На правах рукописи

Завалишин Денис Анатольевич

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

Специальность 01.02.01 – Теоретическая механика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор В.В. Сазонов

Содержание

Сп	исок используемых сокращений	4
Вв	едение	6
1.	Исследование колебаний корпуса МКС при коррекциях орбиты	10
	1.1. Описание исследуемых данных	10
	1.2. Методика спектрального анализа	17
	1.3. Результаты исследования	19
2.	Определение частот упругих колебаний конструкции МКС	42
	2.1. Модель упругих колебаний конструкции станции	43
	2.2. Описание исследуемых данных	44
	2.3. Методика исследования колебаний конструкции МКС	61
	2.4. Результаты построения аппроксимации	62
	2.5. Сопоставление полученных результатов	96
3.	Исследование вибрационных микроускорений на МКС	104
	3.1. Вибрационные микроускорения на станции	104
	3.2. Описание исследуемых данных и методика исследования	106
	3.3. Исследование дискретного спектра	125
	3.4. Исследование непрерывного спектра	136
4.	Анализ космических экспериментов с датчиком конвекции	
	ДАКОН-М	154
	4.1. Датчик конвекции Дакон-М	155
	4.2. Исследуемые данные измерений Дакона-М	156
	4.3. Измерения акселерометра MAMS	158
	4.4. Расчет квазистатической составляющей микроускорения	
	по телеметрическим измерениям	160
	4.5. Сопоставление результатов	163

5.	Уточнение массы МКС по измерениям микроускорений	181
	5.1. Методика определения массы станции по измерениям MAMS	182
	5.2. Тарировка тяги двигателей грузового корабля	184
	5.3. Оценка массы станции	189
Зан	ключение	194
Ли	тература	196

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

AP	-	авторегрессия
AC	-	Американский сегмент
БИПС	-	бортовой измеритель приращения кажущейся скорости
ГСК	-	гринвичская система кординат
ДАКОН	-	датчик конвекции
ДМВ	-	декретное московское время
ДО	-	двигатели ориентации
ДПО	-	двигатели причаливания и ориентации
ИСК	-	инерциальная система координат
КА	-	космический аппарат
Канал К	-	канал крена
Канал Р	-	канал рыскания
Канал Т	-	канал тангажа
КЭ	-	космический эксперимент
МИХ	-	массово-инерционные характеристики
МГТУ	-	Московский государственный технический университет
МКС	-	Международная космическая станция
HA	-	научная аппаратура
НПИ	-	научно-прикладные исследования
ОК	-	орбитальный комплекс
ОСК	-	орбитальная система координат
ПКК	-	пилотируемый космический комплекс
ПМО	-	программно-математическое обеспечение
РАН	-	Российская академия наук
РКК	-	Ракетно-космическая корпорация
PC	-	Российский сегмент
СМ	-	служебный модуль
ССК	-	связанная система координат
ТГК	-	транспортный грузовой корабль

ТК	-	транспортный корабль
ТМИ	-	телеметрическая информация
ΦΓБ	-	функциональный грузовой блок
ФГУП	-	федеральное государственное унитарное предприятие
ЦНИИМАШ	-	Центральный научно-исследовательский институт
		машиностроения
ЦУП-М	-	центр управления полетом – Москва
FPE	-	Final Prediction Error
GMT	-	Greenwich Mean Time
MAMS	-	Microgravity Acceleration Measurement System
NASA	-	National Aeronautics and Space Administration
OSS	-	OARE Sensor Subsystem
PE	-	Prediction Error
РМА	-	Pressurized Mating Adapter
PIMS	-	Principal Investigator Microgravity Service

введение

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 [5, 8, 27]. 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 $0.01 \div 2\Gamma$ ц обусловлен двумя обстоятельствами. Во-первых, микроускорения с частотами менее 0.01Γ ц (так называемые квазистатические) на отечественных космических аппаратах уже достаточно хорошо изучены [4, 43 – 45]. 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 $0.01 \div 2\Gamma$ ц 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.

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

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 MKC. 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 м/c^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 м/c^2 . В работе использована также служебная телеметрическая информация, полученная от датчиков ориентации станции и российских космических кораблей.

В первой главе описаны результаты анализа низкочастотных колебаний корпуса станции, вызываемых работой двигателей причаливания и ориентации (ДПО) корабля «Прогресс М». Использованы данные измерений американского акселерометра MAMS, полученные во время коррекций орбиты станции 20.08.2004 и 26.08.2004. Определены собственные частоты ДПО. Они лежат в диапазоне 0.022 ÷ 0.056 Гц. Показано, что работа ДПО приводит к существенному увеличению микроускорений на станции в диапазоне частот 0 ÷ 1 Гц. Указаны частоты, на которых возмущения возрастают более чем на порядок. Указанное увеличение микроускорений обусловлено возбуждением упругих колебаний корпуса МКС.

Во второй главе представлены результаты исследования свободных колебаний конструкции МКС, возникающих во время стыковки космических кораблей со станцией, их отстыковки от нее и в результате срабатывания двигателей системы ориентации Служебного модуля (СМ). Исследование проведено с использованием данных измерений низкочастотного акселерометра МАМS. Для исследования были выбраны 14 отрезков измерений выполненных в 2005 и 2006 годах. На выбранных отрезках анализировались интервалы данных, отвечающие только процессу свободного затухания колебаний элементов конструкции. Найдены характерные частоты упругих колебаний конструкции станции и соответствующие коэффициенты затухания. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных для различных стыковочных портов (узлов), а также наборов двигателей СМ.

В третьей главе описаны результаты исследования вибрационных микроускорений на борту МКС. Исследование проведено с использованием данных измерений низкочастотного акселерометра MAMS и высокочастотного акселерометра SAMS. Для исследования были выбраны 6 отрезков измерений, выполненных в 2005 г., на которых станция совершала полет в дежурной орбитальной ориентации, двигатели ориентации не включались, экипаж отдыхал. На выбранных отрезках анализировались дискретный и непрерывный спектры. Найдены наиболее значимые возмущения с дискретным спектром (циклические

тренды). В рамках модели авторегрессии 2-го порядка определены параметры наиболее значимых возмущений с непрерывным спектром.

В четвертой главе 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.

В пятой главе обработаны результаты экспериментов по уточнению массы МКС на основании измерений микроускорений. Использованы измерения микроускорения на станции во время коррекции ее орбиты ДПО 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 %.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Глава 1. Исследование колебаний корпуса МКС при коррекциях орбиты

В некоторых научных и технических задачах важно знание вибрационной составляющей микроускорения на борту. Изучение вибрационных возмущений при различных режимах эксплуатации МКС позволяет выявить источники наиболее характерных возмущений и параметры этих возмущений, и в дальнейшем принять меры по обеспечению благоприятного уровня микрогравитации при проведении научных исследований и экспериментов.

Корпус МКС регулярно подвергается колебаниям, вызванным работой двигателей ДПО ТГК "Прогресс-М", являющихся основным средством поддержания заданной ориентации станции при проведении различных динамических маневров, а также основным источником возмущений на борту. Воздействие, оказываемое работающими двигателями на корпус станции, а также знание характерных частот возникающих в результате колебаний ее корпуса позволяет лучше понять природу вибрационных микроускорений на борту и может быть полезно при подготовке к проведению ряда КЭ, а также при анализе результатов их проведения.

Спектральный анализ низкочастотных колебаний корпуса МКС, вызванных работой ДПО ТГК, был проведен путем сравнения картины колебаний ее корпуса на спокойных участках и на участках, на которых работали двигатели ДПО. В ходе сравнительного анализа были выделены собственные частоты двигателей, а также частоты, амплитуды которых возрастают во время работы ДПО на порядок и выше [7, 8, 17, 19].

1. 1. Описание исследуемых данных

Спектральный анализ проводился с использованием данных измерений низкочастотного акселерометра MAMS, установленного в модуле *Lab* Американского сегмента МКС.



Рис. 1. Международная космическая станция.

МАМЅ измеряет микроускорения в собственной системе координат $Oz_1z_2z_3$, с началом в центре масс станции – точке O, при этом направления осей системы $Oz_1z_2z_3$ в строительной системе $Oy_1y_2y_3$ станции задаются формулами перехода $Oz_1 = Oy_1$, $Oz_2 = Oy_2$ и $Oz_3 = -Oy_3$. Обе эти системы – правые, декартовы. Ось Oy_1 параллельна продольной оси СМ и направлена от АС к РС МКС, ось Oy_3 направлена от модуля *Node1* в сторону энергетического модуля *P3-P4* параллельно фермам *S0* и *P1* (рис. 1).

Номинально частоты "сырых" данных акселерометра MAMS лежат в диапазоне от 0 до 1 Гц. Однако эти данные получены со скоростью выборки 10 измерений в секунду, и в их спектре присутствуют частоты до 5 Гц. Почти все сколько-нибудь значимые возмущения имеют частоты менее 2 Гц.

Для исследования были взяты шесть отрезков данных измерений MAMS, полученных 20 и 26 августа 2004 г. Два отрезка получены во время коррекций орбиты в указанные дни двигателями ДПО ТГК "Прогресс", остальные отрезки – при отсутствии динамических операций и включений двигателей управления ориентацией.

Сначала рассмотрим векторные компоненты n_1 данных измерений MAMS (вдоль оси Oy_1). Рис. 1.1 и 1.2 иллюстрируют компоненты n_1 данных измерений, полученных на отрезках 1 и 2 соответственно. На этих отрезках работали двигатели ДПО грузового корабля. На рис. 1.3 приведены компоненты n_1 данных измерений, полученных на отрезках 3 – 6. На данных отрезках двигатели были выключены.

Данные измерений MAMS, полученные на отрезках 1 и 2, предварительно сглаживались следующим способом. Пусть $n_{1n} \approx n_1(t_n)$ (n = 1, ..., N) – данные измерений MAMS, L – натуральное число, $L \ll N$. Сначала по этим данным стандартным методом наименьших квадратов строилось аппроксимирующее выражение

$$n_{1 \text{ ap}}(t) = \beta_0 + \beta_1(t - t_1) + \sum_{l=1}^L b_l \sin \frac{\pi l(t - t_1)}{t_N - t_1}.$$

Затем, чтобы избавиться от возможных больших амплитуд у старших гармоник, коэффициенты при синусах модифицировались с помощью корректирующих множителей [28, 41, 42]

$$n_{1 \text{ sm}}(t) = \beta_0 + \beta_1(t-t_1) + \sum_{l=1}^{L_1} b_l \sin \frac{\pi l(t-t_1)}{t_N - t_1} + \sum_{l=L_1+1}^{L} b_l \frac{L-l+1}{L-L_1+1} \sin \frac{\pi l(t-t_1)}{t_N - t_1}.$$

Здесь L_1 – целая часть числа L/2. Сглаживание данных на рис. 1.1 выполнено при N = 3294, L = 280. Сглаживание данных на рис. 1.2 выполнено при L = 6194, N = 560. Графики сглаживающих выражений $n_{1 \text{ sm}}(t)$ изображены на рис. 1.1а, 1.2а сплошными красными линиями. Пунктирные линии на тех же рисунках воспроизводят данные измерений.

На 1.16 и 1.26 приведены графики разностей $\Delta n_1(t) = n_1(t) - n_{1 \text{ sm}}(t)$. Поскольку при выполнении коррекции тяга двигателей устанавливается не сразу, начальные участки рядов данных Δn_1 были исключены из анализа. В случае отрезка 1 были отброшены данные, отвечающие первым 30 с, в случае отрезка 2 – данные первых 20 с. В обоих случаях для анализа были выбраны 2048 последовательных значений разностей Δn_1 . Графики подвергнутых анализу значений Δn_1 приведены на рис. 1.1в и 1.2в.

На отрезках 3 – 6 включений двигателей не было, поэтому данные этих отрезков, содержащих каждый по 2048 значений (рис. 1.3), анализировались непосредственно. Отрезки 3, 4 расположены вблизи отрезка 1, отрезки 5, 6 – вблизи отрезка 2.



Рис. 1.1. Отрезок данных 1: (а) данные измерений MAMS (штриховая линия) и результат их сглаживания (красная линия); (б) разности исходных и сглаженных данных; (в) отрезок разностей, выбранных для спектрального анализа. Момент t = 0 на графиках (а) и (б) соответствует 04:24:48 ДМВ 20.08.2004, на графике (в) – 04:25:18 ДМВ 20.08.2004.



Рис. 1.2. Отрезок данных 2: (а) данные измерений MAMS (штриховая линия) и результат их сглаживания (красная линия); (б) разности исходных и сглаженных данных; (в) отрезок разностей, выбранных для спектрального анализа Момент t = 0 на графиках (а) и (б) соответствует 03:32:14 ДМВ 26.08.2004, на графике (в) – 03:32:34 ДМВ 26.08.2004.



1.2. Методика спектрального анализа

Спектральный анализ данных на выбранных интервалах выполнялся по следующей схеме. Пусть $n_n \approx n(t_n)$, $t_n = nh$ (n = 0, 1, ..., N) – данные измерений микроускорения. Попытаемся аппроксимировать функцию n(t) при $0 \le t \le Nh$ функцией

$$n_{ap}(t) = \alpha_0 + \beta \cos 2\pi f t + \beta \sin 2\pi f t \tag{1.1}$$

где α_0 , α , β и f – параметры. Значения этих параметров будем искать методом наименьших квадратов. Составим выражение

$$\Psi = \sum_{n=0}^{N} [n_n - n_{ap}(nh)]^2.$$
(1.2)

Согласно методу наименьших квадратов определение параметров α_0 , α , β и f сводится к минимизации по ним выражения (1.2). Функция $\Psi = \Psi(\alpha_0, \alpha, \beta, f)$ имеет, как правило, много локальных минимумов, поэтому ее минимизация проводится поэтапно [41, 46]. Сначала в результате решения ряда одинаковых линейных задач наименьших квадратов вычисляются значения функции

$$\Psi_{1}(f) = \min \Psi(\alpha_{0}, \alpha, \beta, f)$$
$$\alpha_{0}, \alpha, \beta$$

в узлах достаточно мелкой равномерной сетки на отрезке $0 \le f \le 1/2h$, строится график этой функции. Затем перебором по сетке находятся приближенные значения точек минимума $\Psi_1(f)$. Абсциссы значимых (с достаточно малыми ординатами) точек минимума, являются частотами искомых гармоник. Пусть описанным способом найдены частоты f_k (k = 1, 2, ..., M; M << N). Отвечающее этим частотам аппроксимирующее выражение ищем в виде

$$n_{ap}(t) = \alpha_0 + \beta_0 t + \sum_{k=1}^{M} (\alpha_k \cos 2\pi f_k t + \beta_k \sin 2\pi f_k t), \qquad (1.3)$$

где α_k , β_k (k = 0, 1, ..., M) – постоянные параметры. Значения параметров находятся методом наименьших квадратов – из условия минимума функции, заданной соотношениями (1.2) и (1.3).

Чтобы проверить найденное решение другим методом, наряду с функцией $\Psi_1(f)$ рассматривалась также функция

$$I(f) = \left[\sum_{n=0}^{N} (n_n - n_*)\cos 2\pi f nh\right]^2 + \left[\sum_{n=0}^{N} (n_n - n_*)\sin 2\pi f nh\right]^2, \ n_* = \frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N} n_n,$$

называемая периодограммой Шустера [49]. Пусть исследуемая функция x(t) имеет вид (1.3) при $\beta_0 = 0$. Тогда $\alpha_0 \approx n_*$, периодограмма имеет локальные максимумы в точках $f_k^* \approx f_k$, причем $\alpha_k^2 + \beta_k^2 \approx 4I(f_k^*)(N+1)^{-2}$ (k = 1, 2, ..., M). Точность выписанных соотношений увеличивается с ростом N [46, 49]. Таким образом, знание максимумов периодограммы позволяет получить оценки частот и амплитуд гармонических составляющих функции n(t).

Ниже для удобства вместо графиков функций $\Psi_1(f)$ и I(f) приводятся графики функций

$$E(f) = \sqrt{\frac{\Psi_1(f)}{N-2}}, \quad A(f) = \frac{2}{N+1}\sqrt{I(f)}.$$

Минимумы функции E(f) дают оценки среднеквадратической ошибки аппроксимации функции n(t) выражением (1.1), максимумы функции A(f) – оценки амплитуды $\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$.

В качестве единицы измерения функций E(f) и A(f) примем 10^{-6} м/с², частоты будем указывать в герцах.

1.3. Результаты исследования

На рис. 1.4 приведены графики функций $E_1(f)$ и $A_1(f)$ для n_1 -компонент данных измерений отрезков 1, 3 и 4, на рис. 1.5 – аналогичные графики для отрезков 2, 5 и 6.

Точки значимых минимумов функции $E_1(f)$ и точки значимых максимумов функции $A_1(f)$ отличаются не более, чем на несколько единиц 10^{-3} Гц.







(а) отрезок 2 (рис. 4.1.2в), (б) отрезок 5 (рис. 4.1.3в), (в) отрезок 6 (рис. 4.1.3г). Рис. 1.5. Периодограммы n₁-компоненты микроускорения отрезков данных:

Судя по рисункам 1.4 и 1.5, каждая из функций $\Delta_1 n(t)$ или $n_1(t)$ содержит значительное число гармоник. Ниже в соответствующих выражениях (1.3) будем учитывать все наиболее значимые гармоники (отвечающие экстремумам функций $E_1(f)$, $A_{1s}(f)$ с резко выделяющимися экстремальными значениями) и несколько менее значимых. Амплитудой гармоники с частотой f_k в (1.3) будем называть величину $A_k = \sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}$.

Частоты и амплитуды некоторых наиболее значимых гармоник, обнаруженных в функции $n_1(t)$ для отрезков 1 – 6 приведены в таблице 1.1. Таблица устроена следующим образом. Ее верхняя строка содержит номера исследованных отрезков данных. Каждому отрезку отвечают два столбца – столбец частот (f) и столбец амплитуд (A). В этих столбцах указаны частоты и амплитуды построенного для функции $n_1(t)$ данного отрезка данных аппроксимирующего выражения (1.3). Параметры гармоник, обнаруженных в разных отрезках данных, но имеющих примерно одинаковые частоты, помещены в одну и ту же горизонтальную строку. Такая организация таблицы, вопервых, удобна для анализа. Во-вторых, в рассматриваемом случае естественно предположить, что примерно одинаковые частоты, проявляющиеся в разных отрезках, – результат воздействия одной и той же частоты некоторого реального фактора. Небольшие вариации частот, превышающие погрешности, обусловленные ограниченностью длины отрезков данных, могут быть объяснены нестабильностью функционирования бортового оборудования.

Сколько-нибудь значимые возмущения наблюдаются только до 1.6 Гц, поэтому периодограммы представлены на рисунках в диапазоне от 0 до 1.6 Гц. Необходимо отметить, что поиск гармонических составляющих в данных измерений является коварной задачей. Гармоники с малыми амплитудами могут порождаться случайными ошибками в данных [58]. Для гармоник с большими амплитудами таких сомнений не возникает. В рассматриваемой задаче можно быть достаточно уверенными в существовании гармоник с амплитудами более $2 \cdot 10^{-7}$ м/с².

	Α						0.52	1.2	0.54	0.51	0.34	1.6	0.80		1.0	0.70	0.63	1.1	0.78	0.62		
	f	ı	ı	-	ı	-	0.060	0.076	0.091	0.106	0.113	0.123	0.1288	-	0.135	0.150	0.164	0.175	0.180	0.198	-	-
	A			1.49			1.37	1.93	1.92	1.47	2.55	1.44		2.0	1.5	2.1		2.0	3.4	1.5	2.3	2.0
S.	f	ı	ı	0.045	ı	-	0.065	0.078	0.093	0.105	0.111	0.124	-	0.131	0.136	0.149	-	0.171	0.180	0.194	0.208	0.251
	Α															0.44	0.40	0.38	0.48	0.32	0.47	1.2
4	f	ı	ı	ı	ı	I	I	I	I	I	ı	•	-	ı	ı	0.146	0.170	0.176	0.183	0.191	0.205	0.254
	Α							0.48		0.54	0.24	0.58		0.69		0.52	0.88	0.87	0.38	0.43		
с,	f	ı	ı	-	ı	-	-	0.074	-	0.105	0.111	0.120	-	0.131	-	0.148	0.169	0.176	0.183	0.198	-	I
	Α	28.3	24.5	44.2	93.2				58.2	42.2	58.2		52.0				48.5	35.8	46.5	35.8	72.0	50.5
0	f	0.021	0.026	0.043	0.049	-	-	-	0.100	0.106	0.113		0.129	-	-	-	0.166	0.174	0.180	0.193	0.204	0.255
	Α	22.3	16.3	16.2	89.4	78.6	11.1		85.4		85.6	27.3					37.7	25.8	32.8	60.3	91.2	120
1	f	0.023	0.029	0.043	0.050	0.056	0.063	ı	0.101	ı	0.113	0.124	-	1	ı	ı	0.169	0.175	0.181	0.195	0.203	0.253

Таблица 1.1. Гармонические составляющие в данных измерений *x*-компоненты ускорения.

