

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ИНТЕГРИРОВАННОГО СТАРТЕРА-ГЕНЕРАТОРА АВИАЦИОННОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ АПД-500

Е. А. Пронин¹, И. Ф. Сяхов²

¹pronin.ea@ugatu.su, ²isayakhov92@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В статье представлены результаты исследования механических характеристик для интегрированного стартера-генератора (СТГ), созданного на базе вентильной машины с постоянными магнитами (ПМ) для авиационного поршневого двигателя АПД-500. Аналитически подобрана толщина бандажной оболочки. Численными методами проведен расчет прочности бандажной оболочки и определены критические скорости вращения. Испытания опытного образца на стенде и на самолете на аэродроме показали надежность и безопасность использования предложенной конструкции.

Ключевые слова: критические скорости вращения, механический анализ, стартер-генератор, интегрированный стартер-генератор, вентильная машина с постоянными машинами.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время авиация стремится снизить потребление ископаемых топлив в качестве основного источника энергии, за счет чего возрастает привлекательность использования электрифицированных систем на борту самолета [1]. Большое внимание получили СТГ, которые одновременно сочетают в себе стартер для запуска авиационного двигателя и генератор, обеспечивающий борт самолета выработкой электроэнергии [2].

Анализ направления развития авиационных СТГ показывает, что наиболее перспективным и эффективным решением для авиации является применение электрических машин с ПМ, поскольку такое конструктивное исполнение обеспечивает высокие показатели удельной мощности и КПД [3].

В научно-технической литературе в основном представлены СТГ, работающие на двух режимах: режиме стартера и режиме генератора. Рассматриваемый в данной статье интегрированный СТГ спроектирован для работы в трех режимах: режиме стартера, режиме генератора и в режиме электромотора для подкрутки вала воздушного винта самолета, в котором реализуется параллельная гибридная силовая установка [4]. На рис. 1 приведены режимы работы СТГ в составе авиационного поршневого двигателя с реализацией параллельной гибридной схемы.

При проектировании электрических машин с наружными ПМ для обеспечения надежности и безопасности конструкции особенно важным является исследование механических характеристик конструкции, которое включает исследование напряжений бандажной оболочки, а также исследование динамики ротора на всем диапазоне рабочих скоростей вращения.

Цель данной работы – провести механический анализ ротора вентильной электрической машины с наружными ПМ, включающий прочностной расчет ПМ и бандажной оболочки ротора ЭМ, а также проанализировать динамику ротора через диаграмму Кэмбелла, отражающую собственные частоты ротора и критические скорости вращения.

ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ

Прочностной расчет СТГ проводится для максимальной скорости вращения вала ротора 6000 об/мин (628,3 рад/сек). Исследуются прочностные характеристики бандажной оболочки для обеспечения надежной работы. Основные параметры ротора представлены [4]. Параметры бандажной оболочки представлены в табл. 1. Внешний вид ротора показан на рис. 2.

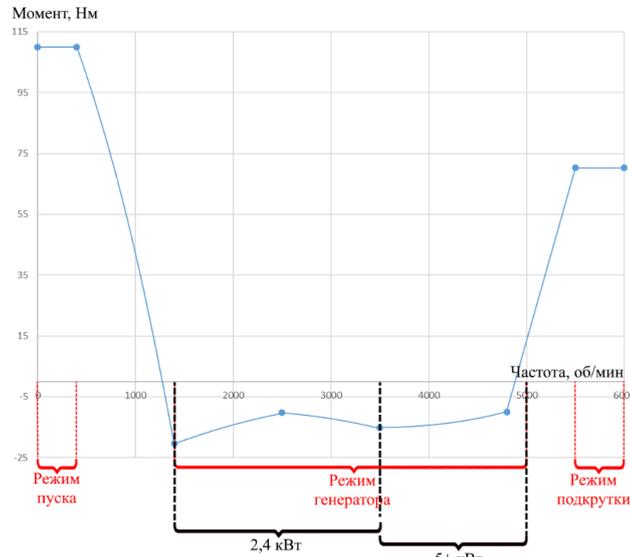


Рис. 1. Режимы работы СТГ.

