

На правах рукописи

Завалишин Денис Анатольевич

**АНАЛИЗ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
МИКРОУСКОРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА БОРТУ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ**

Специальность 01.02.01 – Теоретическая механика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия»  
им. С.П. Королева»

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук, профессор  
Сазонов Виктор Васильевич

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор  
Овчинников Михаил Юрьевич

кандидат технических наук  
Левтов Валентин Леонидович

**Ведущая организация:**


Институт проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского РАН

Защита диссертации состоится 14 июня 2011 г. в 13 часов на заседании  
диссертационного совета Д.002.024.01 в Институте прикладной математики  
им. М.В. Келдыша РАН по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной  
математики им. М.В. Келдыша РАН.

Автореферат разослан "27" апреля 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Т.А. Полилова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** При проектировании Международной космической станции (МКС) предполагалось, что существенную часть научных экспериментов на ее борту будут составлять эксперименты в области микрогравитации. Однако свойства конструкции станции, функционирование экипажа и бортовых систем создают серьезные помехи для отечественных исследований такого рода. Основная проблема – наличие сравнительно больших остаточных микроускорений на Российском сегменте МКС. Выбор приемлемых условий для проведения продолжительных экспериментов с гравитационно-чувствительными системами и процессами потребовал детального изучения микроускорений, возникающих в различных режимах полета. В данной диссертации представлены результаты исследования микроускорений в частотном диапазоне от 0.01 до 2 Гц. Основное внимание уделено микроускорениям, вызываемым динамическими операциями (коррекции орбиты, стыковки и отстыковки космических кораблей), а также кратковременными и редкими срабатываниями двигателей системы ориентации. Исследованы также микроускорения на коротких отрезках неуправляемого полета и во время поддержания ориентации станции гиродинами.

Выбор частотного диапазона  $0.01 \div 2$  Гц обусловлен двумя обстоятельствами. Во-первых, микроускорения с частотами менее 0.01 Гц (так называемые квазистатические) на отечественных космических аппаратах уже достаточно хорошо изучены. Во-вторых, микроускорения с частотами более нескольких герц и обычными для МКС амплитудами практически не оказывают влияния на эксперименты в области микрогравитации. Заметные микроускорения в диапазоне  $0.01 \div 2$  Гц специфичны для МКС, представляющей собой протяженную упругую конструкцию. Российские орбитальные станции «Салют», «Мир» и спутники «Фотон» обладали большей жесткостью и не имели значимых микроускорений в этом диапазоне.

**Постановки задач и методы их решения.** Микроускорения на борту МКС вызваны механическими причинами и с учетом выбранного частотного диапазона изучаются в рамках теории колебаний механических систем. Конкретным объектом исследования являются цифровые записи данных измерений бортовых акселерометров. Эти записи рассматриваются в диссертации как временные ряды, описывающие колебания механической системы. Как известно, такие колебания могут быть свободными или вынужденными, а последние вызываются как детерминированными, так и случайными причинами. Вынужденные и слабо затухающие колебания в диссертации изучаются с помощью спектрального анализа. Затухающие колебания аппроксимируются набором экспонент и тригонометрических функций, конкретный вид которого определяется в процессе решения регрессионной задачи. Случайные колебания аппроксимируются процессами авторегрессии второго порядка.

Кроме задач, в которых микроускорения являются объектом исследования, в диссертации рассмотрены две задачи, в которых микроускорения служат средством их решения. Первая задача – определение массы станции по резуль-

татам измерения микроускорения во время коррекции орбиты. Вторая задача – подготовка данных о микроускорениях для выполнения экспресс-анализа космических экспериментов с датчиком конвекции ДАКОН и для математического моделирования показаний датчика.

**Анализируемые данные измерений.** В диссертации использованы данные измерений низкочастотного акселерометра MAMS-OSS (Microgravity Acceleration Measurement System – OARE Sensor Subsystem) и высокочастотного акселерометра SAMS (Space Acceleration Measurement System), установленных в модуле Lab Американского сегмента МКС. Измерительная аппаратура MAMS-OSS состоит из двух датчиков – низкочастотного и вибрационного. В данной работе используются данные измерений низкочастотного датчика, имеющего скорость выборки 10 измерений в секунду и позволяющего измерять микроускорения в диапазоне частот  $10^{-5}$  – 5 Гц и диапазоне амплитуд от  $3 \cdot 10^{-8}$  до  $0.2 \text{ м/с}^2$ . Акселерометр SAMS имеет настраиваемую скорость выборки от 100 до 600 измерений в секунду и охватывает диапазон измерений по амплитуде от  $10^{-6}$  до  $11 \text{ м/с}^2$ . В работе использована также служебная телеметрическая информация, полученная от датчиков ориентации станции и российских космических кораблей.

**Научная новизна** результатов диссертации обусловлена уникальностью исследуемых в ней объектов, работа с которыми потребовала развития новых приемов решения ряда механических задач и адаптации известных методов к новым ситуациям. Конкретные новые результаты сформулированы ниже в разделе «Основные результаты работы». **Достоверность результатов** обоснована с помощью методов теоретической механики, математической статистики и вычислительной математики.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006 г.);
- 17-ый Международный симпозиум по динамике космического полета (г. Москва, 2003 г.);
- XIII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, ЦНИИ “Электроприбор”, 2006 г.);
- Международная научная конференция “Ракетная техника: фундаментальные и прикладные проблемы механики” (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006 г.);
- 5-ая Международная научно-практическая конференция “Пилотируемые полеты в космос” (РГНИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина, 2003 г.);
- XXX и XXXII Академические чтения по космонавтике (г. Москва, 2006, 2008 гг.);
- 40 и 41-ые Научные чтения памяти К.Э. Циолковского (г. Калуга, 2005, 2006 гг.);
- научно-исследовательский семинар по механике невесомости и гравита-

ционно-чувствительным системам (г. Москва, ИПМех РАН, 2003, 2011 гг.);

- семинар по механике космического полета под руководством чл.-корр. РАН В.В. Белецкого и проф. В.В. Сазонова (г. Москва, МГУ, 2006 г.).

Результаты работы были отмечены:

- премией Правительства РФ для молодых ученых и специалистов в области науки и техники в 2008 году;
- первой премией на XXVIII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов РКК “Энергия” им. С.П. Королева в 2008 году.

**Публикации.** Результаты диссертации опубликованы в 11-ти печатных работах, в том числе, в 3 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК.

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 202 страницы, включая таблицы и рисунки на 118 страницах. Библиография содержит 60 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** описан круг рассматриваемых задач и кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** исследованы низкочастотные колебания корпуса станции, вызываемые работой двигателей причаливания и ориентации (ДПО) грузового корабля «Прогресс-М» при проведении коррекций орбиты в августе 2004 г. Во время коррекции двигатели включались на несколько минут и создавали значительные микроускорения. Исследование проведено с помощью спектрального анализа данных измерений низкочастотного акселерометра MAMS. Исследованы 6 отрезков данных, 2 отрезка были получены при коррекциях орбиты, 4 отрезка – на прилегающих к коррекциям кратковременных участках неуправляемого полета. Сравнивались спектры колебаний на этих отрезках.