	Α	0.98	0.49		1.1			0.51	0.96	2.3	2.6				0.73	0.73	0.53	0.84	0.80	0.81	0.64	1.2
0	f	0.258	0.266	ı	0.303	ı	ı	0.334	0.353	0.379	0.386	ı	I	-	0.418	0.438	0.446	0.456	0.466	0.498	0.506	0.615
	Α	2.1	2.0	0.97	0.90		1.4	0.63	1.1	2.8	8.0	7.1	2.7	2.7	2.8	1.1	2.0			1.9	1.9	
Ś	f	0.260	0.266	0.274	0.304	ı	0.326	0.338	0.354	0.379	0.385	0.390	0.401	0.406	0.418	0.436	0.445	ı	I	0.494	0.504	I
	Α		0.91	0.98	1.1	1.1	1.2		0.89	2.6		1.75	0.88			0.70	0.74	0.61	1.1		0.92	
4	f	ı	0.268	0.275	0.303	0.308	0.331	ı	0.355	0.380	ı	0.389	0.404	I	ı	0.435	0.445	0.456	0.470	ı	0.504	ı
	Α	0.46	0.29	0.61	0.49	1.22		0.65	0.75	1.54	2.58	2.57		0.51			0.59	0.53	0.73		0.57	
S	f	0.258	0.264	0.271	0.304	0.310	1	0.336	0.355	0.376	0.383	0.389	ı	0.406	ı	ı	0.445	0.459	0.466	ı	0.503	I
	Α		9.1	121.0	47.2		47.4	20.0	76.4	27.1	49.3		30.1	24.9		18.7	26.3					
0	f	ı	0.266	0.275	0.300	ı	0.328	0.336	0.353	0.380	0.389	1	0.401	0.409	ı	0.433	0.443	ı	I	I	•	ı
	Α			97.4			87.5	81.9	101		16.0	54.1	47.5			32.6				50.3	40.7	
1	f	I	1	0.274	1	I	0.330	0.340	0.353	1	0.384	0.390	0.401	I	I	0.439	I	I	I	0.496	0.505	I

Таблица 1.1. Гармонические составляющие в данных измерений *х*-компоненты ускорения (продолжение).

	Α		0.67	0.60	0.48	0.70	0.64	1.7	0.68	1.0	0.82	1.4	1.8	1.0	0.96	1.0		0.83			0.70	1.4
	f	I	0.681	0.693	0.700	0.716	0.725	0.736	0.748	0.755	1.023	1.029	1.041	1.070	1.085	1.102	I	1.119	I	I	1.558	1.763
	A	1.7				2.6		2.7	2.0	2.4	1.3											
∫.v	f	0.653	ı	ı	I	0.719	ı	0.738	0.745	0.751	1.025	ı	-	1	ı	-	-	-	ı	ı	ı	-
	Α			1.0	0.84	1.0	1.4	2.3	0.34	0.77	0.63	0.52	0.33					0.32	0.42	0.72	0.84	
	f	ı	ı	0.695	0.709	0.715	0.721	0.735	0.743	0.755	1.022	1.033	1.045	ı	ı	-	-	1.122	1.358	1.415	1.600	-
	A		0.92	0.78	0.54	1.1	1.8	2.2	1.2	0.42	0.45	0.71										0.54
(,	f	I	0.684	0.691	0.704	0.718	0.726	0.735	0.744	0.754	1.023	1.038	I	ı	I	I	I	I	I	I	I	1.767
	A	31.3		26.5	43.9			18.2	20.1		117.2	92.2	68.2		33.3	27.7		29.9	28.7	29.3		
	f	0.659	I	0.693	0.709	ı	I	0.736	0.744	I	1.022	1.035	1.042	ı	1.087	1.099	I	1.120	1.353	1.405	I	ı
	A	29.0		18.8	18.0	42.2	55.0	28.3	22.3		86.8	64.0	106.7	29.4	16.3	60.1	47.0	28.5		25.8		
	f	0.651	I	0.698	0.706	0.715	0.721	0.738	0.744	I	1.0266	1.032	1.043	1.070	1.089	1.099	1.107	1.120	I	1.418	I	I

Таблица 1.1 (продолжение)

Некоторые группы экстремумов функций $E_1(f)$ и $A_1(f)$ с близкими частотами (см. рис. 1.4, 1.5) отвечают колебаниям с так называемым непрерывным спектром [58]. Форма представления таких колебаний в виде (1.3) не адекватна. Однако, если указанные группы экстремумов достаточно локализованы, отвечающую им составляющую функции $n_1(t)$ можно приближенно представить одной гармоникой. Именно такой подход был использован при составлении табл. 1.1.

Аналогичным образом проводился спектральный анализ данных измерений MAMS компонент n_2 и n_3 кажущегося ускорения станции вдоль осей Oy_2 и Oy_3 строительной системы координат соответственно. Введенные выше функции E(f), A(f) для данных измерений величин n_2 и n_3 обозначим $E_2(f)$, $A_2(f)$ и $E_3(f)$, $A_3(f)$ соответственно.

Графики функций $n_2(t)$, $E_2(f)$ и $A_2(f)$ для отрезков 1, 2, ..., 6 изображены на рис. 1.6 – 1.9. Частоты и амплитуды наиболее значимых найденных гармоник приведены в табл. 1.2. Графики функций $n_3(t)$, $E_3(f)$ и $A_3(f)$ представлены на рис. 1.10 – 1.13. Частоты и амплитуды наиболее значимых найденных гармоник приведены в табл. 1.3.

Данные измерений n_2 и n_3 на отрезках 1, 2 (см. верхние графики на рис. 1.6, 1.10) содержат значительные выбросы, обусловленные включением двигателей грузового корабля. Перед проведением спектрального анализа эти выбросы были заменены средними значениями соответствующих данных на отрезке (см. нижние графики на рис. 1.6, 1.10).













(а) отрезок 2 (рис. 4.1.66, нижний график), (б) отрезок 5 (рис. 4.1.7в), (в) отрезок 6 (рис. 4.1.7г)







(а) отрезок 1 (рис. 4.1.10а, нижний график), (б) отрезок 3 (рис. 4.1.11а), (в) отрезок 4 (рис. 4.1.11б).



	A'						2.07	2.44		3.82	3.41	2.49	3.25	4.22	2.84	1.52	3.10	4.87	5.36	3.14
9	f	I	I	I	I	I	0.095	0.105	I	0.127	0.169	0.205	0.256	0.273	0.310	0.319	0.329	0.348	0.352	0.357
	A'											3.89		5.61	5.99	5.41		4.81	5.75	3.30
L.	f	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	0.206	I	0.281	0.308	0.320	I	0.342	0.354	0.359
	A'												1.61	2.01		1.42				1.78
7	f	ı	-	I	ı	ı	ı	-	-	-	-	-	0.254	0.269	ı	0.313	I	-	-	0.359
	A'										1.23			1.56				1.74		1.11
(1)	f	I	I	I	I	I	ı	I	I	I	0.171	I	ı	0.264	I	I	I	0.349	I	0.357
	A'	214		355		45.9	99.2	107	135	76.5	66.0	78.2	52.8	113			58.7	37.7	99.1	92.5
	f	0.022	I	0.051	ı	0.068	0.100	0.107	0.112	0.129	0.166	0.205	0.254	0.276	ı	I	0.325	0.342	0.354	0.359
	A'	150	155	324	243	48.3	160		127	36.6	61.6	101	101	81.3	40.2		99.4	40.7	126	9.77
	f	0.024	0.029	0.049	0.056	0.064	0.100	I	0.112	0.125	0.169	0.203	0.254	0.273	0.310	I	0.330	0.344	0.352	0.359

Таблица 1.2. Гармонические составляющие в данных измерений у-компоненты ускорения.

	A'	5.41	12.8			2.54	4.97		2.64	2.48	2.42		2.40	2.05	2.59			1.41	1.93	
9	f	0.378	0.386	ı	ı	0.400	0.408	ı	0.430	0.440	0.447	ı	0.469	0.493	0.620	ı	I	0.691	0.698	I
	A'	9.12	23.0	22.1		9.33		9.59	4.05		7.52	3.88	5.47	8.03	5.62					2.21
Υ.	f	0.378	0.386	0.391	ı	0.400	ı	0.418	0.425	-	0.444	0.457	0.469	0.493	0.620	ı	I	-	ı	0.703
	A'	4.16	5.87	4.74	3.13		3.60	2.77	2.56			3.91	3.20			4.50	5.26	3.17	3.74	2.83
4	f	0.371	0.381	0.388	0.398	ı	0.403	0.415	0.430	-	ı	0.452	0.464	ı	ı	0.679	0.686	0.693	0.701	0.708
	A'	3.99	9.20	11.0	5.00	1.82	2.01	2.48	0.96	2.02	1.49		1.38	1.91	1.67		2.42		2.75	2.82
(r)	f	0.376	0.383	0.388	0.396	0.400	0.405	0.413	0.425	0.435	0.449	ı	0.466	0.498	0.625	I	0.684	-	0.698	0.706
	Α'	61.5	64.4	213.7	7.93	66.8	94.2			55.1								85.2		150
C	f	0.376	0.381	0.388	0.396	0.400	0.408	ı	I	0.442	ı	I	I	ı	I	I	I	0.693	ı	0.705
	A'		25.6	169		130		88.2	51.3	89.8	35.9					46.0			54.6	84.4
	f	I	0.383	0.391	I	0.400	ı	0.410	0.427	0.440	0.447	I	I	ı	ı	0.676	I	ı	0.701	0.713

Таблица 1.2. Гармонические составляющие в данных измерений у-компоненты ускорения (продолжение).
у-компоненты ускорения (продолжение).	
Таблица 1.2. Гармонические составляющие в данных измерений	

A'	1.20	4.16	11.5	2.26	3.02	3.62	3.72	2.90	2.45	3.03			2.10	2.28
f	0.718	0.728	0.735	0.747	0.754	0.772	0.789	0.808	0.833	0.850	I	ı	1.621	1.663
A'	5.97	9.24	19.5	12.1	7.98			5.19						
f	0.720	0.730	0.737	0.745	0.752	ı	ı	0.808	I	-	-	-	ı	ı
A'	6.33	4.09	11.84	4.18	3.74	2.62	3.05		2.30		2.90	4.31	3.63	
f	0.720	0.728	0.735	0.742	0.754	0.774	0.789	I	0.830	I	1.572	1.599	1.616	ı
A'	3.92	4.92	8.97	6.76	2.79	5.36	2.01				2.00	1.22	2.49	1.28
f	0.718	0.725	0.735	0.742	0.754	0.772	0.784	I	I	I	1.553	1.597	1.616	1.670
A'	143	33.9	I	74.3	I	ı	ı	47.5	I	I	I	I	ı	ı
f	0.720	0.726	I	0.747	I	I	I	0.803	I	I	I	I	I	ı
A'	181		72.5	46.0	38.1	45.9	34.0	76.9		55.3	37.7			
f	0.718	ı	0.737	0.745	0.759	0.772	0.779	0.803	ı	0.852	1.572	ı	ı	ı
	$f \mid A' \mid f \mid A' \mid A'$	f A'	$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$			fA'fA'fA'fA'fA'fA' 0.718 181 0.720 143 0.718 3.92 0.720 6.33 0.720 5.97 0.718 1.20 - 0.726 33.9 0.725 4.92 0.728 4.09 0.730 9.24 0.728 4.16 0.737 72.5 0.735 8.97 0.735 11.84 0.737 19.5 0.735 11.5 0.745 46.0 0.747 74.3 0.742 6.76 0.742 4.18 0.745 12.1 0.747 2.26 0.759 38.1 0.754 2.79 0.754 3.74 0.752 7.98 0.747 2.26					f A' f f A' f A' f f A' f A' f <			

				(,	~	V		4,			
f	A''										
ı		0.022	90.6	ı		I		ı		I	
0.027	60.7	0.029	70.9	-		-		-		-	
0.054	288	0.049	193	-		-		-		-	
I		I		I		I		0.066	4.30		
0.103	101	0.100	128	-		-		0.100	8.34	860.0	2.10
0.110	120	0.110	96.5	-		-		-		0.105	2.39
0.132	46.6	-		-		ı		-		0.127	2.54
		0.156	41.3	0.154	2.47	0.154	3.39	-		0.159	3.73
0.173	56.8	•		-		I		0.171	6.40	-	
0.178	59.4	-		I		I		0.181	7.19	0.181	1.28
0.200	192	-				ı		0.200	5.49	ı	
0.249	75.6	0.252	55.3	0.249	0.73	ı		0.252	8.63		
0.269	31.5	-		-		ı		0.264	7.98	ı	
0.361	60.5	0.359	102	0.359	0.93	I		-		I	
0.376	55.9	•				0.374	3.14	-		-	
0.381	162	0.381	79.0	0.376	1.71	0.378	3.05	-		0.381	1.47
0.388	35.9	0.388	137	0.386	4.80	0.388	3.66	-		-	
0.396	207	I		I		0.398	7.05	-		I	
		0.400	173	I		I		-		I	
0.405	342	0.408	127	0.405	2.18	ı		-		ı	
0.413	235	-		0.415	3.43	0.410	5.67	I		I	

Таблица 1.3. Гармонические составляющие в данных измерений *z*-компоненты ускорения.

38

		A''							4.08			1.37	1.41										
4	6	f	ı	-	-	I	ı	ı	0.486	I	ı	0.523	0.527	I	ı	ı	-	-	ı	-	ı	-	-
		A''							7.04	12.6	7.55	9.01	4.39									3.95	
•	5	f	ı	-	T	I	I	ı	0.481	0.493	0.513	0.520	0.527	I	ı	I	-	I	I	-		0.706	I
		A''	5.12		3.08	1.48						1.77				2.40	3.15	10.3	11.3	7.34	9.08		0.77
4	4	f	0.422	I	0.435	0.449	I	I	-	I	I	0.518	I	I	I	0.652	0.664	0.676	0.686	0.693	0.701	T	0.713
		A''	2.55		1.21	1.20		0.57	1.51						1.18	06.0	2.55	0.90	4.74	2.25	5.74	5.98	4.61
	3	f	0.422	I	0.437	0.444	ı	0.457	0.488	I	ı	ı	I	I	0.623	0.654	0.667	0.676	0.684	0.691	0.698	0.704	0.711
	_	$^{\prime\prime} V$	92.9	149	88.5	126.9	86.3	95.0	90.7	74.3					65.2	1060	82.9	128		200		182	156
	2	f	0.422	0.430	0.440	0.447	0.452	0.459	0.483	0.493	I	ı	I	I	0.620	0.654	0.667	0.676	I	0.693	I	0.703	0.711
		A''	256		116	172		72.8	50.7		40.2			156		144		161	110	82.2	209	187	253
	1	f	0.425	I	0.435	0.449	I	0.459	0.486	I	0.513	I	I	0.603	I	0.652	I	0.679	0.684	0.691	0.698	0.706	0.713

Таблица 1.3. Гармонические составляющие в данных измерений *z*-компоненты ускорения (продолжение).

	A''	0.78		3.19		5.13	1.48	2.53	4.56	5.59	2.29	2.45	2.50	3.30				3.12	4.18	2.54
6	f	0.715	-	0.728		0.735	0.742	0.752	0.757	0.769	0.779	0.784	0.796	0.808	-	I	ı	1.421	1.429	1.440
	Α"		9.62			13.9		23.0	25.7	10.1	13.6	8.9	10.3	10.7						
v)	f	I	0.723	I	I	0.737	I	0.750	0.759	0.769	0.776	0.786	0.798	0.808	I	I	I	I	ı	I
	Α"	0.19		4.50		7.81	1.41	1.55	2.40	2.54	2.16					2.73	2.90	2.83	2.97	3.52
	f	0.718	I	0.725	I	0.735	0.742	0.747	0.759	0.764	0.776	I	ı	ı	I	1.397	1.409	1.414	1.426	1.433
		2			34		32		54		5	8		8	5	0	2	54		
~	A	5.1			3.4		3.3		1.(2.8	1.1		1.3	2.0	2.5	2.3	1.6		
3	f A	0.718 5.1	-	-	0.730 4.8	-	0.745 3.3	-	0.757 1.6	1	0.772 2.8	0.784 1.1	•	0.806 1.3	1.375 2.0	1.397 2.5	1.404 2.3	1.419 1.6	1	-
0	A'' f A	0.718 5.1	- 242	-	3.4 0.730 4.8	-	185.9 0.745 3.3	100.3 -	60.5 0.757 1.6	-	58.0 0.772 2.8	46.4 0.784 1.1	35.7 -	50.9 0.806 1.3	38.3 1.375 2.0	1.397 2.5	103 1.404 2.3	83.2 1.419 1.6	107.5 -	100 -
2 3	f A'' f A	- 0.718 5.1	0.720 242 -	1	0.732 79.4 0.730 4.8	1	0.740 185.9 0.745 3.3	0.747 100.3 -	0.757 60.5 0.757 1.6	1	0.772 58.0 0.772 2.8	0.784 46.4 0.784 1.1	0.798 35.7 -	0.806 50.9 0.806 1.3	1.377 38.3 1.375 2.0	- 1.397 2.5	1.406 103 1.404 2.3	1.421 83.2 1.419 1.6	1.431 107.5 -	1.440 100 -
3	A'' f A'' f A''	- 0.718 5.1	238 0.720 242 -	-	202 0.732 79.4 0.730 4.8	-	142 0.740 185.9 0.745 3.3	138 0.747 100.3 -	0.757 60.5 0.757 1.6	1	82.9 0.772 58.0 0.772 2.8	0.784 46.4 0.784 1.1	62.5 0.798 35.7 -	178 0.806 50.9 0.806 1.3	31.9 1.377 38.3 1.375 2.0	- 1.397 2.5	36.9 1.406 103 1.404 2.3	62.1 1.421 83.2 1.419 1.6	52.4 1.431 107.5 -	80.9 1.440 100 -

Таблица 1.3. Гармонические составляющие в данных измерений *z*-компоненты ускорения (продолжение).

Анализ отрезков 1, 2, 3, 4 и 6 позволил установить следующее. При коррекции орбиты станции с помощью ДПО грузового корабля станция испытывает значительные колебания с частотами 0.022÷0.056 Гц. При выключенных ДПО колебания с этими частотами практически отсутствуют.

Частоты, превышающие 0.6 Гц, в спектрах отрезков данных 1, 2, 3, 4 и 6 практически одинаковы. Амплитуды соответствующих гармоник на отрезках 1, 2 (во время работы ДПО) существенно выше, чем на отрезках 3, 4 и 6. Как видно из табл. 1.1. – 1.3 и рис. 1.4, 1.5, 1.8, 1.9, 1.12 и 1.13, амплитуды вибрационных микроускорений во время работы ДПО в среднем возрастают на порядок, а амплитуды гармоник n_1 -компоненты микроускорения с частотами 0.100÷0.113, 0.252, 0.274, 0.352 и 1.017÷1.043 Гц возрастают на два порядка. В случае n_2 -компоненты при работе ДПО наиболее значительные возмущения наблюдаются на частотах 0.101÷0.111, 0.254, 0.275, 0.360, 0.401 и 0.701÷0.719 Гц. В случае n_3 -компоненты – на частотах 0.250, 0.381÷0.425, 0.450, 0.652, 0.677, 0.805 Гц, причем в n_3 -компоненте амплитуды возрастают на два порядка.

Отрезок 5 следует рассмотреть особо. На этом отрезке происходила передача управления станцией от американского сегмента к российскому, что вызвало некоторое изменение работы системы управления ориентацией и несколько повысило уровень микроускорений. Амплитуды гармонических составляющих в данных отрезка 5 в несколько раз больше соответствующих амплитуд на отрезках 3, 4 и 6. В отличие от отрезков 1, 2, 3, 4 и 6 в спектре n_1 -компоненты микроускорения на отрезке 5 нет возмущений с частотами более 1.03 Гц, а в спектрах n_2 - и n_3 -компонент не наблюдаются возмущения с частотами более 0.808 Гц. На отрезке 5 в спектре n_1 -компоненты присутствуют значительные возмущения на частоте 0.385 Гц, в спектре n_2 компоненты – на частотах 0.385, 0.390, 0.738 Гц, в спектре n_3 -компоненты – на частотах 0.751, 0.759 Гц. Глава 2. Определение частот упругих колебаний конструкции МКС

При проведении на борту МКС экспериментов в области микрогравитации ведется мониторинг микрогравитационной обстановки. В то же время, исследования микрогравитационной обстановки на борту РС МКС позволяют сделать вывод, что он не отвечает в полной мере предъявляемым требованиям к уровню микроускорений при проведении указанных экспериментов [5, 8, 27]. Мониторинг в таком случае способствует анализу и интерпретации полученных результатов, но не улучшает ситуацию на борту.

Создать требуемые условия позволяет использование универсальных и специализированных виброзащитных платформ с дополнительными системами контроля микроускорений непосредственно в зоне размещения (или вблизи этой зоны) экспериментальных капсул или контейнеров. В то же время, при проектировании виброзащитных платформ необходимо учитывать, что собственные частоты платформы и конструкции МКС не должны совпадать, в противном случае в низкочастотной области спектра будет наблюдаться резонанс на собственных частотах виброзащитной платформы [25, 29]. Возникает задача определения характерных частот упругих колебаний конструкции станции.

С целью решения данной задачи были исследованы свободные колебания конструкции, возникающие во время стыковки космических кораблей с МКС, их отстыковки и в результате срабатывания двигателей системы ориентации СМ. Исследование проведено с использованием данных измерений низкочастотного акселерометра MAMS. Для исследования были выбраны 14 отрезков измерений выполненных в 2005 и 2006 годах. На выбранных отрезках анализировались интервалы данных, отвечающие только процессу свободного затухания колебаний элементов конструкции. Найдены характерные частоты упругих колебаний конструкции станции и соответствующие им коэффициенты затухания. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных для различных стыковочных портов (узлов), а также наборов двигателей СМ [18, 20, 22].

2.1. Модель упругих колебаний конструкции станции

Низкочастотный акселерометр MAMS установлен в модуле *Lab* Американского сегмента MKC. Показания этого прибора использованы ниже для определения характерных частот упругих колебаний конструкции станции. Напомним, что MAMS измеряет микроускорения в собственной системе координат $O_{z_1z_2z_3}$, направления осей которой в строительной системе $O_{y_1y_2y_3}$ станции (см. рис. 1) задаются формулами перехода $O_{z_1} = O_{y_1}$, $O_{z_2} = O_{y_2}$ и $O_{z_3} = -O_{y_3}$ (см. п. 1.1). Обе эти системы – правые, декартовы.

