

**УДК 621.643.07**

# **Исследование и анализ резонансных и интерференционных колебаний напряжений в трубопроводных системах летательного аппарата и авиационного двигателя**

М.С. Яхненко

## **Аннотация**

Рассмотрена возможность использования результатов тензометрирования трубопровода самолёта для проектирования и доработок конструкции летательных аппаратов с учётом её вибронагружения

## **Ключевые слова**

гидросистема; тензометрирование; Фурье анализ

## **Введение**

Для исследования работоспособности, долговечности и надежности деталей и узлов конструкций необходима экспериментальная оценка напряженно-деформированного состояния деталей, в том числе и в отдельных, наиболее опасных точках. Для этого используются рентгеновские, поляризационно-оптические в том числе методы фотоупругости хрупких и гальванических покрытий, а также методы тензометрирования, основанные на масштабном преобразовании деформаций поверхности детали с помощью тензометров и тензометрических преобразователей. Поскольку в основе тензометрирования лежат методы измерения и анализа деформаций, а получение и обработка информации о зависимостях между действующими быстроменяющимися нагрузками и деформациями в узлах и деталях объекта исследования относится к динамическому тензометрированию [1], это дает возможность оценки действующих в конструкции напряжений.

Экспериментальные исследования конструкции планера и агрегатов самолёта являются важнейшей частью производственного процесса. Эксперименты по проведению продувок в аэродинамической трубе, тест на герметичность фюзеляжа, и многое другое необходимы для более точного представления о работе конструкции в требуемых условиях.

В условиях производства на Иркутском Авиационном заводе (ИАЗ) используется метод динамического тензометрирования для контроля работоспособности летательных

аппаратов (ЛА) при различных параметрах его работы. Тензометрирование проводится как при статических испытаниях, так и при динамических. Целью динамических испытаний является определение работоспособности гидросистемы (ГС), оцениваемой по достижению максимальных значений переменных напряжений. Результатами этих испытаний являются графики зависимостей напряжения от времени.

В настоящее время процесс проектирования становится многопараметрическим. Поэтому при проектировании учитываются всё большее количество факторов, как технологического характера, так и эксплуатационного. Анализ работы двигателя, как самой ответственной части самолёта, на ранних этапах его производства потребовал проведения динамических расчетов и экспериментов. На сегодняшний день для данных расчетов применяется самый разнообразный спектр подходов, в том числе и Фурье-анализ данных тензометрирования [2,3] и раскрутка математической модели двигателя в соответствие от его реальной циклограммы [4]. Однако для элементов конструкции, удалённых от источников вибрации, подход с использованием циклограммы двигателя является достаточно сильным приближением, не учитывающим вибрацию конструкции планера. Проведение анализа частотного отклика агрегата без знания условий его работы является недостоверным. Для того, чтобы достоверно оценить работоспособность устанавливаемого в ЛА агрегата, необходимо учитывать резонансные и интерференционные пики колебаний напряжений в конструкции ЛА.

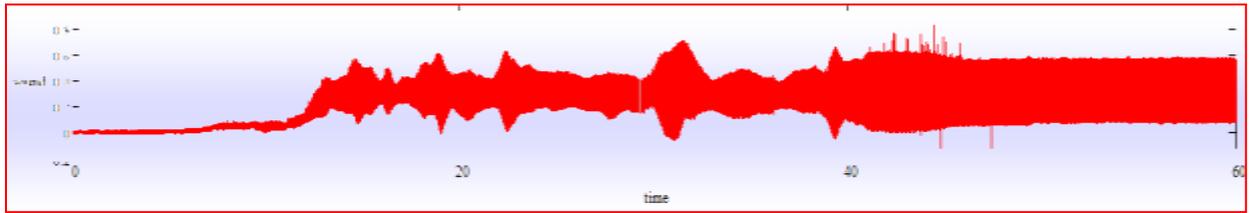
Поэтому цель данной работы состоит в определении возможности применения результатов тензометрирования для уточнения условий проектирования различных агрегатов и систем планера, в том числе и трубопроводам.

#### **Методы и объекты исследования**

В качестве объекта исследования выбран участок конструкции ГС, подверженный воздействию динамических нагрузок от насоса. Статистика разрушений по исследуемому участку труб показывает большую степень ее подверженности циклическим нагрузкам. Трубопроводы системы подвергались тензометрированию согласно стандартам ИАЗ.

#### **Результаты**

Результаты тензометрирования представляют собой дискретные ряды данных, отражающих собой зависимости напряжения от времени  $\sigma(t)$ , определённых во взаимоперпендикулярных плоскостях относительно горизонтальной плоскости фюзеляжа (рис. 1).



