

Т. С. Романович¹, А. А. Пыхалов²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ДИНАМИКА РОТОРНЫХ СИСТЕМ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УПРУГО - ДЕМПФЕРНЫМИ ОПОРАМИ

Аннотация. В работе рассмотрен анализ проблемы динамического поведения роторных систем (РС) авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) при нештатных режимах работы, например, в виде обрыва рабочей лопатки вентилятора. В частности, рассматривается проблема компенсации (демпфирования) повышения уровня вибрации роторной системы ГТД, возникающее, как под воздействием полученного ротором, в этом случае, недопустимого уровня дисбаланса, так и работой ротора в режиме гибкого вала. Колебания РС зависят от динамических характеристик жесткости и демпфирования их опор. То есть, одним из выходов на решение этой проблемы является использование упруго-демпферных опор и управления их работой. Целью настоящего исследования является изучение перспектив получения решения представленной задачи, где, наряду с анализом имеющегося конструктива упруго-демпферных опор, для развития этого направления, предполагается использование современных компьютерных технологий на основе метода конечных элементов (МКЭ) с решением контактной задачи теории упругости для динамического РС со сборными конструкциями опор. Также в работе представлены упруго-демпферные опоры существующих авиационных ГТД. Основное функциональное их назначение состоит в улучшении вибрационного состояния двигателя. В настоящей работе для них ставится задача разработки мероприятий, направленных на реализацию дополнительного функционального назначения, состоящего в управлении динамическим состоянием роторной системы на нештатных режимах её работы.

Ключевые слова: ротор газотурбинного двигателя, колебания, упруго-демпферные опоры.

T. S. Romanovich¹, A. A. Pykhalov²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

DYNAMICS OF ROTOR SYSTEMS OF GAS TURBINE ENGINES OF AIRCRAFT WITH ELASTIC-DAMPING BEARINGS

Abstract. The paper considers the analysis of the problem of dynamic behavior of rotary systems (RS) of aviation gas turbine engines (GTE) under abnormal operating conditions, for example, in the form of a fan blade breakage. In particular, the problem of compensation (damping) of an increase in the vibration level of the rotor system of the gas turbine engine, which occurs both under the influence of the unacceptable level of imbalance obtained by the rotor, in this case, and the operation of the rotor in the flexible shaft mode, is considered. The vibrations of the RS depend on the dynamic characteristics of the stiffness and damping of their supports. That is, one of the ways to solve this problem is to use elastic-damper supports and control their operation. The purpose of this study is to study the prospects for obtaining a solution to the presented problem, where, along with the analysis of the existing design of elastic-damper supports, for the development of this direction, it is assumed to use modern computer technologies based on the finite element method (FEM) with the solution of the contact problem of elasticity theory for dynamic RS with prefabricated support structures. The paper also presents elastic-damping supports of existing aviation gas turbine engines. Their main functional purpose is to improve the vibration state of the engine. In this paper, the task for them is to develop measures aimed at implementing an additional functional purpose, consisting in controlling the dynamic state of the rotor system in abnormal modes of its operation.

Keywords: gas turbine engine rotor, vibrations, elastic-damping supports.

Введение

Роторные системы (РС) современных газотурбинных двигателей (ГТД) проектируются [1, 5, 6] с высокими требованиями надежности и долговечности, которые напрямую зависят от динамического поведения роторов в условиях эксплуатации ГТД на штатных режимах и при работе во внештатных ситуациях, при повышении уровня вибрации роторной системы ГТД, возникающей под воздействием роторных и не роторных источников колебаний. Вне-

штатной ситуацией, например, может являться обрыв рабочих лопаток, вентилятора ГТД и др. Проблема заключается в том, что и в этом случае также должна оставаться возможность управления (компенсации) уровнем динамического воздействия роторной системы ГТД. Одним из решений этой проблемы является использование упруго-демпферных опор и управление ими для стабилизации динамического поведения ротора.