Свободные колебания корпуса станции достаточно точно аппроксимируются свободными колебаниями линейной системы с конечным числом степеней свободы [1, 26, 39]. С учетом этого обстоятельства будем считать, что каждая векторная компонента n_1 , n_2 или n_3 показаний MAMS должна иметь вид

$$n = C_0 + \sum_{k=1}^{N} e^{-\mu_k(t-t_0)} \Big[C_{2k-1} \cos 2\pi \, \nu_k \left(t - t_0 \right) + C_{2k} \sin 2\pi \, \nu_k \left(t - t_0 \right) \Big].$$
(2.1)

Здесь t_0, μ_k, v_k и C_j – постоянные величины, C_0 – учитывает постоянное смещение в данных измерений. В выражении (2.1) наибольший интерес представляют величины μ_k и v_k , знание которых позволяет судить о механических параметрах колебательной системы.

Построение аппроксимирующих выражений (2.1) выполнялось методом наименьших квадратов на специально выбранных отрезках данных отдельно для каждой векторной компоненты ускорения. Эти отрезки выбирались так, чтобы колебания на них были свободными (действие вынуждающих сил отсутствовало) и имели достаточно большие амплитуды. Возбуждение собственных колебаний происходило в результате проведения так называемых динамических операций – при стыковке и отстыковке космических кораблей и при срабатывании двигателей ориентации СМ. MAMS функционировал непрерывно, но отрезки, полученные при действии возмущающих сил, в обработку не включались.

Перед проведением динамических операций по стыковке и отстыковке управление станцией передается с Американского сегмента на Российский сегмент МКС. Поддержание ориентации станции российскими средствами заключается в периодическом включении двигателей ориентации СМ или двигателей ДПО ТГК "Прогресс". Порядок и длительность включения двигателей определяется бортовым компьютером с учетом информации об уходах станции из требуемого положения. Двигатели выключаются за несколько минут до начала динамической операции (стыковки или отстыковки) и включаются через несколько мнут после ее окончания. Поэтому непосредственно перед контактом с кораблем при стыковке или сразу после его отхода при отстыковке имеется промежуток времени, на котором станция не связана с кораблем и на котором колебания ее конструкции можно считать свободными. Если стыковки или отстыковки не происходит, но ориентация станции поддерживается реактивными двигателями, то между отдельными срабатываниями можно найти достаточно продолжительные промежутки времени, на которых колебания конструкции станции также можно считать свободными. Ниже в качестве исследуемых отрезков данных взяты данные, полученные на указанных промежутках, а чтобы полнее характеризовать эти промежутки, приводятся графики данных на более продолжительных временных интервалах, включающих контакты кораблей со станцией и срабатывания реактивных двигателей.

2.2. Описание исследуемых данных

Для исследования были выбраны 14 отрезков данных измерений, выполненных в период с марта 2005 по июнь 2006 гг. На 7 отрезках происходила отстыковка космических кораблей от станции, на 3 отрезках космические корабли стыковались со станцией, на 4 отрезках происходило срабатывание двигателей СМ (см. табл. 2.1, 2.2). На всех выбранных отрезках станция находилась в орбитальной ориентации. Для стыковки российских транспортных и грузовых кораблей со станцией используются стыковочный порт в корме СМ, стыковочный узел "Пирс", а также стыковочный узел Функционально-грузового блока (ФГБ). Стыковка американских кораблей многоразового использования осуществляется к стыковочному узлу PMA-2 (Pressurized Mating Adapter) Американского сегмента. Для анализа выбрано по два отрезка для каждого стыковочного порта Российского сегмента (отрезки 1 – 6). Для узла PMA-2 выбрано четыре отрезка: две стыковки и две отстыковки орбитальных кораблей системы "Space Shuttle" (отрезки 7 – 10). На двух участках поддержания ориентации станции средствами Российского сегмента выбрано четыре отрезка между срабатываниями двигателей ориентации СМ (отрезки 11 – 14). Отрезки данных 1, 4, 5, 7, 10, 12 и 14 представлены на рис. 2.1а, 2.2а, ..., 2.14а графиками компонент кажущегося ускорения n_1 , n_2 или n_3 . Выделенные на этих отрезках промежутки, отвечающие свободным колебаниям, указаны на графиках отрезками горизонтальных прямых.

Общие сведения о выбранных отрезках данных, отвечающих стыковкам и отстыковкам кораблей, приведены в табл. 2.1. Здесь для каждого отрезка указана информация о типе операции (стыковка или отстыковка), дата и время начала проведения операции, наименование модуля или узла МКС, а также космического аппарата, задействованных в операции. В табл. 2.2 приведены общие сведения об отрезках данных, полученных при срабатывании двигателей ориентации СМ. Для каждого отрезка указаны дата и моменты выключения двигателей по каналам крена (К), рысканья (Р) и тангажа (Т). Срабатывание двигателей ориентации СМ по каналу К, Р или Т приводит к появлению возмущающего момента относительно оси Oy_1 , Oy_2 или Oy_3 соответственно. В табл. 2.3 приведены начальные точки t_0 и длины отрезков данных, относящихся к свободным колебаниям конструкции станции. Длины характеризуются числом M моментов времени с измерениями. Напомним, шаг данных по времени составляет 0.1 с. Значения t_0 и M выбирались индивидуально для каждой векторной компоненты ускорения на каждом отрезке.

_					_
Отрезок	Дата	$t_{\rm нач. \ операции}$	Узел	КА	Операция
1	2005.09.07	13:25:57	CM	ТГК M53	Отстыковка
-		100110			<u>_</u>
2	2006.03.03	13:06:10	CM	TTK M54	Отстыковка
2	20060610	17.06.50	Пля		
3	2000.00.19	17:00:50	Пирс	11 K M55	Отстыковка
1	2006.06.26	10.24.36	Пире	ТГК М57	Стикория
4	2000.00.20	19.24.30	пирс		Стыковка
5	2005 04 24	$21 \cdot 44 \cdot 40$	ወርይ	ΤΚ ΤΜΔ5	OTOTLIKOPKA
5	2003.04.24	21.77.70	Ψ ID		OTCIDINODKA
6	2005 07 19	1/1.07.50	ΦΓΓ	TK TMA6	Стыкорка
0	2005.07.17	14.07.37	Ψ ID		CIDINUDRA
7	2005 08 06	10.24.00	$\mathbf{D}\mathbf{M}\mathbf{A}2$	STS 11/	
/	2005.00.00	10.24.00	1 10177-2	515-114	Отстыковка
8	2006 07 15	13.07.46	PMA_2	STS_121	Οτοτιικορκα
0	2000.07.15	13.07.40	1 10177-2	515-121	Отстыковка
0	2005 07 28	1/1.17.25	$\mathbf{D}\mathbf{M}\mathbf{A}2$	STS 11/	
2	2003.07.20	14.17.33	1 IVIA-2	515-114	CIDINUBRA
10	2006 07 06	17.51.45	$PM\Delta_2$	STS_121	CTLIKOPKA
10	2000.07.00	17.51.45	1 IVI/1-2	515-121	CIDINUDKA

Таблица 2.1. Общие сведения об операциях на отрезках 1 – 10.

Таблица 2.2. Времена выключения двигателей СМ на отрезках 11 – 14.

Отрезок	Лата	t _{выкл}	поч. двигателей	СМ
orpeser	Auru	канал К	канал Р	канал Т
11	2006.03.03	9:48:31.393	9:48:39.530	-
12	2006.03.03	10:00:41.331	10:00:41.331	-
13	2006.06.19	-	15:25:28.550	15:25:20.749
14	2006.06.19	-	17:17:31.749	17:17:27.948







Рис. 2.2. Отрезок данных 2: отстыковка от стыковочного порта CM 2006.03.03; а) исходные данные MAMS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результат их аппроксимации.







Рис. 2.4. Отрезок данных 4: стыковка к стыковочному узлу "Пирс" 2006.06.26; а) исходные данные MAMS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результат их аппроксимации.











Рис. 2.7. Отрезок данных 7: отстыковка от стыковочного узла РМА-2 2005.08.06; а) исходные данные МАМS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результат их аппроксимации.







Рис. 2.9. Отрезок данных 9: стыковка к стыковочному узлу РМА-2 2005.07.28; а) исходные данные MAMS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результат их аппроксимации.







Рис. 2.11. Отрезок данных 11: срабатывание двигателей СМ по каналам К и Р 2006.03.03; а) исходные данные MAMS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результат их аппроксимации.

57













2.3. Методика исследования колебаний конструкции МКС

Поиск характерных частот упругих колебаний конструкции МКС с использованием отобранных отрезков данных осуществлялся в три этапа. На первом этапе выбранные данные непосредственно аппроксимировались выражением (2.1). Как правило, удавалось выделить колебания на низких частотах (условимся называть так частоты менее 0.85 Гц). В случае хорошо выраженных колебаний таких частот оказывалось одна или две, что подтверждалось результатами предварительной аппроксимации анализируемых данных с помощью спектрального анализа.

Заметим, что при изучении затухающих колебаний спектральный анализ имеет ограниченное применение [12, 49]. Спектральный анализ включал в себя построение функций E(f) (1.3), минимумы которых дают оценки среднеквадратической ошибки аппроксимации данных измерений акселерометров выражением (1.1), а также поиск значимых минимумов указанных функций. Оценки частот v_k , полученные в результате такого анализа, служили лишь первым приближением при решении нелинейной задачи метода наименьших квадратов по построению выражения (2.1). Такое применение спектрального анализа оказалось весьма полезным.

На втором этапе из исходных данных измерений вычитались значения выражения (2.1), построенного на первом этапе. Из полученного ряда остатков выбирался подынтервал, на котором высокочастотные колебания проявлялись наиболее заметно. Такой подынтервал был назван укороченным рядом остатков. Укороченный ряд также аппроксимировался выражением (2.1), но с более высокими частотами, чем на первом этапе. На втором этапе удавалось выявить колебания со сравнительно высокими частотами (более 0.85 Гц). Такие колебания быстро затухают и имеют, как правило, малые амплитуды, что затрудняет их выявление на первом этапе.

Третий этап заключался в проверке результатов первого и второго этапов. Из отрезка исходных данных выбирался подынтервал, имеющий, как правило, те же длину и начальную точку, что и укороченный ряд остатков. Этот подынтервал был назван отрезком окончательной обработки. На нем опять строилось выражение (2.1), в котором учитывались все частоты, найденные на предыдущих этапах. На отрезке окончательной обработки удавалось одновременно обнаружить как высокочастотные, так и низкочастотные гармоники, но точность определения параметров μ_k и v_k , на нем оказывалась, как правило, хуже, чем на первом и втором этапах.

Выполнение второго и третьего этапов в ряде случаев оказалось излишним. На некоторых отрезках данных уже на первом этапе удалось найти высокочастотные гармоники. Второй и третий этапы в этих случаях не дали ничего нового.

Поскольку построение выражения (2.1) выполнялось методом наименьших квадратов, разброс найденных параметров этого выражения удобно характеризовать обычными оценками точности метода наименьших квадратов – соответствующими стандартными отклонениями. Эти стандартные отклонения вычислялись в предположении о несмещенности и некоррелированности ошибок в аппроксимируемых данных. Такие оценки выбраны из соображений удобства – теоретико-вероятностные условия их применимости в данном случае не выполнены.

2.4. Результаты построения аппроксимации

Результаты первого этапа построения аппроксимирущих выражений (2.1) на выбранных отрезках данных приведены в табл. 2.3 – 2.10. В табл. 2.3 для каждого отрезка и векторной компоненты ускорения указаны число N обнаруженных гармоник в выражении (2.1) и оценка σ стандартного отклонения ошибок аппроксимации данных этим выражением. В табл. 2.4 – 2.10 приведены оценки соответствующих параметров μ_k , v_k , $A_k = \sqrt{C_{2k-1}^2 + C_{2k}^2}$ и их стандартные отклонения $\sigma_{\mu k}$, $\sigma_{v k}$, σ_{Ak} (для простоты письма индексы k в таблицах опущены). Величины v_k и $\sigma_{v k}$ выражены в Гц, единицей измерения величин μ_k и $\sigma_{\mu k}$ служит с⁻¹, величин A_k и $\sigma_{Ak} - 10^{-3}$ м/с².

Отрезок	Компонента	t_0	М	Ν	σ
	n_1	13:26:12.898	430	1	0.109
1	<i>n</i> ₂	13:26:15.098	405	2	0.203
	n ₃	13:26:11.000	64	4	0.049
	n_1	13:06:35.391	640	1	0.061
2	<i>n</i> ₂	13:06:29.793	715	2	0.174
	n ₃	13:06:32.094	88	4	0.111
	<i>n</i> ₁	17:06:55.047	70	4	0.109
3	<i>n</i> ₂	17:06:53.945	300	2	0.372
	n ₃	17:06:56.645	160	1	0.261
	n_1	19:24:54.742	100	4	0.347
4	<i>n</i> ₂	19:24:54.141	300	2	0.713
	n ₃	19:25:01.336	240	2	0.138
	n_1	21:44:57.664	400	1	0.141
5	<i>n</i> ₂	21:44:56.496	400	1	0.429
	n ₃	21:44:58.664	51	2	0.192
	n_1	14:08:15.418	480	2	0.072
6	<i>n</i> ₂	14:08:46.211	230	1	0.106
	n ₃	14:08:31.918	220	2	0.063

Таблица 2.3. Сведения об анализируемых на первом этапе отрезках

Отрезок	Компонента	t ₀	М	N	σ
	n_1	10:24:02.328	600	2	0.046
7	<i>n</i> ₂	10:24:03.328	600	2	0.190
	<i>n</i> ₃	10:24:02.926	100	2	0.091
	n_1	13:07:57.844	700	1	0.097
8	<i>n</i> ₂	13:07:56.445	700	1	0.248
	n ₃	13:08:00.648	156	2	0.080
	n_1	14:17:37.488	50	1	0.459
9	<i>n</i> ₂	14:17:38.891	84	4	0.529
	n ₃	14:17:37.891	61	3	0.730
	n_1	17:52:03.609	64	3	0.579
10	<i>n</i> ₂	17:52:05.508	150	3	1.194
	n ₃	17:52:04.609	55	3	1.407
	n_1	9:48:39.711	64	4	0.032
11	<i>n</i> ₂	9:48:40.402	76	4	0.076
	n ₃	9:48:41.602	60	3	0.176
	n_1	10:00:42.895	190	3	0.028
12	<i>n</i> ₂	10:00:43.992	190	2	0.075
	n ₃	10:00:45.992	51	3	0.128
	n_1	15:25:28.586	250	4	0.054
13	<i>n</i> ₂	15:25:28.785	100	3	0.285
	n ₃	15:25:30.785	120	1	0.241
	n_1	17:17:31.766	200	2	0.057
14	<i>n</i> ₂	17:17:32.566	196	2	0.133
	<i>n</i> ₃	17:17:31.766	110	1	0.343

Таблица 2.3. Продолжение

Каждая из табл. 2.4 – 2.10 содержит характеристики двух отрезков данных. В случае табл. 2.4 – 2.8 эти отрезки относятся к одному и тому же стыковочному узлу. В случае табл. 2.9, 2.10 отрезки относятся к одной и той же паре каналов управления вращательным движением станции. В каждой таблице параметры гармоник, обнаруженных на разных отрезках данных, но имеющих примерно одинаковые частоты, помещены в одну и ту же горизонтальную строку – естественно предположить, что проявляющиеся на разных отрезках близкие частоты, результат колебаний одних и тех же элементов конструкции корпуса. Таблица 2.4. Результаты первого этапа для стыковочного порта в корме СМ.

77				Отр	езок 1							Отр	езок 2			
Компонента	ь	М	f	$\sigma_{_f}$	A	$\sigma_{_A}$	k	σ_k	σ	Μ	f	$\boldsymbol{\sigma}_{_f}$	Α	$\sigma_{_A}$	k	σ_k
x	0.109	430	0.432	0.002	0.673	0.026	0.024	0.0015	0.061	640	0.424	0.001	0.646	0.013	0.025	0.0007
î.		105	0.432	0.001	1.752	0.051	0.026	0.0012	0 174	715	0.423	0.001	1.791	0.038	0.025	0.0006
Ś	CU2.U	0.04	0.739	0.006	0.923	0.071	0.075	0.0060	0.1/4	C1/	0.701	0.012	0.789	0.077	0.122	0.0117
			ı								0.173	0.119	0.244	0.109	0.267	0.0969
			ı								0.412	0.031	0.274	0.064	0.026	0.0349
			0.564	0.096	0.118	0.040	0.222	0.0919			ı					
Ŋ	0.049	64	ı						0.111	88	0.722	0.022	0.671	0.078	0.145	0.0216
			0.907	0.018	0.661	0.043	0.204	0.0166			0.944	0.075	0.151	0.068	0.100	0.0759
			1.278	0.039	0.224	0.036	0.147	0.0402			ı					
			1.789	0.041	0.179	0.031	0.118	0.0400			ı					

Таблица 2.5. Результаты первого этапа для стыковочного узла "Пирс".

				Отр	езок 3							Отр	езок 4			
компонента	σ	Μ	f	$\sigma_{_f}$	A	$\sigma_{_A}$	k	σ_k	σ	М	f	$\sigma_{_f}$	A	$\sigma_{_A}$	k	σ_k
			0.380	0.033	0.364	0.063	0.045	0.0325			0.392	0.042	0.636	0.176	0.073	0.0410
;	0 100		0.759	0.044	0.426	0.084	0.162	0.0461	777	100	0.712	0.035	0.576	0.161	0.021	0.0370
r	601.0	2	1.043	0.012	1.790	0.086	0.203	0.0116	1+0.0		1.033	0.013	4.485	0.244	0.237	0.0140
			1.644	0.064	0.293	0.072	0.185	0.0619			1.728	0.033	1.945	0.236	0.261	0.0330
ŝ	<i>CL</i> 2 0	300	0.384	0.006	0.136	0.115	0.042	0.0060	0 712	300	0.382	0.009	1.708	0.236	0.056	0.0100
Ś	710.0	000	0.765	0.018	3.024	0.231	0.240	0.0183	C1 / . N	nnc	0.728	0.005	5.643	0.284	0.094	0.0050
	1900	160	0.745	0.007	2.344	0.119	0.115	0.0070	0 1 2 0	070	0.745	0.006	0.810	0.052	0.077	0.0060
Z	107.0	001	I						001.0	740	1.463	0.020	0.489	0.067	0.146	0.0210

ΦΓБ.
порта
стыковочного
впд
этапа
первого
Результаты
<u>.</u> 6.
Таблица 2

	σ_k	0.0041	0.0073	0.0039	0.0008	0.0327		
	k	0.050	0.034	090.0	0.052	0.109		
	$\sigma_{_A}$	0.043	0.039	0.038	0.022	0.028		
езок б	\boldsymbol{V}	0.439	0.183	962.0	0.215	860.0		
Отр	${\boldsymbol \sigma}_{_f}$	0.004	0.007	0.004	0.008	0.033		
	f	0.387	0.413	0.400	0.441	0.778	-	I
	Μ	180	100	230			077	
	Q		710.0	0.106		0.062	CUU.U	
	σ_k	0.0013		0.0017			0.0403	0.0607
	k	0.054		0.062			0.151	0.207
	$\sigma_{_A}$	0.044		0.139			0.130	0.137
езок 5	Y	1.974		5.368			1.009	0.763
Отр	σ_{f}	0.001		0.002			0.037	0.057
	f	0.389	ı	0.391	ı	I	0.851	1.619
	Μ	007	400	400		۲ ۲	10	
	ь	0 171	0.141	0.429		0 100	0.172	
	компонента	\$	Y	У			2	

Таблица 2.7. Результаты первого этапа для стыковочного узла РМА-2.

	σ_k	0.0008		0.0006		0.0118	0.0052
	k	0.019		0.019		0.045	0.057
	$\sigma_{_A}$	0.020		0.050		0.031	0.032
езок 8	A	0.655		2.038		0.242	0.643
Отр	${oldsymbol{\sigma}}_{f}$	0.001		0.001		0.013	0.005
	f	0.377	ı	0.377	ı	0.471	0.705
	Μ				001	156	ncı
	σ	0.007	160.0	8760	0.240	080.0	0.000
	σ_k	0.0006	0.0005	0.0008	0.0042	0.005	0.007
	k	0.024	0.103	0.023	0.113	0.084	0.020
	$\sigma_{_A}$	0.010	0.019	0.042	0.081	0.035	0.022
езок 7	A	0.503	0.408	1.576	2.189	0.605	0.138
Отр	σ_{f}	0.001	0.005	0.001	0.004	0.005	0.008
	f	0.387	0.734	0.387	0.733	0.437	0.752
	Μ	600		600	000	100	001
	σ	0.016	0.040	0 100	061.0	0.001	160.0
JI	компонента	\$	Y	î	Ś		Z

Таблица 2.8. Результаты первого этапа для стыковочного узла РМА-2.

				Отр	езок 9							Orp(ззок 10	(
Компонента	Q	M	f	$\sigma_{_f}$	\boldsymbol{A}	$\sigma_{_A}$	k	σ_k	σ	Μ	f	$\sigma_{_f}$	A	$\sigma_{_A}$	k	σ_k
			ı								0.489	0.047	10.82	1.537	0.598	0.0577
;	0.150	202	0.645	0.033	9.510	0.464	0.607	0.0279	0 5 70	v v	ı					
X	0.409		ı						61C.U	5	0.845	0.057	3.371	4.287	3.100	4.3480
			ı								1.200	0.105	2.314	0.853	0.321	0.0941
			0.264	0.039	3.807	0.672	0.217	0.0361			0.232	0.044	2.087	1.341	0.093	0.0656
			I								0.322	0.026	8.250	3.414	0.536	0.2332
y	0.529	84	0.437	0.021	4.917	0.571	0.137	0.0195	1.194	150	0.412	0.017	6.196	1.205	0.082	0.0165
			0.671	0.067	0.746	0.342	0.058	0.0764			ı					
			0.901	0.049	1.079	0.307	0.066	0.0442			ı					
			0.228	0.283	0.147	7.009	1.362	0.4042			0.197	0.275	6.536	8.393	0.294	0.3829
			ı								0.479	0.168	4.033	6.724	0.446	0.6898
N,	0.730	61	0.531	0.142	1.627	1.318	0.258	0.2020	1.407	55	ı					
			I								0.760	0.075	7.576	2.082	0.140	0.0543
			0.834	0.033	3.557	0.572	0.048	0.0319			I					

69

Таблица 2.9. Результаты первого этапа для набора двигателей СМ по каналам К и Р.