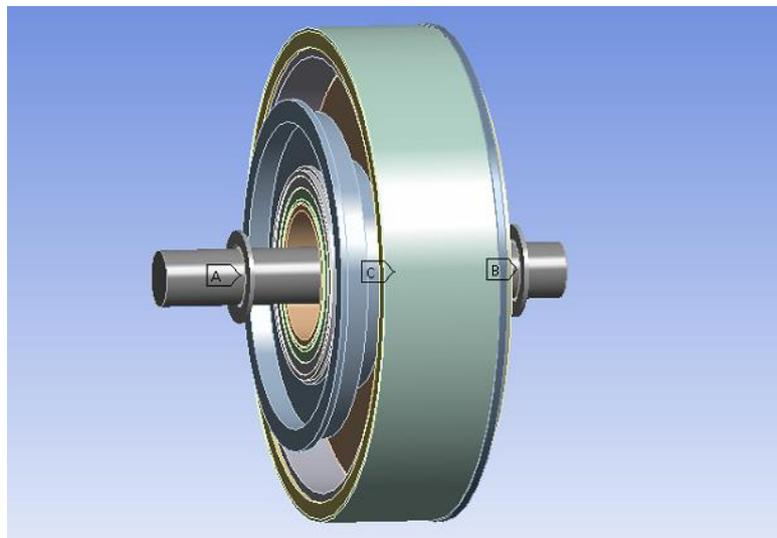


Рис. 2. Внешний вид ротора СТГ

Таблица 1

Параметры бандажной оболочки

Материал	Характеристика		
	Предел прочности, МПа	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплового расширения, 1/°С
Стеклопластик ТУ 2296-001-26757545-2008	Не менее 280	1900	15,7·10 ⁻⁶

Минимальную толщину бандажной оболочки определяем аналитически:

$$b = \frac{\Omega^2 \rho (r_1 + r_2) (D_4^2 - D_3^2)}{16 \sigma_m} k_3 =$$

$$= \frac{628,3^2 \cdot 1900 \cdot (0,142 + 0,151) \cdot (0,302^2 - 0,284^2)}{16 \cdot 280000000} \cdot 2,5 = 0,00129 \text{ м} = 1,29 \text{ мм}$$

где Ω – скорость вращения ротора (рад/с); ρ – плотность ПМ (кг/м^3); σ – предел текучести бандажной оболочки (Па); k_3 – коэффициент запаса; r_1 – радиус вала (м); r_2 – внешний радиус ПМ (м); D_3 – внутренний диаметр ПМ (м); D_4 – внешний диаметр ПМ (м).

Принимаем толщину бандажной оболочки 2 мм: ожидаемый запас прочности при такой толщине составляет 3,88.

Изучение прочностных характеристик проводим в *ANSYS Mechanical*. Выполнен численный расчет напряжений в бандажной оболочке (рис. 3). Максимальные напряжения для бандажной оболочки на 6000 об/мин составили 75,28 МПа, что соответствует коэффициенту прочности 3,72 (разница 4,12% с аналитическим расчетом).

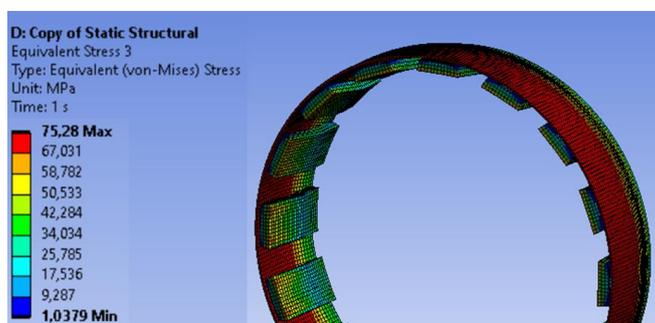


Рис. 3. Максимальные напряжения в связке бандажной оболочки

На рис. 4 представлены перемещения деталей СТГ.

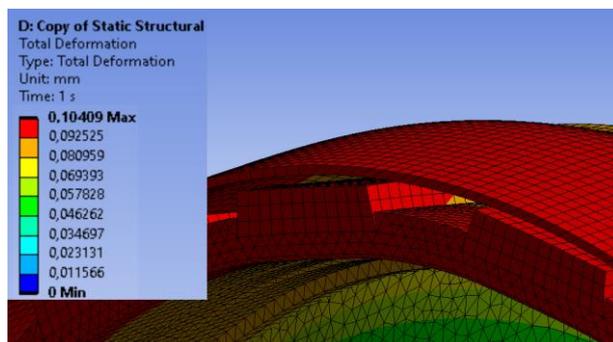


Рис. 4. Перемещения деталей СТГ

Наибольшие перемещения наблюдается у бандажной оболочки и составляют 0,1 мм. Данные перемещения находятся в рамках допустимых для воздушного зазора и не представляют никакой угрозы безопасности эксплуатации СТГ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РОТОРА

Исследование динамики ротора проводится в *ANSYS Mechanical* на всем диапазоне рабочих скоростей вращения: 0-6000 об/мин. Результаты определения критических скоростей в виде диаграммы Кэмбэлла, отражающей зависимость собственных частот колебаний от скорости вращения ротора.

