



На правах рукописи

Орлов Виктор Сергеевич

**Автоматизация процесса формирования режимов
испытаний космического аппарата по результатам
анализа натурных измерений**

05.07.07 – контроль и испытание летательных аппаратов и их систем

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1 0 ДЕК 2009

Красноярск – 2009

Работа выполнена в Сибирском государственном аэрокосмическом университете имени академика М. Ф. Решетнева и ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Ханов Владислав Ханифович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Шатров Александр Константинович

кандидат физико-математических наук, доцент
Поздеев Александр Альфредович

Ведущая организация:

НИИ прикладной механики и математики
при Томском государственном университете

Защита состоится «25» декабря 2009 года в 16 часов на заседании диссертационного совета ДС 212.023.02 при Сибирском государственном аэрокосмическом университете имени академика М. Ф. Решетнева по адресу: 660014, г.Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева

Автореферат разослан «24» ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., профессор



М.В. Лукьяненко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Транспортирование космических аппаратов (КА) от завода-изготовителя до полигона запуска является одним из этапов натурной эксплуатации КА, а авиационная транспортировка в последнее время стала основным видом доставки КА до полигона запуска. Вместе с тем авиационное транспортирование КА до сих пор остается наименее исследованным видом транспортирования. При этом внешние воздействия на груз принимаются из нормативно-технической документации, разработанной еще на этапе создания самолета. В ней приводятся максимальные нагрузки на само транспортное средство и груз для наилучших условий эксплуатации, часто являющиеся завышенными, т.к. не учитываются особенности перевозок специальных грузов (возможные ограничения по погодным условиям, крепление, качеству аэродромов и т.д.). Например, для самолета Ил-76 (основного транспортного самолета в России) за 30 лет с начала эксплуатации никаких изменений и уточнений режимов нагружения грузов не проводилось. Это объясняется недостаточностью информации о нагрузках, действующих на самолет и груз в процессе эксплуатации (экспериментальные исследования нагрузок связаны с необходимостью проведения длительной регистрации в широком частотном диапазоне многоканальной аппаратурой с автономными источниками питания и трудоемкой обработкой результатов измерений), а также сложностью расчетной оценки и воспроизведения их в лабораторных условиях.

Все вместе это представляет достаточно серьезную научную и техническую проблему, решение которой позволит существенно снизить нагрузки на КА при отработке на авиационное транспортирование.

Исходя из сказанного выше, представленная работа является актуальной.

Объектом исследования является космический аппарат, транспортируемый самолетами от завода изготовителя к полигону запуска.

Предметом исследования являются нагрузки, действующие на космический аппарат при авиационном транспортировании, и режимы испытаний при отработке КА на транспортирование.

Целью данной работы является создание методики, позволяющей по результатам автоматизированной обработки измерений полученных при авиационной транспортировке КА сформировать режимы нагружения/испытаний КА на случай авиационного транспортирования.

Поставленная цель определила необходимость решения следующего комплекса взаимосвязанных задач:

1. Разработка алгоритма разделения стационарных и нестационарных составляющих в зарегистрированных сигналах.
2. Разработка методики форсирования режимов испытаний КА на случай авиационного транспортирования.
3. Разработка программы и базы данных для автоматизированной обработки результатов измерений
4. Построение по результатам обработки измерений моделей нагружения КА при авиационном транспортировании.
5. Формирование режимов нагружения/испытаний КА по результатам анализа данных натурных измерений.

Методы исследований: При выполнении диссертационной работы использовался аппарат теории эксперимента, системного анализа, теории вероятности и математической статистики, методы и алгоритмы обработки сигналов, методы имитационного моделирования.

Новизна работы представляется следующими результатами:

1. Разработана методика, позволяющая автоматизировать процесс формирования режимов испытаний космического аппарата по результатам анализа натурных измерений
2. Разработана методика, позволяющая разделять стационарные и нестационарные составляющие сигналов (патент РФ №2293958 от 20.02.2007).
3. Разработана методика форсирования режимов испытаний КА на случай авиационного транспортирования (патент РФ №2337338 от 27 октября 2008).
4. По результатам натурных измерений разработана стохастическая модель нагружения КА при авиационном транспортировании.

