

УДК 629.735.33

А.В. АМБРОЖЕВИЧ, И.П. БОЙЧУК, В.Ю. СИЛЕВИЧ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Предложен универсальный метод исследования амплитудно-фазо-частотных характеристик, использующий метод дистанционной регистрации первичного сигнала. Метод позволяет непосредственно преобразовывать полученные звуковые осциллограммы в формат массивов данных для последующей математической обработки. Универсальность заключается в применении его для определения частоты любого колебательного процесса, в диапазоне звуковой частоты 20 – 20000 Гц. Рассмотрен анализ полученных во время испытаний осциллограмм при помощи вейвлет-преобразования. Представлены результаты исследований рабочего процесса в пульсирующем воздушно-реактивном двигателе.

метод измерений, пульсирующий воздушно-реактивный двигатель, амплитудно-фазо-частотные характеристики, вейвлет-анализ, осциллограмма колебаний

Введение

Возникновение необходимости получения амплитудно-фазо-частотных характеристик (АФЧХ) типично в процессе разработки различных объектов техники. Причем, во многих случаях проблематичной является размещение первичных датчиков непосредственно на объекте разработки (исследований) в силу неблагоприятных условий для надежной работы высокоточных средств регистрации ввиду наличия физических полей высокой интенсивности. Таким образом, возникает предпосылка к созданию средств измерения АФЧХ, использующих принцип дистанционной регистрации первичного сигнала, например, акустического. Другой предпосылкой является общая тенденция к унификации средств измерений на основе достижений в области информационных технологий. Такого рода метод и реализующий его программно-аппаратный комплекс предложен в данной статье.

1. Метод измерения АФЧХ элементов конструкции ПуВРД

Ранее использовавшиеся методы аналогичного назначения требовали применения специального

оборудования наподобие резонансного частотомера или шлейфового осциллографа с пьезокварцевым датчиком [1].

Метод измерения АФЧХ, описанный ниже, не требует каких-либо специальных устройств. Для проведения исследований нужно иметь ЭВМ с универсальным программным продуктом и компьютерный микрофон. Схема проведения эксперимента приведена на рис. 1.

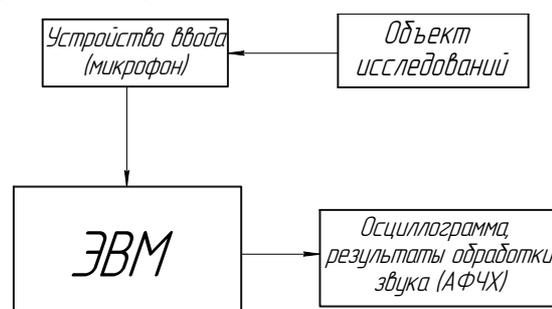


Рис. 1. Схема проведения эксперимента для определения АФЧХ

Звук, исходящий от объекта исследований, воспринимается микрофоном (следует заметить, что компьютерный микрофон воспринимает звуковые волны в диапазоне частот 20 – 20000 Гц и интенсивностью от 3 dB). Далее, полученный аналоговый сигнал обрабатывается звуковой картой ЭВМ, кото-

рая в данном случае работает как АЦП. Преобразованный сигнал записывается в виде осциллограммы, готовой к обработке.

Программный продукт позволяет анализировать звук, получая сводку по частотам, осциллограмму, интенсивность и т.д.

Для математических расчётов автором была разработана специальная программа, позволяющая получить координаты пиков колебательной кривой. Программа записывает в текстовом файле столбцы с числами – координатами пиков, которые потом могут обрабатываться универсальными программными продуктами наподобие «Excel», «Mathcad».

2. Исследование колебаний при помощи вейвлет-преобразования

В разных областях науки возникают задачи, связанные с анализом пространственных полей сложной многомасштабной структуры либо временных сигналов с меняющимся во времени спектральным составом. В качестве отклика возник метод построения специальных функциональных разложений, центральной идеей которых было использование базиса, каждая функция которого характеризует как определённую пространственную (временную) частоту, так и место её локализации в физическом пространстве (во времени). Выросший из данной схемы метод обычно называют непрерывным вейвлет-анализом [2]. Типовыми приложениями вейвлет-анализа являются локализация и классификация особых точек сигнала, вычисление различных его фрактальных характеристик, частотно-временной анализ нестационарных сигналов и др. [3 – 6]. Известны примеры использования вейвлет-анализа [4] в задачах диагностики режимов работы двигателей в целом и отдельных узлов: турбин, компрессоров и т.п. Основное назначение вейвлет – анализ временных сигналов и исследование структуры пространственных полей. Вейвлет-преобразование отображает пространство функций одной переменной (время)

в пространство функций двух переменных (время и частота). Вейвлет-анализ позволяет восстановить полную эволюцию спектрального состава сигнала во времени. Общее представление о спектрально-временной структуре сигнала можно получить по распределению модуля вейвлет-преобразования, фаза вейвлет-преобразования даёт наиболее точную информацию об особенностях в сигнале.

