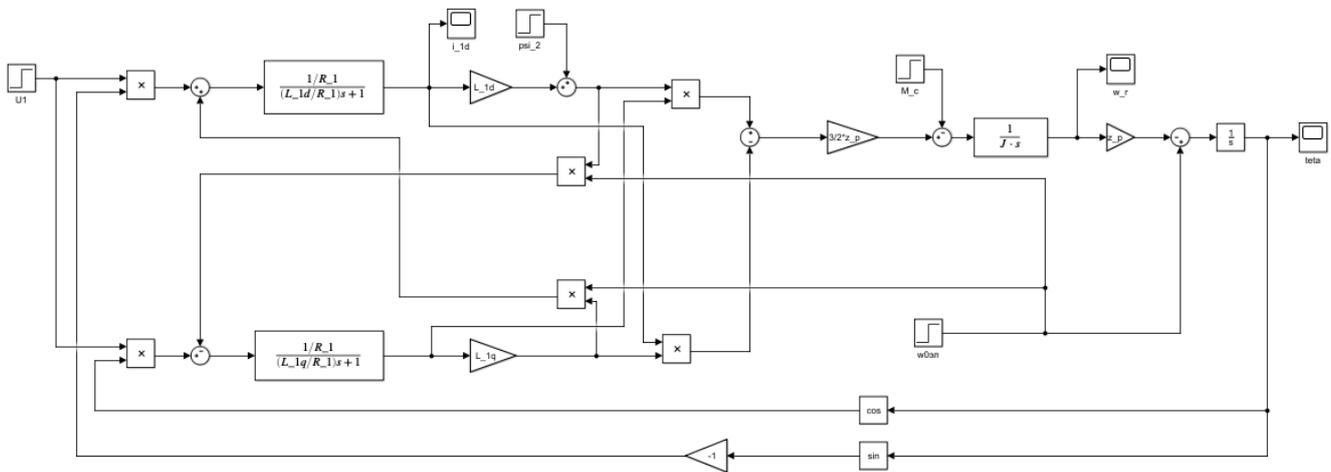


Рис. 1. Модель стартер-генератора в программной среде Matlab Simulink

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения расчетов в программе Mathcad при двух минимальных значениях числа пар полюсов $p=1$ и $p=2$ было установлено, что в случае выбора двухполюсной конструкции ротора синхронной машины результирующее значение массы разрабатываемого стартер-генератора превышает в 1,89 раза значение массы, полученное при расчете четырехполюсной машины, таким образом можно окончательно заключить, что целесообразным является использование четырехполюсной конструкции ротора.

Полученные значения длины (63,1 мм) и наружного диаметра (111,3 мм) разрабатываемого стартер-генератора не превышают значений, заданных в требованиях к разработке, которые составляют 150 мм и 200 мм соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Лёвин А.В., Халютин С.П., Жмуров Б.В. Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования // Научный вестник МГТУ ГА. 2015, вып. № 213. С. 50-57.
 [2] Халютин С. Электрический самолет: прошлое, настоящее, будущее // Авианепанорама. 2016, вып. № 6 (120). С. 42-51.
 [3] Иниятуллин А.И., Журиков Р.Н., Шакуров А.В. Технология создания электрического самолета с применением универсального высокоэффективного электротехнического комплекса нового

поколения // Сборник научных статей по материалам второй Всероссийской научно-практической конференции «Авиатор». 11-13 февраля 2015 г. В 2-х т. Т. 1 / Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015, С. 46-54.

[4] Detailed Design of a High Speed Switched Reluctance Starter/Generator for More/All Electric Aircraft / Song Shoujuna, Liu Weiguo, Dieter Peitsch, Uwe Schaeferb // Chinese Journal of Aeronautics. 2009, вып. № 23(2010). С. 216-226.
 [5] Волокитина Е.В. Исследования по созданию системы генерирования и запуска маршевого двигателя в концепции полностью электрифицированного самолета. Часть 1 // Электроснабжение и электрооборудование. 2011, вып. № 4. С. 29-33.
 [6] Интегрированные в авиационный двигатель беспилотного летательного аппарата высокотемпературные, высокооборотные электрохимические преобразователи энергии / Ф.Р. Исмаилов, В.Е. Вавилов, Р.Д. Каримов, В.И. Бекузин // Вестник УГАТУ. 2015, вып. №3 (69). С. 171-177.
 [7] Кайбышев В.Р., Магданова К.Р., Салахов А.Х. Анализ перспективных авиационных электрических машин на летательных аппаратах // Наука, образование и культура. 2017, вып. № 1 (16). С. 25-26.
 [8] Власов А.И. Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения: автореф. дисс. канд. техн. наук / ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, 2010. 20 с.
 [9] Смирнов А.Ю. Особенности конструирования и анализа высокооборотных синхронных машин с постоянными магнитами на роторе // Электроэнергетика и электротехника. 2013, вып. № 4 (101). С. 231-235.