

# РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ВИБРАЦИЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТРЕКОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Астахов С.А., Киселев И.А.

Федеральное казенное предприятие «Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем имени Л.К.Сафронова», Белоозерский, Россия  
saastahov@yandex.ru, ikiseleff@yandex.ru

*Аннотация.* Решение проблемы оценки действующих на динамическую систему «трековая каретка – объект испытаний» вибрационных нагрузок является актуальной научной задачей, позволяющей по полученным результатам принимать обоснованные технические, технологические и конструктивные решения по снижению уровня вибрационных воздействий с целью обеспечения сохранности объекта испытаний при его движении по рельсовому треку.

*Ключевые слова:* трековые испытания, рельсовый трек, ракетная каретка, вибрационные нагрузки, оценка вибраций, собственные упругие колебания, сверхвысокие скорости.

## Введение

Вибрационные нагрузки на элементы системы «трековая каретка – объект испытаний» (ТК-ОИ) при ее движении по рельсовому треку характеризуются переменным во времени внешним нагружением, вызывающим вынужденные колебания и собственными упругими колебаниями [1, 2, 3].

Вынужденные колебания возникают за счет внешних сил и динамических ударных воздействий, переходных ударных возмущений в направлении трех осей, формируемых со стороны башмаков трековой каретки и рельсов, а также за счет механических связей работающей двигательной установки с конструкцией трековой каретки и, наконец, за счет воздействия давления акустического поля, создаваемого турбулентными пульсациями истекающих продуктов сгорания двигательных установок, взаимодействующих с окружающей средой и отраженных от элементов трека. Нестационарное аэродинамическое обтекание является причиной возникновения широкополосной вибрации и акустического давления составных частей подвижной трековой установки.

При движении экспериментальной установки (ЭУ) по ракетному треку за счет угловых перемещений системы ТК-ОИ от действия аэродинамических сил и ударов между башмаками и рельсами из-за наличия зазоров могут возникать автоколебания.

Характеристиками, влияющими на изменение силовых воздействий при динамическом движении системы ТК-ОИ, является наличие зазоров между рельсовым полотном и башмаком и расстояния между центром масс и центром жесткости элементов ТК-ОИ – эксцентриситета центра жесткости.

Вибрационное воздействие при движении каретки по рельсовому треку определяется переходными ударными возмущениями в направлении всех трех осей  $X, Y, Z$ . Характер изменения массы, моментов инерции, эксцентриситета центра масс системы ТК-ОИ зависит от конструктивного оформления трековой каретки, типа объекта испытаний и определяется ее функциями.

Конструктивные элементы системы ТК-ОИ (рама трековой каретки с башмаками и узлами для размещения двигательной установки и объекта испытания) при анализе системы, как жесткого тела, характеризуются массой (эквивалентная масса  $m$ ), механической жесткостью (упругостью  $k$  (Н/м), и резонансной частотой ( $\omega_0$  – круговая частота собственных колебаний). Объект испытания размещается обычно на каретке с консольным закреплением.

Изгибно-крутильные колебания консольного цилиндрического тела – объекта испытания обусловлены различными механизмами вибрационного нагружения, например, сугубо нестационарным аэродинамическим воздействием при обтекании потоком объекта испытаний и вынужденными колебаниями, передающимися от башмаков при скольжении по рельсам, имеющим на контактной поверхности геометрические неровности и стыковые зазоры [4, 5].

При анализе вибрационного нагружения изделий, размещенных на трековых каретках при наземных трековых испытаниях, используются приближения, в которых реальная система заменяется условной с сосредоточенными параметрами с эквивалентной массой и упругостью.

Колебательное движение системы с одной степенью свободы обусловлено разницей внешней возбуждающей силы  $P_0 \sin \omega t$  и суммы сил инерции, упругости и демпфирования, т.е.

$$\ddot{x} + 2\delta_0\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = \omega_0^2 \frac{P_0}{k} \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – круговая частота собственных колебаний системы;  $\delta_0$  – параметр, пропорциональный коэффициенту демпфирования.