В настоящей работе был проведен вейвлет-анализ осциллограммы колебаний лепестка клапана и осцилляций давления в камере сгорания ПуВРД.

При помощи преобразования Хаара произведен анализ затухающих колебаний лепестка клапана (рис. 2, а) в приложении «MATLAB» [7], результат которого вместе с преобразованием Фурье представлен на рис. 2, б.

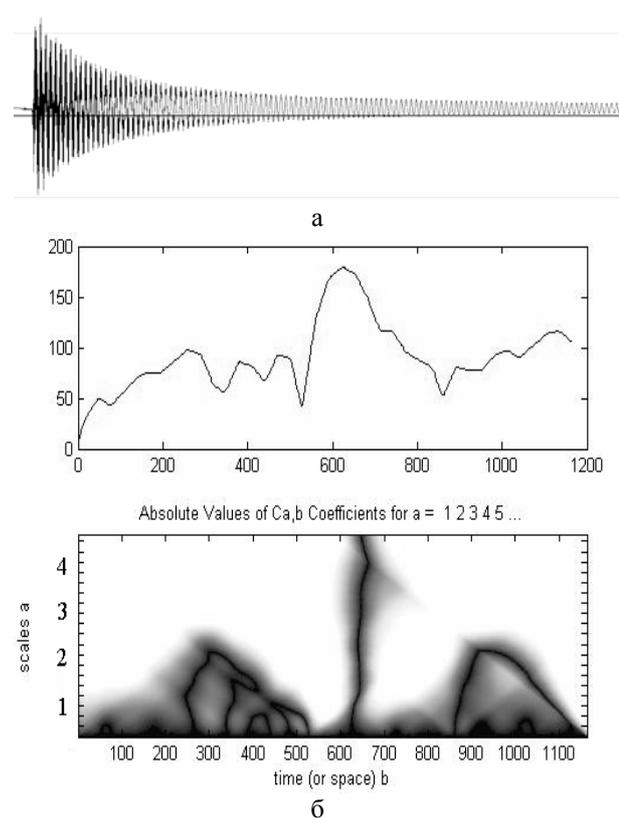


Рис. 2. Результат анализа Фурье и вейвлет-преобразования Хаара для колебаний лепестка клапана

Этот же результат можно представить в виде трёхмерного графика, где в горизонтальной плоскости две оси – это время осцилляций и период, а вер-

тикальная ось – масштабный коэффициент, умноженный на амплитуду колебаний (рис. 3).

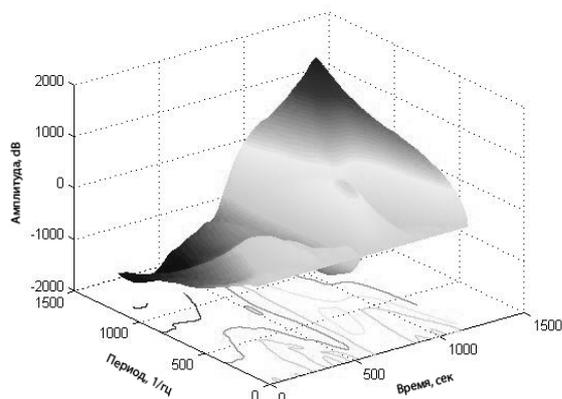
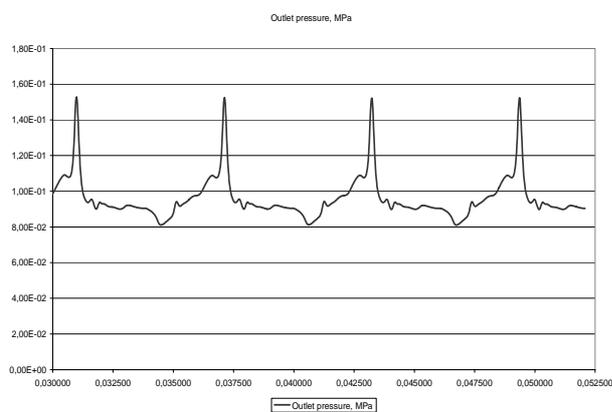
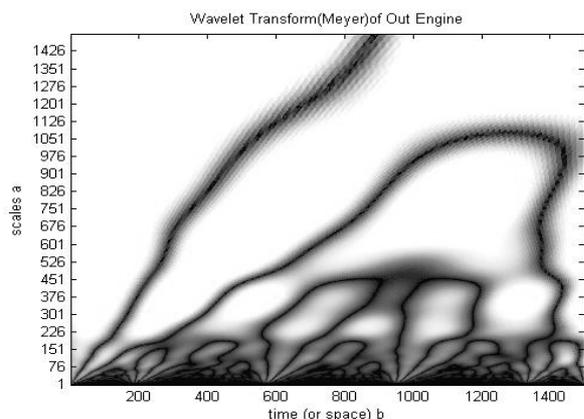


Рис. 3. Преобразование Хаара в трехмерном виде

Для обработки осциллограммы давлений в камере работающего ПуВРД (рис. 4, а) было применено преобразование Мейера. Анализ осцилляций давления, полученных при проведении огневых испытаний опытного образца ПуВРД, представлен на рис. 4, б.