Для реализации решения представленной проблемы используется широкий набор экспериментально-теоретических подходов инженерного анализа. Однако, на современном этапе наибольшее развитие получило теоретическое направление, связанное с математическим моделированием на основе численного решения методом конечных элементов (МКЭ) [2], в особенности с использованием в представленном решении контактной задачи теории упругости, позволяющей моделировать условия сопряжения деталей и изменения этих условий в процессе эксплуатации ГТД, как для ротора [3, 4], так и для сборных конструкций упруго-демпферных опор. Наибольший интерес, в этой ситуации, представляет моделирование динамического поведения внештатных ситуаций, таких, например, как обрыв лопаток, сопровождающийся появлением высокого уровня дисбаланса с последующим возможным выходом на резонансное состояние РС.

Исследование упруго-демпферных опор газотурбинных двигателей летательных аппаратов

Роторы называют гибкими (гибкого вала) если их рабочий диапазон превышает первую (реже и вторую) критическую частоту вращения. Такие роторы характерны для современных конструкций ГТД, в особенности гражданского назначения. Как правило, они имеют тонкостенную конструкцию вала и барабана компрессора, и находятся в состоянии устойчивого динамического равновесия в представленном диапазоне рабочих частот вращения. В частности, на рис.1 представлена шкала частот вращения ротора ГТД, где рабочий диапазон на штатном режиме находится между первой (D_1) критической (твердотельной) частотой вращения $n_{кр1}$ и второй критической (изгибной) (D_2) частотой вращения $n_{кр2}$.

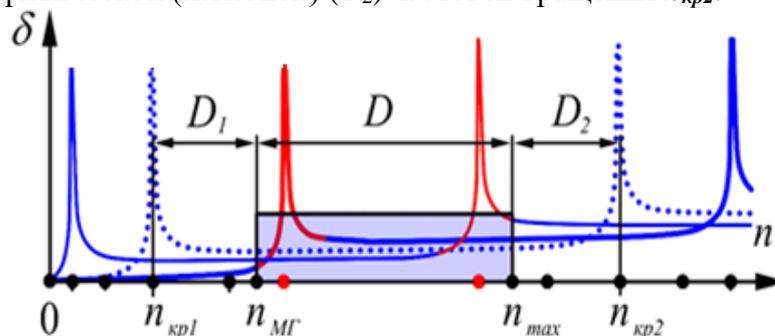


Рис. 1. Диапазон работы ротора ГТД в режиме гибкого вала

При запуске авиационного газотурбинного двигателя набор оборотов ротора происходит с повышенным по скорости изменению частоты вращения переходом, то есть первую критическую частоту $n_{кр1}$ ротор проходит с большим ускорением, что позволяет иметь незначительное повышение амплитуды колебаний ротора и, тем самым, успешный выход на свой рабочий диапазон $n_{МГ}$ - n_{max} .

При возникновении внештатной ситуации, такой как обрыв лопатки, прекращается (отсекается) подача топлива к двигателю, и ротор, постепенно снижая обороты, уходит в режим авторотации, то есть его скорость вращения начинает снижаться с относительно небольшим отрицательным ускорением (торможением). В результате, при медленном переходе частоты вращения ротора через величину критической частоты $n_{кр1}$ (рисунок 1), возникает значительное (резонансное) повышение амплитуды колебаний, внешнее проявление которого имеет вид сильного удара, передаваемого на опоры и корпус ГТД. Тем самым двигатель, выведенный из рабочего состояния, испытывает дополнительное динамическое воздействие большой величины.

Для предотвращения подобных аварийных ситуаций предлагается управлять динамическим состоянием ротора через изменение параметров жесткости и демпфирования на опорах ротора.

Конструкции роторов и их опор моделируются на основе МКЭ и решения контактной задачи теории упругости. Исследование проводится с целью изучения различных подходов способствующих решению представленной выше проблемы.

Роторы ГТД [4] имеют различные конструкции (рис. 2а), например, с консольной жесткой заделкой и между двух опор с шарнирными опорами и др. Более сложный характер динамического поведения имеют ротора с упругими опорами и упруго-демпферными опорами (рис. 2б).