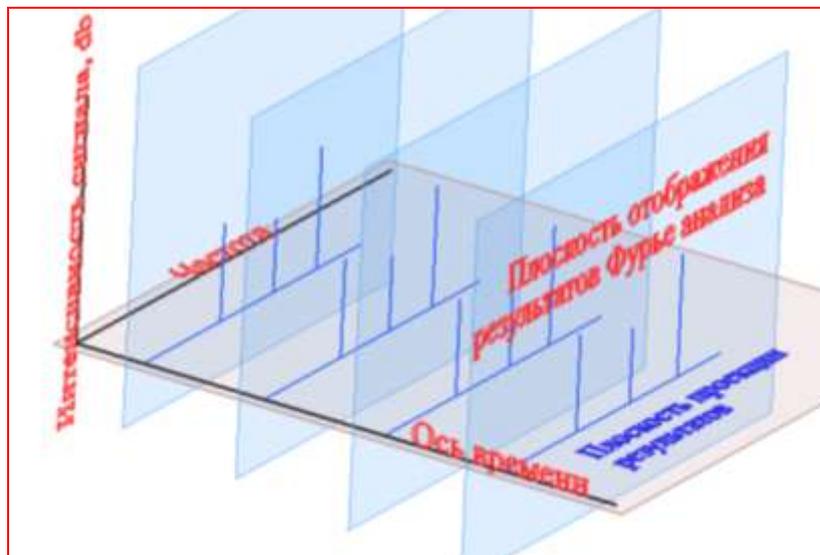
**Рис. 1.** Зависимость  $\sigma(t)$  для тензодатчика на поверхности трубопровода в горизонтальной плоскости  
 Анализ данных тензометрирование и их визуализация происходят согласно выражению:

$$spectra\langle j \rangle := \left[ dB \left( \left( |fft(wslice\langle j \rangle)| \right)^2 + .0001 \right) \right], \quad (1)$$

где  $fft(M)$  - функция быстрого преобразования Фурье, задающаяся выражением

$$c_p = \frac{1}{\sqrt{NO}} \cdot \sum_k \left[ v_k \cdot e^{i \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{NO} \right) \cdot k} \right], \quad (2)$$

Реализация построения спектрограммы исследуемого процесса происходит в плоскости проекции результатов (рис. 2). Построение спектрограммы ведётся по участкам (n) массива исходных данных (x) с выделением сигналов, преобладающих по интенсивности на исследуемом участке длиной (N) согласно результатам Фурье-анализа.



**Рис. 2.** Расположение данных на спектрограмме.

$$w_i := Hm(i, ss), \quad (3)$$

$$, \quad (4)$$

где  $Hm(n,N)$  аппроксимирующая функция для массива длиной  $N$ , являющегося частью массива длиной  $n$ , где коэффициенты необходимы для регулировки чувствительности спектрограммы

$$Hm(n,N) := \left( .54 - .46 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N - 1}\right) \right), \quad (5)$$

где  $j$  - координата положения начала участка в функции для разложения её в ряд Фурье.

$$j := 0 .. n - \text{ceil}\left(\frac{1}{1 - \text{overlap}}\right), \quad (6)$$

$$n := \text{floor}\left[\frac{\text{length}(\text{sound})}{ss \cdot (1 - \text{overlap})}\right], \quad (7)$$

где  $\text{floor}$  - функция, округляющая до большего целого;

$$\text{slice}_{i,j} := \text{sound}_{i+j \cdot \text{floor}[ss \cdot (1 - \text{overlap})]}, \quad (8)$$

где  $ss = 2^n$  - количество точек для разложения в ряд Фурье.

Функция для логарифмического отображения полученных в результате проведения Фурье - преобразований:  $dB(x) := 20 \cdot \log(x)$ .

В результате проведенных вычислений получаем спектрограмму сигнала тензодатчика (рис. 3).