	\mathfrak{q}_k		4537	0140	0079		0161	0072				0515	5493	
	k		.505 0.	.049 0.	.103 0.		0.038 0.	093 0.				.225 0.	.033 0.	
	$\sigma_{_A}$.049 1	0.012 0	014 0		0.026 0	0.031 0).216 0	.500 1	
30K 12	Α		0.196 (0.073 (0.203 (0.122 (0.485 (0.617 (1.110 (
Отре	$\sigma_{_f}$		0.027	0.013	0.008		0.017	0.007				0.061	0.033	1
	f	ı	0.532	0.739	0.946	I	0.377	0.738	I	I	I	0.648	0.797	
	М			190				100	170			, 1	10	
	ь			0.028				2000	C/0.0			0,100	0.120	
	σ_k	0.0264	0.3040		0.0170	0.0720	0.013	0.043	0.024	0.076	060.0	0.115		
	k	0.045	0.649		0.088	0.315	0.025	0.090	0.099	0.217	0.213	0.282		
	$\sigma_{_A}$	0.026	0.005		0.023	0.079	0.042	0.053	0.054	0.059	0.081	0.048		
езок 11	V	0.249	0.002		0.306	0.131	0.578	0.220	0.435	0.201	0.482	0.089		
Отр	$\sigma_{_f}$	0.032	0.328		0.017	0.073	0.013	0.047	0.024	0.074	0.065	0.032		
	f	0.383	0.566	ı	0.949	1.265	0.381	0.704	0.944	1.265	0.426	0.688	ı	i I
	Μ			64				26	0/			60	00	
	ь			0.032				7200	0/0.0			7610	0/1.0	
	Компонента			x				2	Ŷ				N	-

Таблица 2.10. Результаты первого этапа для набора двигателей СМ по каналам Р и Т.

				Orpe	30K 13							Orpe	зок 14			
сомпонента	р	М	f	$\sigma_{_f}$	${V}$	$\sigma_{_A}$	k	σ_k	α	М	f	$\sigma_{_f}$	A	$\sigma_{_A}$	k	σ_k
			0.365	0.018	0.104	0.033	0.014	0.0170			0.382	0.002	0.726	0.019	0.033	0.0019
ş	0.051	750	0.407	0.034	0.056	0.012	0.018	0.0352	0.057		-					
X	40.0	007	0.748	0.005	0.364	0.020	0.072	0.0048	100.0	007	0.770	0.007	0.347	0.023	0.082	0.0067
		L	1.218	0.004	0.314	0.017	0.040	0.0036			ı					
			0.312	0.038	1.013	0.298	0.545	0.1673			0.383	0.001	2.535	0.046	0.039	0.0014
y	0.285	100	0.764	0.016	1.777	0.164	0.111	0.0147	0.133	196	0.769	0.004	1.116	0.050	0.065	0.0041
			1.216	0.029	0.503	0.120	0.009	0.0307			ı					
2	0.241	120	0.729	0.008	2.334	0.120	0.123	0.0084	0.343	110	0.764	0.010	2.365	0.162	0.089	0.0100

Примеры аппроксимирующих выражений (2.1), построенных на первом этапе, приведены на рис. 2.16, 2.26, ..., 2.146. Графики этих выражений изображены сплошной красной линией, тонкой пунктирной линией с маркерами указаны данные измерений. Представленные на этих рисунках отрезки данных выделены из отрезков на соответствующих рис. 2.1a, 2.2a, ..., 2.14a. В случаев компонент n_1 отрезков 2 – 5, 7 – 12, компонент n_2 отрезков 2, 5, 7 – 9, 11 и компонент n_3 отрезков 1, 5, 8, 9, 12 первый этап построения аппроксимирующего выражения (2.1) дал окончательный результат. Здесь и ниже компоненты векторов указываются в строительной системе координат СМ.

На рис. 2.15 – 2.21 представлены графики функций E(f), полученные для исследуемых отрезков данных измерений на первом этапе анализа. Значимые минимумы функции E(f) соответствуют искомым характерным частотам. Несмотря на то, что применение спектрального анализа в рассматриваемых случаях может рассматриваться исключительно как поиск первого приближения, изучение рис. 2.15 – 2.21 показывает достаточно точное совпадение значений частот, найденных в результате построения аппроксимирующих выражений (2.1), со значимыми минимумами соответствующих функций E(f), при этом расхождение оценок характерных частот не превышает, как правило, 0.01 Гц.




























Второй и третий этапы были выполнены для рядов остатков компоненты n_1 отрезков 1 и 6, компоненты n_2 отрезков 1, 3, 4, 6 и 10, компоненты n_3 отрезков 2, 4, 6, 7 и 10 – 12. Результаты представлены в табл. 2.11 – 2.25 и на рис. 2.8 – 2.15. Таблицы устроены аналогично табл. 2.1 – 2.10. В них указаны начальные моменты времени t_0 исследуемых отрезков, число M точек с данными на этих отрезках, значения σ стандартного отклонения ошибок аппроксимации, оценки параметров μ_k , v_k , A_k и их стандартные отклонения. Для сравнения в табл. 2.11 – 2.25 повторены результаты первого этапа.

Этап	t_0	σ	Μ	f	$\sigma_{_f}$	Α	$\sigma_{\scriptscriptstyle A}$	k	$\sigma_{\scriptscriptstyle k}$
1	13:26:12.898	0.109	430	0.432	0.002	0.673	0.026	0.024	0.0015
				0.477	0.208	0.075	0.060	0.171	0.2133
2	13.26.13 098	0.065	19	0.708	0.158	0.076	0.054	0.273	0.1768
2	15.20.15.098	0.005	T	1.252	0.040	0.402	0.053	0.113	0.0386
				1.626	0.084	0.183	0.051	0.156	0.0876
				0.433	0.029	0.706	0.065	0.049	0.0249
3	13:26:13.098	0.065	49	0.713	0.097	0.124	0.056	0.089	0.1312
3				1.252	0.040	0.422	0.056	0.134	0.0383
				1.630	0.087	0.185	0.052	0.168	0.0883

Таблица 2.11. Результаты анализа для отрезка 1, компонента n_1 .

Этап	t_0	σ	М	f	$\sigma_{_f}$	A	$\sigma_{\scriptscriptstyle A}$	k	$\sigma_{\scriptscriptstyle k}$
1	13.26.15 098	0 203	405	0.432	0.001	1.752	0.051	0.026	0.0012
	15.20.15.070	0.203	тUJ	0.739	0.006	0.923	0.071	0.075	0.0060
2	13.26.15 008	0.028	18	0.900	0.303	0.036	0.020	0.975	0.3563
2	15.20.15.070	0.020	10	1.671	0.072	0.517	0.036	0.178	0.0517
3	13.26.15 098	0.033	18	0.565	0.029	1.917	0.065	0.145	0.0198
5	15.20.15.070	0.055	10	1.658	0.075	0.598	0.045	0.333	0.0490

Таблица 2.12. Результаты анализа для отрезка 1, компонента n_2 .

Таблица 2.13. Результаты анализа для отрезка 2, компонента n_3 .

Этап	t_0	σ	М	f	$\sigma_{_f}$	A	$\sigma_{\scriptscriptstyle A}$	k	$\sigma_{\scriptscriptstyle k}$
				0.173	0.119	0.244	0.109	0.267	0.0969
1	13.06.32 00/	0 1 1 1	88	0.412	0.031	0.274	0.064	0.026	0.0349
L	13.00.32.074	0.111	00	0.722	0.022	0.671	0.078	0.145	0.0216
				0.944	0.075	0.151	0.068	0.100	0.0759
				0.545	0.397	0.094	0.051	1.029	0.3423
2	13:06:35.191	0.016	33	1.091	0.204	0.089	0.047	1.097	0.4531
				1.637	0.028	0.262	0.018	0.203	0.0294
				0.415	0.058	0.106	0.029	0.242	0.0522
3	13.06.35 101	0 049	50	0.755	0.063	0.988	0.170	0.489	0.0483
	15.00.55.171	0.049	50	1.079	0.402	0.668	0.280	1.486	0.3897
				1.683	0.078	0.312	0.063	0.392	0.0745

Этап	Время	σ	М	f	$\sigma_{_f}$	Α	$\sigma_{\scriptscriptstyle A}$	k	$\sigma_{\scriptscriptstyle k}$
1	17:06:56.645	0.261	160	0.745	0.007	2.344	0.119	0.115	0.0070
2	2 17:06:56 645	0 147	50	0.746	0.018	1.696	0.121	0.105	0.0178
	17.00.50.045	0.177	50	1.014	0.080	0.813	0.264	0.283	0.0688
3	17:07:02.238	0.106	74	0.755	0.010	1.251	0.058	0.106	0.0099

Таблица 2.14. Результаты анализа для отрезка 3, компонента n_2 .

Таблица 2.15. Результаты анализа для отрезка 3, компонента n_3 .

Этап	t_0	σ	Μ	f	$\sigma_{_f}$	A	$\sigma_{_{A}}$	k	$\sigma_{_k}$
1	17.06.53 945	0 372	300	0.384	0.006	0.136	0.115	0.042	0.0060
	17.00.33.743	0.572	500	0.765	0.018	3.024	0.231	0.240	0.0183
2	17.06.53 945	0.130	20	0.781	0.253	0.315	0.122	0.017	0.2348
	17.00.33.743	0.150	20	1.799	0.052	1.740	0.133	0.230	0.0584
3	17.06.53 945	0 142	20	0.819	0.038	1.928	0.129	0.121	0.0417
5	17.00.33.743	0.172	20	1.773	0.056	1.829	0.148	0.274	0.0631

Этап	t ₀	σ	М	f	$\sigma_{_f}$	A	$\sigma_{_{A}}$	k	$\sigma_{_k}$
1	19.24.54 141	0713	300	0.382	0.009	1.708	0.236	0.056	0.0100
1	17.27.37.171	0.715	500	0.728	0.005	5.643	0.284	0.094	0.0050
				0.941	0.103	1.629	0.687	0.186	0.0950
2	19.24.54 141	0 317	57	1.130	0.162	1.944	0.944	0.430	0.1801
Z	17.24.34.141	0.517	57	1.633	0.168	0.565	0.499	0.055	0.1628
				1.804	0.073	3.853	0.752	0.383	0.0733
			57	0.396	0.052	1.177	0.315	0.049	0.0592
3	19:24:54.141	0 539		0.720	0.016	6.616	0.436	0.157	0.0193
3		0.339		1.029	0.076	1.069	0.351	0.027	0.0721
				1.798	0.043	2.646	0.378	0.194	0.0424

Таблица 2.16. Результаты анализа для отрезка 4, компонента n_2 .

Таблица 2.17. Результаты анализа для отрезка 4, компонента n_3 .

Этап	t_0	σ	Μ	f	$\sigma_{_f}$	A	$\sigma_{\scriptscriptstyle A}$	k	$\sigma_{\scriptscriptstyle k}$
1	10.25.01 336	0 138	240	0.745	0.006	0.810	0.052	0.077	0.0060
1	17.25.01.550	0.150	240	1.463	0.020	0.489	0.067	0.146	0.0210
				0.960	0.045	0.361	0.064	0.245	0.0493
2	10.25.01 226	0.053	59	1.352	0.602	0.372	0.152	1.237	0.4623
	17.25.01.550			1.402	0.086	0.039	0.026	0.366	0.1016
				1.811	0.116	0.143	0.059	0.266	0.1210
3	19.25.01 336	0 165	59	0.738	0.030	0.675	0.090	0.019	0.0279
5	17.25.01.550	0.105	57	1.496	0.049	0.419	0.092	0.040	0.0501

Этап	t_0	σ	Μ	f	$\sigma_{_f}$	A	$\sigma_{\scriptscriptstyle A}$	k	$\sigma_{\scriptscriptstyle k}$
1	14.08.15 418	0.072	480	0.387	0.004	0.439	0.043	0.050	0.0041
	14.00.15.410	0.072	100	0.413	0.007	0.183	0.039	0.034	0.0073
2	14.08.15 418	0.064	31	0.752	0.115	0.192	0.053	0.143	0.1375
2	14.00.15.410	0.004	51	1.940	0.080	0.213	0.043	0.103	0.0737
3	14.08.15 418	0 124	31	0.433	0.105	0.805	0.148	0.540	0.1249
5	14.00.13.410	0.124	51	1.906	0.157	0.203	0.083	0.113	0.1508

Таблица 2.18. Результаты анализа для отрезка 6, компонента n_1 .

Таблица 2.19. Результаты анализа для отрезка 6, компонента n_2 .

Этап	t_0	σ	Μ	f	$\sigma_{_f}$	Α	$\sigma_{_{A}}$	k	$\sigma_{_k}$
1	14:08:46.211	0.106	230	0.400	0.004	0.796	0.038	0.060	0.0039
2	14:08:46.211	0.043	60	0.744	0.025	0.252	0.025	0.103	0.0241
3	14.08.46 211	0.038	60	0.398	0.007	0.737	0.023	0.047	0.0066
5	17.00.70.211	0.050	00	0.748	0.024	0.235	0.024	0.087	0.0242

Таблица 2.20. Результаты анализа для отрезка 6, компонента n_3 .

Этап	t_0	σ	Μ	f	$\sigma_{_f}$	Α	$\sigma_{_{A}}$	k	$\sigma_{_k}$
1	14.08.31 918	0.063	220	0.441	0.008	0.215	0.022	0.052	0.0008
1	14.00.31.710	0.005	220	0.778	0.033	0.098	0.028	0.109	0.0327
2	14:08:31.918	0.027	34	1.574	0.061	0.130	0.020	0.127	0.0663
				0.395	0.119	0.096	0.033	0.374	0.0917
3	14:08:31.918	0.036	34	0.967	0.103	0.522	0.163	2.676	0.8970
				1.540	0.123	0.206	0.051	0.334	0.0933

Этап	t_0	σ	Μ	f	$\sigma_{_f}$	Α	$\sigma_{\scriptscriptstyle A}$	k	$\sigma_{\scriptscriptstyle k}$
1	10.24.02 926	0 091	100	0.437	0.005	0.605	0.035	0.084	0.0050
1	10.24.02.720	0.071	100	0.752	0.008	0.138	0.022	0.020	0.0070
				1.004	0.152	0.024	0.001	0.178	0.2527
2	10:24:02.926	0.013	35	1.470	0.052	0.074	0.009	0.202	0.0400
				1.937	0.174	0.002	0.003	0.974	0.3966
3	10.24.02 926	0.087	35	0.445	0.085	0.514	0.104	0.062	0.0563
5	10.27.02.720	0.007	55	0.808	0.122	0.406	0.140	0.310	0.2111

Таблица 2.21. Результаты анализа для отрезка 7, компонента n_3 .

Таблица 2.22. Результаты анализа для отрезка 10, компонента n_2 .

Этап	t_0	σ	М	f	$\sigma_{_f}$	Α	$\sigma_{\scriptscriptstyle A}$	k	$\sigma_{\scriptscriptstyle k}$
				0.232	0.044	2.087	1.341	0.093	0.0656
1	17:52:05.508	1.194	150	0.322	0.026	8.250	3.414	0.536	0.2332
				0.412	0.017	6.196	1.205	0.082	0.0165
				0.597	0.023	1.556	0.129	0.003	0.0214
2	17.52.05 508	0 156	13	1.005	0.085	2.363	0.349	0.813	0.0960
2	17.52.05.500	0.150	-5	1.467	0.037	2.848	0.249	0.455	0.0355
				2.085	0.072	1.512	0.197	0.533	0.0641
3	17:52:05.508	1.548	43	0.347	0.038	15.86	1.446	0.393	0.0453

Этап	t_0	σ	М	f	$\sigma_{\scriptscriptstyle f}$	Α	$\sigma_{_A}$	k	$\sigma_{_k}$
1	17:52:04.609	1.407	55	0.197	0.275	6.536	8.393	0.294	0.3829
				0.479	0.168	4.033	6.724	0.446	0.6898
				0.760	0.075	7.576	2.082	0.140	0.0543
2	17:52:04.609	0.351	55	1.100	0.146	0.002	0.005	1.322	0.4604
				1.431	0.068	0.405	0.120	0.411	0.0542
				1.763	0.059	0.500	0.145	0.233	0.0612

Таблица 2.23. Результаты анализа для отрезка 10, компонента n_3 .

Таблица 2.24. Результаты анализа для отрезка 11, компонента n_3 .

Этап	t ₀	σ	М	f	$\sigma_{\scriptscriptstyle f}$	Α	$\sigma_{_A}$	k	$\sigma_{_k}$
1	9:48:41.602	0.176	60	0.426	0.065	0.482	0.081	0.213	0.0900
				0.688	0.032	0.089	0.048	0.282	0.1150
				0.951	0.019	1.750	1.658	0.168	0.0220
2	9:48:41.602	0.163	25	1.353	0.308	0.020	0.019	1.408	0.3110
				1.641	0.155	0.178	0.039	0.315	0.1567
3	9:48:41.602	0.024	29	0.428	0.201	0.330	0.232	0.106	0.4001
				0.968	0.088	1.933	0.244	0.321	0.0540

Таблица 2.25. Результаты анализа для отрезка 12, компонента n_2 .

Этап	t_0	σ	Μ	f	$\sigma_{_f}$	Α	$\sigma_{\scriptscriptstyle A}$	k	$\sigma_{\scriptscriptstyle k}$
1	10:00:45.992	0.075	190	0.377	0.017	0.122	0.026	0.038	0.0161
				0.738	0.007	0.485	0.031	0.093	0.0072
2	10:00:45.992	0.029	38	0.969	0.038	0.141	0.019	0.060	0.0427
				1.667	0.149	0.133	0.030	0.595	0.1427
3	10:00:45.992	0.029	50	0.374	0.071	0.093	0.023	0.081	0.0507
				0.718	0.035	0.409	0.056	0.054	0.0370
				0.945	0.090	0.276	0.065	0.266	0.0694
				1.643	0.078	0.093	0.023	0.191	0.0758

Рис. 2.22 – 2.25 и 2.27 – 2.36 организованы следующим образом. Каждый рисунок отвечает одной исследуемой компоненте какого-либо отрезка. В верхней части рисунка приведен график ряда остатков, который получен вычитанием из исходных данных MAMS соответствующих значений аппроксимирующего выражения (2.1), найденного на первом этапе. Отрезок горизонтальной прямой указывает промежуток, выбранный для исследования на втором этапе. В средней части рисунка помещены графики, представляющие результат второго этапа. График построенного на этом этапе аппроксимирующего выражения изображен жирной линией, график аппроксимируемых остатков – тонкой линией с маркерами. В нижней части рисунка помещены графики, представляющие результат третьего этапа. Красной линией изображен график выражения (2.1), построенного на отрезке окончательной обработки, тонкой линией с маркерами – аппроксимируемые данные MAMS.

В данных компоненты n_3 отрезка 3 после 5с заметен небольшой скачок (рис. 2.26а). Анализ ряда остатков показывает, что данный скачок делит ряд остатков на две части – возмущенную первую и относительно спокойную вторую. На всем отрезке была выявлена одна частота – 0.745 Гц (результаты представлены в первой строке табл. 2.15). Взяв интервал исходных данных протяженностью 5 с так, чтобы он заканчивался непосредственно перед наблюдаемым скачком (рис. 2.26б), обнаруживаем две частоты – 0.746 и 1.014 Гц, при этом колебание на второй частоте затухает почти в три раза быстрее (результаты представлены во второй строке табл. 2.15). Был взят также второй интервал исходных данных протяженностью 7.4с, начинающийся сразу после скачка в исходных данных (рис. 2.26). Здесь была выделена только одна частота – 0.755 Гц (третья строка табл. 2.15).

Судя по рисункам и стандартным отклонениям оцениваемых параметров в таблицах построенные аппроксимации и найденные оценки параметров μ_k и v_k являются достаточно точными.











Рис. 2.27. Отрезок данных 4.











2.5. Сопоставление полученных результатов

Начнем с результатов, относящимся к стыковкам и отстыковкам российских кораблей. По своей компоновке корабли "Союз" и "Прогресс" мало отличаются друг от друга, имеют практически одинаковые массу и стыковочный узел. Кроме того, в период с марта 2005 г. по июнь 2006 г. конфигурация МКС менялась незначительно. Таким образом, сопоставление результатов, полученных для разных кораблей, является правомерным. В процессе сопоставления результатов по умолчанию рассматриваются результаты, полученные на первом этапе. Указание результатов второго этапа оговаривается дополнительно. Связано это с тем, что на первом этапе длина анализируемых отрезков, как правило, значительно превышает длину отрезков, изучаемых на втором этапе. Таким образом, в случае несовпадения значений частот, выявленных на первом и втором этапах, предпочтение отдается значениям, выявленным на первом этапе – точность решения на первом этапе, как правило, выше.

В данных, относящихся к компоненте n_z , основное возмущение наблюдалось в диапазоне частот $0.722 \div 0.907$ Гц. В случае узла "Пирс" – на частоте 0.745 Гц, в случае порта СМ – на частотах 0.907 и 0.722 Гц на отрезках 1 и 2 соответственно, а в случае узла ФГБ – на частотах 0.851 и 0.778 Гц на отрезках 5 и 6 соответственно. Колебания в данных n_x представлены, в основном, в диапазоне частот $0.380 \div 0.432$ Гц. Для данных n_y характерна суперпозиция колебаний в диапазонах частот $0.382 \div 0.432$ и $0.701 \div 0.765$ Гц. При этом в случае порта СМ доминируют колебания на частотах 0.432, 0.424 Гц, в случае узла "Пирс" – на частотах 0.765, 0.728 Гц. В случае же узла ФГБ колебания имеют место только на частотах 0.391, 0.4Гц, если не учитывать гармонику с частотой 0.744 Гц, найденную только на втором этапе (отрезок 6).