а



б

Рис. 4. Вейвлет-преобразование Мейера пульсаций давления в ПуВРД

Подобно предыдущему случаю полученный результат представлен в трехмерном виде (рис. 5).

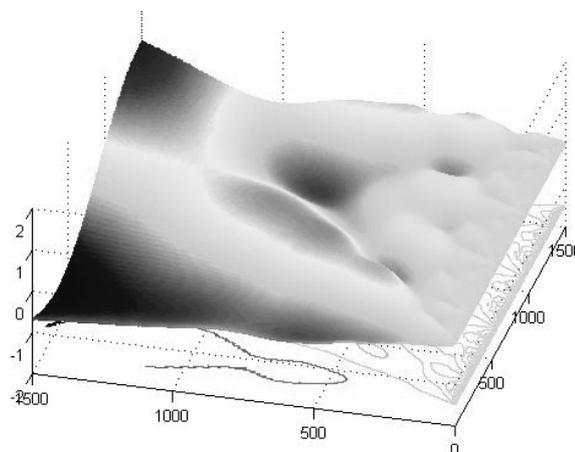


Рис. 5. Преобразование Мейера в трёхмерном виде

3. Применение инструментария численных опережающих исследований к задачам разработки ДУ с ПуВРД

Как показала практика опытной доводки, в процессе работ по созданию нового образца ПуВРД в значительной мере проявляются проблемы, связанные с согласованием собственных частотных характеристик процесса в целом, камеры и автоматического клапана. Тем самым обусловлена необходимость использования специальных методов расчета, основанных на детерминированной модели процесса, в основе которой лежат представления, адекватные физике образующих колебательных явлений.

Процесс отработки запуска и самоподдерживающихся режимов работы пульсирующих ВРД с автоматическим впускным клапаном требует проведения частотных исследований.

В результате анализа физики рабочего процесса выделены два основных фактора, влияющих на частоту работы двигателя:

1. периодичность газообмена;
2. автоколебания элементов конструкции.

Факторная схема колебательного процесса в камере ПуВРД имеет следующий вид:

- A. Элементы камеры (массивной конструкции)

совершают колебания с собственными низкими частотами и малой амплитудой.

Б. Клапан совершает сложное колебательное движение, состоящее из движения упругих элементов с большой амплитудой с наложением колебательного процесса меньшей амплитудой, но с большей частотой.

Результирующий колебательный процесс возникает в результате интерференции факторов по п.п. А-Б.

Частная задача исследований заключалась в определении параметров, влияющих на колебательные свойства клапана.

Эксперимент, имеющий своей целью получение АФЧХ, проводился с использованием программного обеспечения авторской разработки для преобразования звука в осциллограмму. Первичным датчиком-преобразователем являлся компьютерный микрофон. Отдельный лепесток клапана защемлялся на расстоянии 22 мм от центра, имитируя прижим ограничительной шайбой в двигателе (рис. 6).

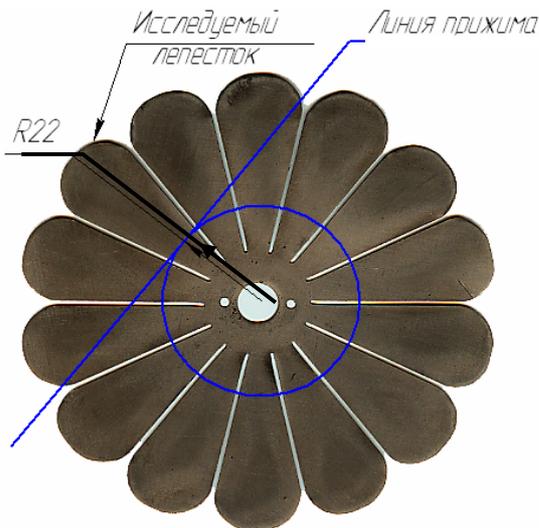


Рис. 6. Схема фиксации лепестка клапана

Лепесток отводился на 6-10 мм от положения равновесия и освобождался. Звук, исходящий от колеблющейся пластины, воспринимался микрофо-

ном, а далее с помощью АЦП и последующего программного преобразования отображался на экране монитора. Для уменьшения влияния колебаний остальных лепестков на микрофон, использовался специальный демпфер. Результат программной обработки представляет собой осциллограмму, показанную на рис. 7.