Достоверность результатов исследований основывается на использовании:

1. фундаментальных математических методов;
2. общепризнанных современных методов и алгоритмов обработки сигналов;
3. широко известных современных пакетов обработки сигналов: MATLAB, MATHCAD, MAPLE, MATHEMATICA;
4. сертифицированных средств натурных измерений;
5. сопоставлении полученных результатов с зарубежными источниками.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке алгоритмов разделения сигналов на стационарные и нестационарные составляющие и методики форсирования режимов испытаний КА на случай авиационного транспортирования.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики и программы (в виде интерактивной автоматизированной системы обработки данных), позволяющих по результатам натурных измерений сформировать более точные режимы испытаний КА, исключив повышенные воздействия на КА, а также в построении различных моделей нагружения КА при авиационном транспортировании. Разработанные методики используются в ОАО "Информационные спутниковые системы" им. академика М.Ф.Решетнева при разработке нормативной документации и проведении испытаний КА на случай авиационной транспортировки.

Работа проводилась в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002-2006 годы» по теме 2006-РП-16.0/001/076.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались: на семинарах кафедры «БИТ» СибГАУ, на I,II конференциях «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (апрель 2005,2006гг.- Красноярск), на IX,X,XI Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием, посвященных памяти академика М. Ф. Решетнева (ноябрь 2005...2007гг.- Красноярск).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 10 печатных работ, включая 3 рецензируемые работы и 2 патента на изобретения. Результаты исследований отражены в 3 научно-технических отчетах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения и четырех разделов, основных выводов, списка сокращений, списка использованных литературных источников из 104 наименований и приложения. Общий объем работы 129 страниц, включающих 41 иллюстрацию, 9 таблиц и приложения объемом 18 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика диссертационной работы, обосновывается актуальность темы, поставлена цель исследований. Сформулированы научная повизна и положения, выносимые на защиту, а так же определена практическая значимость работы. Приведены сведения об апробации, публикациях и внедрении результатов.

В первом разделе дана постановка задачи исследования нагружения КА при авиационном транспортировании, проанализированы нагрузки, действующие на самолет и груз при транспортировании, дан обзор методов аналитической оценки уровней нагружения КА, методов летных измерений, обработки и анализа полученных данных, приведены результаты анализа отечественных и зарубежных работ. Излагаются концепции многоуровневого представления данных, архитектура

построения баз данных, организация хранения данных. А также совокупность проблем, связанных с проектированием, эксплуатацией и оценкой эффективности информационных систем, использующих базы данных.

Значительный вклад в развитие постановок и методов исследований воздействий на самолеты и грузы при авиационной транспортировке, постановке экспериментальных исследований и обработке результатов внесли отечественные ученые: Болотин В.В., Гладкий В.Ф., Гриненко П.И., Гудков А.И., Котельников, Куликов Е.И., Куликовский К.Л., Лавренчик В.Н., Лешаков П.С., Макаревский А.И., Макеев В.П., Новицкий П.В., Осоков Г.А., Павлюк Ю.С., Тихонов А.Н., Цветков Э.И., Шитов А.Б., Яценко Н.Н., и другие, а также ряд зарубежных ученых.

В конце раздела сформулированы задачи, решение которых позволит достигнуть поставленной в данной работе цели.

Во втором разделе вначале дается определение стационарных и нестационарных сигналов, а затем обсуждаются классические и современные методы их сбора, обработки и анализа. Наибольшее внимание уделяется вероятностно-статистическим методам.

Если среднее значение (первый момент) случайного процесса $\{x(t)\}$ в момент времени t_1 $\mu_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1)$, и ковариационная функция

$R_{xx}(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1)x_k(t_1 + \tau)$ для моментов времени t_1 , $t_1 + \tau$ зависят

от времени t_1 , то случайный процесс $\{x(t)\}$ называется нестационарным, а если они не зависят от t_1 , то случайный процесс называется слабо стационарным. Когда все моменты и смешанные моменты инвариантны во времени, то случайный процесс называется строго стационарным. Для практики, обычно, достаточно независимости от времени первых двух моментов (среднего и дисперсии). Предположение о стационарности, например, может быть подтверждено или опровергнуто при помощи простого непараметрического среднего квадрата (или других связанных с ним оценок характеристик), рассчитанных по отдельным отрезкам имеющейся реализации.

Количественная оценка стационарных случайных процессов проводится с помощью функций спектральной плотности процессов:

$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$, $S_{yy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{yy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$, $S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$, где $R_{xx}(\tau)$, $R_{yy}(\tau)$, $R_{xy}(\tau)$, ковариационные и взаимная ковариационная функции.