Картина колебаний по осям x и y в случае узла "Пирс" несколько сложнее. Как и в случае порта СМ и узла ФГБ здесь наблюдаются колебания в диапазонах частот $0.380 \div 0.392$ и $0.712 \div 0.765$ Гц. Однако в

данных n_x доминирует колебание в диапазоне частот $1.033 \div 1.043$ Гц, а также наблюдается достаточно сильное возмущение в диапазоне $1.644 \div 1.728$ Гц, причем в случае отрезка 4 амплитуда данного колебания даже существенно больше амплитуд колебаний в диапазонах $0.380 \div 0.392$ и $0.712 \div 0.765$ Гц. В данных же n_y , согласно результатам второго этапа, присутствует довольно сильное возмущение на частоте 1.8 Гц.

Большое значение имеет направление воздействия на корпус станции. При стыковке к порту СМ воздействие направлено по оси x – вдоль ее корпуса, при стыковке к "Пирсу" оно направлено по оси y – поперек корпуса. Этим можно объяснить заметное различие выражений (1), построенных по данным отрезков 1, 2 и 3, 4.

Положение точки воздействия по отношению к центру масс станции также играет существенную роль. Действительно, и при стыковке к узлу ФГБ, и при стыковке к "Пирсу" воздействие направлено по оси у, но расстояние от узла ФГБ до центра масс станции приблизительно в два раза меньше аналогичного расстояния для "Пирса". Как следствие, количество характерных частот на отрезках 5 и 6 меньше, чем на отрезках 1 – 4.

В случае российских кораблей, помимо приведенных выше значений частот, следует указать еще дополнительные частотные диапазоны, в которых были обнаружены характерные возмущения: диапазон 1.25 ÷ 1.35 Гц (отрезки 1 – 4, первый и второй этап), частота 1.46 Гц (отрезок 4, первый этап), диапазон 1.57 ÷ 1.637 Гц (отрезки 1, 2, 5, 6, первый и второй этап). Выше отмечались мощные возмущения на высоких частотах в случае узла "Пирс". Вообще, согласно результатам первого и второго этапов стыковки к этому узлу сопровождаются значительными возмущениями в диапазоне 1.633 ÷ 1.811 Гц. Таким образом, частотный диапазон этих колебаний сдвинут несколько вправо по сравнению с диапазоном 1.57 ÷ 1.637 Гц в случае СМ и ФГБ.

Перейдем к стыковкам и отстыковкам шаттлов. Предварительно отметим, что их масса более чем в 13 раз превышает массу российских кораблей. Кроме того, ось стыковочного узла РМА-2 параллельна оси *x*, как и у стыковочного порта СМ.

Укажем наиболее характерные частоты. Будем сопоставлять пары отрезков 7 и 8, 9 и 10. Первая пара представляет отстыковку орбитальных кораблей, вторая пара – стыковку тех же кораблей со станцией. На этих парах значения частот несколько отличаются, что можно объяснить малой протяженностью анализируемых отрезков данных и особенностями проводимых операций. В данных n_x и n_y основные возмущения представлены в диапазонах частот 0.377 \div 0.437 и 0.645 \div 0.733 Гц. В случае отрезка 8 обнаружено лишь колебание на частоте 0.377 Гц. В случае отрезка 7 в компонентах n_x и n_y поочередно доминируют колебания на частотах 0.387 и 0.733 Гц. В данных n_x на отрезке 9 обнаружено единственное колебание на частоте 0.489 Гц. В данных n_y основное возмущение на отрезке 9 имеет частоту 0.437 Гц, на отрезке 10 выделяются две частоты 0.322 и 0.412 Гц. В целом, в случае данных n_x и n_y найденные на отрезках 9, 10 значения частот согласуются с частотами, полученными на отрезках 7, 8.

В данных n_z также поочередно доминируют возмущения в диапазонах частот 0.437 ÷ 0.471 и 0.705 ÷ 0.834 Гц. В данных n_z на отрезках 9, 10 также наблюдаются сильные возмущения в диапазоне частот 0.20 ÷ 0.53 Гц. Данный диапазон включает в себя привычный диапазон частот 0.3 ÷ 0.4 Гц. В данных n_z также наблюдается смещение вправо возмущений на частоте около 0.4 Гц по сравнению с узлами СМ и ФГБ. Данный эффект наблюдался ранее на спокойных отрезках данных, т.е. отрезках, на которых не производилось никаких динамических операций, а станция совершала полет в дежурной орбитальной ориентации [19, 21].

Кроме указанных выше в данных отрезков 7 – 10 обнаружены также возмущения в частотных диапазонах 1.004 ÷ 1.1 Гц, 1.43 ÷ 1.47 Гц и 1.937 ÷ 2.085 Гц.

Перейдем к описанию характерных частот, наблюдаемых при срабатываниях двигателей СМ. Рассмотрим пары отрезков 11 и 12, 13 и 14. Каждая из этих пар соответствует определенному набору двигателей – по каналам К и Р (отрезки 11, 12) или каналам Р, Т (отрезки 13, 14).

В данных n_y на всех отрезках присутствуют колебания в диапазонах частот $0.312 \div 0.387$ Гц и $0.704 \div 0.769$ Гц, при этом колебания доминируют поочередно. В данных n_x на отрезках 13 и 14 наблюдается та же картина распределения частот, что и в случае данных n_y , – колебания сосредоточены в частотных диапазонах $0.365 \div 0.382$ Гц и $0.748 \div 0.770$ Гц. На отрезках 11 и 12 набор частот значительно отличается. Так, в данных n_x доминируют колебания в диапазоне частот $0.946 \div 0.949$ Гц, наблюдаются возмущения на частотах 0.383 и 0.532 Гц.

В данных n_z на отрезках 13 и 14 найдены лишь колебания в частотном диапазоне 0.729 ÷ 0.764 Гц. В данных n_z на отрезках 11 и 12, в отличие от отрезков 13 и 14, снова доминируют колебания в диапазоне 0.946 ÷ 0.951 Гц, а также обнаружены возмущения на частотах 0.426 и 0.797 Гц.

В целом, если отвлечься от диапазона 0.946 ÷ 0.951 Гц, на отрезках 11 и 14 доминировали возмущения в диапазоне 0.312 ÷ 0.426 Гц, а на отрезках 12 и 13 – в диапазоне 0.704 ÷ 0.797 Гц.

Помимо приведенных частот, на отрезках 11, 13 в данных n_x и n_y на первом этапе были выявлены характерные возмущения в диапазоне 1.216÷1.265 Гц. На отрезках 11, 12 в данных n_y и n_z на втором этапе были найдены колебания с частотами 1.640÷1.667 Гц.

Сопоставим полученные данные. Во время отстыковки процесс отталкивания и отхода корабля не происходит мгновенно. Кроме того, пружины от-талкивателя стыковочного механизма российских кораблей могут оказывать недостаточно равномерное воздействие на корпус МКС. В случае стыковки российских кораблей со станцией неравномерность касания и стягивания корабля со станцией может приводить к заметному усложнению картины колебаний конструкции в первые секунды после касания. Поскольку масса американского шаттла превышает массу российского корабля более чем в 13 раз, сделанные замечания относительно процесса стыковки/отстыковки в случае американских кораблей имеют еще большее значение.

Что касается отрезков, на которых изучается воздействие возмущений, оказываемых на корпус станции работой двигателей ориентации, протяженность выбранных для анализа отрезков определяется, в основном, скоростью затухания колебаний, а также временем последующего срабатывания двигателей.

Достаточно сильные возмущения, наблюдаемые на отрезках 1 – 10, вызваны, по-видимому, значительным воздействием корабля на станцию. В случае же срабатывания двигателей ориентации СМ (отрезки 11 – 14) колебания конструкции станции имеют хорошо выраженный характер. Интервалы для анализа на таких отрезках можно брать практически сразу после выключения двигателей, в отличие от отрезков 1 – 10.

В целом, анализ отрезков 1 – 14 показывает достаточно хорошее совпадение частотных диапазонов и отдельных частот обнаруженных колебаний. Это множество частот практически не зависит от точек приложения возмущающих сил к корпусу станции. Отсюда можно сделать вывод, что обнаруженные колебания действительно являются собственными колебаниями конструкции станции. Отметим также, что многие найденные частоты достаточно хорошо согласуются с частотами, указанными в первой главе.

Практически на всех отрезках наблюдаются колебания в частотных диапазонах, включающих значения 0.4 и 0.7 Гц. В зависимости от анализируемой векторной компоненты эти диапазоны несколько варьируются. Так, если исключить некоторые не очень точные значения частот, полученные на отрезках 9, 10 (стыковка к РМА-2), для данных n_x – это диапазоны 0.365÷0.432 Гц и 0.733÷0.748 Гц, для данных n_y – диапазоны 0.312÷0.432 Гц и 0.701÷0.769 Гц, для данных n_z – диапазоны 0.426÷0.471 Гц и 0.705÷0.907 Гц. Возмущения в приведенных диапазонах частот, как правило, являются доминирующими. В то же время, в случае узла "Пирс" в данных n_x и n_y наблюдается несколько иное распределение частот. В данных n_x доминирует колебание на частоте 1.04 Гц, в данных n_x и n_y имеются хорошо выраженные колебания в диапазоне 1.7÷1.8 Гц.

В случае стыковки шаттлов несколько увеличиваются по сравнению с российскими кораблями выявленные характерные частоты. Для шаттлов эти частоты лежат в диапазоне 0.197 ÷ 2.085 Гц, для российских кораблей – в диапазоне 0.173 ÷ 1.94 Гц. Однако на отрезках, отвечающих шаттлам, чаще встречаются частоты менее 0.38 Гц.

В случае работы двигателей по каналам Р и Т наблюдаются возмущения в диапазонах 0.312÷0.382 и 0.729÷0.770 Гц. В случае работы двигателей по каналам К и Р значительную роль играют колебания в диапазоне частот 0.946÷0.951 Гц. На отрезках 11 - 14 наблюдается существенное сокращение диапазона выявленных характерных частот по сравнению с отрезками 1 – 10. Здесь основные частоты лежат в пределах от 0.312 до 1.667 Гц. Данный эффект обусловлен, по-видимому, более слабыми воздействиями на станцию на отрезках 11 - 14. Возмущения, вносимые срабатываниями реактивных двигателями СМ или кораблей "Прогресс", намного меньше возмущений от ударов при стыковках тех же "Прогрессов" или шаттлов.

Отметим еще, что на различных отрезках наблюдаются сравнительно высокочастотные возмущения в частотных диапазонах $1.216 \div 1.35$ Гц, $1.43 \div 1.47$ Гц и $1.57 \div 1.811$ Гц. При этом в данных компонент n_y и n_z удается обнаружить более высокочастотные возмущения чем в данных компоненты n_x .

Рассмотрим теперь коэффициенты затухания колебаний μ_k , отвечающие наиболее часто встречающимся частотам v_k. Начнем с колебаний на частотах около 0.4 Гц. В случае стыковочного порта СМ коэффициент затухания составляет 0.025 с⁻¹. Для стыковочного узла "Пирс" значения этого коэффициента лежат в интервале 0.042 ÷ 0.056 с⁻¹. Для стыковочного узла $\Phi\Gamma \overline{b}$ – в интервале $0.05 \div 0.062 \text{ c}^{-1}$. Таким образом, по мере приближения точки приложения возмущающего импульса к центру масс станции наблюдается увеличение коэффициента затухания колебания. В случае отстыковки шаттлов (узел РМА-2) значение коэффициента затухания в измерениях компонент n_x и n_y лежит в интервале $0.019 \div 0.024$ с⁻¹, что близко к значению, полученному для порта СМ. В случае измерений компоненты n_{z} этот коэффициент лежит в интервале $0.045 \div 0.084 \, \mathrm{c}^{-1}$. На отрезках стыковки шаттлов со станцией частота колебаний сдвигается вправо, а коэффициент затухания лежит в интервале $0.08 \div 0.6$ с⁻¹. На отрезках срабатывания двигателей коэффициент затухания колебания находится в интервале $0.2 \div 0.4$ с⁻¹.

Рассмотрим распределение значений коэффициентов затухания колебаний на частоте около 0.75 Гц. В случае российских кораблей эти значения лежат в диапазоне $0.075 \div 0.15$ с⁻¹, в случае шаттлов – в диапазоне $0.02 \div 0.14$ с⁻¹. Для набора двигателей по каналам К и Р (отрезки 11, 12) коэффициент затухания для рассматриваемой частоты составляет 0.09 с⁻¹, а в случае набора двигателей по каналам Р и Т – лежит в диапазоне $0.07 \div 0.12$ с⁻¹. Таким образом, независимо от причины возбуждения свободных колебаний, наблюдается хорошее согласие результатов.

На отрезках 11, 12 были выделены колебания с частотой около 0.95 Гц. Значения коэффициента затухания таких колебаний в данных n_r и n_y лежат в интервале $0.06 \div 0.1 \text{ c}^{-1}$, для данных n_z этот коэффициент лежит в интервале $0.17 \div 0.29 \text{ c}^{-1}$.

В случае узла "Пирс" были обнаружены колебания на частотах, близких 1.04 Гц и 1.8 Гц. Коэффициент затухания колебаний на первой частоте составляет около 0.2 с⁻¹, для колебания на второй частоте он лежит в интервале $0.2 \div 0.4$ с⁻¹.

Полученные результаты использованы при анализе микрогравитационной обстановки на МКС и могут быть полезны при проектировании виброзащитных платформ.

Глава 3. Исследование вибрационных микроускорений на МКС

Исследования микрогравитационной обстановки на борту МКС и, в частности, вибрационных микроускорений направлены на выявление источников возмущений, а также оценку уровня и характера этих возмущений. В то же время, ввиду нежесткости конструкции станции, возникают колебания с непрерывными спектрами, что приводит к усложнению микрогравитационной обстановки на борту. Так, вибрационные микроускорения на борту МКС представляют собой суперпозицию колебаний с дискретным и непрерывным спектрами. Представляет интерес изучение соотношения вкладов в вибрационные микроускорения, создаваемых колебаниями с дискретным и непрерывным спектрами.

Описаны результаты исследования вибрационных микроускорений на борту МКС. Исследование проведено с использованием данных измерений низкочастотного акселерометра MAMS и высокочастотного акселерометра SAMS. Для исследования были выбраны 6 отрезков измерений, выполненных в 2005 г., на которых станция совершала полет в дежурной орбитальной ориентации, двигатели ориентации не включались, экипаж отдыхал. На выбранных отрезках анализировались дискретный и непрерывный спектры. Найдены наиболее значимые возмущения с дискретным спектром (циклические тренды). В рамках модели авторегрессии 2-го порядка определены параметры наиболее значимых возмущений с непрерывным спектром [23].

3.1. Вибрационные микроускорения на станции

Низкочастотный акселерометр MAMS и высокочастотный акселерометр SAMS установлены в модуле Lab Американского сегмента MKC. Показания этих приборов использованы ниже для изучения вибрационных микроускорений на борту станции. MAMS измеряет кажущееся ускорение в собственной системе координат $z_1 z_2 z_3$, направления осей которой в строительной системе с CM задаются формулами $z_1 = -x$, $z_2 = -y$ и $z_3 = z$. Обе эти системы – правые, декартовы. Ось *x* параллельна продольной оси CM и направлена от его переходного отсека к агрегатному отсеку, ось у перпендикулярна оси вращения солнечных батарей СМ. Номинально частоты "сырых" данных акселерометра MAMS лежат в диапазоне от 0 до 1 Гц. Однако эти данные получены со скоростью выборки 10 измерений в секунду, и в их спектре присутствуют частоты до 5 Гц. Все сколько-нибудь значимые возмущения имеют частоты менее 2 Гц.

SAMS измеряет кажущееся ускорение в собственной системе координат $z'_1 z'_2 z'_3$, связанной с системой *xyz* CM формулами $z'_1 = z$, $z'_2 = y$ и $z'_3 = -x$. Головки акселерометра SAMS имеют настраиваемое значение частоты обрезания. В работе использовались данные измерений головки F02, для которой частота обрезания составляла 100 Гц. Головка F02 имеет скорость выборки 250 измерений в секунду, и в спектре данных ее измерений заметны частоты до 125 Гц. Ниже компоненты векторов указываются в строительной системе *xyz* CM.

Вибрационные микроускорения на борту станции представляют собой суперпозицию колебаний с дискретным и непрерывным спектрами. Происхождение микроускорений дискретного спектра вызвано, как правило, работой двигателей 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 МКС, который представляет собой нежесткое тело. Эти колебания вызываются различными причинами, в частности, работой экипажа. Если возмущения носят случайный характер, то колебания корпуса имеют, как правило, непрерывный спектр. Ниже микроускорения непрерывного спектра будем считать обусловленными нежесткостью корпуса МКС. Микроускорения с дискретным спектром, обусловленные функционированием бортовых устройств, возникали бы и в том случае, если бы корпус станции был абсолютно жестким телом.

3.2. Описание исследуемых данных и методика исследования

Для исследования вибрационных микроускорений на борту МКС были выбраны по 3 отрезка данных измерений MAMS и SAMS. Ниже они обозначаются как отрезки 1– 3 и 4– 6 соответственно. Отрезки 1, 4 приходятся на 16 июля, отрезки 2, 5– на 20 июля, отрезки 3, 6– на 24 июля 2005 г. Каждый из отрезков содержит 4096 последовательных значений измерений одного из акселерометров.

На выбранных отрезках станция совершала полет в дежурной орбитальной ориентации. При этом не совершались динамические операции, и не включались двигатели управления ориентацией станции. Экипаж отдыхал, и возмущения, вызываемые его активной жизнедеятельностью, отсутствуют. Выбор отрезков вызван желанием изучить вибрационные микроускорения на борту МКС в условиях, которые наиболее благоприятны для проведения космических экспериментов в области микрогравитации. Представление об отобранных данных дают верхние графики на рис. 3.1 - 3.6 с индексами «а». Это – графики компонент a_x , a_y и a_z кажущихся ускорений на отрезках 2, 5. Отрезок 2 приведен целиком, в случае отрезка 5 приведены его первые 500 значений. Данные на остальных отрезках выглядят примерно также.

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 вычитались найденные в них циклические тренды, в полученном ряде остатков выделялись некоторые составляющие, которые затем аппроксимировались процессами авторегрессии. Эти процессы служили для описания непрерывного спектра.



Рис. 3.1. Отрезок 1 (MAMS): а) векторная компонента a_x ; б) спектральный анализ компоненты a_x .






Рис. 3.3. Отрезок 3 (MAMS): а) векторная компонента a_x ; б) спектральный анализ компоненты a_x .



Рис. 3.4. Отрезок 1 (MAMS): а) векторная компонента a_y ; б) спектральный анализ компоненты a_y .































3.3. Исследование дискретного спектра

Поиск циклических трендов в исходных данных выполнялся по схеме, подробно описанной в п.1.2 данной работы. Исследуемые отрезки данных содержат значительное число гармоник. Ниже в соответствующих выражениях (3.3) учитываются все значимые гармоники (отвечающие локальным экстремумам функций $\Psi_1(f)$, I(f) с резко выделяющимися значениями) и некоторые менее значимые.

Частоты и амплитуды циклических трендов, найденных в исследуемых отрезках данных, приведены в табл. 3.1 – 3.6. Каждая таблица содержит параметры трендов, найденных во всех отрезках данных, которые отвечают данной компоненте микроускорения, измеренной данным акселерометром. Верхние строки таблиц содержат номера отрезков. Каждому отрезку отвечают два столбца – столбец частот f и столбец амплитуд A. Частоты измеряются в герцах; единицей измерения амплитуд в табл. 3.1 – 3.3, составленных для данных измерений MAMS, служит 10^{-6} м/с², в табл. 3.4 – 3.6, характеризующих данные SAMS, единица измерения амплитуд – 10^{-3} м/с². Параметры трендов, обнаруженных в разных отрезках данных и имеющих примерно одинаковые частоты, помещены в таблицах в одну и ту же горизонтальную строку. Такая организация таблиц предполагает, что примерно одинаковые частоты, проявляющиеся в разных отрезках, – результат воздействия одного и того же реального фактора. Небольшие вариации частот, превышающие погрешности, обусловленные ограниченностью длины отрезков данных, могут быть объяснены нестабильностью функционирования бортового оборудования.

Амплитудные спектры, вычисленные для данных измерений MAMS, приведены в верхней части рис. 3.16, 3.26 и 3.36. Средние графики на этих рисунках суть спектры рядов данных с удаленными основными циклическими трендами. Спектры данных измерений MAMS построены на отрезке $0 \le f \le 2\Gamma$ ц. Аналогичные графики для данных измерений SAMS приведены в верхних и средних частях рис. 3.46, 3.56 и 3.66.

