

УДК 629.735.33

А.В. АМБРОЖЕВИЧ, И.П. БОЙЧУК, В.Ю. СИЛЕВИЧ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ЧАСТОТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И РЕСУРСОМ КЛАПАНА ПУВРД**

Приведены оценки факторов, определяющих ресурс пульсирующего воздушно-реактивного двигателя с автоматическим клапаном. Проведен анализ осциллограмм акустического сигнала, исходящего от колеблющегося лепестка работоспособного клапана ПуВРД и рабочего режима двигателя. Выявлена основная частота колебаний лепестка клапана и наличие гармоник высокого порядка. Представлены результаты численного моделирования процесса колебания лепестка клапана на основании схемы колебательного процесса заземленного стержня. Получена трактовка эффекта присутствия высоко-частотных гармоник. Сформулировано условие работоспособности ПуВРД, как согласование собственного частотного спектра клапана и процесса в целом.

Ключевые слова: пульсирующий воздушно-реактивный двигатель, автоматический клапан, натурный эксперимент, осциллограмма, амплитудно-фазочастотные характеристики, Фурье-анализ, вейвлет-анализ, частотный спектр, гармоники высокого порядка.

Введение

На сегодняшний день в качестве ДУ малоразмерных и сверхлегких БЛА применяются практически все известные типы двигателей, включая электропривод. Скоростной диапазон простирается от 10–15 м/с для сверхлегких БЛА с электроприводом воздушного винта и взлетной массой менее 1 кг до 250 км/ч для БЛА с взлетной массой порядка 200 кг.

Вплоть до 60-х гг. XX в. проводились широкие исследования по применению пульсирующих воздушно-реактивных двигателей (ПуВРД) в реактивной авиации, в том числе и беспилотной. Свойственные ПуВРД недостатки (высокий уровень вибраций и пульсирующий характер тяги, высокий удельный расход топлива, сильный шум, трудности в компоновке с летательным аппаратом) привели к отказу от применения ПуВРД в качестве двигательной установки полноразмерных ЛА.

Существует две конструктивно различных схемы ПуВРД: с механическим впускным клапаном [1] и акустическим (бесклапанные).

Основной проблемой при создании ПуВРД является проблема живучести клапанов. Клапаны первых ПуВРД имели ресурс 20-30 мин., что вполне достаточно для одноразового разведывательного БЛА или БЛА - мишени. Вместе с тем имеются основания полагать, что при применении современных материалов ресурс клапанной решетки возможно довести до часа, что позволит применять ПуВРД на возвращаемых аппаратах.

Процесс доводки схем с механическим клапаном оказался непреодолимым для многих разработ-

чиков [2]. Не справившись с задачей обеспечения достаточного ресурса клапанной решетки, вызвали к жизни различные варианты бесклапанных ПуВРД которые примерно в два раза уступают ПуВРД клапанных схем в термодинамическом совершенстве, что влечет за собой повышенный расход горючего. Тем не менее, бесклапанные ПуВРД нашли широкое применение в зарубежных беспилотных аппаратах.

В качестве наиболее характерного примера можно привести выпускающийся относительно большой серией БЛА - мишень Е-95М ЗАО «ЭНИКС» (г. Казань).

Постановка задачи исследования. Главным фактором, определяющим ресурс пульсирующего воздушно-реактивного двигателя, является стойкость автоматического клапана (рис. 1).



Рис. 1. Узел автоматического клапана ПуВРД

Работоспособность клапана определяется механическими свойствами конструкционного материала и рядом характерных воздействий высокой интенсивности:

1) ударным, нарастающим к периферии асимметричным взаимодействием лепестков с седлом и решеткой в колебательном процессе;

2) наложением температурных нагрузок.

Интенсификация рабочего процесса обусловлена стремлением к обеспечению необходимого уровня термодинамического и аэрогазодинамического совершенства двигательной установки с ПуВРД, откуда вытекают основные задачи проектирования. Повышенная амплитуда изгиба лепестка при открытии способствует улучшению газообмена, поскольку приводит к увеличению проходных сечений в фазе наполнения камеры свежим зарядом топливовоздушной смеси.

Высокие скорости на периферии лепестка обусловлены высокой частотой циклического процесса.

Интегральная и удельная лобовая тяга двигателя пропорциональна расходонапряженности, т.е. числу рабочих циклов в единицу времени [6]. В связи с этим снижение частоты процесса с целью повышения ресурса не следует рассматривать в качестве приемлемого решения.