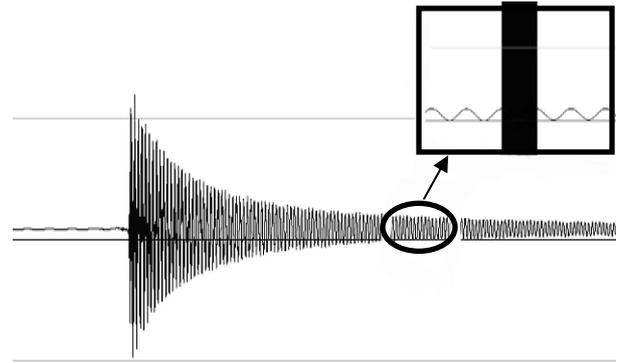


Рис. 7. Общий вид осциллограммы

При увеличении полученной кривой проявляется ее синусоидальный вид. Черным прямоугольником выделен период колебаний.

В результате преобразования исходного звукового сигнала была получена затухающая кривая колебаний. В соответствии с классическими представлениями механики [8] линия, проведенная через пики затухающей кривой, должна иметь вид $Y = A \cdot e^{-\beta x}$. Коэффициент A , зависящий от первичного отклонения лепестка и равный приблизительно величине первого пика кривой колебаний. На декремент затухания β влияют свойства материала и толщина пластины.

В результате серии опытов с различными образцами клапанов были найдены координаты пиков осциллограммы (рис. 8). Декременты затухания определялись с использованием метода наименьших квадратов. Так называемая «линия Тренда» [9, 10] представляет собой результат обработки массивов экспериментальных данных специальным математическим «фильтром».

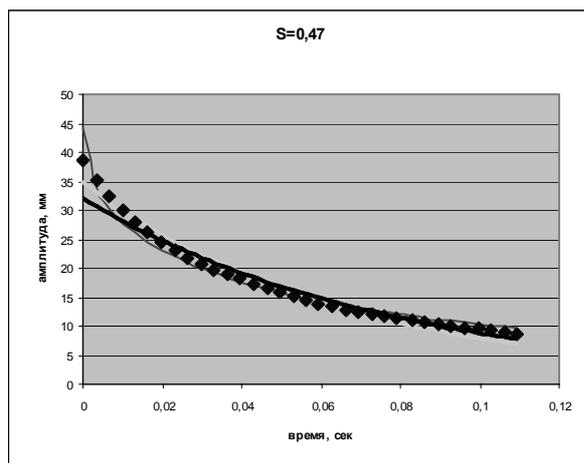


Рис. 8. Результат математической обработки массива экспериментальных данных образца клапана

Наилучший результат аппроксимации экспериментальных точечных массивов обеспечивается функцией вида $Y = A \cdot e^{-\beta\sqrt{x}}$.

Заключение

1. Разработанный метод является универсальным, поскольку может применяться для определения частоты любого колебательного процесса, в диапазоне звуковой частоты 20 – 20000 Гц.
2. Метод не требует использования специального оборудования и реализуется на основе ординарных мультимедийных программно-аппаратных средств.
3. Метод не требует специальной подготовки операторов измерительного комплекса.
4. Метод позволяет непосредственно преобразовывать полученные звуковые осциллограммы в формат массивов данных для последующей математической обработки.
5. Метод включает в себя средства для проведения частотных исследований рабочих процессов с применением вейвлет-преобразований.

Литература

1. Бородин В. Пульсирующие воздушно-реактивные двигатели летающих моделей самолетов. – Х.: ДОСААФ, 1974. – 104 с.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145-1170.
3. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций / П.Г. Фрик. – Ч. II. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1999. – 136 с.
4. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171, № 5. – С. 465-501.
5. Левкович-Маслюк Л. Дайджест вейвлет-анализа, в двух формулах и 22 рисунках // КомпьюТерра. – 1998. – № 8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://offline.computerra.ru/1998/236/1123/> (25.02.2008).
6. Короновский А.А., Храмов А.Е. Об эффективном анализе перехода к хаосу через перемежаемость с помощью вейвлетного преобразования // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, В.1. – С. 3-8.
7. Michel Misiti, Yves Misiti. Wavelet Toolbox For Use with MATLAB. Users Guide. – © COPYRIGHT by The MathWorks, Inc. – 1996. – 626 p.
8. Савельев И.В. Курс физики (том 2). – М.: Наука, 1989. – 462 с.
9. Блаттнер П. Использование Microsoft Excel 2002. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2002. – 864 с.
10. Лавренов С.М. Excel: Сборник примеров и задач. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 336 с.

Поступила в редакцию 6.03.2008

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