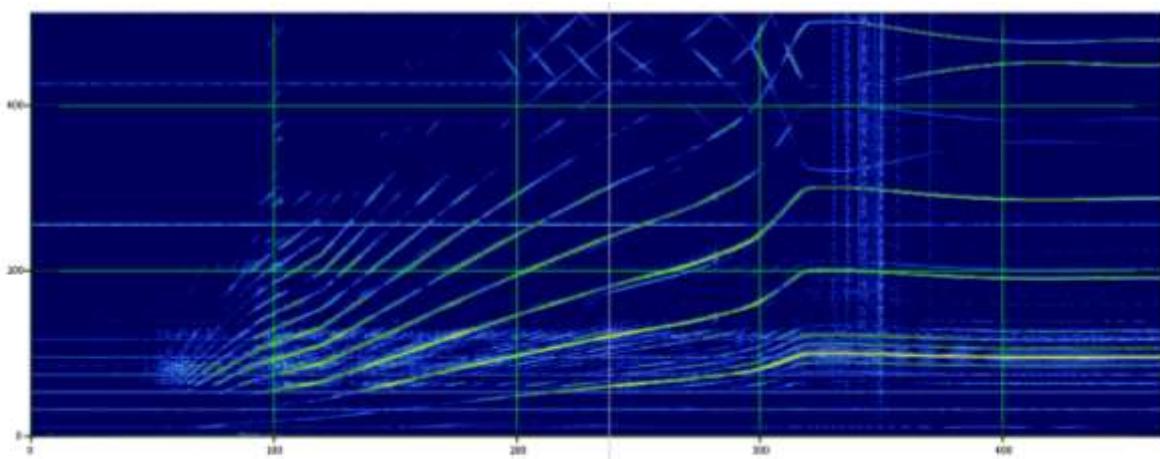


Рис. 3. Спектрограмма

При разделении спектрограммы по участкам временного анализа получаем АЧХ работы трубопроводной системы на исследуемом участке в данный момент времени (рис. 4).

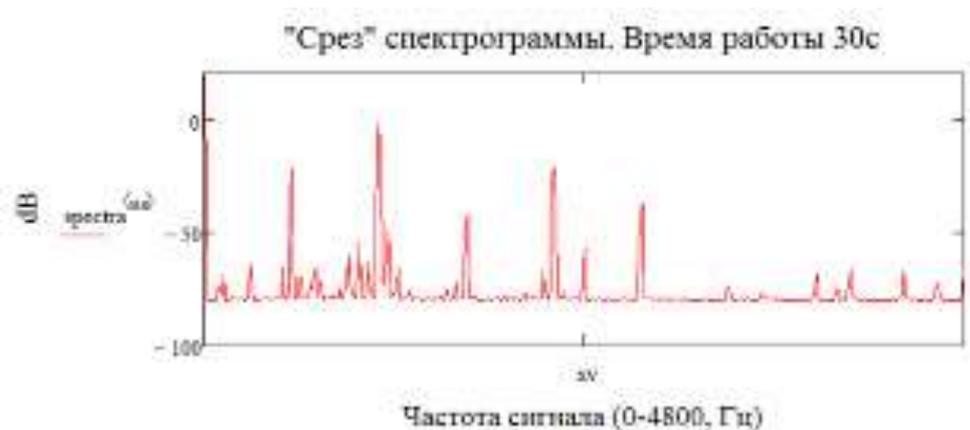


Рис. 4. АЧХ

На рисунке 3 виден характер частотного возбуждения конструкции во всем диапазоне измерений, однако очевидны явные пики. График (рис.4) является картиной внешнего силового воздействия на трубопровод. Пики на этом графике не являются пиками частотного отклика конструкции, так как сняты с нагруженной конструкции при определенном силовом возбуждении. Однако наличие графика в координатах, аналогичных координатам графика частотного отклика системы, позволяет оценить конструкцию путём сравнения положения пиков частотного отклика системы и пиков силового возбуждения конструкции. Такого рода анализ позволит заранее предсказать возможность попадания конструкции в резонанс с одним или многими источниками возбуждения, что позволит точнее прогнозировать поведение конструкции агрегата или системы при установке её на борт ЛА.

### Заключение

Описанный выше анализ показывает доступность результатов с одной стороны и сложность работы конструкции с другой. При моделировании динамических характеристик ротора двигателя, например, необходимо знать лишь циклограмму его работы [2, 3], в случае моделирования работы участка конструкции планера при комплексном возбуждении конструкции полученные данные необходимы в связи с очевидной сложностью её вибрационного нагружения.

Применение для моделирования работы конструкций такой методики приведёт к значительному усложнению модели и потребует увеличения производительности оборудования, однако со временем метод позволит добиться более точных результатов при анализе работы модели конструкции в процессе её проектирования, а значит - снизить время и затраты на испытания, а также позволит контролировать геометрические параметры конструкции в зависимости от предполагаемых условий её работы.

## **Библиографический список**

1. Леонтьев М.К. Тензометрирование в авиационных газотурбинных двигателях (ред. В.В.Иткин, М.Е. Колотников). М.: Изд-во МАИ. 2001. 36 с.
2. Капралов В.М. Исследование структуры вибрационной напряженности лопаток осевого компрессора авиационных ГТД. Полет, 2009, № 9, с.31-37.
3. Капралов В.М. Оценка долговечности и ресурса лопаток осевых компрессоров многорежимных авиационных ГТД. Полет, 2009, № 11, с. 56-60.
4. Пыхалов А. А., Милов А. Е. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин. - Иркутск: ИрГТУ. 2007. - 192 с.

Сведения об авторе:

Яхненко Михаил Сергеевич, аспирант Иркутского государственного технического университета, ул. Лермонтова, 83, Иркутск 664074, тел. 89086617353, e-mail: holtfor@mail.ru