Нестационарные случайные процессы хорошо описываются с помощью функций ударных спектров (ускорений, перемещений и т.д.).

$$X(f) = 2\pi f \max \max \int_0^t U(\tau) e^{-\frac{\pi f}{Q}(t-\tau)} \sin[2\pi f(t-\tau)] d\tau, \text{ где}$$

Q - добротность системы, f - собственная частота, U - функция воздействия, t -длительность воздействия, X - реакция системы на воздействие.

Рассматриваются два этапа *обработки и анализа данных*. Первичный этап (редактирование данных) включает в себя выявление и исключение аномальных или недостоверных сигналов, сбоев регистрирующей аппаратуры, исключение сигналов с уровнями шумов выше критических. Вторичный этап включает, как минимум, проверку на стационарность, присутствие периодических составляющих, нормальность процесса. Здесь же *принимается решение* об объеме и видах дополнительной обработки (разной для разных сигналов). Это может быть: разделение сигналов на стационарные и нестационарные составляющие, построение ударных спектров ускорений, гистограмм распределения текущих значений, автокорреляционных функций, взаимных корреляционных функций, расчет дисперсии и матожидания и т.д. Последним шагом второго этапа является формирование режимов нагружения/испытаний и *принятие решения* о форсировании испытательных режимов. На этом же этапе начинается *управление* созданными базами данных и их заполнение. При этом, в процессе анализа необходимо постоянно проводить *оценку и анализ* погрешностей, как при измерениях, так и при обработке результатов.

В разделе в дополнение к известным предлагаются *алгоритмы и методики разработанные* автором: алгоритм разделения данных на стационарные и нестационарные составляющие, методики форсирования режимов испытаний и построения стохастической модели нагружения КА.

Алгоритм разделения данных. Суть алгоритма состоит в следующем. Воздействие на КА при транспортировании представляется в виде суммы двух воздействий: стационарного и нестационарного. Рассмотрим имеющийся набор из $K \cdot N$ зависимостей ускорений от времени (набор временных рядов), полученных в результате измерений в K точках контроля по N случаям транспортирования, длительностью t_i каждый. Для каждой из K точек контроля по всем имеющимся N случаям измерений формируем псевдоисходный процесс $\Theta_k(T_N)$ длительностью, равной их общей длительности $T_N = \sum_{i=1}^N t_i$. Набор временных рядов $\{\Theta(t, K, N)\}$ имеет вид

$$U_{MN}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [F_1(\omega) - F_2(\omega)] e^{-j\omega t} d\omega,$$

$$F_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_{MN}(t) e^{-j\omega t} dt, F_2(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{MN}(t) e^{-j\omega t} dt$$

В результате такой операции в исходном процессе остаются только нестационарные составляющие. Выполнение обратного преобразования Фурье позволяет получить нестационарную составляющую часть псевдоисходного процесса $\{U_{MN}(t)\}$ в виде временной зависимости. В результате из одного псевдоисходного процесса $\{\Theta_{MN}(t)\}$ получают два процесса: стационарный $\{S_{MN}(t)\}$ и нестационарный $\{U_{MN}(t)\}$.

Дальнейшая обработка проводится по алгоритмам, предназначенным для обработки соответствующих процессов.

Методика форсирования режимов испытаний. Полученная по результатам обработки натуральных измерений функция внешнего нагружения $W_{MN}(S(\omega), U(\omega))$ включает в себя вибрационные воздействия в форме спектральной плотности мощности виброускорений (СПМ) и времени воздействия вибрации, а ударные в форме ударных спектров ускорений (УСУ) и количества ударов. При *принятии решения* о форсировании испытаний из всех вибрационных воздействий по всем этапам транспортирования получаем максимальное значение СПМ по методу огибающих. Режимы испытаний приводим к максимальным значениям СПМ, а длительность вибрационного воздействия определяем по формуле:

$$T_p = \frac{L}{L_t} \left\{ \sum_{i=1}^{i=k} (PS_i / PS_{\max})^\alpha T_i \right\} \quad (1)$$

где: T_p – время испытаний;

T_i – время транспортирования на “i” режиме транспортирования (общее время транспортирования $T_t = \sum T_i$);

PS_i – текущее значение спектральной плотности мощности виброускорений при транспортировании;

PS_{\max} – максимальное значение спектральной плотности мощности виброускорений при транспортировании;

L – необходимая дальность транспортирования

L_t – дальность транспортирования, для которой был сформирован режим вибрационных испытаний;

α – коэффициент эквивалентности вибрационных испытаний;

k – количество режимов транспортирования.