Приемлемая работоспособность рабочего тела, генерируемого в процессе изохорического сгорания, на основных режимах работы достигается при стехиометрическом соотношении компонентов топлива, поэтому снижение температуры следует связывать лишь с дросселированием двигателя по тяге.

Механическая прочность клапана зависит от его материала и толщины. Свойства материала определяют вязкость, пластичность, величину удельной нагрузки, устойчивость к знакопеременным нагрузкам. Выбор титанового сплава обусловлен экспериментально установленным фактом повышенной стойкости по сравнению с иными конструкционным материалам, применяемыми в аналогах.

Статистика испытаний свидетельствует, что ресурс клапана в значительной мере зависит от его толщины (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость ресурса двигателя от толщины клапана

Толщина клапана, мм	Ресурс двигателя, мин
0,41	1-3
0,53	5-8
0,63	20-30

Каждый клапан имеет свою собственную частоту колебаний лепестка, которая зависит от толщины материала и диаметра седла, причем, от амплитудо-фазо-частотных характеристик (АФЧХ) зависит его работоспособность.

В данном направлении были проведены работы по измерению АФЧХ лепестка клапана, полученной из осциллограммы, в зависимости от толщины. Выделены основные частоты и гармоники колеблю-

щейся пластины [4]. Осциллограмма лепестка клапана показана на рис. 2.

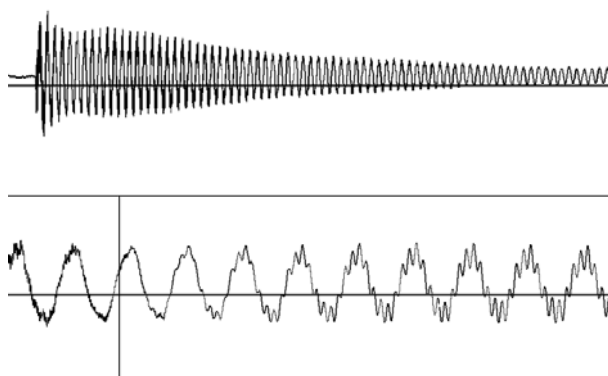


Рис. 2. Осциллограмма колебаний лепестка клапана

При обработке осциллограммы выявилась устойчивая гармоника, частота которой была на порядок выше основной. Трактовка указанного эффекта следует из представленной далее математической модели процесса осциллирующий лепестка клапана, сводящейся к описанию свободных колебаний упругого стержня в двумерном пространстве.

Метод численного исследования

Движение лепестка определяется функцией $y(t,x)$ и описывается уравнением [5]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{EJ}{\rho S} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0, \quad (1)$$

$y(t,x)$ – смещение поверхности от равновесного положения; E – модуль Юнга; ρ – плотность материала; S – площадь поверхности; $J = \frac{bh^3}{12}$ – момент инерции; h , b – толщина и ширина соответственно.

На краях лепестка удовлетворяются граничные условия:

– на левом конце - жесткое защемление:

$$y|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial x}|_{x=0} = 0,$$

– на правом конце – отсутствие изгибающего момента и перерезывающей силы:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}|_{x=l} = 0.$$

В начальный момент времени:

$$y|_{t=0} = f(x), \quad \frac{\partial y}{\partial t}|_{t=0} = 0 \quad (0 \leq x \leq l).$$

Решение уравнения (1) получено методом конечных разностей [9]. Частные производные аппроксимировались конечными разностями четвертого порядка точности [3]. Полученный результат представлен в виде вековой поверхности (рис. 3, а) и изменения формы лепестка во времени (рис. 3, б),

где 1–7 – форма изгиба лепестка клапана на семи временных срезах за время полупериода колебаний.