Корректирующий импульс выдавался вдоль продольной оси Служебного модуля (СМ), направленной по трансверсали к орбите станции. Ось чувствительности 1 акселерометра MAMS также была направлена вдоль продольной оси СМ. Измерения этой компоненты содержат интервалы, соответствующие работе 4, 6 и 8 ДПО (ориентация станции во время коррекции поддерживается периодическим отключением некоторых пар двигателей, что позволяет компенсировать уходы станции из заданной орбитальной ориентации). Поскольку цель исследования состояла в анализе упругих колебаний корпуса станции, из данных измерений MAMS были исключены составляющие, обусловленные изменением режима работы ДПО. Эта составляющая на каждом из рассматриваемых отрезков данных компоненты 1 аппроксимировалась выражением

$$n_{sm}(t) = a_{M+1} + a_{M+2}t + \sum_{m=1}^M a_m \sin \frac{\pi m t}{T}, \quad (0 \leq t \leq T).$$

Здесь  $T$  – длина отрезка,  $a_m$  – коэффициенты, которые находились методом наименьших квадратов (коэффициенты при старших гармониках умножались затем на корректирующие множители). Пример сглаживающего выражения приведен на рис. 1.

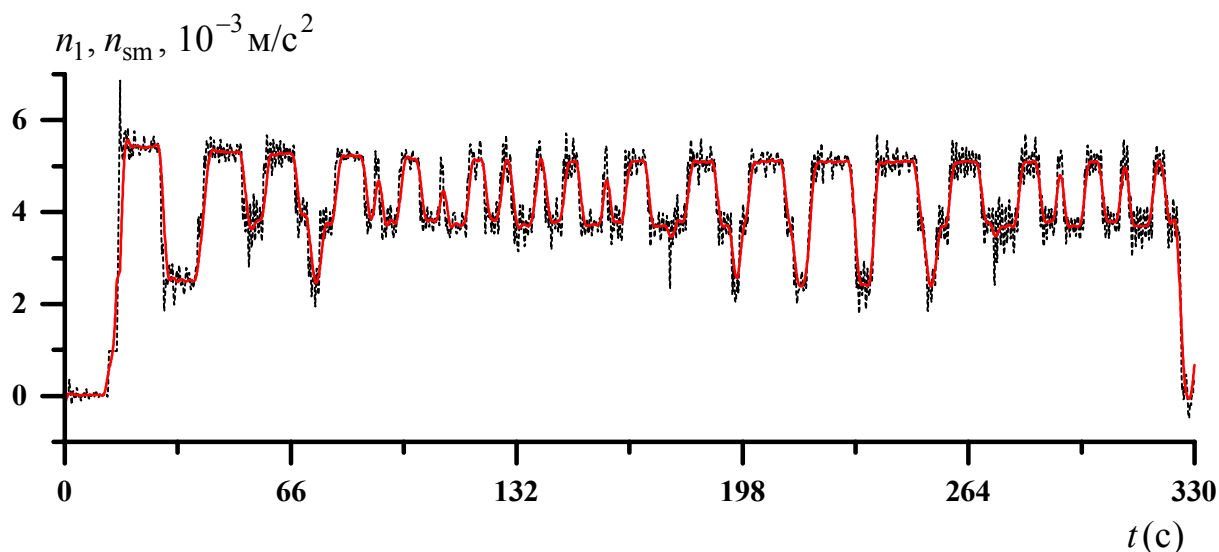


Рис. 1. Сглаживание данных измерений MAMS. Момент  $t = 0$  на графике соответствует 04:24:48 ДМВ 20.08.2004. Пунктирной черной линией показана компонента 1 данных измерений акселерометра MAMS, красной линией – сглаживающее выражение  $n_{sm}(t)$  для этой компоненты.

После вычитания аппроксимирующих выражений из данных измерений были получены временные ряды, близкие к стационарным. Другие компоненты данных на возмущенных отрезках, а также данные отрезков, на которых включений ДПО не было, анализировались непосредственно. Амплитудные спектры двух отрезков данных представлены на рис. 2.

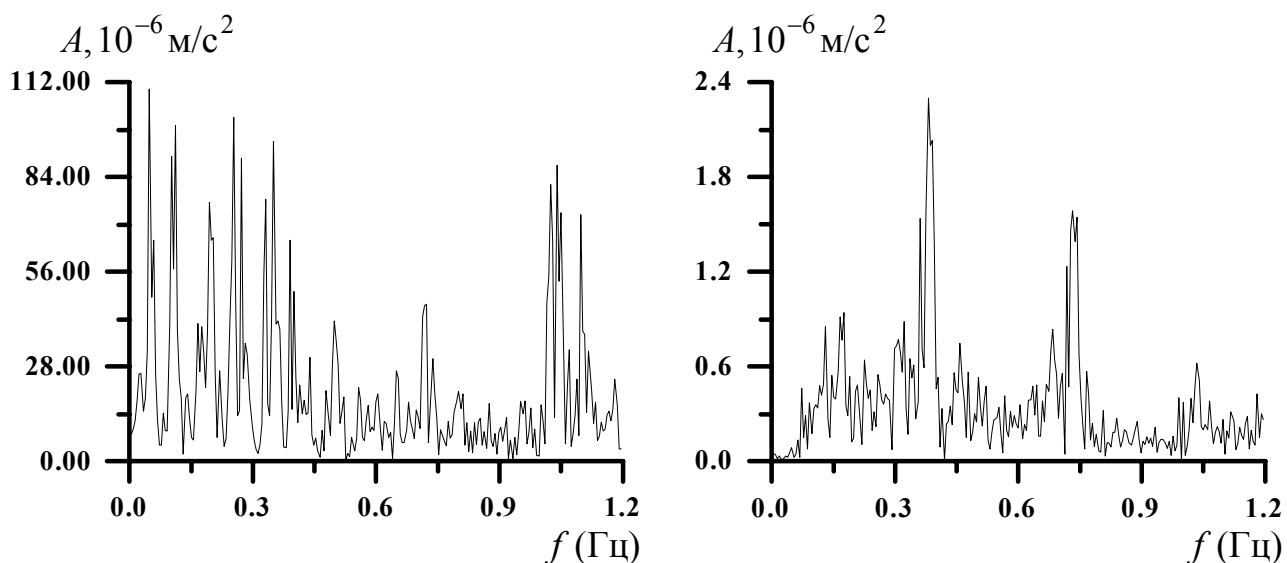


Рис. 2. Амплитудные спектры данных измерений компоненты 1 MAMS. Слева – при работе ДПО, справа – ДПО не работают.