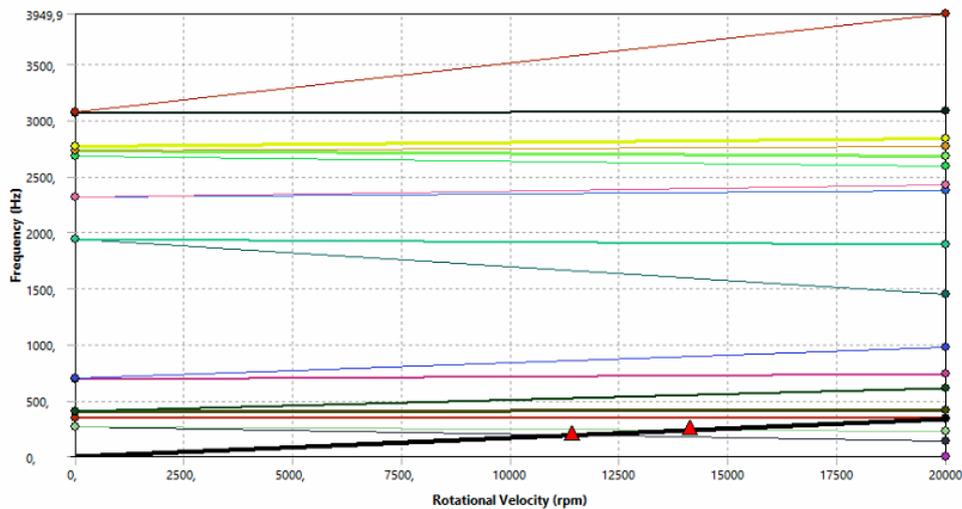


Рис. 5. Критические скорости СТГ

Как видно из результатов расчета, для анализируемого ротора имеется запас 90% для ближайшей критической скорости вращения 11396 об/мин, определяемой первой формой собственных колебаний ротора, вследствие чего можно утверждать, что установившийся номинальный режим работы ротора электрической машины обладает достаточным запасом по критическим значениям скоростей вращения и является безопасным с точки зрения возникновения резонанса.

ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА СТГ

Результаты проведенных расчетов показали возможность создания опытного образца, который будет удовлетворять требованиям надежной и безопасной эксплуатации. На рис. 6 (а) показан СТГ в составе АПД-500, а на рис. 6 (б) представлен СТГ вместе с АПД-500 на борту легкого самолета Як-18Т.



а)



б)

Рис. 6. Интегрированный СТГ: а) – на испытательном стенде в составе с АПД-500; б) – на борту самолета Як-18Т

Экспериментальные запуски на испытательном стенде и на земле на аэродроме на борту самолета показали эффективную и надежную работу разработанного СТГ. Нарушений целостности бандажной оболочки и критических режимов работы обнаружено не было.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье проведено исследование механических характеристик интегрированного авиационного СТГ на основе вентильной машины с ПМ. Аналитически подобрана толщина бандажной оболочки. Численными методами проведен прочностной расчет, который подтвердил безопасность эксплуатации подобранной бандажной оболочки, и определены критические

скорости вращения, в ходе чего было показано, что рабочие скорости вращения, разрабатываемого интегрированного СТГ находятся в безопасной зоне. Экспериментальные запуски опытного образца СТГ на испытательном стенде и на земле на аэродроме в составе самолета Як-18Т показали эффективную и надежную работу разработанного СТГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gnadt A. R. et al. Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft //Progress in Aerospace Sciences. – 2019. – Т. 105. – С. 1-30.
2. Noland J. K. et al. High-power machines and starter-generator topologies for more electric aircraft: A technology outlook //IEEE access. – 2020. – Т. 8. – С. 130104-130123.
3. Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Gusakov D. V. Design features of liquid-cooled aviation starter generators //2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). – IEEE, 2018. – С. 1-5.
4. Ismagilov F. R. et al. Creation of an integrated starter-generator for the aircraft piston engine-demonstrator APD-500 //2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – IEEE, 2021. – С. 584-591.

ОБ АВТОРАХ

ПРОНИН Егор Андреевич, магистрант 2-го курса АВИАЭТ, инженер НИИ «ЭТКиС», кафедра электромеханики УГАТУ.
САЯХОВ Ильдус Финатович, младший научный сотрудник НИИ «ЭТКиС», кафедра электромеханики УГАТУ.

METADATA

Title: Mechanical characteristics for the integrated starter-generator of aircraft piston engine APD-500

Affiliation: Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹pronin.ea@ugatu.su, ²isayakhov92@mail.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1(27), pp. 85-89, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The article presents the results of a study of mechanical characteristics for an integrated starter-generator (ISG), created on the basis of a valve machine with permanent magnets (PM) for an APD-500 aircraft piston engine.

Key words: critical speeds, mechanical analysis, starter-generator, integrated starter-generator, brushless DC machines.

About authors:

PRONIN, Egor Andreevich, postgraduate student 2 year AVIET, Engineer of NII «ETKiS», Department of Electromechanics, USATU.

SAYAKHOV, Ildus Finatovich, Junior Researcher of NII "ETKiS", Department of Electromechanics, USATU.