## **1. Оценка вибрационных воздействий на систему «трековая каретка – объект испытаний»**

Оценка вибрационных воздействий проведена теоретическими, численными и экспериментальными методами, результаты моделирования подтверждены натурными экспериментами.

### **1.1. Теоретические исследования вибраций динамической системы «трековая каретка-объект испытаний»**

Теоретические исследования вибраций динамической системы «трековая каретка-объект испытаний» проведены в следующих направлениях исследований:

- оценки вероятности возбуждения механических автоколебаний динамической системы «трековая каретка-объект испытаний» заданной конструктивной схемы и компоновки с учетом характеристик рельсового пути;
- оценки статической устойчивости системы «трековая каретка-объект испытаний» заданной конструктивной схемы и компоновки при продольном ее нагружении;
- оценки вибрационного нагружения движущейся системы «трековая каретка-объект испытаний» заданной конструктивной схемы и компоновки с учетом действующих на нее внешних нагружений и вибрационных нагрузок;
- стохастического анализа неустойчивых режимов движения системы «трековая каретка-объект испытаний» заданной конструктивной схемы и компоновки по сигналам виброускорений датчиков в натурном эксперименте;
- оценки частот акустико-вихревого взаимодействия в полукрытых полостях конструкции трековой каретки при натуральных высокоскоростных испытаниях.

Теоретические исследования вибраций динамической системы «трековая каретка-объект испытаний» проведены в целях формирования конструктивных решений исполнения системы «трековая каретка – объект испытаний» с учетом массогабаритных параметров объекта испытаний, определения необходимых исходных данных и условий для дальнейших численных исследований и моделирования движения по рельсовому треку.

### **1.2. Численные исследования вибраций динамической системы «трековая каретка-объект испытаний»**

Численные исследования вибраций проведены с использованием разработанных модели динамики движения системы «трековая каретка – объект испытаний» и метода численного расчета аэродинамических характеристик при нестационарном обтекании системы «трековая каретка – объект испытаний» произвольной компоновки при высокоскоростных трековых испытаниях с учетом изменения параметров внешней среды.

Математическая модель динамической системы трековая каретка-объект испытаний выполнена с использованием принципа связанных графов и представлена блоком каретки, блоком аэродинамики, блоком двигателя и блоком опор.

Основным блоком является блок каретки, содержащий информацию о конструкции объекта и его массово-инерционных свойствах. Блок каретки может быть разбит на произвольное количество элементов с заданием упругих свойств для связей между элементами и массово-габаритных свойств для каждого элемента. Увеличение количества элементов позволяет уточнить вибрационные характеристики моделируемого объекта.

Блок аэродинамики выполняет расчет аэродинамических сил и крутящих моментов, действующих на моделируемый объект. При расчете используются скорости движения каретки, рассчитанные в основном блоке. При необходимости уточнения вибрационных характеристик и изгибных форм каретки для каждого ее элемента может использоваться свой блок аэродинамики.

Блок двигателя позволяет задать профиль тяги и ориентацию вектора тяги от времени, также в нем вычисляется расход топлива, влияющий на изменение инерционных свойств каретки.

Блок опор определяет силы и крутящие моменты, действующие со стороны рельсов при движении.

Моделирование вибраций проводилось по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  для следующих основных элементов монорельсовой двухопорной системы ТК-ОИ: задней опоры, передней опоры, корпуса и обтекателя, в том числе, в условиях измененных параметров внешней среды (пониженной плотности).

На рисунке 1 приведены графики спектральной плотности виброускорений при моделировании вибраций имитатора объекта испытаний во внешней среде с различной плотностью на примере монорельсовой двухопорной каретки.