Спектральный анализ заключался в поиске гармонических составляющих в выбранных отрезках данных измерений. Предварительный поиск осуществ-

лялся с помощью периодограмм Ломба и Шустера (графики амплитудных спектров на рис. 2 построены по периодограммам Шустера), окончательное уточнение частот и амплитуд обнаруженных гармоник проводилось методом наименьших квадратов из условия наилучшей аппроксимации анализируемых данных суммой этих гармоник. В ходе исследования было обнаружено большое число гармоник, которые обусловлены упругими колебаниями конструкции станции, а также гармоники, которые объясняются изменением режима работы ДПО. Последние гармоники отсутствуют в отрезках данных, полученных при отсутствии управлений. Гармоники, связанные с изменением режима работы ДПО, имеют частоты в диапазоне  $0.024 \div 0.053$  Гц и весьма значительные амплитуды – до  $0.004 \text{ м/с}^2$  на частоте  $0.05$  Гц.

Гармоники, связанные с упругими колебаниями корпуса станции, имеют частоты в диапазоне от  $0.1$  до  $1.5$  Гц. При отсутствии управлений амплитуды этих гармоник составляют, как правило, менее  $0.00001 \text{ м/с}^2$ ; при работе ДПО эти амплитуды возрастают в несколько десятков раз. Наибольшие амплитуды имеют гармоники с частотами  $0.100 \div 0.113$ ,  $0.252$ ,  $0.274$ ,  $0.352$  и  $1.017 \div 1.043$  Гц в случае компоненты 1, с частотами  $0.101 \div 0.111$ ,  $0.254$ ,  $0.275$ ,  $0.360$ ,  $0.401$ ,  $0.701 \div 0.719$  Гц в случае компоненты 2 и с частотами  $0.250$ ,  $0.381 \div 0.425$ ,  $0.450$ ,  $0.652$ ,  $0.677$ ,  $0.805$  Гц в случае компоненты 3.

Во **второй главе** исследованы свободные колебания корпуса станции, возникающие при стыковках и отстыковках космических кораблей, а также в результате срабатывания двигателей системы ориентации СМ. Исследование проведено с использованием данных измерений MAMS. Для исследования были выбраны 14 отрезков данных, относящихся к 2005 и 2006 гг.; 10 отрезков получены при стыковках к четырем стыковочным портам (узлам) станции и отстыковках от них, 4 отрезка – при срабатывании двигателей СМ. На выбранных отрезках анализировались только участки, отвечающие затухающим колебаниям. Такие колебания рассматривались как свободные колебания системы с конечным числом степеней свободы, и на этих участках каждая векторная компонента микроускорения независимо от остальных компонент аппроксимировалась выражением

$$n_{\text{ap}}(t) = c_0 + \sum_{m=1}^M \exp(-\mu_m t) [c_{2m-1} \cos 2\pi\nu_m t + c_{2m} \sin 2\pi\nu_m t].$$

Здесь  $\mu_m$ ,  $\nu_m$  и  $c_m$  – постоянные величины,  $c_0$  – учитывает смещение в данных измерений. Отыскание параметров аппроксимирующих выражений выполнялось в несколько этапов методом наименьших квадратов.

Пример построения аппроксимирующего выражения приведен на рис. 3. Он относится к отстыковке «Прогресса М-53» от порта СМ 07.09.2005 г. Выделенный участок свободных колебаний указан на верхнем графике горизонтальным отрезком прямой. График построенного выражения  $n_{\text{ap}}(t)$  изображен красной линией на нижнем графике.

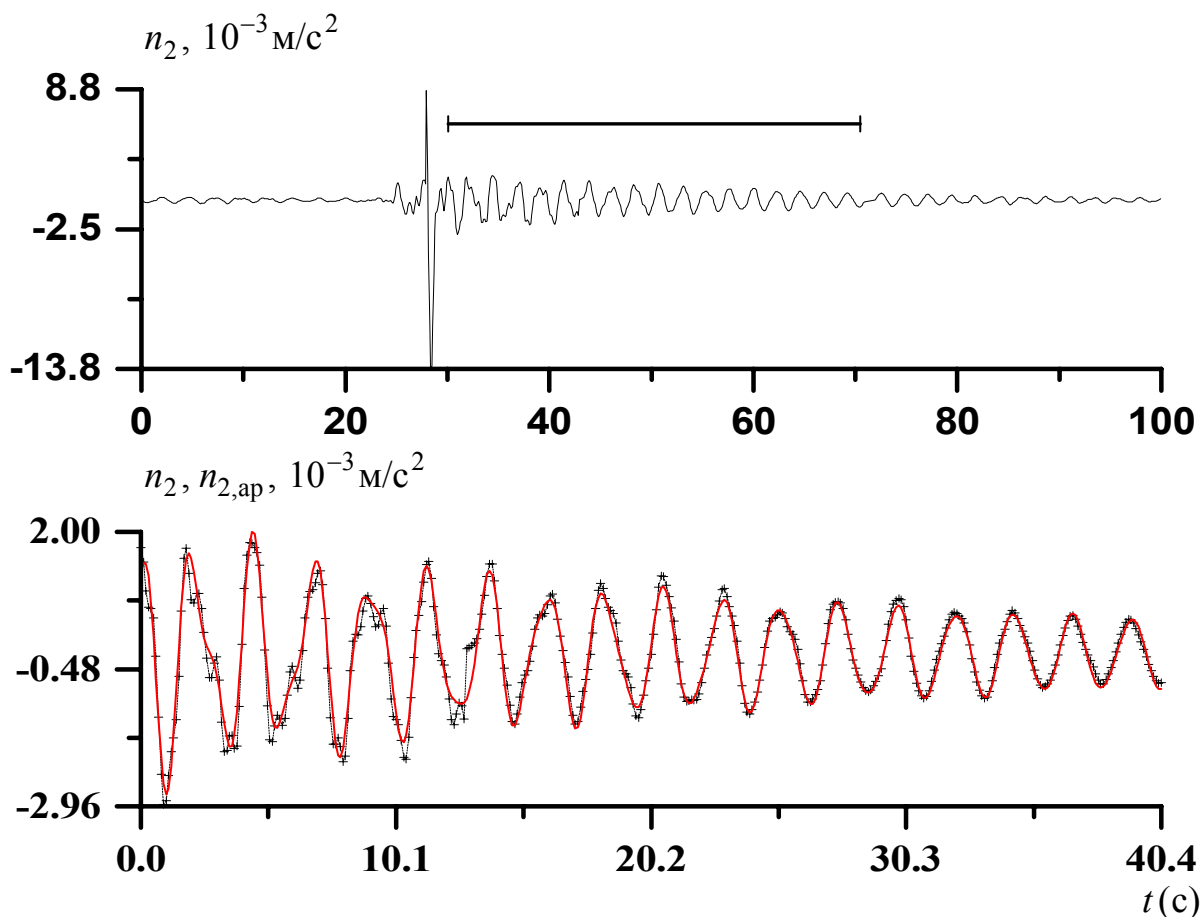


Рис. 3. Отстыковка от порта СМ 07.09.2005 г. Вверху – данные измерений компоненты 2, указан участок, выбранный для построения аппроксимации. Внизу – измерения компоненты 2 и график аппроксимирующего выражения  $n_{2,ap}(t)$ .