Аналогично максимальные значения УСУ получаем по методу огибающих по данным обо всех случаях авиационного транспортирования для всех заранее определенных амплитудных диапазонов, а количество ударов определяем по формуле:

$$N_p = \frac{M}{M_1} \left\{ \sum_{q=1}^{j-n} (S_{jq} / S_{\max})^\beta N_{jq} \right\} \quad (2)$$

где: N_p – количество ударов при испытаниях;

N_{jq} – количество ударов на “j” режиме транспортирования в “q” амплитудном диапазоне (общее количество ударов за время транспортирования $N_t = \sum N_{jq}$);

S_j – текущее значение ударного спектра ускорений при транспортировании в амплитудном диапазоне;

S_{\max} – максимальное значение ударного спектра ускорений полученное при транспортировании;

M – необходимое количество взлетов и посадок

M_1 – количество взлетов и посадок, для которых был сформирован режим ударных испытаний;

β – коэффициент эквивалентности ударных испытаний;

a – количество амплитудных диапазонов;

n – количество режимов транспортирования.

Количество ударов также форсируется относительно максимального значения УСУ. Кроме того, при определении количества ударов максимальные значения ударного спектра ускорений, полученные по методу огибающих, для всех амплитудных диапазонов по данным обо всех случаях авиационного транспортирования, заменяем ударными спектрами ускорений от импульсов ускорений. Такие УСУ должны отличаться от огибающих УСУ на величину меньшую, чем погрешность определения УСУ.

Коэффициент α в формуле (1), принимаем равным двум, а коэффициент β в формуле (2) равным четырем. В результате этого время испытаний существенно сокращается.

Методика построения стохастической модели нагружения КА

В разделе обосновывается представление нагрузки (ускорений) $a(t)$ на КА при авиационном транспортировании в следующем виде:

$$a(t, \omega) = A_0 e^{-\sigma t} \sin(\omega_1 t + \zeta) \eta(t) + B_0 \sin(\omega_2 t + \zeta) \eta(t) + C_0 \sin(\omega_3 t + \chi) \eta(t) + \Theta(t), \quad (3)$$

где:

A_0, B_0, C_0 – амплитуды ускорений (положительные случайные постоянные);

σ – коэффициент затухания

$\varphi(t)$ – стационарная случайная функция времени

$\eta(t)$ – единичная функция Хевисайда.

ω_1 – случайная составляющая (частота)

ζ, χ – случайные переменные (фазы),

$\Theta(t)$ – нормальный белый шум;

Значения коэффициентов в уравнении (3) получаются в результате обработки данных по натурному транспортированию КА. Данная модель включает все виды воздействий на КА при авиационном транспортировании (не рассматривается природа воздействия, а фиксируется общая реакция конструкции на эти воздействия), причем исключение части слагаемых в уравнении и варьирование коэффициентами позволяет моделировать различные этапы транспортирования (взлет, посадка, крейсерский полет и т.д.). Представленная модель может быть использована при имитационном моделировании в качестве рабочей нагрузки.

В третьем разделе рассматривается разработка многоуровневой базы данных для анализа результатов измерений, функциональная модель исследуемого объекта, обсуждаются проблемы и модели хранения временных рядов, обосновывается выбор системы управления базой данных, ее структура и структура информационной системы, и проводится разработка системы автоматизированной обработки данных.

В разделе на основании опроса экспертов в исследуемой предметной области была сформирована функциональная модель формирования режимов испытаний по результатам натуральных измерений. Схематично она представлена на рисунке 1. В процессе обработки для каждого случая транспортирования создается экземпляр структуры в базе данных (БД), по мере проведения анализа поля этой структуры заполняются вновь полученными данными. Для хранения таких данных предпочтительней использовать объектно-реляционную методологию, что имеет неоспоримые преимущества при работе с временными рядами. Это позволяет создавать удобную и быструю в плане доступа структуру данных, которую легко модифицировать, дополнять и уточнять.