Отре	зок 1	Отре	зок 2	Отре	зок 3
f	A	f	A	f	A
0.078	0.39	0.078	0.26	0.078	0.90
0.091	0.33	0.098	0.32	0.098	0.66
0.102	0.38	0.106	0.33	0.104	0.38
0.122	0.23	0.124	0.82	0.124	1.28
0.138	0.25	0.135	0.39	0.137	0.34
-		-		0.144	0.64
0.153	0.25	0.150	0.49	0.150	0.94
-		0.169	0.39	0.169	0.60
0.176	0.14	0.177	0.59	0.176	0.92
-		0.195	0.57	0.193	0.65
0.200	0.30	0.202	0.42	0.203	0.76
-		0.222	0.62	0.222	0.87
-		0.249	0.57	0.247	1.03
-		0.256	0.44	0.259	0.52
-		0.275	0.49	0.273	0.73
-		-		0.295	0.84
0.302	0.20	0.301	0.55	0.301	1.04
0.328	0.21	0.327	0.46	0.327	1.29
-		0.346	0.52	0.343	0.93
0.365	0.43	-		0.369	1.47
0.372	0.26	0.372	0.79	0.376	1.06
0.383	0.41	0.386	0.66	-	
0.392	0.67	0.393	1.04	0.390	1.84
0.398	1.76	0.399	1.86	0.398	2.28
0.405	0.81	-		-	
0.412	0.75	0.414	0.36	0.417	0.75
0.683	0.42	0.684	0.42	0.681	0.50
0.716	0.28	-		0.715	0.48
-		0.720	0.27	0.720	0.51

Таблица 3.1. Гармонические составляющие в данных измерений компоненты ускорения a_x акселерометром MAMS; $[f] = \Gamma \mu$, $[A] = 10^{-6} \text{ м/c}^2$

Отре	зок 1	Отре	зок 2	Отре	зок 3
f	A	f	A	f	A
-		0.730	0.28	-	
0.739	0.21	-		0.737	0.50
-		-		1.025	0.44
-		-		1.047	0.49
-		-		1.643	0.69
-		-		1.660	0.95
-		-		1.666	0.77
-		-		1.677	0.70
1.708	0.40	-		-	
-		1.763	0.41	-	
-		1.768	0.46	1.767	0.65
-		1.840	0.40	1.847	0.54

Таблица 3.1. (продолжение)

Отре	зок 1	Отре	зок 2	Отре	зок 3
f	A	f	A	f	A
-		-		0.017	1.71
-		-		0.033	1.80
0.078	0.67	-		0.077	1.34
0.087	1.02	0.086	0.42	0.084	1.48
0.096	0.76	0.096	0.68	-	
-		0.124	0.86	-	
-		-		0.330	2.13
0.351	1.18	0.345	1.13	0.346	2.44
-		0.372	1.25	0.369	2.63
0.374	0.70	-		0.376	3.26
0.383	1.28	0.383	2.82	0.385	2.07
-		0.393	2.86	0.390	4.78
0.398	3.52	0.399	5.78	0.398	7.98
0.405	1.72	0.408	1.59	-	
0.411	1.59	-		-	
0.422	0.96	0.425	0.88	0.425	2.67
0.438	0.66	-		0.431	2.39
0.476	0.61	-		0.474	1.22
0.527	0.60	-		0.525	1.11
-		0.683	1.65	-	
0.690	0.86	0.688	1.68	-	
-		0.693	1.32	-	
-		0.699	1.68	0.696	1.29
0.705	0.97	0.708	1.13	-	
0.712	0.97	-		0.714	1.38
0.720	1.29	0.720	1.31	0.721	2.19
0.730	2.03	0.735	1.41	0.733	2.14
0.738	1.08	-		0.738	3.53
0.743	0.78	0.742	1.06	0.744	4.23

Таблица 3.2. Гармонические составляющие в данных измерений компоненты ускорения a_y акселерометром MAMS; $[f] = \Gamma$ ц, $[A] = 10^{-6}$ м/с²

Отре	зок 1	Отре	зок 2	Отре	зок 3
f	A	f	A	f	A
0.748	0.75	0.749	1.48	-	
0.756	0.83	0.758	1.77	0.755	1.74
0.764	0.74	0.767	2.11	0.767	2.14
-		0.771	2.21	-	
-		0.801	1.47	-	
0.847	0.56	-		-	
-		0.868	1.10	-	
-		0.880	1.36	-	
-		1.648	0.50	1.643	3.34
-		1.658	0.50	1.660	3.86
-		-		1.666	3.33
1.712	0.73	-		-	
1.721	0.76	-		-	

Таблица 3.2. (продолжение)

Отре	зок 1	Отре	зок 2	Отре	зок 3
f	A	f	A	f	A
0.074	0.47	0.078	0.56	0.076	1.54
0.085	1.09	0.088	0.51	0.085	1.06
-		0.093	0.56	-	
0.101	0.92	-		-	
-		0.125	0.41	0.124	0.87
0.359	0.34	0.353	0.60	-	
0.373	0.36	0.373	1.05	-	
0.393	0.40	0.392	1.37	-	
-		0.399	2.10	-	
-		0.410	2.28	-	
0.419	0.36	0.417	2.13	-	
-		0.424	1.44	-	
0.438	0.59	0.439	0.73	-	
0.463	0.59	0.462	0.62	-	
0.472	0.46	-		0.474	2.08
0.484	1.10	-		0.480	1.39
0.490	0.43	-		0.493	0.95
0.505	0.61	-		0.500	0.90
-		0.677	1.01	0.676	1.11
0.683	0.70	0.683	1.46	-	
0.694	0.48	0.693	2.27	-	
-		0.699	1.90	-	
0.707	0.82	0.709	1.30	-	
0.719	0.58	0.719	1.37	0.719	1.22
0.727	1.52	-		0.727	2.05
-		0.734	1.24	0.735	1.07
0.740	0.78	0.745	1.22	0.744	4.08
0.750	1.27	0.750	0.78	0.748	3.94
0.756	0.95	0.754	1.15	0.756	1.57

Таблица 3.3. Гармонические составляющие в данных измерений компоненты ускорения a_z акселерометром MAMS; $[f] = \Gamma \mu$, $[A] = 10^{-6}$ м/с²

Отре	зок 1	Отре	зок 2	Отре	зок 3
f	A	f	Α	f	Α
0.761	0.80	0.766	1.08	0.762	1.21
0.772	0.41	0.771	0.95	0.769	3.02
0.784	0.38	0.785	0.62	0.786	1.07
0.878	0.82	-		-	
0.974	0.66	-		-	
0.985	0.54	-		-	
-		1.465	0.68	1.462	0.87
-		1.492	0.65	1.498	1.15
1.501	0.41	-		1.508	1.48
-		1.528	0.47	1.525	1.01
-		-		1.549	1.62
-		-		1.572	2.04
-		-		1.590	1.91
-		-		1.599	1.52
-		-		1.606	2.30
-		-		1.623	1.76
-		-		1.640	1.64
-		-		1.656	1.53
-		-		1.673	1.68

Таблица 3.3. (продолжение)

Отре	зок 4	Отре	зок 5	Отре	зок б
f	Α	f	Α	f	Α
-		11.104	0.52	-	
-		11.278	0.81	-	
-		11.480	0.82	-	
48.629	0.50	48.638	0.46	48.701	0.52
48.955	0.33	48.744	0.57	48.844	0.47
57.370	4.21	57.393	4.68	57.580	4.81
97.258	0.65	97.384	0.66	97.411	0.74
-		97.536	0.57	97.540	0.51
105.302	4.80	102.214	4.25	-	

Таблица 3.4. Гармонические составляющие в данных измерений компоненты ускорения a_x акселерометром SAMS; $[f] = \Gamma \mu$, $[A] = 10^{-3}$ м/с²

Таблица 3.5. Гармонические составляющие в данных измерений компоненты ускорения a_y акселерометром SAMS; $[f] = \Gamma \mu$, $[A] = 10^{-3}$ м/с²

Отре	зок 4	Отре	зок 5	Отре	зок б
f	Α	f	Α	f	Α
-		11.106	2.56	-	
-		11.279	2.79	-	
-		11.485	2.25	-	
26.366	0.36	26.384	0.79	-	
26.763	0.49	26.794	0.69	-	
28.461	0.78	-		-	
48.627	0.98	48.638	0.84	48.702	1.03
48.953	0.59	48.743	1.01	48.834	0.88
57.370	5.47	57.393	6.05	57.580	5.87
-		97.292	0.34	97.404	0.42
105.30	11.74	102.213	3.81	-	

Отре	зок 4	Отре	зок 5	Отре	зок б
f	A	f	A	f	A
5.672	0.34	-		-	
6.118	0.26	6.159	0.44	-	
-		6.570	0.60	-	
7.034	0.25	7.222	0.49	-	
7.740	0.33	-		7.679	0.04
8.838	0.27	-		-	
-		11.104	0.73	-	
-		11.274	0.82	-	
-		11.490	0.70	-	
-		23.502	0.36	23.549	0.14
26.368	0.25	26.383	0.51	-	
26.762	0.34	26.794	0.45	-	
28.462	0.50	-		-	
48.627	1.10	48.639	0.95	48.701	1.19
48.955	0.66	48.741	1.17	48.836	1.01
57.370	2.84	57.393	2.92	57.580	2.77
84.770	0.46	-		-	
-		-		86.380	0.17
-		97.292	0.31	97.406	0.29
105.300	3.33	102.214	8.93	-	

Таблица 3.6. Гармонические составляющие в данных измерений компоненты ускорения a_z акселерометром SAMS; $[f] = \Gamma \mu$, $[A] = 10^{-3}$ м/с²

Поиск гармонических составляющих в данных измерений является коварной задачей. Гармоники с малыми амплитудами могут порождаться случайными ошибками в данных [58]. Для гармоник с большими амплитудами таких сомнений не возникает. В рассматриваемой задаче в случае данных измерений MAMS можно быть достаточно уверенными в существовании гармоник с амплитудами более $2 \cdot 10^{-7}$ м/с², в случае данных SAMS – $2 \cdot 10^{-5}$ м/с².

Анализ показывает, что многие значимые максимумы периодограмм исходных рядов измерений (например, максимумы в частотных диапазонах, включающих значения 0.4 и 0.7 Гц), принадлежат непрерывному спектру. Так, на рис. 3.16, 3.26, .., 3.66 видно, что полностью удалить соответствующие пики на графиках не удалось. Однако после удаления циклического тренда во многих случаях достигалось заметное уменьшение этих максимумов и среднеквадратического значения ряда данных измерений.

Возникает естественный вопрос, законно ли в описанной ситуации выделение циклических трендов. По-видимому, законно, поскольку в данном случае, скорее всего, приходится иметь дело со смешанным спектром. Какоето 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, создаваемые устройством-возбудителем, могут иметь нестабильную частоту и т. п. Указанные обстоятельства приводят к "размыванию" частоты и появлению в измерениях компоненты с непрерывным спектром.

Рассмотрим данные измерений MAMS. Наиболее значимые колебания в выбранных отрезков данных имеют частоты в диапазонах 0.076 \div 0.081, 0.398 \div 0.485, 0.693 \div 0.771, 1.61 \div 1.66 Гц. У компонент a_x и a_y на всех трех отрезках в амплитудных спектрах доминируют пики с частотой 0.398 Гц. В

случае компоненты a_x этот пик является основным – остальные пики амплитудного спектра намного меньше. В случае компоненты a_y в спектрах отрезков 1 и 2 имеются также пики в диапазоне частот 0.757÷0.771 Гц, а в спектре отрезка 3 – пик на частоте 1.66 Гц, причем высота последнего пика превышает высоты пиков в диапазоне 0.757 \div 0.771 Гц. В спектрах компоненты a_z , помимо возмущений в диапазонах 0.410÷0.485 и 0.693÷0.744 Гц, присутствуют также возмущения в диапазоне 0.076÷0.081 Гц (отрезки 1, 3). Отметим интересный факт. Возмущения на частоте 0.398 Гц доминируют в спектрах компонент a_x и a_y , но в спектрах компоненты a_z возмущение с близкой частотой наблюдается только на отрезке 2, при этом его основной пик приходится на частоту 0.410 Гц; в случае же отрезков 2 и 3 возмущения наблюдаются на частотах 0.485 и 0.474 соответственно. Данный эффект наблюдался ранее [19, 21]. Возможно, он проявляется систематически и вызван особенностями конструкции МКС. Некоторые отличия в наборах частот, найденных ранее и в данной главе, можно объяснить тем, что для описываемого исследования были выбраны более спокойные участки полета, на которых амплитуда колебаний конструкции станции была заметно меньше. В предыдущей главе [18, 20, 221 показано, частоты диапазонах 0.076÷0.081, $0.398 \div 0.485$. что В 0.693÷0.771, 1.61÷1.66 Гц являются характерными частотами упругих колебаний конструкции станции. Возмущения с остальными выявленными частотами вызваны, по-видимому, работой бортового оборудования.

Перейдем к данным измерений SAMS. Здесь наиболее значимые возмущения наблюдаются в диапазонах частот 57.37÷57.58 и 102.2÷105.3 Гц. Возмущения в диапазоне частот 57.37÷57.58 присутствуют в спектрах всех составляющих на всех отрезках. На отрезках 2 и 3 наблюдаются значительные возмущения в диапазоне частот 102.2÷105.3 Гц. При этом, если в случае составляющей a_z возмущение в диапазоне 57.37÷57.58 Гц является доминирующим, то в случае составляющей a_x возмущения на данной частоте и в диапазоне частот 102.2÷105.3 Гц сопоставимы по амплитуде. Также на некоторых отрезках выявлены значительно более слабые, но отчетливые возмущения в диапазонах частот 48.63÷48.96, 97.29÷97.76 Гц, причем возмущения проявляются в виде одиночных пиков, в отличие от обнаруженных наборов частот в диапазонах 11.10÷11.49 и 23.50÷28.46 Гц.

После удаления из исходных данных измерений большинства выявленных циклических трендов в спектрах, по-прежнему, остаются достаточно сильные колебания. Здесь, как и в случае данных MAMS, колебания на большинстве частот имеют смешанный спектр. Тем не менее, колебания с малыми амплитудами в диапазоне 114.7÷115.2 Гц имеют чисто дискретный спектр – при удалении соответствующих циклических трендов, пики на таких частотах полностью исчезают. В измерениях компонент a_x и a_z отрезка 4 удалось выделить чистую гармонику с частотой 86.4 Гц.

3.4. Исследование непрерывного спектра

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. Представляет интерес найти математические модели, адекватно описывающие микроускорения с непрерывным спектром. С этой целью из ряда остатков выделялись составляющие, имеющие достаточно узкий спектр, и эти составляющие аппроксимировались процессами авторегрессии.

Выбор составляющих с узким спектром осуществлялся так. Сначала сравнивались спектры исходного ряда данных измерений и ряда остатков, полученного удалением циклических трендов. Как правило, каждому значимому экстремуму функций $\Psi_1(f)$ и I(f) (они практически совпадали) исходного ряда отвечали несколько близких экстремумов аналогичных функций ряда остатков. Выбирался по возможности узкий диапазон частот $f_1 \leq f \leq f_2$, содержащий эти несколько экстремумов, и из ряда остатков выделялась составляющая, спектр которой располагался внутри указанного диапазона. А именно, ряд остатков подвергался дискретному преобразова-

нию Фурье, члены преобразованного ряда, отвечающие частотам вне диапазона $f_1 \leq f \leq f_2$, заменялись нулями, и полученный в результате ряд подвергался обратному преобразованию Фурье.

Приведенные выше слова «по возможности узкий диапазон» означают, в частности, следующее. Граничные значения f_1 и f_2 выбирались таким образом, чтобы величины $\Psi_1(f_1)$, $\Psi_1(f_2)$ и $I(f_1)$, $I(f_2)$ находились на уровне фоновых (преобладающих) значений функций $\Psi_1(f)$ и I(f).

Приведем некоторые сведения о процессах авторегрессии. Рассмотрим временной ряд $\xi_n = \xi(t_n)$, $t_n = nh$, где индекс *n* принимает любые целые значения. Этот временной ряд называется процессом авторегрессии порядка *p* (обозначается AP(*p*)), если его члены удовлетворяют соотношению

$$\xi_n = b_1 \xi_{n-1} + b_2 \xi_{n-2} + \dots + b_p \xi_{n-p} + \varepsilon_n.$$
(3.4)

Здесь b_m (m = 1, 2, ..., p) – постоянные коэффициенты, ε_n – независимые случайные величины, имеющие одинаковое распределение и нулевое среднее значение.

Рассмотрим применение процесса AP(p) для моделирования временных рядов. Если известны значения процесса при n = 0, 1, ..., N, то оценки коэффициентов b_k можно найти методом наименьших квадратов – из условия минимума выражения

$$\sum_{n=p}^{N} (\xi_n - b_1 \xi_{n-1} - \dots - b_n \xi_{n-p})^2 .$$

Соответствующие нормальные уравнения называются уравнениями Юла – Уокера [12]. Решение этих уравнений обозначим $b_m(p)$. Если порядок p процесса заранее неизвестен, то его обычно определяют исходя из принципа экономии – модель должна быть не только адекватной, но и простой. Иными словами, необходимо подобрать модель (3.4), имеющую минимальное количество параметров, которая бы удовлетворяла при этом некоторым условиям оптимальности [12, 60].

Часто используется введенное Акаике условие минимальности так называемой окончательной ошибки предсказания FPE (Final Prediction Error). Для случая, когда среднее значение исследуемого ряда не было удалено перед оценкой параметров AP(p), окончательная ошибка предсказания определяется формулой [12]

FPE(p) =
$$\frac{N+p}{N-p} \sum_{n=p}^{N} \left(\xi_n - \sum_{m=1}^{p} b_m(p) \xi_{n-m} \right)^2$$
.

Функция FPE(*p*) вычисляется для всех приемлемых значений $p \in [1, N-1]$, затем из них выбирается такое p_A , что число FPE(p_A) достаточно мало и при $p \ge p_A$ функция FPE(*p*) меняется незначительно. Число p_A принимается в качестве искомого порядка авторегрессионного процесса. В описываемом исследовании вычисления FPE(*p*) проводились для *p* в пределах от 1 до 10.

Берг предложил другую формулу ошибки предсказания [60]

$$\operatorname{PE}(p) = \frac{1}{2(N-p)} \sum_{n=p+1}^{N} \left\{ \left(\xi_n - \sum_{m=1}^p b_m(p) \xi_{n-m} \right)^2 + \left(\xi_{n-p} - \sum_{m=1}^p b_m(p) \xi_{n-p+m} \right)^2 \right\}.$$

Функция PE(p) быстро возрастает, если порядок AP процесса переоценен. Как и в предыдущем случае, функция PE(p) вычислялась при $1 \le p \le 10$. Число p_B , для которого величина $PE(p_B)$ достаточно мала и при $p \ge p_B$ функция PE(p) быстро возрастает, следует принять в качестве порядка модели (3.4).

Правило Акаике обычно дает заниженное значение порядка авторегрессионного процесса. Правило Берга оказывается корректным именно в случае процессов авторегрессии и приводит к переоценке порядка смешанных процессов, включающих скользящее среднее. Одновременное использование этих двух правил позволяет достаточно точно определить оптимальный порядок изучаемого процесса.

Для исследования AP процессов выбирались отрезки рядов данных, которые выглядели стационарными. Как известно, процесс AP(*p*) стационарен, если корни его характеристического уравнения

$$\lambda^{p} - b_{1}\lambda^{p-1} - b_{2}\lambda^{p-2} - \dots - b_{p} = 0$$
(3.7)

удовлетворяют неравенству $|\lambda| < 1$. Этот факт позволяет, в частности, проверить правильность определения коэффициентов $b_m(p)$ с помощью уравнений Юла-Уокера. При изучении колебаний механических систем наибольший интерес представляют процессы AP(2). Если корни характеристического уравнения такого процесса – комплексные и лежат в единичном круге $|\lambda| < 1$, то процесс представляет собой затухающие колебания, поддерживаемые случайными возмущениями. В этом случае удобно использовать параметры [12]

$$d = -\frac{1}{2h} \ln(-b_2), \quad f = \frac{1}{2\pi h} \arccos\left(\frac{b_1}{2\sqrt{-b_2}}\right), \quad P = \frac{\sigma_r}{\sigma_0},$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N} \xi_n^2}, \quad \sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-2p} \sum_{n=p}^{N} \left(\xi_n - \sum_{m=1}^{p} b_m(p)\xi_{n-m}\right)^2}.$$
(3.8)

Здесь d – коэффициент затухания, f – частота затухающих колебаний, σ_0 и σ_r – среднеквадратичные значения исходного временного ряда и ряда остатков соответственно, P – коэффициент, характеризующий уменьшение среднеквадратичного значения сигнала после удаления из исследуемого временного ряда найденного процесса AP(2). Практически все значимые колебания, принадлежащие исследуемым в данной работе отрезкам [f_1 , f_2] непрерывного спектра, могут быть описаны процессами AP(2). С учетом этого обстоятельства в тех спорных случаях, когда, согласно приведенным выше критериям, можно было выбрать второй или более высокий порядок AP процесса, выбирался второй порядок. Иными словами, предпочтение отдавалось возможности описания исследуемых отрезков спектра одночастотными затухающими колебаниями.

Результаты второго этапа исследования колебаний в измерениях MAMS на выбранных отрезках данных приведены в табл. 3.7 – 3.15. Таблицы устроены следующим образом. В их первом столбце указан выделенный для анализа участок спектра. Для каждого такого участка в столбцах 2 – 6 приведены параметры (3.8) и корни характеристического уравнения соответствующего процесса AP(2). Для корней указаны действительные и мнимые части, частоты выражены в Гц, единицы измерения остальных величин: $[\sigma_0] = 10^{-7} \text{ м/c}^2$, $[\sigma_r] = 10^{-10} \text{ м/c}^2$, $[P] = 10^{-4}$, $[d] = 10^{-3}$.