Сравнительный анализ результатов, полученных для различных стыковочных портов, а также наборов двигателей СМ, показал достаточно хорошее совпадение частот затухающих колебаний. Это позволило заключить, что выявленные описанным способом колебания действительно являются собственными колебаниями корпуса станции. Многие найденные частоты достаточно хорошо согласуются с частотами, обнаруженными ранее в главе 1.

Почти на всех исследованных отрезках найдены колебания с частотами, лежащими в окрестности значений 0.4 и 0.7 Гц. Члены с этими частотами, как правило, доминируют в построенных аппроксимациях. В случае стыковочного узла «Пирс» в данных одной из компонент доминируют колебания с частотой 1.04 Гц, кроме того, в некоторых данных появляются значимые колебания в диапазоне частот 1.7÷1.8 Гц. В случае работы двигателей ориентации по каналам рыскания и тангажа наблюдаются колебания с частотами 0.312÷0.382 и 0.729÷0.770 Гц. В случае работы двигателей по каналам крена и рыскания значимы колебания с частотами 0.946÷0.951 Гц. Полученные результаты показывают, в частности, что пассивная виброзащитная платформа ВЗП-1К, успешно испытанная на станции «Мир» и имеющая собственные частоты в диапазоне 0.4÷0.6 Гц, на МКС была бы менее эффективна.

В **третьей главе** описаны результаты исследования вибрационных микроускорений, вызванных работой бортовых систем станции. Такие микроуско-



рения представляют собой суперпозицию колебаний с дискретным и непрерывным спектрами. Происхождение микроускорений дискретного спектра вызвано, как правило, работой электродвигателей вентиляторов и других систем обеспечения жизнедеятельности экипажа. Обычно такие устройства создают в стабильных режимах работы возмущения с постоянными частотами.

К вибрационным микроускорениям относятся и микроускорения, создаваемые упругими колебаниями корпуса станции. Эти колебания вызываются различными причинами, в частности, работой экипажа. Если возмущения носят случайный характер, то колебания корпуса имеют, как правило, непрерывный спектр. В диссертации микроускорения непрерывного спектра считаются обусловленными нежесткостью корпуса станции. Микроускорения с дискретным спектром, вызываемые функционированием бортовых устройств, возникали бы и в том случае, если бы корпус станции был абсолютно жестким телом.

Для исследования были выбраны по 3 отрезка данных измерений низкочастотного акселерометра MAMS и высокочастотного акселерометра SAMS. На этих отрезках не совершались динамические операции, станция совершала полет в дежурной орбитальной ориентации на гиродинах, экипаж отдыхал, и возмущения, вызываемые его активной жизнедеятельностью, отсутствовали. Выбор отрезков был вызван желанием изучить вибрационные микроускорения на борту МКС в условиях, наиболее благоприятных для проведения космических экспериментов в области микрогравитации.

Исследование каждого отрезка данных осуществлялось в два этапа. На первом этапе изучался дискретный спектр, на втором – непрерывный. Колебания с дискретным спектром представимы в виде суммы нескольких гармоник – циклических трендов – с несоизмеримыми в общем случае частотами. Изучение дискретного спектра сводилось к поиску таких гармоник. На втором этапе из исходных данных измерений удалялись найденные в них циклические тренды, в полученном ряде остатков выделялись некоторые составляющие, которые затем аппроксимировались процессами авторегрессии. Эти процессы служили для описания колебаний с непрерывным спектром.

Поиск циклических трендов в исходных данных выполнялся по схеме, описанной в главе 1. Анализ показал, что многие значимые экстремумы периодограмм (максимумы для периодограммы Шустера и минимумы для периодограммы Ломба) исходных рядов измерений относятся непрерывному спектру. После удаления циклических трендов с соответствующими частотами во многих случаях достигалась заметная редукция этих экстремумов и среднеквадратичного значения ряда остатков. Однако удалить эти экстремумы не удавалось. В данном случае приходилось иметь дело со смешанным спектром.

Смешанный спектр может возникнуть следующим образом. Какое-то устройство создает гармонические колебания заданной частоты. Расположенные вблизи этого устройства элементы конструкции станции и бортового оборудования колеблются с той же или близкой частотой, следовательно, данные измерений акселерометра, полученные во время работы этого устройства, должны иметь соответствующий циклический тренд. Однако из-за резонансов могут возбудиться и моды с близкими частотами. Кроме того, колебания, соз-

даваемые устройством-возбудителем, могут иметь нестабильную частоту и т. п. Указанные обстоятельства приводят к “размыванию” частоты и появлению в измерениях компоненты с непрерывным спектром.

Ряд остатков, полученный удалением циклических трендов из исходных данных, содержит, в основном, колебания с непрерывным спектром. Такие колебания возникают, по-видимому, вследствие разного рода случайных воздействий на нежесткий корпус станции. Чтобы адекватно описать микроускорения с непрерывным спектром, из ряда остатков выделялись несколько составляющих, имеющих узкий спектр. Каждая составляющая соответствовала полной окрестности одного из значимых экстремумов периодограмм и аппроксимировалась процессом авторегрессии 2-го порядка. Параметры процесса находились методом наименьших квадратов в результате решения нормальных уравнений Юла – Уокера.