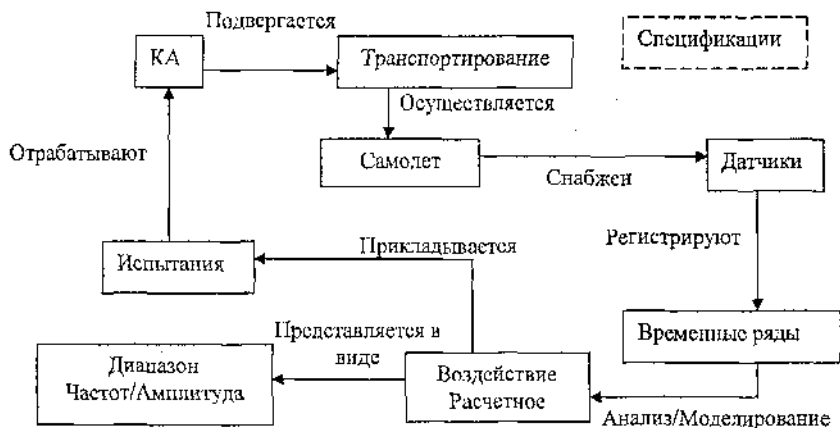


Рисунок 1 - Модель объекта

Рассматриваемая база данных использует хорошо зарекомендовавшую себя систему Oracle с интегрируемым модулем Oracle8 Time Series Data Cartridge для объектно-реляционной системы управления баз данных (СУБД) Oracle8. Модуль этот позволяет оптимизировать хранение в базах данных информации, представляющей собой временные ряды. Доступ к данным осуществляется посредством стандартного SQL или через объектный интерфейс. Модуль входит в состав СУБД Oracle8 Enterprise Edition.

Непосредственно для проведения анализа сигнала в составе информационной системы в основном используются уже хорошо известные математические процедуры из состава пакета MATLAB. В состав пакета MATLAB входит инструмент Database Toolbox. Это один из перечня дополнительных инструментов MATLAB, который позволяет перемещать данные (импортировать и экспортировать) между пакетом MATLAB и известными реляционными БД. С его помощью можно считать данные из существующей БД в MATLAB, использовать любые вычислительные и аналитические инструменты и сохранить полученные результаты обратно в ту или иную БД. Используя пакеты MATLAB и СУБД Oracle8i, была создана автоматизированная система, которая основана на пакетном принципе обработки данных.

Иерархия классов для хранения в БД показана на рисунке 2.

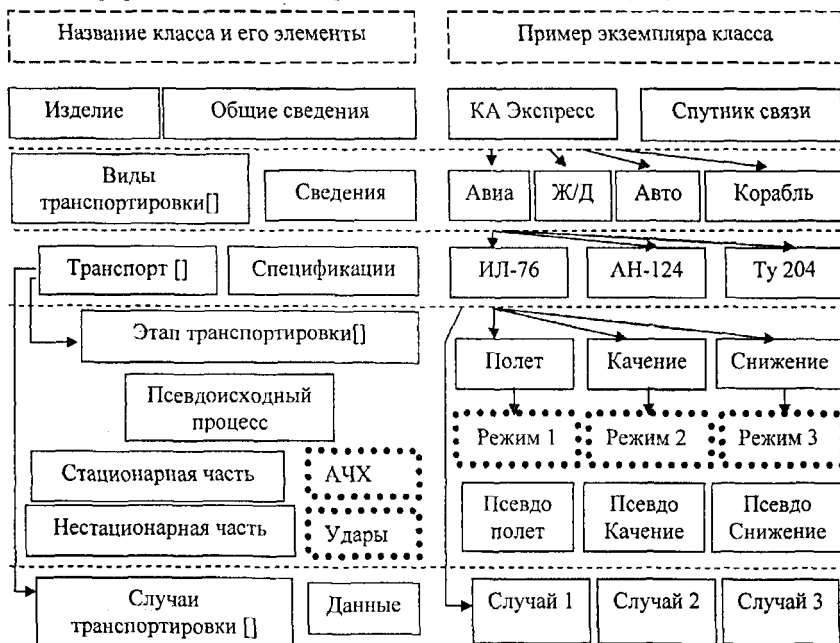


Рисунок 2 - Иерархия классов для ОР модели

Для каждого случая транспортирования создается экземпляр структуры в БД. По мере проведения анализа поля этой структуры заполняются вновь полученными значениями и временными рядами. Процедуры формализации для этапов первичной обработки и непосредственного формирования режимов испытаний трудно реализуемы, поэтому используется интерактивный режим работы. Система строилась с использованием пакетного принципа обработки, и поэтому большая часть процедур анализа сигнала используется в готовом виде в пакете MATLAB. Необходимый пакет данных берется из БД и передается на подсистему обработки, которая возвращает пакет с результатами. Структура системы показана на рис.3.