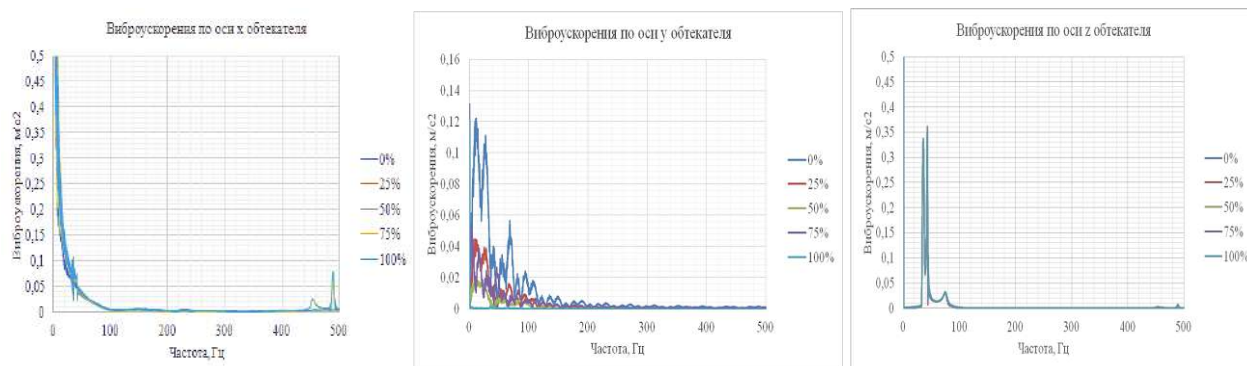


Рис. 1. Графики спектральной плотности виброускорений объекта испытаний по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  в условиях измененных параметров внешней среды

### 1.3. Экспериментальные исследования вибраций динамической системы «трековая каретка-объект испытаний»

В рамках проведенных экспериментов получены экспериментальные данные вибрационных воздействий на динамическую систему «трековая каретка – объект испытаний» при проведении трековых испытаний с использованием разработанного метода обработки экспериментальных данных вибрационных воздействий на динамическую систему «трековая каретка – объект испытаний» произвольной компоновки при высокоскоростных трековых испытаниях.

Метод представлен в виде последовательности следующих действий: определение облика и конструктивной схемы системы ТК-ОИ и мест размещения датчиков – регистраторов вибраций; получение входных данных для дальнейшей обработки; обработка сигналов; вычисление вероятностных характеристик сигналов виброускорений по всем осям и определение резонансных пиков; оценка нормальности распределения; проведение корреляционного анализа; проведение спектрального анализа; построение амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик, проведение Вейвлетного анализа.

Для исследований временных характеристик случайных вибрационных сигналов применяются Вейвлет преобразования. Это двухпараметрическая функция одномерного сигнала с локализацией по времени и по частоте. В качестве базисной функции применяемой программы расчетов используется форма Морлет. Эта форма базисной функции применяется для случаев, когда внешние воздействия на динамическую систему имеют форму импульсов или ударов в сочетании с периодическими воздействиями. Вейвлетное преобразование осуществляется методом свертки исходного сигнала и вейвлетной функции Морлет.

Программная реализация использует оконный проект. Сигнал масштабируется и сдвигается по времени. Вейвлет преобразование раскладывает сигнал в сумму базовых вейвлет функций, полученных путем масштабирования и сдвига базовых убывающих (быстро затухающих) Морлет функций. Вейвлетная функция или масштабно-временной спектр имеет вид.

$$W(\tau, T) = \frac{1}{\sqrt{T}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{T}\right) dt. \quad (2)$$

Чтобы перекрыть короткими волнами всю временную ось введен сдвиг по времени.