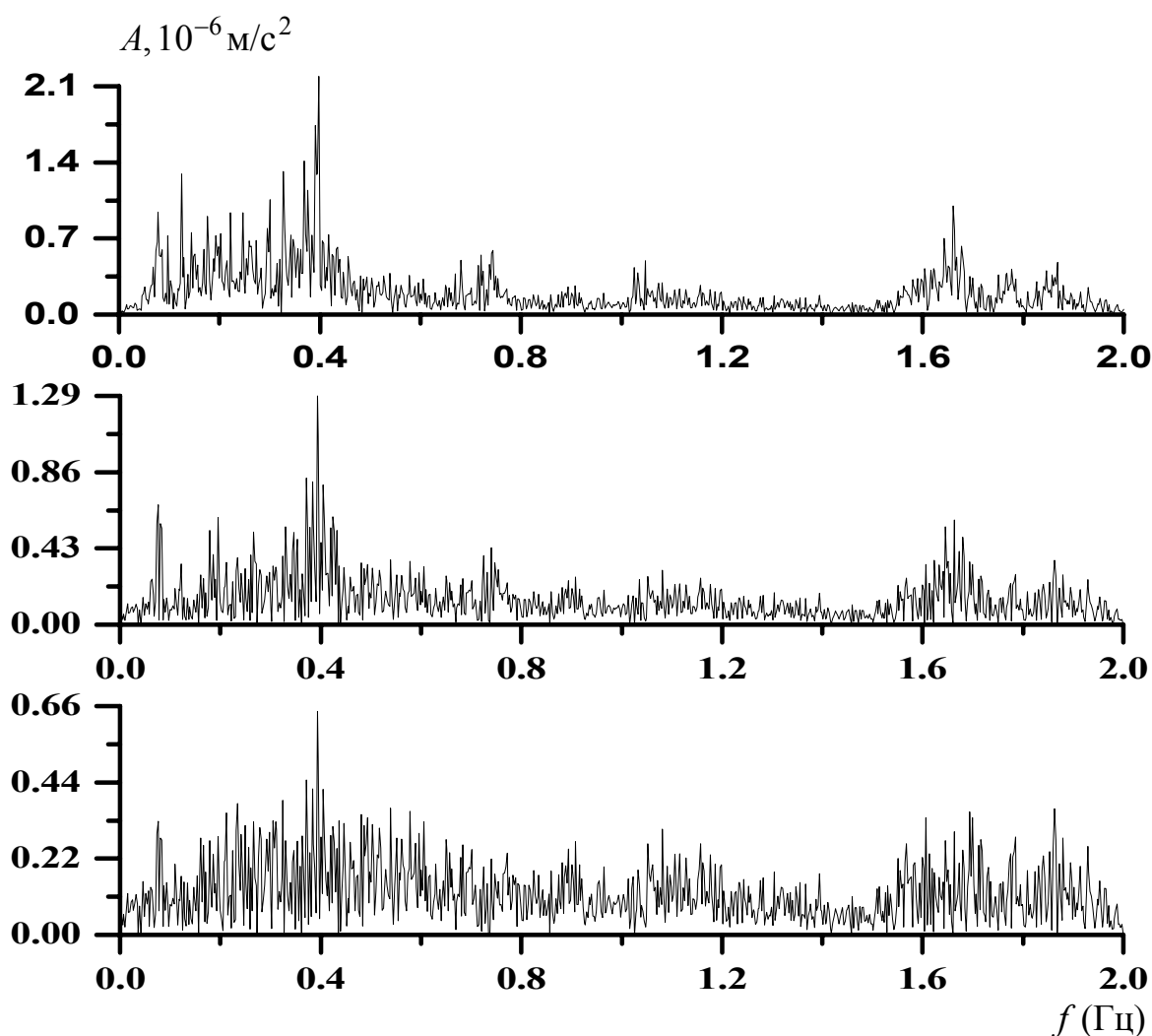


Рис. 4. Амплитудные спектры данных измерений компоненты 1 MAMS на разных этапах спектрального анализа. Измерения выполнены 20.07.2005 г.

На рис. 4 приведены примеры амплитудных спектров данных измерений компоненты 1 MAMS на различных этапах спектрального анализа. Длина анализируемого отрезка данных – 409.6 с. Верхний график – спектр исходных данных, средний график – спектр ряда остатков, полученного удалением основных циклических трендов. На нижнем графике приведен спектр ряда остатков, ко-

торый был получен удалением из исходных данных найденных в них составляющих с дискретным и непрерывным спектрами.

В случае данных MAMS с помощью описанного подхода были исследованы значимые колебания с непрерывным спектром в диапазоне  $0.06 \div 1.7$  Гц. А чтобы оценить возможности этого подхода, в диссертации исследованы также некоторые наиболее значимые колебания с непрерывным спектром в данных измерений акселерометра SAMS. Здесь рассматривался диапазон от 4.5 до 105 Гц. Как оказалось, наиболее значимые колебания непрерывного спектра имеют место в частотных диапазонах, представляющих собой окрестности частот ранее выделенных циклических трендов. Таким образом, большинство выявленных значимых колебаний в данных измерений акселерометров MAMS и SAMS имеют смешанный – дискретный и непрерывный спектр. Эти колебания обусловлены, в основном, колебаниями конструкции станции – многие найденные частоты совпадают с найденными в предыдущих главах характерными частотами таких колебаний. По-видимому, все колебания со смешанным спектром можно связать с упругими колебаниями конструкции. Колебания с чисто дискретным спектром следует связать с функционированием бортового оборудования, все они имеют малые амплитуды.

**Четвертая глава** диссертации посвящена экспериментам с датчиком конвекции ДАКОН-М, расположенным в Российском сегменте МКС. Измерения датчика сравниваются с результатами расчета квазистатической компоненты микроускорения в точке его установки. Датчик изготовлен в Пермском государственном университете (Г.Ф. Путин, А.Ф. Глухов и др.) и представляет собой полость в форме цилиндра, заполненную углекислым газом. Диаметр и высота цилиндра имеют одинаковое значение  $L = 10$  см. Разность температур на противоположных основаниях цилиндра неизменна:  $\Delta T = 60^\circ \text{C}$ . Внутри полости установлены две дифференциальные термопары для измерения разностей температур в двух парах фиксированных точек. Эти разности температур – измерения датчика. Они выдаются в цифровом виде с шагом в одну секунду. Чтобы проинтерпретировать эти измерения, свяжем с датчиком правую декартову систему координат  $Dx_1x_2x_3$ . Начало системы, точка  $D$ , находится на оси цилиндра вблизи его центра. Ось  $Dx_3$  направлена по оси цилиндра от его холодного основания к горячему. Пары точек, в которых измеряются разности температур, расположены на осях  $Dx_1$  и  $Dx_2$ . Точки каждой пары расположены симметрично относительно оси  $Dx_3$  и одинаково удалены от нее.

В орбитальном полете датчик ведет себя как линейный фильтр низких частот, и его показания допускают простую интерпретацию. Обозначим  $Q_1$  и  $Q_2$  разности температур в термопарах, расположенных по осям  $Dx_1$  и  $Dx_2$  соответственно. Пусть  $\varepsilon_i$  и  $n_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) компоненты в системе координат  $Dx_1x_2x_3$  низкочастотных составляющих углового ускорения этой системы и микроускорения точки  $D$ ,  $\beta \approx 0.003 \text{K}^{-1}$  – коэффициент теплового расширения газа в полости. Тогда  $Q_1 \sim F_1$ ,  $Q_2 \sim F_2$ , где

$$F_1 = kn_1 - 2\varepsilon_2, \quad F_2 = kn_2 + 2\varepsilon_1, \quad k = \frac{\beta\Delta T}{L} \approx 1.8\text{ м}^{-1}.$$

Как видно из приведенных соотношений, показания датчика могут служить интегральной характеристикой микрогравитационной обстановки на борту станции в области низких частот. Сравнение измерений датчика с результатами математического моделирования конвекции газа в полости, полученными с учетом реальных испытываемых полостью линейных и угловых микроускорений, позволит оценить точность принятой математической модели. Все это объясняет интерес к экспериментам такого рода.