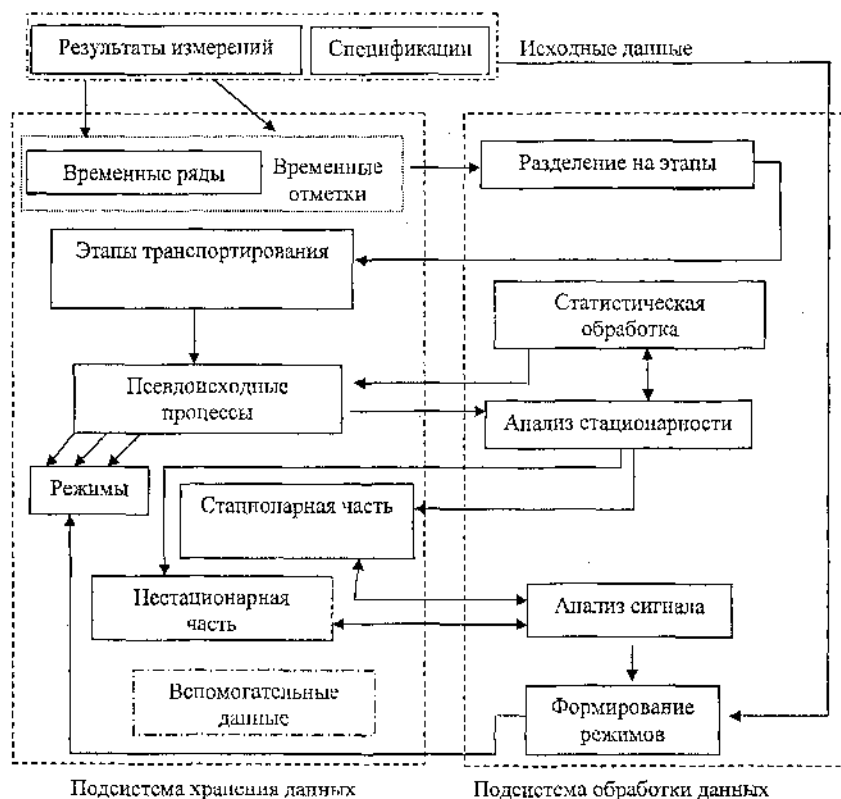


Рисунок 3 - Структура системы

Каждый такой пакет данных является целостным, и для его обработки не нужны никакие прочие сведения. Отличительными чертами такой методики являются высокая степень алгоритмизации и комплексность, что позволяет существенно упростить, а иногда и

исключить работу человека, причем модульность делает систему надежной и более гибкой, позволяет независимо друг от друга улучшать и варьировать блоками системы

В четвертом разделе проводится анализ нагрузок на космические аппараты, транспортируемые самолетами Ил-76 с использованием интерактивной автоматизированной системы обработки данных. По результатам обработки данных о транспортировании 14 КА сформированы режимы нагружения и испытаний для всех этапов транспортирования.

В результате обработки выделены три режима нагружения КА: взлет - посадка, набор высоты – заход на посадку, крейсерский полет

Режимы полета могут быть представлены в виде стационарного случайного процесса, т.к. матожидание и дисперсия слабо зависят от выборок (разброс составляет менее 1% для крейсерского полета и 5-6% в случаях набора высоты и при заходе на посадку), а взлет - посадка в виде нестационарного случайного процесса.

Модель нагрузок на КА представлена в виде УСУ и СПМ (три режима нагружения), и два случая для построения стохастических моделей.

Стохастические модели нагружения КА

Воздействие на груз при «взлете – посадке» представляется в виде:

$$a(t, \omega) = A_0 e^{-\sigma t} \sin(\omega_1 t + \zeta) \eta(t) + B_0 \sin(\omega_2 t + \zeta) \eta(t) + C_0 \sin(\omega_3 t + \chi) \eta(t) + \Theta(t) \text{ где:}$$

A_0 - амплитуда ускорений равная 2,5g;

σ - коэффициент затухания равный 0,126 1/с;

$\eta(t)$ - единичная функция Хевисайда;

$\Theta(t)$ - нормальный белый шум с дисперсией 2,5% от дисперсии суммарного процесса;

ω_1 – узкополосная случайная составляющая, изменяющаяся в диапазоне;

50 - 80Гц для продольных и 80 - 160Гц для поперечных колебаний;

B_0 - амплитуда случайного сигнала равная 0,5g по амплитуде в диапазоне частот 3 - 100Гц и 1g диапазоне 100-310 Гц;

ω_2 –случайная составляющая, изменяющаяся в диапазоне частот 3 - 310Гц;

C_0 - амплитуда случайного сигнала, равная 0,4g;

ω_3 – низкочастотная узкополосная случайная составляющая, изменяющаяся в диапазонах частот 3 - 7Гц и 15 - 20Гц;

ζ, χ -случайные переменные (фазы), изменяющиеся в диапазоне от 0 до π .