Базисная Морлет функция (единичная волна) в дискретном виде вычисляется по формуле:

$$\psi(t) = \sqrt{\frac{1}{f_s s}} \cdot \pi^{-\frac{1}{4}} \cdot e^{\left(\frac{jmt}{s}\right)} \cdot e^{-\frac{(t/s)^2}{2}}. \quad (3)$$

$f_s$  – частота дискретизации сигнала виброускорения,  $s$  – масштаб вейвлета (в единицах обратных частоте),  $m = b$  – параметр вейвлета. Здесь

$$s = \frac{1}{f \cdot L}. \quad (4)$$

Размер окна вейвлета  $N = k \cdot s \cdot f_s$ . Коэффициент  $k = 8$  выбран из условия с тем, чтобы

$$t/s = \frac{i - N/2}{S \cdot f_s} \text{ изменялось от } -4 \text{ до } +4.$$

На рисунке 2 по результатам эксперимента приведены сигналы виброускорений по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  датчика, размещенного в имитаторе объекта испытания за все время движения экспериментальной установки от точки старта до конечной отметки трека и входа в улавливатель. По записи виброускорений датчиками ВС 327 зарегистрированы ударные возмущения достаточно больших значений. Все датчики установлены в строгом соответствии с подвижной системой координат. Анализ сигналов виброускорений производился на различных участках движения системы ТК-ОИ.

Максимальные значения амплитуд виброускорений при ускоренном движении ЭУ в среде воздуха составляли в направлениях: по оси  $X$  – плюс  $A_X = +1571$  g и минус  $A_X = -1485$  g; по оси  $Y$  –  $A_Y = +1091$  g;  $A_Y = -1135$  g; по оси  $Z$  –  $A_Z = +938$  g;  $A_Z = -1002$  g.