ДАКОН-М не очень чувствителен и реагирует только на достаточно большие микроускорения. В частности, на те, которые возникают при динамических операциях. Обычно применяемая методика расчета квазистатических микроускорений на борту станции (М.Ю. Беляев, В.В. Сазонов и др.) предназначена для спокойного полета на гиродинах. Для динамических операций она не приспособлена. По этой причине для анализа экспериментов с ДАКОНОм в диссертации предложена модификация этой методики, использующая помимо служебной телеметрической информации о вращательном движении станции еще и данные измерений низкочастотного акселерометра, причем акселерометр не обязательно должен располагаться вблизи датчика. В качестве такого датчика использовался акселерометр MAMS, находящийся в Американском сегменте станции. Новая методика состоит в следующем.

Для расчета квазистатической составляющей микроускорения известна простая формула. Пусть станция представляет собой твердое тело, и точка  $D$  – место установки ДАКОНа – жестко с ней связана. Тогда квазистатическая составляющая  $\mathbf{n}_D$  микроускорения в точке  $D$  имеет вид

$$\mathbf{n}_D = \mathbf{n}(\mathbf{r}) + \mathbf{w}, \quad \mathbf{n}(\mathbf{r}) = \mathbf{r} \times \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \times \boldsymbol{\omega} + \frac{\mu_e}{|\mathbf{R}|^3} \left[ \frac{3(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^2} - \mathbf{r} \right].$$

Здесь  $\mathbf{n}(\mathbf{r})$  – составляющая микроускорения, вызываемая силами инерции и гравитации,  $\mathbf{w}$  – слагаемое, обусловленное силами иной природы,  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки  $D$  относительно центра масс станции,  $\mathbf{R}$  – геоцентрический радиус-вектор этого центра масс,  $\boldsymbol{\omega}$  – абсолютная угловая скорость станции,  $\mu_e$  – гравитационный параметр Земли.

Слагаемое  $\mathbf{w}$  не зависит от выбора точки  $D$  на станции. Если в некоторой точке борта  $A$ , имеющей радиус-вектор  $\mathbf{r}'$  относительно центра масс станции, измерить микроускорение  $\mathbf{n}_A = \mathbf{n}(\mathbf{r}') + \mathbf{w}$  и по какой-либо информации найти величины  $\boldsymbol{\omega}$ ,  $d\boldsymbol{\omega}/dt$  и  $\mathbf{R}$ , то, согласно приведенному выражению, по формуле  $\mathbf{n}_D = \mathbf{n}_A - \mathbf{n}(\mathbf{r}') + \mathbf{n}(\mathbf{r})$  можно найти реальную квазистатическую составляющую микроускорения в точке  $D$ . Поскольку корпус станции испытывает упругие колебания, такой пересчет справедлив только для квазистатической составляющей микроускорения – с частотами ниже частот упругих колебаний. По

этой причине измерения  $\mathbf{n}_A$  и расчет величин  $\boldsymbol{\omega}$ ,  $d\boldsymbol{\omega}/dt$  и  $\mathbf{R}$  должны быть выполнены на достаточно продолжительном отрезке времени.

Аппроксимация фактического движения станции (расчет величин  $\boldsymbol{\omega}$ ,  $d\boldsymbol{\omega}/dt$  и  $\mathbf{R}$ ) выполнялась по телеметрическим значениям компонент вектора  $\boldsymbol{\omega}$  и кватерниона, задающего ориентацию станции относительно абсолютной системы координат, а также по информации об орбите станции. Здесь использованы алгоритмы и программное обеспечение прежней методики. Данные измерений MAMS (измерения  $\mathbf{n}_A$ ) сглаживались независимо по каждой векторной компоненте с помощью выражений, аналогичных  $n_{sm}(t)$  (см. выше). Такое сглаживание выполнялось, чтобы исключить из этих данных колебания с частотами более 0.01 Гц. Затем найденные функции  $\mathbf{n}_D(t)$  и  $d\boldsymbol{\omega}(t)/dt$  пересчитывались в систему  $Dx_1x_2x_3$ , и по ним вычислялись функции  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$ .

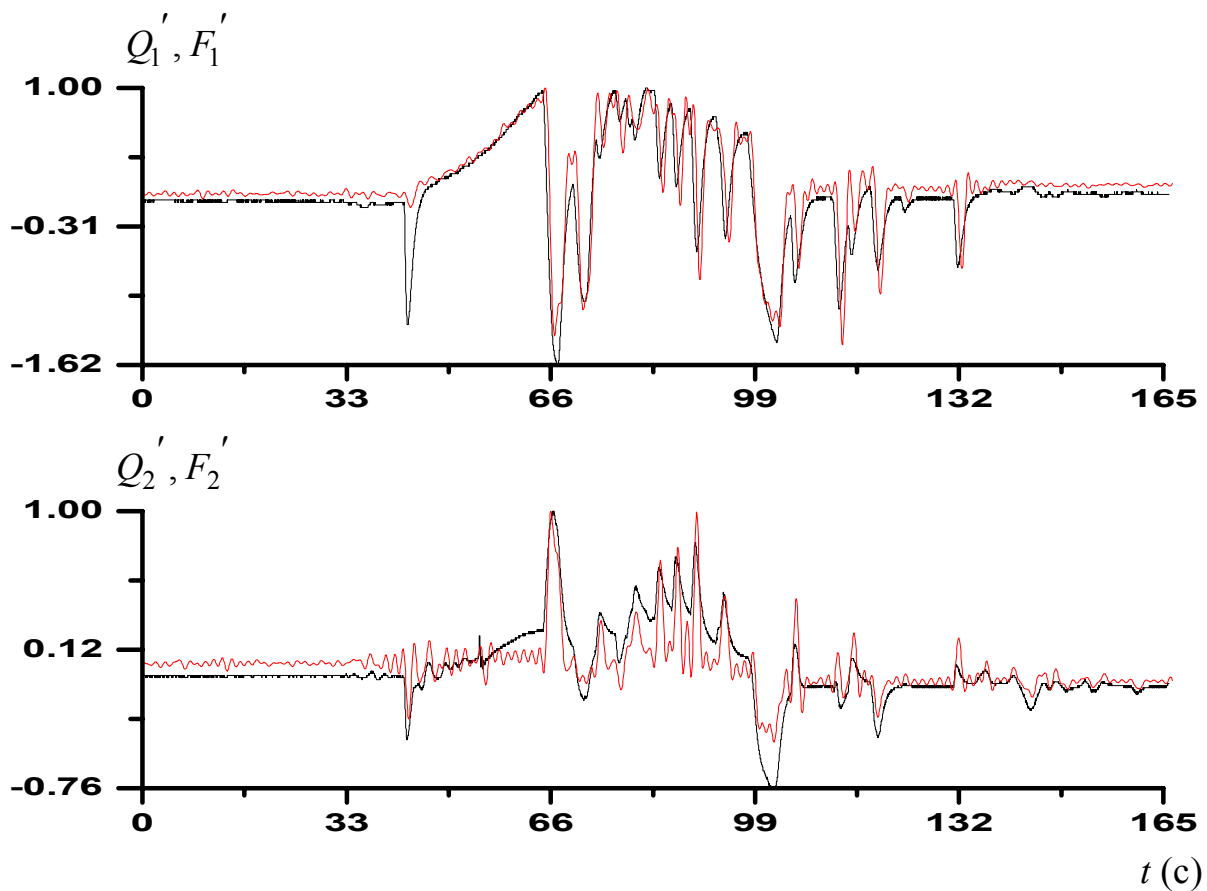


Рис. 5. Измерения датчика ДАКОН-М во время стыковки шаттла к МКС. Момент  $t = 0$  на графиках соответствует: 23:36:40 ДМВ 17.03.2009.