Воздействие на груз при крейсерском полете представляется в виде:

$$a(t, \omega) = B_0 \sin(\omega_1 t + \zeta) \eta(t) + C_0 [\sin(\omega_2 t + \chi_2) + \sin(\omega_3 t + \chi_3)] \eta(t) + \Theta(t), \text{ где:}$$

$\Theta(t)$ - нормальный белый шум с дисперсией 2,5% от дисперсии суммарного процесса;

$\eta(t)$ - единичная функция Хевисайда;

B_0 - амплитуда случайного сигнала, изменяющаяся в пределах 0,3g;

ω_1 - широкополосная случайная составляющая, изменяющаяся в диапазоне частот 3 - 310Гц;

C_0 - амплитуда случайного сигнала, изменяющаяся в пределах 0,1g;

ω_2 - низкочастотная узкополосная случайная составляющая, изменяющаяся в диапазонах частот 3 - 5Гц;

ω_3 - низкочастотная узкополосная случайная составляющая, изменяющаяся в диапазонах частот 15 - 20Гц;

ζ, χ - случайные переменные (фазы), изменяющиеся в диапазоне от 0 до π .

В таблице 1 приведены форсированные режимы вибрационных, а в таблице 2 ударных испытаний КА в виде одиночных импульсов эквивалентных УСУ. Максимальное значение УСУ в направлении Z показано на рисунке 4. Эквивалентный импульс описывается уравнением $9g \cdot \sin(\pi/3)t$.

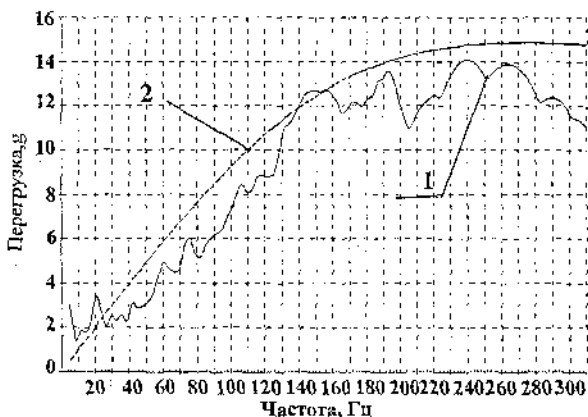


Рисунок 4 - Максимальный УСУ-1 по направлению Z и УСУ его аппроксимирующий-2

Таблица 1 - Форсированные режимы вибрационных испытаний

Направление		Режим 1	Режим 2	Режим 3
X-X	Частота, Гц	СПМ, г ² /Гц		
	5-20	0,008	0,008	-
	20-30	0,006	0,006	0,004
	30-40		-	-
	40-80			
	80-120	0,002		
	120-180			
180-310	0,001			
Время (мин)	9,7	12,8	15,4	
Y-Y	5-20	0,004	0,004	-
	20-30	0,015	-	
	30-40	0,004	0,004	
	40-310	0,0015	-	
	Время (мин)	9,6	9	
Z-Z	5-40	0,015	0,001	-
	40-310	-	0,001	
	Время (мин)	10	3,4	

Таблица 2 - Форсированные режимы ударных испытаний

Направление воздействия	Импульс в форме волны полусинусоиды		Количество ударов
	Длительность, τ, мс	Амплитуда ускорения, g	
X-X	3	3	1
	10	6	
Y-Y	3	6	1
Z-Z	3	9	3

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена актуальной в настоящее время теме анализа нагрузок на космические аппараты при авиационном транспортировании.

Цель работы состояла в создании методики, позволяющей по результатам автоматизированной обработки измерений полученных при авиационной транспортировке КА сформировать режимы нагружения/испытаний КА на случай авиационного транспортирования.