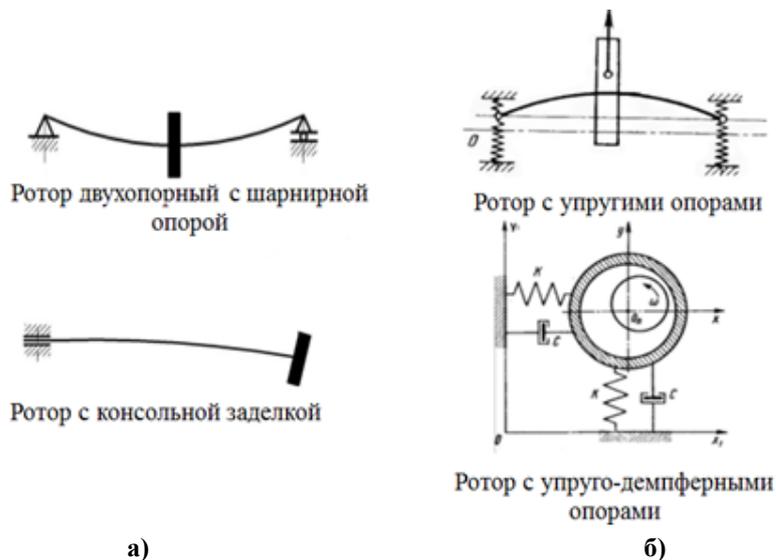


Рис. 2. Виды конструкций авиационных роторов ГТД

Основными типами конструкций упруго-демпферных опор, применяемых в настоящее время в авиационных ГТД, являются:

- опоры с кольцевыми упругими элементами;
- опоры типа «белчье колесо».

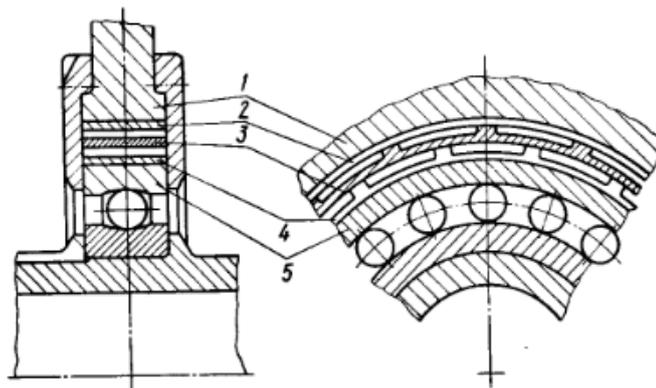


Рис. 3. Упруго-демпферная опора с кольцевыми упругими элементами:
1 – корпус; 2,3,4 – упругие кольца; 5 – подшипник

Упруго-демпферная опора ГТД с кольцевыми упругими элементами (рис.3), состоит из упругих колец, которые установлено между корпусом и внешними кольцами подшипника. При радиальном перемещении подшипника участки упругого кольца прогибаются, создавая упругую реакцию на подшипник. Толщина и ширина упругого кольца определяют жесткость опоры. Упругое кольцо имеет 9-12 выступов и столько же упругих участков. Высота выступов составляет 0,15-0,25мм и определяет допустимую по прочности величину прогиба участка кольца. пространство между выступами заполняется маслом. При деформации колец происходит выдавливание и засасывание масла, тем самым, создается эффект демпфирования

колебаний. Перетекание масла происходит через торцевые зазоры и через неплотности выступов.

Упруго-демпферная опора типа «беличье колесо» (рис. 4) представляет собой втулку с большим количеством прорезей. Под действием внешней радиальной силы на подшипник стержневые элементы упругой втулки работают на изгиб. Жесткость опоры определяется толщиной стенки втулки, а также шириной прорезей, числом и длиной образовавшихся стержневых элементов. Демпфером опоры является тонкий масляный слой между втулками, расположенный над подшипником. Толщина слоя составляет 0,2-0,3 мм, её величина определяется максимальным значением упругой радиальной деформации опоры. Длина демпфирующего масляного слоя определяется расположением уплотняющих колец. Такая опора создает не только демпфирующий эффект, но и гидродинамический, что является дополнением к упругой силе. [1, 5, 6].