Непосредственное сравнение последних функций с измерениями датчика  $Q_1(t)$  и  $Q_2(t)$  затруднительно, поскольку  $F_i$  и  $Q_i$  измеряются в разных единицах. Сравнились функции

$$F'_i(t) = \frac{F_i(t) - \langle F_i \rangle}{F_i^*}, \quad Q'_i(t) = \frac{Q_i(t) - \langle Q_i \rangle}{Q_i^*},$$

$$F_i^* = \max_t |F_i(t) - \langle F_i \rangle|, \quad Q_i^* = \max_t |Q_i(t) - \langle Q_i \rangle| \quad (i = 1, 2).$$

Такое сравнение было проведено на трех временных отрезках. На отрезке 1 (12.02.2009) происходила стыковка корабля «Прогресс М», на отрезках 2 (17.03.2009) и 3 (25.03.2009) – стыковка и отстыковка шаттла. На этих отрезках МКС находилась в орбитальной ориентации, которая поддерживалась двигателями СМ. На каждом отрезке имели место контакты кораблей со станцией и срабатывания двигателей. Сравнение в случае отрезка 2 представлено на рис. 5. Здесь черными линиями изображены графики функций  $Q'_i(t)$ , красными линиями – графики функций  $F'_i(t)$ . Как видно из рисунка, имеет место определенное сходство обоих наборов функций.

По результатам описанных расчетов функций  $\mathbf{n}_D(t)$  и  $d\omega(t)/dt$  подготовлены данные для математического моделирования конвекции газа в полости датчика.

**Пятая глава диссертации** содержит пример использования данных измерений микроускорений для определения массы станции. В 2004 г. был проведен эксперимент по уточнению массы МКС с помощью двигателей ДПО корабля «Прогресс-М». Масса МКС определялась по данным измерений акселерометра MAMS, полученным во время коррекции орбиты станции 20.08.2004. Коррекция выполнялась двигателями ДПО.

Как уже говорилось выше, импульс, корректирующий орбиту МКС, выдается вдоль продольной оси СМ, направленной по трансверсали к орбите. Из теоремы об изменении количества движения МКС следует соотношение

$$Ma(t) = F_0q(t) + F_1(t).$$

Здесь  $M$  – масса МКС и пристыкованных к ней кораблей,  $t$  – время,  $a(t)$  – компонента кажущегося ускорения центра масс МКС вдоль продольной оси СМ,  $q(t)$  – число работающих двигателей,  $F_0$  – проекция на указанную ось тяги одного двигателя,  $F_1(t)$  – компонента вдоль этой оси главного вектора негравитационных внешних сил, действующих на станцию. Двигатели считаются одинаковыми, в  $F_1(t)$  наибольший вклад вносят силы аэродинамического торможения. Так как одна из осей чувствительности MAMS параллельна продольной оси СМ, кажущееся ускорение МКС на участке выдачи импульса известно из данных измерений этого акселерометра. Значения кусочно-постоянной функции  $q(t_n) = q_n$  также известны из телеметрии, а силой  $F_1(t)$  можно пренебречь. Знание  $a(t)$  и  $q(t)$  позволяет найти отношение  $\alpha = F_0/M$  методом наименьших квадратов. Далее, величина  $F_0$  была найдена в результате тарировки тяги ДПО в автономном полете корабля «Прогресс-М», поэтому массу станции можно оценить по формуле  $M = F_0/\alpha$ .

Тарировка тяги ДПО «Прогресса М» проводилась на участке дальнего сближения со станцией. Тарировочный импульс был выдан вдоль продольной оси корабля с помощью восьми двигателей ДПО в режиме без поддержания ориентации. Двигатели работали в непрерывном режиме. После выдачи импульса система управления движением корабля была отключена.

На борту «Прогресса М» установлен бортовой измеритель приращения

кажущейся скорости (БИПС). Этот прибор выдает моменты времени, в которые приращение кажущейся скорости оказывается кратным 4 см/с. Решение уравнений движения корабля на участке выдачи импульса относительно проекции  $v$  кажущейся скорости на продольную ось корабля позволяет получить полином, использованный для обработки показаний БИПС

$$v_{sm}(t) = v_0 + v_1t + v_2t^2 + \dots + v_nt^n.$$

Были построены полиномы порядков от 1 до 5, при этом их параметры находились методом наименьших квадратов. Так как главным членом в правой части выражения является второй, величина  $F_0$  вычислялась по формуле  $F_0 = m_0v_1/8$ .

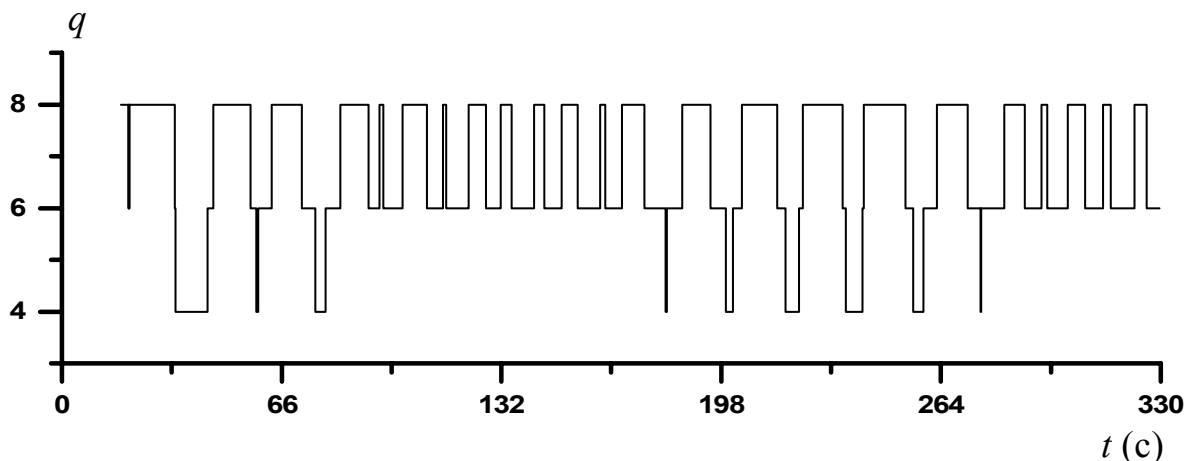


Рис. 6. Число работающих ДПО. Момент  $t=0$  соответствует 04:24:48 ДМВ 20.08.2004.