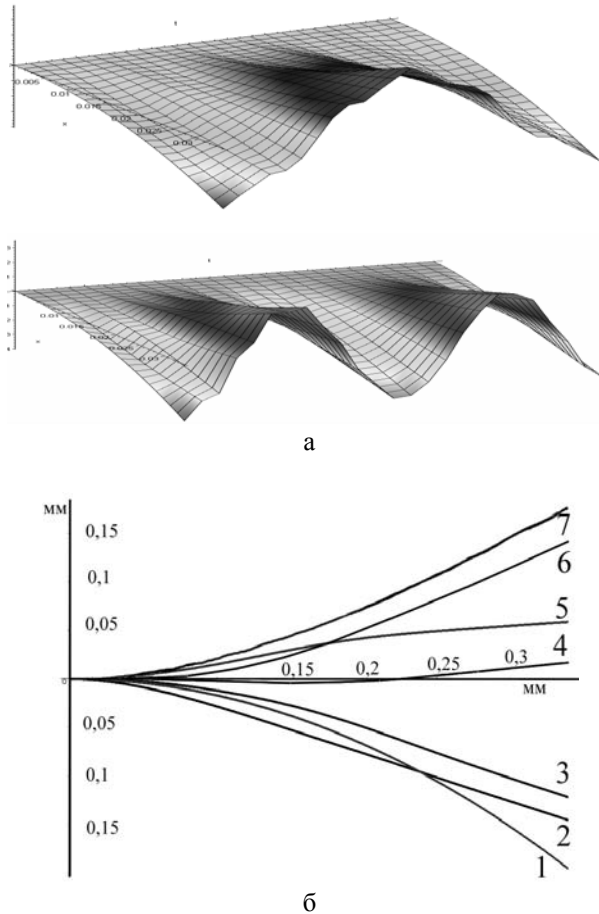


Рис. 3. Вековая поверхность и срезы процесса колебания лепестка клапана

Результаты численного моделирования дают представление о комплексно гармоническом характере колебательного движения лепестка клапана. Кроме основной частоты (рис. 6), в колебательном процессе присутствуют частоты более высокого порядка, а значит, лепесток в верхней и нижней мертвых точках при колебании меняет свою форму. Это, в свою очередь, может явиться основанием к пересмотру формы поверхности седла и клапанной решетки.

Определение частотного спектра осуществлялось на основе двухвариантного анализа.

Проведенный по Фурье-преобразованию (рис. 4) вейвлет-анализ [7, 8] звуковой записи процесса колебаний лепестка показал, что основная гармоника остается устойчивой на протяжении всего временного промежутка, в то время как гармоники высших порядков со временем затухают (рис. 5), что подтвердил развернутый во времени Фурье анализ (рис. 6).

Для сравнения на рис. 7 представлен Фурье-анализ звуковой записи рабочего режима двигателя.



Рис. 4. Фурье-анализ колебаний лепестка клапана

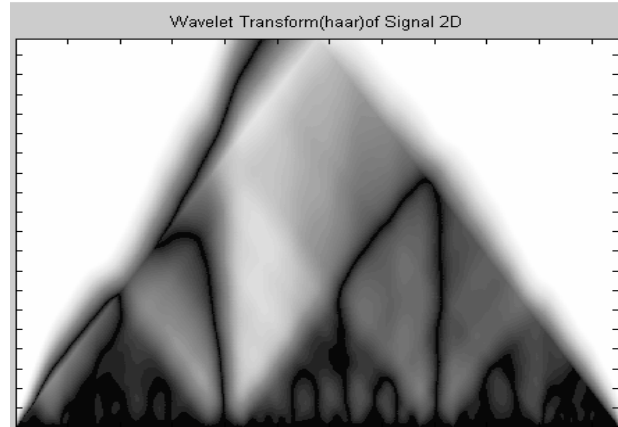


Рис. 5. Вейвлет-анализ (вейвлет Хаара) Фурье-преобразования

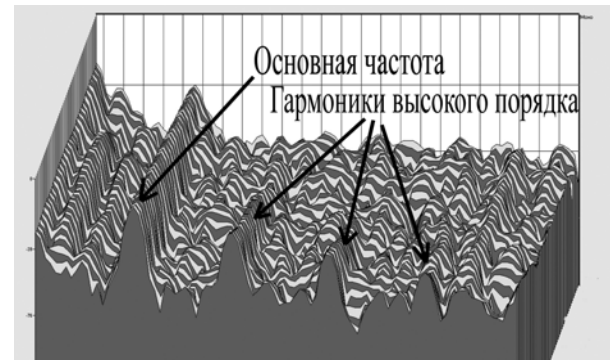


Рис. 6. Фурье-анализ колебаний лепестка клапана во времени

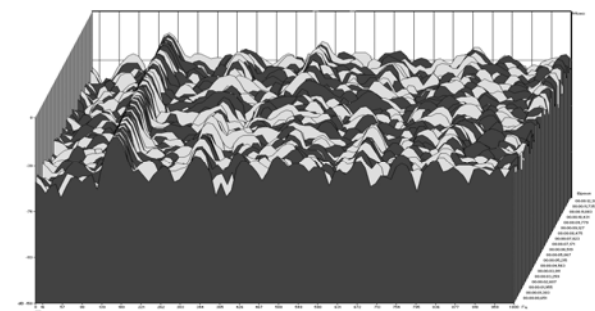


Рис. 7. Преобразование Фурье для звукового сигнала работы двигателя

Заключение

Из сопоставления полученных частотных спектров отдельного лепестка и двигателя в целом можно прий-