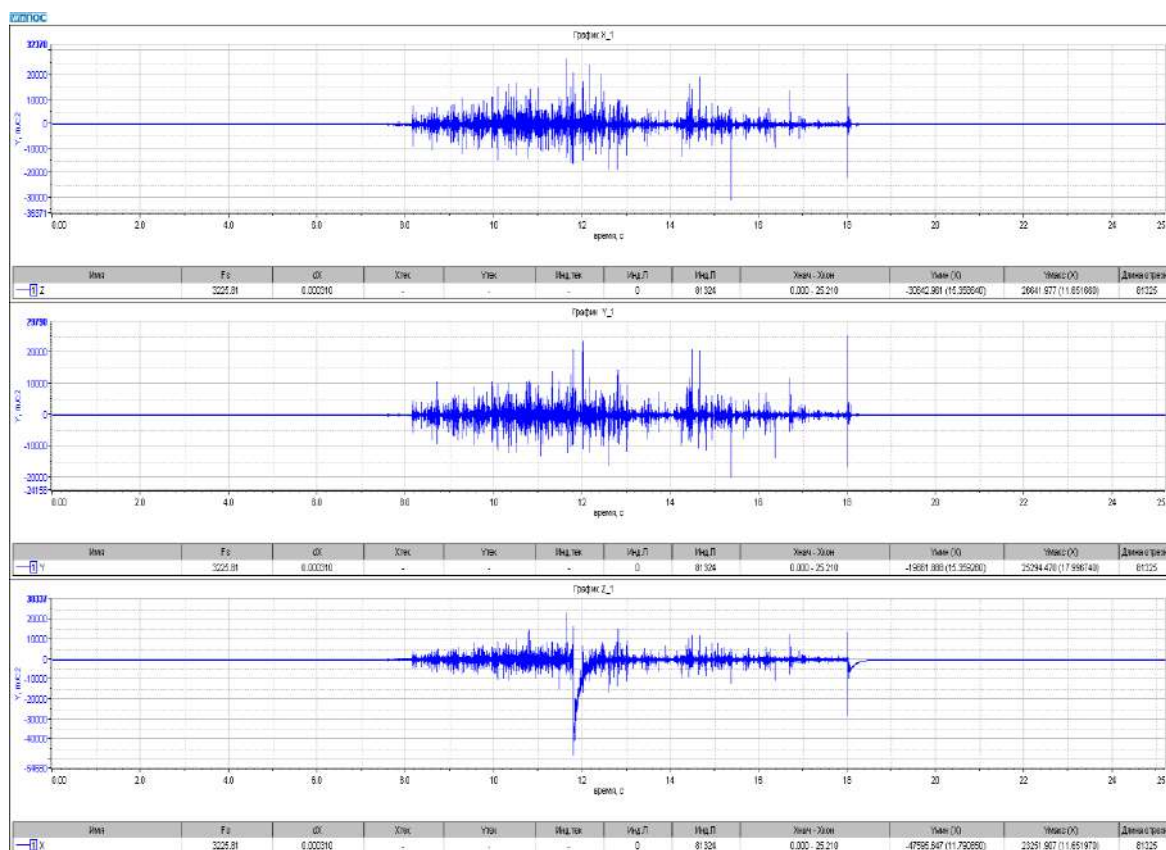


Рис. 2. Сигналы виброускорений по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  датчика ВС 327 за все время движения системы ТК-ОИ по рельсовому треку. Ордината виброускорений представлена в  $m/s^2$

На рисунке 3 приведен график изменения амплитуды вейвлетной функции по времени, отражающий вклад периодических воздействий и ударов в вибрацию по направлениям осей датчика, размещенного в имитаторе объекта испытаний [6].

В составе сложного сигнала присутствуют длинноволновые воздействия с частотой от 1 Гц с амплитудой, не превышающей  $300 m/s^2$  ( $\sim 30$  g). Наблюдается антирезонанс для составляющих, имеющих следующие частоты: от 1,0 Гц до 2 Гц; от 2 Гц до 3 Гц, далее, в широком диапазоне изменения частоты от 3 Гц до 10 Гц. Область графика, представленная синим цветом, отражает влияние среды в виде смеси воздуха с гелием на виброускорения датчика, направленные по ходу движения каретки.

График, в координатах амплитуда (ордината) и время движения ЭУ (абсцисса) в галерее с измененной средой, характеризует влияние свойств среды, ее плотности, вязкости, теплопроводности, скорости звука и др., на реакцию датчика по направлению продольных периодических и ударных внешних воздействий.

Строчка данных внизу графика отображает:  $X$  – текущее время, с;  $Y$  – амплитуда виброускорений,  $\text{м/с}^2$ ;  $Z$  – частота, Гц.