Описанная методика определения массы станции была реализована четырьмя способами. В способе 1 использовались все данные измерений MAMS, относящиеся к интервалу выдачи корректирующего импульса. В способе 2 использовались сглаженные значения кажущегося ускорения. Функция  $q(t)$  на рис. 6 является кусочно-постоянной и задает число ДПО, задействованных в каждый момент времени.

Сравнение графиков на рис. 1 и 6 показывает, что при оценке массы МКС целесообразно использовать лишь значения ускорения, для которых  $q(t) = 8$ . Во-первых, суммарная тяга ДПО на этих участках наиболее стабильна; во-вторых, калибровка ДПО проводилась при одновременной работе именно восьми двигателей. В способе 3 учитывались лишь измерения микроускорения, относящиеся к десяти достаточно продолжительным интервалам постоянства  $q(t)$ , на которых  $q(t) = 8$ . В способе 4 для тех же  $t_n$ , что и в способе 3, вместо измерений микроускорения использовались сглаженные значения данных MAMS.

Способы 3 и 4 оказались заметно точнее способов 1 и 2. Погрешность определения значения массы способа 4 при значениях  $F_0 = 118.04$  Н и  $F_0 = 120.06$  Н оказалась всего 0.16 % и 0.13 %, расхождение проектной и экспериментальной оценок оказалось менее 1 %. Приведенные значения тяги ДПО являются крайними, определяющими разброс возможных экспериментальных оценок

массы МКС. Проектная оценка значения массы станции находится в полученном интервале значений. Таким образом, удалось проверить и подтвердить проектную оценку массы станции.

В **заключении** приведены основные результаты диссертации.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Систематически исследованы микроускорения на борту МКС в малоизученном частотном диапазоне  $0.01 \div 2$  Гц – на станциях «Салют» и «Мир» микроускорения с такими частотами были малы. Рассмотрены микроускорения, возникающие в различных режимах полета: 1) во время коррекций орбиты, 2) при проведении стыковок и отстыковок космических кораблей, 3) при кратковременных срабатываниях двигателей системы ориентации Служебного модуля, 4) при отсутствии динамических операций. Основное внимание уделено микроускорениям, обусловленным упругими колебаниями корпуса станции. Дан анализ составляющих микроускорения с дискретным и непрерывным спектрами, определены собственные частоты упругих колебаний корпуса станции, получены оценки коэффициентов затухания этих колебаний. Выявлены частоты, колебания с которыми присутствуют как на спокойных, так и на возмущенных участках полета, в частности, найдены частоты, на которых возмущения во время коррекций орбиты возрастают более чем на порядок. Показано, что микроускорения на спокойных участках полета вызваны, в основном, колебаниями конструкции МКС.
2. Разработана методика подготовки данных измерений различных типов для представления микрогравитационной среды в задачах математического моделирования гидродинамических процессов на борту МКС. По указанной методике сформированы расчетные аналоги реальных сигналов, поступавших на вход датчика конвекции ДАКОН-М в космических экспериментах на МКС. Сопоставление расчетных входных и реальных выходных сигналов дало хорошие результаты и подтвердило перспективность применения датчиков такого рода в мониторинге квазистатических микроускорений на борту космических аппаратов.
3. Обработаны результаты экспериментов по уточнению массы МКС на основании измерений микроускорений. Использованы измерения микроускорения на станции во время коррекции ее орбиты двигателями причаливания и ориентации корабля «Прогресс-М» и косвенные измерения кажущегося ускорения этого корабля, создаваемого теми же двигателями в автономном полете. В результате обработки уточнены суммарная тяга двигателей и величина корректирующего импульса, что в свою очередь позволило уточнить массу станции с погрешностью менее 1 %.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Babkin E.V., Beliaev M.Yu., Efimov N.I., Zavalishin D.A., Sazonov V.V. Investiga-



- tion of microgravity environment in ISS Service Module // Proceedings of 17th International Symposium on Space Flight Dynamics. Vol. 1. P. 368-389. Moscow, KIAM, 16-20 June 2003.
2. *Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В.* Применение данных акселерометра MAMS при оценке динамических характеристик МКС // Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. 2005. № 101.
  3. *Беляев М.Ю., Завалишин Д.А., Егоров Н.А., Спаржсин Ю.В., Хамиц И.И., Шутиков М.А., Сазонов В.В.* Определение массы Международной космической станции в полете // Космонавтика и ракетостроение. 2005. № 4. С. 224–232.
  4. *Завалишин Д.А.* Уточнение динамических характеристик МКС в полете // Труды XI чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Секция “Проблемы ракетной и космической техники”. Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина, 2006, С.128-141.
  5. *Банит Ю.Р., Завалишин Д.А., Стажков В.М.* Оценка динамических параметров орбитальных станций в полете // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Т. 1 (Нижний Новгород, 22-28 августа 2006). Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2006. – С. 21.
  6. *Завалишин Д.А.* Определение характерных частот упругих колебаний конструкции МКС // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXII Академических чтений по космонавтике. Москва, январь – февраль 2008 г. / Под общей редакцией А.К. Медведевой. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2008. – С. 127.
  7. *Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В.* Определение характерных частот упругих колебаний конструкции МКС // Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. 2008. № 86.
  8. *Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В.* Оценка динамических характеристик Международной космической станции по измерениям микроускорений // Космические исследования. 2009. Т. 47. № 2. С. 193-203.
  9. *Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В.* Определение характерных частот упругих колебаний конструкции МКС // Космические исследования. 2010. Т. 48. № 4. С. 362-370.
  10. *Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В.* Исследование вибрационных микроускорений на борту Международной космической станции // Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. 2010. № 43.
  11. *Путин Г.Ф., Глухов А.Ф., Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В.* Исследование микроускорений на борту МКС с помощью датчика конвекции ДАКОН-М // Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. 2011. № 23.

Для заметок.

ЗАВАЛИШИН ДЕНИС АНАТОЛЬЕВИЧ

АНАЛИЗ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
МИКРОУСКОРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА БОРТУ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

01.02.01 – Теоретическая механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Усл.п.л. – 1.0

Заказ №04291

Тираж: 100экз.

Копицентр «ЧЕРТЕЖ.ру»

ИНН 7701723201

107023, Москва, ул.Б.Семеновская 11, стр.12

(495) 542-7389

[www.chertez.ru](http://www.chertez.ru)