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_r	Р	d	Reλ	Imλ
$0.062 \div 0.079$	0.0691	0.83	0.19	2.26	0.053	0.999	0.043
$0.079 \div 0.092$	0.0859	0.54	0.08	1.42	0.018	0.999	0.054
$0.092 \div 0.103$	0.0962	1.06	0.18	1.71	0.020	0.998	0.060
$0.103 \div 0.113$	0.1078	0.77	0.09	1.23	0.013	0.998	0.068
$0.123 \div 0.137$	0.1297	1.08	0.39	3.62	0.048	0.997	0.081
$0.137 \div 0.154$	0.1464	1.02	0.60	5.86	0.092	0.996	0.092
$0.198 \div 0.213$	0.2038	1.56	0.88	5.64	0.046	0.992	0.128
$0.359 \div 0.379$	0.3684	2.15	2.63	12.25	0.072	0.973	0.229
$0.379 \div 0.389$	0.3817	1.13	0.58	5.11	0.010	0.971	0.238
$0.389 \div 0.399$	0.3948	2.63	1.23	4.67	0.088	0.969	0.246
$0.399 \div 0.418$	0.4058	3.22	4.11	12.76	0.074	0.968	0.252
$0.686 \div 0.703$	0.6910	1.67	3.61	21.58	0.064	0.907	0.421
$1.700 \div 1.717$	1.7091	1.13	4.48	39.74	0.052	0.477	0.879

Таблица 3.7. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_x акселерометром MAMS на отрезке 1

Таблица 3.8. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_y акселерометром MAMS на отрезке 1

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
$0.078 \div 0.093$	0.0852	2.70	0.55	2.04	0.052	0.999	0.054
$0.217 \div 0.232$	0.2258	2.79	2.12	7.60	0.075	0.990	0.141
$0.342 \div 0.352$	0.3477	3.14	1.72	5.49	0.021	0.976	0.217
$0.352 \div 0.369$	0.3596	4.82	7.17	14.87	0.012	0.975	0.224
$0.388 \div 0.398$	0.3938	8.00	5.17	6.46	0.173	0.970	0.245
$0.398 \div 0.423$	0.4118	7.85	14.05	17.90	0.128	0.967	0.256
$0.711 \div 0.721$	0.7129	2.94	4.77	16.22	0.051	0.901	0.433
$0.721 \div 0.738$	0.7276	5.50	6.76	12.29	0.025	0.897	0.441
$1.712 \div 1.731$	1.7211	3.52	20.54	58.28	0.121	0.470	0.883

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_r	Р	d	Reλ	Imλ
$0.086 \div 0.105$	0.0970	1.64	0.32	1.98	0.031	0.998	0.061
$0.457 \div 0.474$	0.4639	2.04	3.35	16.41	0.080	0.958	0.287
$0.476 \div 0.499$	0.4862	3.51	7.39	21.06	0.112	0.954	0.301
$0.506 \div 0.523$	0.5104	3.00	3.96	13.22	0.051	0.949	0.315
$0.684 \div 0.694$	0.6883	2.48	2.79	11.25	0.015	0.908	0.419
$0.694 \div 0.713$	0.7033	4.01	5.63	14.04	0.026	0.904	0.428
$0.713 \div 0.720$	0.7159	1.62	1.18	7.25	0.007	0.901	0.435
$0.720 \div 0.740$	0.7284	4.59	11.02	24.01	0.090	0.897	0.442
$0.740 \div 0.750$	0.7440	3.04	2.37	7.80	0.008	0893	0.451
$0.750 \div 0.772$	0.7571	3.45	11.11	32.20	0.122	0889	0.458
$0.972 \div 0.979$	0.9764	2.26	0.99	4.36	0.002	0.818	0.576

Таблица 3.9. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_z акселерометром MAMS на отрезке 1

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
$0.079 \div 0.098$	0.0897	1.10	0.44	3.98	0.125	0.998	0.056
$0.105 \div 0.120$	0.1121	1.29	0.47	3.68	0.048	0.998	0.070
0.120 ÷ 0.139	0.1281	1.77	0.87	4.93	0.081	0.997	0.080
$0.140 \div 0.164$	0.1498	1.78	1.48	8.33	0.169	0.996	0.094
0.164 ÷ 0.195	0.1773	1.71	2.15	12.59	0.318	0.994	0.111
$0.203 \div 0.230$	0.2159	1.72	1.99	11.54	0.185	0.991	0.135
$0.230 \div 0.250$	0.2408	1.60	1.50	9.35	0.089	0.989	0.151
$0.250 \div 0.256$	0.2536	1.04	0.17	1.62	0.004	0.987	0.159
$0.256 \div 0.286$	0.2714	2.25	4.08	18.14	0.309	0.985	0.170
$0.286 \div 0.308$	0.2957	1.57	1.56	9.96	0.079	0.983	0.185
$0.347 \div 0.361$	0.3522	2.11	2.29	10.89	0.071	0.976	0.220
$0.362 \div 0.369$	0.3660	1.21	0.38	3.11	0.006	0.974	0.228
0.369 ÷ 0.386	0.3800	3.73	3.44	9.22	0.039	0.972	0.236
0.386 ÷ 0.393	0.3889	1.80	0.60	3.36	0.009	0.970	0.242
0.393 ÷ 0.412	0.3998	4.60	5.49	11.94	0.058	0.969	0.249
$0.420 \div 0.427$	0.4228	0.92	0.31	3.32	0.005	0.965	0.263
$0.730 \div 0.740$	0.7344	1.16	1.56	13.41	0.023	0.895	0.445
1.835 ÷ 1.846	1.8416	1.39	4.19	30.12	0.024	0.402	0.916

Таблица 3.10. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_x акселерометром MAMS на отрезке 2

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
$0.337 \div 0.357$	0.3475	4.31	4.80	11.12	0.068	0.976	0.217
$0.372 \div 0.383$	0.3794	8.45	5.30	6.27	0.016	0.972	0.236
$0.385 \div 0.394$	0.3879	6.88	3.78	5.49	0.019	0.970	0.241
$0.394 \div 0.409$	0.3990	12.02	12.65	10.54	0.045	0.969	0.248
$0.409 \div 0.427$	0.4149	5.15	7.63	14.83	0.078	0.966	0.258
$0.730 \div 0.750$	0.7390	5.31	11.29	21.26	0.047	0.894	0.448
$0.750 \div 0.772$	0.7607	5.68	21.00	36.98	0.152	0.888	0.460
$0.784 \div 0.801$	0.7903	4.45	11.42	25.64	0.079	0.879	0.476
$0.872 \div 0.889$	0.8796	4.43	12.20	27.52	0.068	0.851	0.525
$1.611 \div 1.648$	1.6289	4.12	37.53	91.12	0.283	0.520	0.854
$1.648 \div 1.663$	1.6534	2.23	6.71	30.08	0.030	0.507	0.862
$1.663 \div 1.679$	1.6694	2.86	11.16	39.02	0.051	0.499	0.867

Таблица 3.11. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения *a_y* акселерометром MAMS на отрезке 2

Таблица 3.12. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_z акселерометром MAMS на отрезке 2

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_r	Р	d	Reλ	Imλ
$0.373 \div 0.391$	0.3851	4.84	6.21	12.82	0.072	0.971	0.240
$0.391 \div 0.410$	0.4042	7.85	11.17	14.23	0.065	0.968	0.251
$0.410 \div 0.425$	0.4161	5.90	5.73	9.72	0.035	0.966	0.258
$0.425 \div 0.440$	0.4304	3.22	3.42	10.63	0.040	0.964	0.267
$0.674 \div 0.694$	0.6821	3.38	6.71	19.84	0.049	0.910	0.416
$0.698 \div 0.720$	0.7081	6.38	19.61	30.74	0.128	0.903	0.430
$0.720 \div 0.735$	0.7252	4.97	5.80	11.66	0.005	0.898	0.440
$0.735 \div 0.750$	0.7413	4.40	7.61	17.30	0.031	0.893	0.449
$0.750 \div 0.771$	0.7635	3.01	9.82	32.69	0.136	0.887	0.462
$1.450 \div 1.458$	1.4528	2.24	4.89	21.79	0.025	0.612	0.791
$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_r	Р	d	Reλ	Imλ
--------------------	--------	---------------	------------	-------	-------	-------	-------
$0.115 \div 0.125$	0.1206	1.58	0.31	1.96	0.017	0.997	0.076
$0.174 \div 0.193$	0.1816	2.64	1.66	6.28	0.076	0.993	0.114
$0.193 \div 0.205$	0.1959	2.47	0.74	3.02	0.010	0.992	0.123
$0.260 \div 0.274$	0.2667	2.82	2.14	7.61	0.040	0.986	0.169
$0.327 \div 0.350$	0.3385	3.60	7.00	19.43	0.258	0.977	0.211
$0.350 \div 0.357$	0.3529	2.06	0.70	3.37	0.007	0.976	0.220
$0.369 \div 0.376$	0.3719	3.30	1.11	3.36	0.008	0.973	0.232
$0.381 \div 0.391$	0.3847	3.73	2.04	5.47	0.009	0.971	0.239
$0.391 \div 0.398$	0.3941	6.04	2.30	3.80	0.006	0.970	0.245
$0.398 \div 0.418$	0.4069	4.05	4.70	11.60	0.052	0.967	0.253
$0.418 \div 0.434$	0.4262	4.00	5.76	14.40	0.053	0.964	0.265
$0.722 \div 0.735$	0.7271	1.99	4.06	20.35	0.061	0.897	0.441
$0.735 \div 0.762$	0.7478	2.86	10.88	38.03	0.167	0.892	0.453
$1.621 \div 1.644$	1.6316	2.55	17.32	67.99	0.112	0.519	0.855
$1.645 \div 1.661$	1.6483	2.85	10.87	37.92	0.053	0.510	0.860
$1.661 \div 1.688$	1.6723	3.68	31.44	85.36	0.230	0.497	0.868

Таблица 3.13. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_x акселерометром MAMS на отрезке 3

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
$0.073 \div 0.093$	0.0803	7.13	2.17	3.05	0.091	0.999	0.050
$0.369 \div 0.376$	0.3718	8.17	2.76	3.38	0.009	0.973	0.232
$0.376 \div 0.391$	0.3810	7.69	7.60	9.88	0.044	0.971	0.237
$0.391 \div 0.398$	0.3942	18.30	6.95	3.80	0.006	0.969	0.245
$0.398 \div 0.418$	0.4068	11.75	17.05	14.51	0.091	0.967	0.253
$0.418 \div 0.432$	0.4241	7.06	7.98	11.30	0.021	0.965	0.263
$0.432 \div 0.452$	0.4391	7.13	12.37	17.34	0.104	0.962	0.272
$0.676 \div 0.696$	0.6826	5.02	11.66	23.22	0.065	0.909	0.416
$0.711 \div 0.733$	0.7239	10.47	26.15	24.98	0.082	0.898	0.439
$0.738 \div 0.754$	0.7451	14.95	32.23	21.56	0.062	0.892	0.451
$0.760 \div 0.779$	0.7713	10.48	20.34	19.40	0.041	0.885	0.466
$1.643 \div 1.660$	1.6482	14.69	56.34	38.36	0.050	0.510	0.860
$1.662 \div 1.688$	1.6723	15.96	132.2	83.12	0.221	0.497	0.868

Таблица 3.14. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_y акселерометром MAMS на отрезке 3

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
$0.069 \div 0.086$	0.0765	5.61	1.34	2.38	0.055	0.999	0.048
$0.442 \div 0.460$	0.4508	3.72	2.83	7.59	0.015	0.960	0.279
$0.460 \div 0.481$	0.4719	7.04	11.64	16.52	0.055	0.956	0.292
$0.728 \div 0.764$	0.7446	10.29	40.66	39.52	0.151	0.893	0.451
$0.765 \div 0.787$	0.7708	8.41	16.98	20.18	0.044	0.885	0.466
$1.470 \div 1.499$	1.4826	6.56	39.17	56.67	0.128	0.5967	0.803
$1.504 \div 1.524$	1.5140	5.16	21.57	41.84	0.066	0.581	0.814
$1.524 \div 1.548$	1.5368	5.44	36.55	67.22	0.167	0.569	0.822
$1.548 \div 1.573$	1.5604	4.87	30.39	62.40	0.147	0.557	0.831
$1.573 \div 1.590$	1.5817	5.72	33.18	58.01	0.111	0.546	0.838
$1.590 \div 1.607$	1.5977	5.39	31.57	58.54	0.125	0.537	0.844
$1.607 \div 1.622$	1.6132	3.65	9.85	26.94	0.021	0.529	0.849
$1.622 \div 1.638$	1.6336	3.78	12.75	33.72	0.021	0.518	0.855
$1.719 \div 1.738$	1.7304	4.48	22.85	50.96	0.085	0.465	0.885
$1.749 \div 1.758$	1.7511	3.65	5.00	13.70	0.006	0.453	0.891
$1.780 \div 1.788$	1.7847	2.34	1.88	8.04	0.004	0.434	0.901

Таблица 3.15. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения *a_z* акселерометром MAMS на отрезке 3

Табл. 3.16 – 3.24 содержат результаты второго этапа исследования колебаний в выбранных отрезках данных измерений SAMS. Таблицы устроены аналогично табл. 3.7 – 3.15 и отличаются только единицами измерения приводимых величин. В табл. 3.16 – 3.24 эти единицы следующие: $[\sigma_0] = 10^{-4} \text{ м/c}^2, [\sigma_r] = 10^{-7} \text{ м/c}^2, [P] = 10^{-4} [d] = 1.$

В табл. 3.25 и 3.26 приведены среднеквадратичные значения сигнала после выполнения первого и второго этапов исследования для всех выбранных отрезках данных измерений обоих акселерометров. Единицей измерения среднеквадратичных значений сигнала для данных MAMS (табл. 3.25) служит 10^{-6} м/с², для данных SAMS (табл. 3.26) – 10^{-2} м/с². В таблицах приведены также отношения среднеквадратичного значения сигнала, полученного на первом этапе, к среднеквадратичному значению сигнала на втором этапе. Квадрат этого отношения характеризуют соответствующее уменьшение

мощности сигнала. Из анализа табл. 3.25, 3.26 следует, что в результате удаления колебаний, отвечающих непрерывному спектру, среднеквадратичное значение сигнала на рассматриваемых отрезках данных уменьшается от 1.3 до 2.8 раз.

Таблица 3.16. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_x акселерометром SAMS на отрезке 4

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
$22.03 \div 24.85$	23.531	0.99	19.3	19.5	0.074	0.830	0.557
$47.86 \div 49.80$	48.783	3.85	28.7	7.45	0.003	0.338	0.941
57.13 ÷ 58.30	57.595	1.07	8.79	8.20	0.004	0.123	0.992
97.30 ÷ 98.03	97.558	1.19	7.34	6.15	0.005	-0.771	0.636

Таблица 3.17. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_y акселерометром SAMS на отрезке 4

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
48.59 ÷ 49.14	48.791	3.18	15.8	4.97	0.002	0.338	0.941
57.13 ÷ 57.87	57.570	2.08	11.2	5.39	0.001	0.124	0.992
93.57 ÷ 94.49	94.014	1.76	14.7	8.36	0.009	-0.712	0.702
97.17 ÷ 98.53	97.674	2.09	18.2	8.70	0.012	-0.773	0.634

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
48.53 ÷ 49.15	48.796	1.78	8.57	4.82	0.002	0.338	0.941
57.13 ÷ 57.99	57.566	1.69	10.17	6.03	0.002	0.124	0.992
97.05 ÷ 97.54	97.342	2.02	3.90	1.93	0.001	-0.768	0.640
97.54 ÷ 97.97	97.737	2.17	5.86	2.70	0.001	-0.774	0.633

Таблица 3.18. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_z акселерометром SAMS на отрезке 4

Таблица 3.19. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_x акселерометром SAMS на отрезке 5

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
5.93 ÷ 6.54	6.290	2.06	2.38	1.15	0.004	0.986	0.157
6.54 ÷ 7.15	6.913	2.21	2.78	1.26	0.003	0.985	0.173
$10.14 \div 11.24$	10.828	3.29	12.28	3.73	0.011	0.963	0.269
$11.30 \div 12.45$	11.815	3.57	13.87	3.88	0.010	0.956	0.293
25.58 ÷ 27.59	26.635	3.09	52.7	17.1	0.047	0.784	0.620
48.45 ÷ 49.15	48.772	3.49	18.52	5.31	0.001	0.338	0.941
96.93 ÷ 97.85	97.419	1.54	8.25	5.35	0.004	-0.769	0.639
$101.99 \div 102.37$	102.214	13.2	41.9	3.19	0.002	-0.840	0.542

Таблица 3.20. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_y акселерометром SAMS на отрезке 5

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
9.96 ÷ 11.84	11.142	9.42	48.7	5.17	0.018	0.961	0.276
$25.58 \div 26.07$	25.843	2.20	6.98	3.18	0.002	0.796	0.605
$26.07 \div 26.92$	26.524	3.34	25.3	7.58	0.010	0.786	0.618
$26.92 \div 28.40$	27.421	3.61	40.1	11.1	0.019	0.771	0.636
48.45 ÷ 49.14	48.772	2.96	15.7	5.31	0.001	0.338	0.941
56.89 ÷ 57.74	57.397	1.20	10.92	9.12	0.004	0.128	0.992
97.09 ÷ 97.78	97.425	1.71	9.33	5.46	0.005	-0.769	0.639
$101.69 \div 102.48$	102.209	5.39	17.8	3.31	0.003	-0.840	0.542

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
$10.13 \div 11.24$	10.877	1.91	7.59	3.96	0.013	0.963	0.270
11.30 ÷ 11.96	11.672	2.51	6.25	2.49	0.005	0.957	0.290
$48.28 \div 49.15$	48.773	1.57	8.48	5.42	0.001	0.338	0.941
97.06 ÷ 97.84	97.471	2.81	17.79	6.33	0.005	-0.770	0.638
$101.44 \div 102.85$	102.224	6.52	33.34	5.11	0.006	-0.841	0.542

Таблица 3.21. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_z акселерометром SAMS на отрезке 5

Таблица 3.22. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_x акселерометром SAMS на отрезке 6

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
$4.85 \div 6.68$	5.710	2.06	5.91	2.87	0.026	0.990	0.143
6.68 ÷ 8.12	7.451	1.56	4.61	2.95	0.016	0.982	0.186
8.12 ÷ 10.14	9.268	2.13	12.14	5.71	0.038	0.973	0.231
$25.34 \div 26.37$	25.887	1.65	13.82	8.39	0.012	0.796	0.606
$26.37 \div 27.29$	26.844	1.50	11.65	7.78	0.010	0.781	0.625
$27.29 \div 28.08$	27.699	1.66	12.31	7.42	0.008	0.767	0.641
$28.08 \div 29.79$	28.850	2.61	37.5	14.4	0.030	0.748	0.663
48.20 ÷ 49.35	48.797	4.49	38.28	8.53	0.005	0.338	0.941
57.13 ÷ 57.56	57.371	1.95	6.74	3.46	0.001	0.129	0.992
83.82 ÷ 85.76	84.693	2.58	60.6	23.5	0.049	-0.529	0.848
85.76 ÷ 87.35	86.477	2.13	33.3	15.66	0.023	-0.567	0.824
$104.75 \div 105.90$	105.277	5.28	25.4	4.81	0.005	-0.880	0.476
$105.90 \div 106.57$	106.256	2.40	8.31	3.46	0.004	-0.891	0.454
$106.57 \div 108.04$	107.092	2.39	19.5	8.16	0.021	-0.900	0.435

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	$\sigma_{_r}$	Р	d	Reλ	Imλ
$25.33 \div 26.36$	25.920	2.31	18.5	7.99	0.011	0.795	0.606
$26.37 \div 28.08$	27.344	2.47	53.2	15.3	0.036	0.773	0.634
$28.08 \div 29.79$	28.872	4.66	61.2	13.1	0.025	0.748	0.664
48.16 ÷ 49.33	48.792	4.04	34.7	8.60	0.005	0.338	0.941
57.27 ÷ 57.56	57.377	3.80	12.3	3.23	0.001	0.128	0.992
$104.75 \div 105.90$	105.297	17.2	74.3	4.32	0.004	-0.880	0.475
$105.90 \div 108.05$	106.623	9.66	10.4	10.8	0.036	-0.895	0.446

Таблица 3.23. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_y акселерометром SAMS на отрезке 6

Таблица 3.24. Параметры процессов AP(2) в измерениях компоненты ускорения a_z акселерометром SAMS на отрезке б

$f_1 \div f_2$	f	$\sigma_{_0}$	σ_{r}	Р	d	Reλ	Imλ
48.10 ÷ 49.34	48.810	2.18	19.54	8.95	0.006	0.337	0.941
57.27 ÷ 57.56	57.379	2.98	9.52	3.20	0.001	0.128	0.992
96.62 ÷ 98.34	97.531	4.09	47.21	11.54	0.020	-0.771	0.637
$104.68 \div 105.91$	105.276	8.01	43.79	5.47	0.008	-0.880	0.476

Компо- нента	Отре- зок	После удаления циклических трен- дов, 10^{-6} м/ c^2	После удаления АР процессов, 10^{-6} м/c^2	Отношение
<i>a</i> _x	1	0.017	0.013	1.31
	2	0.025	0.015	1.67
	3	0.061	0.037	1.65
<i>a</i> _y	1	0.114	0.087	1.31
	2	0.174	0.120	1.45
	3	0.527	0.321	1.64
a _z	1	0.058	0.045	1.29
	2	0.095	0.064	1.48
	3	0.195	0.133	1.47

Таблица 3.25. Среднеквадратичные значения на этапах обработки данных MAMS

Таблица 3.26. Среднеквадратичные значения на этапах обработки данных SAMS

Компо- нента	Отре- зок	После удаления	После удаления	
		циклических трен-	АР процессов,	Отношение
		дов, 10^{-2} м/c^2	10^{-2} M/c^2	
<i>a</i> _x	4	0.544	0.249	2.18
	5	4.399	1.586	2.77
	6	2.528	1.163	2.17
<i>a</i> _y	4	0.912	0.622	1.47
	5	3.910	1.885	2.07
	6	11.44	5.138	2.23
a _z	4	0.466	0.274	1.70
	5	1.504	0.615	2.45
	6	2.470	1.055	2.34

Все исследованные процессы AP(2) имеют параметры, находящиеся в области стационарности вблизи ее границы – корни характеристических уравнений этих процессов лежат внутри единичного круга, но коэффициент затухания процессов очень мал. Расширение исследуемого отрезка спектра $f_1 \leq f \leq f_2$ приводит к увеличению коэффициента затухания и смещению корней характеристического уравнения внутрь единичного круга.