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработаны алгоритмы и математическое обеспечение для разделения стационарных и нестационарных составляющих в зарегистрированных сигналах

2. Разработана методика форсирования режимов испытаний на случай авиационного транспортирования.
3. Разработана база данных и программа для автоматизированной обработки результатов измерений.
4. По результатам обработки данных о четырнадцати случаях транспортирования космических аппаратов самолетами Ил-76 получены стохастические и детерминированные модели для трех этапов нагружения: взлет-посадка, набор высоты и заход на посадку, крейсерский режим полета. Показано, что в случаях набора высоты и захода на посадку, крейсерского режима полета, нагружение КА носит характер случайного стационарного процесса, а на этапе "взлет-посадка" воздействие может быть представлено в виде случайного стационарного процесса и нестационарной (ударной) составляющей.
5. Сформированы по результатам обработки режимы нагружения/испытаний КА на случай транспортировки самолетами Ил-76, что позволило в 10-100 (в разных частотных диапазонах) уменьшить нагрузки при испытаниях.
6. Сформированы по результатам обработки форсированные режимы нагружения/испытаний КА на случай транспортировки самолетами Ил-76, позволяющие уменьшить время испытаний в 5-10 раз.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. **Орлов В.С.** Об одном статистическом алгоритме анализа нестационарных процессов/ Орлов В.С. Ханов В.Х.// Вестник СибГАУ имени академика М.Ф.Решетнева. Вып. 6. Красноярск, 2005. с.80-82.
2. **Орлов В.С.** Автоматизация формирования режимов испытаний космического аппарата по результатам анализа натуральных измерений. // Научный вестник НГТУ. Вып.№2(27): Издательство НГТУ, - Новосибирск, 2007. – с.41-56.
3. **Орлов В.С.** Алгоритм форсирования режимов ударных испытаний сформированных по данным натуральных измерений. / Орлов В.С.// Вестник СибГАУ имени академика М.Ф.Решетнева. Вып. 4(17). Красноярск, 2008. с.64-67.
4. Пат. 2293958 РФ, МПК⁷ G01M7/00, B64G7/00 Способ испытаний специальных грузов на случай авиационного транспортирования/ **Орлов В.С.**, Орлов С.А.//; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение прикладной механики им.

- М.Ф.Решетнева» -№2005114552/28(016693); заявл. 12.09.2006; опубл. 20.02.2007., Бюл.№5.-8с; ил. 4.
5. Пат. 2337338 РФ, МПК⁷ G01M7/00 Способ испытаний грузов на случай авиационного транспортирования/ Орлов В.С., Орлов С.А.//; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение прикладной механики им. М.Ф.Решетнева» -№2006140570/28; заявл. 16.11.2006; опубл. 27.10.2008., Бюл.№30.-8с; ил. 1.
 6. Орлов В.С. Об использовании некоторых алгоритмов вейвлет-анализа для обработки нестационарных процессов. / В.С. Орлов, В.Х. Ханов // Материалы IX Международной научной конференции «Решетневские чтения», СибГАУ. - Красноярск: 2005г. с.309-310.
 7. Орлов В.С. О некоторых особенностях архитектуры автоматизированной системы регистрации и обработки данных натурных измерений / В.С. Орлов, В.Х. Ханов// Материалы X Международной научной конференции «Решетневские чтения», СибГАУ. - Красноярск: 2006г. с.311-312.
 8. Орлов В.С. Формирование режимов испытаний космических аппаратов по результатам анализа натурных измерений / Орлов В.С.// Решетневские чтения. Материалы XI Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, СибГАУ.- Красноярск, 2007.- с.316-317.
 9. Орлов В.С. Постановка задачи статистического анализа нестационарных процессов по данным натурных измерений. / В.С. Орлов// Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Тез. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов (4-9 апреля 2005, г. Красноярск), СибГАУ. Красноярск, 2005. 336 с.- с.299-301.
 10. Орлов В.С. Автоматизированная система формирования режимов испытаний космических аппаратов по результатам натурных измерений. / В.С. Орлов// тез. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов (3-7 апреля 2006, г. Красноярск), СибГАУ. Красноярск, 2006. 372 с. - с. 320-322

*Статья в изданиях из перечня ВАК

Орлов Виктор Сергеевич

**Автоматизация процесса формирования режимов
испытаний космического аппарата по результатам анализа натуральных
измерений**

Автореферат

Подписано в печать 23.04.2009. Формат 60x84/16
Бумага писчая. Гарнитура Times New Roman. Усл. Печ. Л. 1,39. Уч.-изд. л. 0,85.
Тираж 100 экз. Заказ № 458

Отпечатано в отделе копировально-множительной техники СибГАУ
660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.