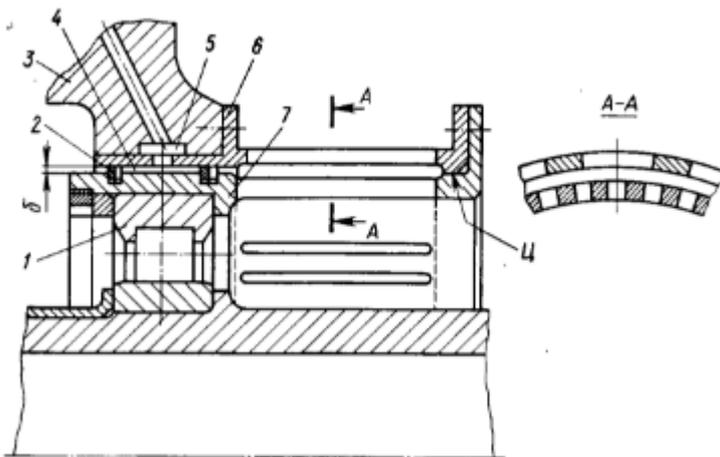


Рис. 4. Упруго-демпферная опора типа «беличье колесо»:
1 – подшипник ротора; 2 – уплотняющие кольца; 3, 5 – корпус;
4 – масляный слой; 6,7 – корпусная втулка

Заключение

Результаты исследований упруго-демпферных опор ГТД направлены на повышение надежности и долговечности роторов турбомашин в процессе эксплуатации двигателей летательных аппаратов с учетом специфических особенностей их работы.

Таким образом, разработка подходов математического моделирования сборных конструкций упруго-демпферных опор на основе метода конечных элементов и решения контактной задачи теории упругости с реализацией дополнительного для упруго-демпферных опор ГТД их функционального назначения, состоящего в управлении динамическим состоянием роторной системы на нештатных режимах её работы является актуальной задачей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хронин Д.В. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей. / Под ред. Д.В. Хронина. – М.: Машиностроение. - 1989. – 565 с.
2. Зинкевич О. Метод конечных элементов в технике /О. Зинкевич. – издательство «МИР» - Москва, 1975. – 271 с.
3. Пыхалов А. А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин // Дисс. уч. ст. докт. техн. наук. -М.:МАИ. - 2006. – 428 с.
4. Пыхалов А. А., Милов А. Е. Математическое моделирование динамического поведения сборных роторов турбомашин. // Компрессорная техника и пневматика. -2006. - № 3. - С. 16-23.
5. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. – М.: Машиностроение. - 181. – 550с.

6. Масленников М.М., Бехли Ю.Г., Шальман Ю.И. Газотурбинные двигатели для вертолетов.– М.: Машиностроение. - 1969. – 202 с.

REFERENCES

1. Khronin D.V. Design and engineering of aviation gas-turbine engines. / Edited by D.V. Khronin. - Moscow: Mashinostroenie. - 1989. - 565 с.

2. Zinkevich O. The method of finite elements in engineering / O. Zinkevich. - Izdatel'stvo "MIR" - Moscow, 1975. - 271 с.

3. Pykhalov A.A. Contact task of static and dynamic analysis of assembled turbomachine rotors / Dissertation of doctoral degree in Engineering. -MAI. - 2006. - 428 с.

4. Pikhlov A.A., Milov A.E. Mathematical modeling of the dynamic behavior of the assembled rotors of turbomachines. // Compressor equipment and pneumatics. -2006. - № 3. - С. 16-23.

5. Skubachevsky G.S. Aviation Gas-Turbine Engines. - Moscow: Mashinostroenie. - 181. - 550с.

6. Maslennikov M.M., Bchli Y.G., Shalman Y.I. Gas-turbine engines for helicopters. - 1969. - 202 с.

Информация об авторах

Романович Татьяна Сергеевна – аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, e-mail: 1292000@mail.ru

Пыхалов Анатолий Александрович – д. т. н., профессор Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск e-mail: pykhalov_aa@mail.ru

Information about the authors

Tatyana Sergeevna Romanovich – PhD student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: 1292000@mail.ru

Anatoliy Alexandrovich Pykhalov – Doctor of Technical Science, Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pykhalov_aa@mail.ru