ти к выводу об их схожести, откуда следует заключение о наличии основополагающего условия работоспособности исследованной конфигурации ПуВРД.

Литература

1. Амброжевич А.В. Комплексная математическая модель ПуВРД малой тяги и его испытательного стенда / А.В. Амброжевич, С.Н. Ларьков // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2004. – № 4.

2. Ларьков С.Н. Формирование облика воздушно-реактивных двигателей малоразмерных летательных аппаратов на основе комплексного моделирования: дис. канд. техн. наук: 05.07.05; (Рукопись) / Ларьков Сергей Николаевич. – Х., 2005. – 159 с.

3. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1973. – 631 с.

4. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. / С.Л. Марпл-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

5. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 736 с.

6. Бородин В. Пульсирующие воздушно-реактивные двигатели летающих моделей самолетов / В. Бородин. – Х.: Изд-во ДОСААФ, 1974. – 104 с.

7. Фрик П.Г. Турбулентность: модели и подходы: конспект лекций. Часть II / П.Г. Фрик. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т., 1999. – 136 с.

8. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // *Успехи физических наук*. – 1996. – Том 166, № 11. – С. 1145-1170.

9. Рихтмайер Р. Разностные методы решения краевых задач / Р. Рихтмайер, К. Мортон. – М.: Мир, 1972. – 418 с.

Поступила в редакцию 15.01.2009

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. конструкции авиационных двигателей А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ЧАСТОТНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ І РЕСУРСОМ КЛАПАНА ПУПРД

О.В. Амброжевич, І.П. Бойчук, В.Ю. Сілевич

Наведені оцінки факторів, що визначають ресурс пульсуючого повітряно-реактивного двигуна з автоматичним клапаном. Проведений аналіз осцилограми акустичного сигналу, що виходить від коливного пелюстка працездатного клапана ПуПРД і робочого режиму двигуна. Виявлена основна частота коливань пелюстка клапана й наявність гармонік високого порядку. Представлені результати чисельного моделювання процесу коливання пелюстка клапана на підставі схеми коливального процесу затисненого стрижня. Отримане трактування ефекту присутності високочастотних гармонік. Сформульована умова працездатності ПуПРД, як узгодження власного частотного спектра клапана й процесу в цілому.

Ключові слова: пульсуючий повітряно-реактивний двигун, автоматичний клапан, натурний експеримент, осцилограма, амплітудно-фазочастотні характеристики, Фур'є-аналіз, вейвлет-аналіз, частотний спектр, гармоніки високого порядку.

RESEARCH OF CORRELATION BETWEEN FREQUENCY CHARACTERISTICS AND AIR PULSE-JET VALVE AVERAGE LIFE

A.V. Ambrozhevitch, I.P. Boychuk, V.Y. Silevich

The factor assessment which determines average life of pulse-jet engine with automatic valve is considered. The analysis of oscillogram acquired from acoustic signal of serviceable pulse-jet engine valve vacillating and acoustic signal from performance engine has been conducted. The reference frequency of automatic valve vibration and high order harmonics presence is shown. The results of valve lobe vibration process computational modeling based on vibration process of restrained beam is presented. The interpretation of high order harmonics attendance is obtained. The working capacity of pulse-jet engine requirement like agreement between auxiliary valve frequency content and whole process is developed.

Key words: pulse air-jet engine, automatic valve, full-scale experiment, oscillogram, amplitude-phase-frequency characteristics, Fourier-transform, wavelet-analysis, frequency content, high order harmonics.

Амброжевич Александр Владимирович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры ракетных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Бойчук Игорь Петрович – ассистент кафедры теоретической механики и машиноведения, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: igor_boichuk@mail.ru.

Силевич Владимир Юрьевич – аспирант кафедры ракетных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: bob4ik84@mail.ru.