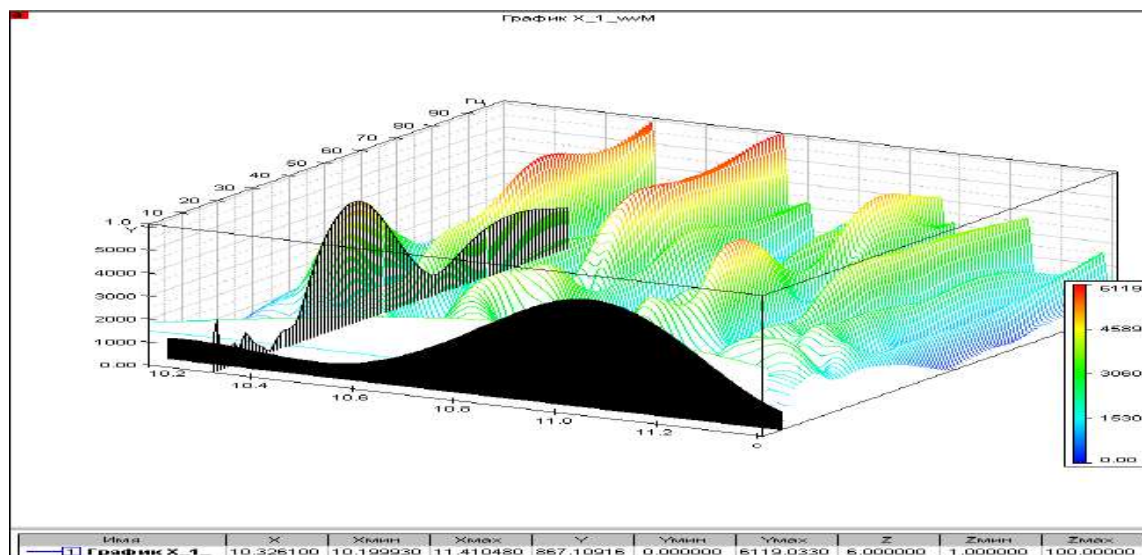


Рис. 3. График изменения амплитуды вейвлетной функции сигнала виброускорений, направленных по оси  $X$  датчика, при прохождении гелиевой галереи, за время движения каретки от 10,2 с до 11,4 с. Размерность виброускорений в  $\text{м/с}^2$

На графике рисунка 3 приведен пример построения вейвлетной функции для конкретного случая. Исследования вибрационных воздействий на систему «трековая каретка – объект испытаний» проведены как для имитатора объекта испытаний, так и для элементов трековой каретки, оборудованных датчиками, для различных временных интервалов движения по рельсовому треку.

## 2. Результаты оценки вибрационных воздействий на систему «трековая каретка – объект испытаний»

По результатам обработки экспериментальных данных вибрационных воздействий на динамическую систему «трековая каретка-объект испытаний» получено, что уровень максимальных амплитуд виброускорений в среднем по направлению осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  имитатора объекта испытания при разгоне экспериментальной установки до скорости около 2 М не превышает 600 g.

Проведенные эксперименты подтверждают значения, полученные в результате численных исследований и моделирования. На основании близости значений динамических коэффициентов  $K_x$ , (отношение амплитуд виброускорений в башмаке к амплитудам виброускорений на имитаторе объекта испытаний по оси  $X$ ), полученных из экспериментальных данных и из расчетных модельных значений, следует, что модель адекватно описывает реакцию системы ТК-ОИ на вибродинамические нагрузки при высокоскоростном движении по треку.

## 3. Заключение

Моделирование вибрационных нагрузок с использованием верифицированных методов и моделей позволяет получить адекватные оценки вибраций, действующих на элементы трековой каретки и объект испытаний при высокоскоростных испытаниях, обосновать конструктивные решения по выбору компоновки системы ТК-ОИ, обеспечить гарантированную сохранность объекта испытаний при его движении по рельсовому треку.

## Литература

1. Астахов С.А., Бирюков В.И. Экспериментальные исследования проводимости ударных воздействий от опор трековой каретки к изделиям при сверхзвуковых испытаниях // СТИН. – 2024. – № 4. – С. 2–6.

2. *Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Лисенкова Е.Е.* Задачи волновой динамики систем, несущих движущиеся нагрузки, и их приложение к испытаниям на ракетном треке // III «Нелинейная динамика машин» – School-NDM 2016: сборник трудов, Москва, 12–15 апреля 2016 г. – М.: ИМАШ РАН, 2016. – С. 45–54.
3. *Гладкий В.Ф.* Прочность, вибрация и надежность конструкции летательного аппарата. – М.: Наука, 1975. – 454 с.
4. *Веричев Н.Н., Ерофеев В.И., Орехова О.И.* Нелинейные стационарные изгибно-крутильные волны в упругом стержне // Приволжский научный журнал. – 2012. – № 2(22). – С. 27–34.
5. *Астахов С.А., Бирюков В.И., Кулак И.П. [и др.]* Изгибно-крутильные колебания консольно размещенного обтекаемого тела, имеющего кольцевое поперечное сечение, при высокоскоростных трековых испытаниях // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: материалы XXVIII Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, Кремёнки, 16–20 мая 2022 года. – М.: ООО «ТРП», 2022. – Т. 2. – С. 12–14.
6. *Астахов С.А., Бирюков В.И., Киселев И.А.* Фурье и вейвлет анализ вибраций при высокоскоростных трековых испытаниях авиационной техники // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: материалы XXX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, Кремёнки, 20–24 мая 2024 года. – М.: ООО «ТРП», 2024. – Т. 1. – С. 20–22.