Подведем итоги. На втором этапе исследования были выявлены наиболее значимые колебания, оставшиеся после удаления циклических трендов. Были определены параметры процессов авторегрессии, аппроксимирующих эти колебания. Как уже отмечалось, все рассмотренные колебания достаточно точно описываются процессами авторегрессии второго порядка. Наиболее значимые колебания непрерывного спектра имеют место в частотных диапазонах, представляющих собой окрестности частот ранее выделенных циклических трендов. Спектры рядов остатков, полученных после удаления найденных процессов авторегрессии, все еще сохраняют в указанных диапазонах довольно заметные пики.

Таким образом, большинство выявленных значимых колебаний в данных измерений акселерометров MAMS и SAMS имеют смешанный – дискретный и непрерывный спектр. Выявленные возмущения вызваны, в основном, колебаниями крупногабаритных элементов конструкции станции – многие найденные частоты являются характерными частотами упругих колебаний конструкции MKC [18, 20, 22]. По-видимому, все колебания со смешанным спектром можно связать с упругими колебаниями конструкции станции. Колебания с чисто дискретным спектром следует связать с функционированием бортового оборудования. Все такие колебания имеют малые амплитуды.

Глава 4. Анализ космических экспериментов с датчиком конвекции ДАКОН-М

При анализе микрогравитационной обстановки большое внимание уделяется квазистатической компоненте микроускорения, имеющей первостепенное значение для экспериментов в области микрогравитации. Эта компонента находится расчетным путем [11, 34] и с помощью акселерометров [34], но такое ее определение имеет несколько формальный характер. Физический смысл этой компоненты, проверка правильности ее выделения понастоящему выясняются и проверяются в экспериментах с гравитационночувствительными системами, в частности, в экспериментах с датчиком конвекции ДАКОН. Исследования применимости подобных систем для анализа квазистатической составляющей микроускорения на борту КА ведутся как в России, так и зарубежом [6, 11, 16, 34, 37 – 40, 51, 58, 59].

Ниже описаны результаты экспериментов с датчиком конвекции ДА-КОН-М на борту Российского сегмента МКС. Проведено сопоставление измерений датчика и результатов расчета квазистатической компоненты микроускорения в точке его установки. Для сопоставления взяты три отрезка измерений из экспериментов 2009 г., во время которых проводились стыковки космических кораблей со станцией, отстыковки от нее, и происходило срабатывание реактивных двигателей системы ориентации. При расчете микроускорения использованы данные измерений низкочастотного акселерометра MAMS, установленного в Американском сегменте, и телеметрическая информация о вращательном движении МКС. Эта информация позволила пересчитать измерения MAMS в точку установки датчика конвекции ДАКОН-М. Сравнение показаний датчика и расчетных микроускорений показало определенное совпадение расчетных и измеренных данных, что позволяет сделать вывод о перспективности идеи использования датчиков такого рода для мониторинга квазистатических микроускорений.

4.1. Датчик конвекции ДАКОН-М

Датчик конвекции ДАКОН-М представляет собой полость в форме цилиндра, заполненную углекислым газом. Диаметр и высота цилиндра имеют одинаковое значение L = 10 см. На противоположных основаниях цилиндра поддерживается фиксированная разность температур $\Delta T = 60^{\circ}$ С. Внутри полости установлены две дифференциальные термопары для измерения разностей температур в двух парах фиксированных точек. Эти разности температур – показания датчика. Датчик ДАКОН-М является усовершенствованным вариантом датчика ДАКОН, эксперименты с которым проводились на орбитальной станции «Мир» [6]. Как показано в [11, 34, 44], показания датчика конвекции зависят от испытываемых им микроускорений. Такой датчик – пример гравитационно-чувствительной системы.

Измерения ДАКОНа-М 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 , причем все точки одинаково удалены от нее.

Влияние микроускорений на датчик конвекции зависит от частотных свойств датчика и микроускорений. 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 ε_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

$$F_1 = kn_1 - 2\varepsilon_2, \quad F_2 = kn_2 + 2\varepsilon_1, \quad k = \frac{\beta \Delta T}{L} \approx 1.8 \,\mathrm{m}^{-1}.$$
 (4.1)

Как видно из приведенных соотношений, показания датчика могут служить интегральной характеристикой микрогравитационной обстановки на борту космического аппарата в области низких частот. Кроме того, сравнение измерений датчика с результатами математического моделирования конвекции газа в полости, полученными с учетом реальных испытываемых полостью линейных и угловых микроускорений (ср. [11, 34, 45]), позволит оценить точность принятой математической модели. Все это объясняет интерес к экспериментам такого рода.

Ниже описываются первые результаты анализа экспериментов с датчиком ДАКОН-М на борту МКС. Они заключаются в сопоставлении показаний датчика с величинами F_1 и F_2 . Последние рассчитаны по телеметрической информации о вращательном движении станции и по данным измерений американского акселерометра MAMS.

4.2. Исследуемые данные измерений ДАКОНа-М

На исследуемых ниже отрезках времени датчик конвекции ДАКОН-М был установлен в Служебном модуле (СМ) МКС. Направления осей системы координат $Dx_1x_2x_3$ датчика в строительной системе $Oy_1y_2y_3$ СМ задавались формулами $Dx_1 = -Oy_2$ и $Dx_2 = -Oy_1$. При этом ось Oy_1 параллельна продольной оси СМ и направлена от его переходного отсека к агрегатному отсеку, ось Oy_2 перпендикулярна оси вращения солнечных батарей СМ, начало системы $Oy_1y_2y_3$ находится в геометрическом центре седьмого шпангоута СМ. Координаты точки D в системе $Oy_1y_2y_3$ известны. Ниже, если не оговорено особо, компоненты векторов и координаты точек указываются в системе $Oy_1y_2y_3$.

Для исследования были взяты три отрезка данных измерений ДАКО-На-М. Эти данные, а также данные измерений микроускорений, графики функций $F_1(t)$, $F_2(t)$ и ряда вспомогательных зависимостей представлены на рис. 4.1 – 4.4. Рис. 4.1, 4.3 и 4.4 относятся к отрезкам 1, 2 и 3 соответственно, на рис. 4.2 представлена аналогичная графическая информация для части отрезка 1 – отрезка 1'. Некоторые сведения об этих отрезках приведены в табл. 4.1 – 4.3. В табл. 4.1 для каждого отрезка указана информация о типе операции (стыковка или отстыковка), дата и время начала проведения операции, наименование модуля или узла МКС, а также космического аппарата, задействованных в операции. В табл. 4.2 приведены начальные точки t_0 , количество точек и длины выбранных отрезков измерений ДА-КОНа-М. Графики этих измерений изображены черными линиями в левых частях рис. 4.1 – 4.4 с индексом «г». В табл. 3 приведены координаты точек установки акселерометра и датчика конвекции на указанных отрезках.

На отрезке 1 происходило причаливание транспортного грузового корабля «Прогресс-М» к стыковочному узлу «Пирс» станции, на отрезке 2 со станцией стыковался американский шаттл, на отрезке 3 тот же шаттл отстыковывался от станции. На всех выбранных отрезках МКС находилась в орбитальной ориентации, которая поддерживалась реактивными двигателями СМ или транспортного грузового корабля «Прогресс-М». Порядок и длительность включения двигателей определялись бортовым компьютером с учетом информации об отклонении станции от требуемого положения. Двигатели выключались за несколько минут до начала динамической операции и включаются через несколько минут после ее окончания. На выбранных отрезках данных измерений датчика конвекции имели место и контакты кораблей со станцией, и срабатывания реактивных двигателей.

Отрезок	Дата	Время начала операции	Стыков. узел	КА	Операция
1	13.02.2009	10:19:13	Пирс	ТГК М66	Отстыковка
2	18.03.2009	00:19:53	PMA-2	STS-119	Стыковка
3	25.03.2009	22:53:44	PMA-2	STS-119	Отстыковка

Таблица 4.1. Динамические операции на отрезках 1	- 3
--	-----

Таблица 4.2. Характеристики выбранных отрезков данных измерений ДАКОН-М и MAMS

Отре- зок	Интервал аппроксимации движения станции		Количество точек М	
	t ₀ (ДМВ)	Длина (мин)	ДАКОН-М	MAMS (oss)
1	08:55:30	196.2	11772	736
1′	10:09:30	30.0	1802	113
2	23:36:40	166.7	9954	625
3	21:10:00	112.4	6744	422

Таблица 4.3. Координаты MAMS и ДАКОН-М на отрезках 1 – 3 в соответствии с текущими массово-инерционными характеристиками (МИХ) МКС

МИХ	Время действия МИХа	Координаты	Координаты
	между операциями	«Дакон-М»	MAMS
2340	Перед отстыковкой ТГК М66 (13.02.2009)	29.2, -0.5, -2.6	-6.6, -0.2, -2.8
2330	Между отстыковкой ТГК М66 и стыковкой STS-119 (13.02.2009 ÷ 18.03.2009)	28.7, -0.3, -2.5	-7.1, 0, -2.7
1370	Между стыковкой и отстыков- кой STS-119 (18.02.2009 ÷ 25.03.2009)	34.6, 3.4, -2.7	-1.1, 3.7, 1.9
1420	После отстыковки STS-119 (25.03.2009)	28.9, -0.4, -0.1	-6.9, -0.1, 0.4

4.3. Измерения акселерометра МАМЅ

Низкочастотный акселерометр MAMS установлен в модуле Lab Американского сегмента MKC и измеряет кажущееся ускорение – микроускорение с обратным знаком. В описываемом исследовании его измерения рассматриваются как измерения микроускорения в левой системе координат $Mz_1z_2z_3$, направления осей которой связаны со строительной системой CM формулами: $Mz_1 = Oy_1$, $Mz_2 = Oy_2$ и $Mz_3 = -Oy_3$. Координаты акселерометра в системе $Oy_1y_2y_3$ известны.

Скорость выборки MAMS – 10 измерений в секунду, прибор позволяет измерять микроускорения в диапазоне частот $10^{-5} \div 5$ Гц и диапазоне амплитуд $10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-3}$ м/с².

Группа PIMS (Principal Investigator Microgravity Services) NASA, курирующая MAMS, обрабатывает полученные данные с целью выделения квазистатической составляющей, а также устранения смещения нуля. Обработанные PIMS данные имеют шаг по времени 16 секунд. Файлы как с исходными (сырыми) данными измерений акселерометра, так и с обработанными доступны на сайте PIMS. В данном исследовании использованы обработанные данные акселерометра, пересчитанные в систему $Oy_1y_2y_3$.

Ниже измерения MAMS рассматриваются на тех же отрезках времени, что и данные измерений ДАКОНа-М. В табл. 4.2 приведены начальные точки t_0 , количество точек с измерениями и длины выбранных отрезков измерений MAMS. Построенные по этим измерениям графики микроускорения n_1 , n_2 и n_3 изображены черными линиями в левых частях рис. 4.1 – 4.4 с индексом «*в*».

Согласно подходу, принятому в PIMS, квазистатическая составляющая микроускорения не должна содержать колебания с частотами более 0.01 Гц. Однако в обработанных данных MAMS присутствуют заметные колебания и с более высокими частотами. Датчик на такие сравнительно высокочастотные колебания не реагирует, поэтому в описываемом исследовании проводи-

лось дополнительное сглаживание (низкочастотная фильтрация) данных MAMS.

Сглаживающие ряды строились независимо для каждой компоненты микроускорения. Ряды, построенные по данным измерений на отрезке времени $t_0 \le t \le t_0 + T$ (T > 0), имели вид [4]

$$n_{i,\rm sm}(t) = \alpha_i + \beta_i(t - t_0) + \sum_{m=1}^M a_{im} \sin \frac{\pi m (t - t_0)}{T} \quad (i = 1, 2, 3).$$
(4.2)

Коэффициенты α_i , β_i , a_{im} находились методом наименьших квадратов, затем коэффициенты при старших гармоникам умножались на корректирующие множители. Графики построенных выражений (4.2) изображены красными линиями в левых частях рис. 4.1 – 4.4 с индексом «*в*». Данные на отрезках 1, 2 и 3 сглажены при M = 250, на отрезке 1' – при M = 110. Отношение T / M составило: на отрезке 1 – 47 с, на отрезке 2 – 40 с, на отрезке 3 – 27 с, на отрезке 1' – 16 с.

4.4. Расчет квазистатической составляющей микроускорения по телеметрическим измерениям

Для расчета квазистатической составляющей микроускорения известна простая формула. Пусть станция представляет собой твердое тело, и точка *Р* жестко с ней связана. Тогда квазистатическая составляющая **n** микроускорения в точке *P* имеет вид [4, 44, 45]

$$\mathbf{n}_{P} = \mathbf{n}(\mathbf{r}) + \mathbf{w}, \quad \mathbf{n}(\mathbf{r}) = \mathbf{r} \times \frac{d\mathbf{\omega}}{dt} + (\mathbf{\omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{\omega} + \frac{\mu_{e}}{|\mathbf{R}|^{3}} \left[\frac{3(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^{2}} - \mathbf{r} \right].$$
(4.3)

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

Слагаемое **w** не зависит от выбора точки *P* на станции. Если движение последней неуправляемо или управляется посредством гиродинов, то это слагаемое определяется в основном аэродинамическим сопротивлением [4, 44, 45]. На отрезках полета, рассматриваемых в данной работе, **w** содержит дополнительный вклад от сил, создаваемых двигателями ориентации и стыковками или расстыковками кораблей со станцией.

Если в некоторой точке борта Q, имеющей радиус-вектор \mathbf{r}' относительно центра масс станции, измерить микроускрение $\mathbf{n}_Q = \mathbf{n}(\mathbf{r}') + \mathbf{w}$ и по какой-либо информации найти величины $\boldsymbol{\omega}$, $d\boldsymbol{\omega}/dt$ и \mathbf{R} , то согласно (4.3) по формуле $\mathbf{n}_P = \mathbf{n}_Q - \mathbf{n}(\mathbf{r}') + \mathbf{n}(\mathbf{r})$ можно найти реальную квазистатическую составляющую микроускорения в любой точке борта P. 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}_Q и расчет величин $\boldsymbol{\omega}$, $d\boldsymbol{\omega}/dt$ и \mathbf{R} должны быть выполнены на достаточно продолжительном отрезке времени.

Справедливость описанного подхода в определенной степени подтверждается результатами [4]. В этой работе формула $\mathbf{n}_Q = \mathbf{n}(\mathbf{r}') + \mathbf{w}$ позволила со среднеквадратичной ошибкой около 10^{-6} м/c^2 согласовать измерения MAMS и расчет микроускорений по движению МКС в случае, когда это движение управлялось с помощью гиродинов.

Аппроксимация фактического вращательного движения станции в [4] и в данной работе выполнялась по телеметрическим значениям компонент вектора ω и кватерниона, задающего ориентацию системы $Oy_1y_2y_3$ относительно абсолютной системы координат J2000. Эти значения доступны в дискретные моменты времени с шагом около 1 с. Телеметрическая информация использовалась следующим образом. Сначала на некотором интервале времени компоненты кватерниона сглаживались выражениями вида (4.2). Затем по этим выражениям (нормированным на 1) и кинематическим соотношениям вычислялись угловые скорость и ускорение станции. Данные измерений компонент угловой скорости также сглаживались выражениями вида (4.2), и их графики сравнивались с графиками компонент угловой скорости, рассчитанных по кватерниону. Такое сравнение позволяло контролировать выбор числа гармоник в сглаживающих выражениях. Некоторые результаты аппроксимации вращательного движения станции представлены на рис. 4.1 – 4.4 с индексами «*a*» и «*б*».

На рисунках с индексом «*a*» слева маркерами указаны телеметрические значения компонент кватерниона (для каждой компоненты приведено только каждое сотое значение для отрезков 1, 2, 3 и каждое пятидесятое для отрезка 1'), сплошными кривыми изображены графики соответствующих сглаживающих выражений. На графиках справа сплошные кривые представляют рассчитанную с помощью этих выражений зависимость от времени углов Крылова, которые задают положение системы координат $Oy_1y_2y_3$ относительно орбитальной системы $CY_1Y_2Y_3$. Орбитальная система и углы определены так.

Точка C – центр масс станции, ось CY_2 направлена по геоцентрическому радиусу-вектору этой точки, ось CY_3 направлена противоположно вектору орбитального кинетического момента станции, ось CY_1 дополняет систему до правой. Углы Крылова ψ (рысканье), γ (крен) и θ (тангаж) введены с помощью условия, что оси системы $CY_1Y_2Y_3$ могут быть расположены параллельно одноименным осям системы $Oy_1y_2y_3$ тремя последовательными поворотами. Первый поворот – на угол ψ вокруг оси CY_2 , второй поворот – на угол γ вокруг новой оси CY_1 , третий поворот – на угол θ вокруг новой оси CY_3 , совпадающей с осью Cy_3 . При построении орбитальной системы координат использовалась достаточно детальная модель движения центра масс станции. Вернемся к рисункам. Маркеры рядом с правыми кривыми на рис. 4.1*а* – 4.4*а* указывают значения углов (каждое сотое значение для отрезков 1, 2, 3 и каждое пятидесятое для отрезка 1'), рассчитанные по телеметрическим значениям кватерниона. На рис. 4.1 – 4.4 с индексом «б» слева приведены графики компонент угловой скорости станции. Черные кривые – результат расчета с помощью выражений, сглаживающих кватернион, красные кривые – результат сглаживания телеметрических значений угловой скорости. Справа на этих рисунках приведены графики компонент углового ускорения станции, рассчитанного по сглаживающим кватернион выражениям.

При пересчете квазистатической составляющей микроускорения из точки расположения MAMS в точку расположения ДАКОНа-М использовались проектные оценки их координат. Результаты пересчета приведены на рис. 4.1 – 4.4 с индексом «s». Здесь черными линиями в правых частях рисунков изображены графики компонент n_1 , n_2 и n_3 этой составляющей.

4.5. Сопоставление результатов

Измерения датчика конвекции сопоставлялись с параметрами микрогравитационной среды, имевшей место при проведении измерений. Как было указано в п. 4.1, входными сигналами датчика служат функции $F_1(t)$ и $F_2(t)$, определенные формулами (4.1). Эти функции были рассчитаны по значениям компонент микроускорения в точке установки датчика и компонент углового ускорения станции. Графики входных сигналов изображены красными линиями в левых частях рис. 4.1 – 4.4 с индексом «г» рядом с графиками соответствующих измерений $Q_1(t)$ и $Q_2(t)$. Непосредственное сравнение функций $F_i(t)$ и $Q_i(t)$ затруднительно, поскольку они измеряются в разных единицах. Более информативно сравнение безразмерных центрированных функций

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

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

Графики таких функций приведены в правых частях рис. 4.1*г* – 4.4*г* (черные линии – измерения, красные – входной сигнал). Как видно из рисунков, имеет место определенное сходство обоих наборов функций, что свидетельствует о перспективности применения датчиков такого рода в мониторинге квазистатических микроускорений на борту космических аппаратов (ср. [11, 34, 44]).

















Рис. 4.2*a*. Отрезок 1' (подинтервал 1). Момент t = 0 соответствует: 10:09:30 ДМВ 13.02.2009. Слева – компоненты кватерниона, справа – углов.













Рис. 4.3*a*. Отрезок 2. Момент *t* = 0 соответствует: 23:36:40 ДМВ 17.03.2009. Слева – компоненты кватерниона, справа – углов.















Рис. 4.4*a*. Отрезок 3. Момент t = 0 соответствует: 21:10:00 ДМВ 25.03.2009. Слева – компоненты кватерниона, справа – углов.












Глава 5. Определение массы МКС по измерениям микроускорений

В предыдущих главах были приведены примеры использования данных измерений акселерометров для исследования микрогравитационной обстановки на борту МКС. В то же время, указанные данные могут быть использованы при решении других задач, возникающих в процессе эксплуатации станции. В частности, при уточнении динамических параметров МКС. Ниже приводится пример использования данных измерений акселерометра при уточнении одного из таких параметров – массы станции.

При эксплуатации МКС из-за большого грузопотока, а также наличия погрешностей в учете расходования топлива и перемещения грузов, доставляемых на борт или удаляемых с него, может возникнуть заметное расхождение между истинным значением массы станции и значением, указанным в проектной документации. Знание же с приемлемой точностью этой характеристики позволяет в процессе управления станцией уменьшать расходы топлива при проведении различных динамических операций.

Проектная оценка массы МКС регулярно осуществляется специалистами РКК "Энергия" и NASA исходя из знания массово-инерционных параметров элементов конструкции, массы доставляемых и удаляемых грузов, величин расходования ресурсов и т.д. [52]. Такая оценка не является абсолютно точной, более того, по мере увеличения продолжительности полета станции накапливается и ошибка знания ее массы.

Задача определения массы орбитальной станции в полете возникла еще во время эксплуатации станций первого поколения "Салют", однако особую актуальность задача приобрела во время эксплуатации ОК "Мир", масса которого к концу срока его существования составляла более 120 т. На ОК "Мир" был проведен эксперимент по его взвешиванию с помощью двигателей ТГК "Прогресс" [47]. Двигатели корабля предварительно были оттарированы на участке его автономного полета. Тарирование тяги двигателей осуществлялось по экспериментальной зависимости тяги от давления и значений температур в баках с топливом и баллонах наддува двигательной установки

181

[47, 48]. Данный способ взвешивания был взят за основу при определении массы МКС в полете с помощью двигателей.

В августе 2004 г. был проведен эксперимент по взвешиванию МКС с помощью двигателей ТГК "Прогресс-М" [9, 21]. Масса МКС определялась по данным измерений американского акселерометра MAMS, полученным во время коррекции орбиты станции 20.VIII.2004. Коррекция выполнялась двигателями причаливания и ориентации ТГК "Прогресс-М".

Отличие проведенного на МКС эксперимента от аналогичного на ОК "Мир" заключалось в том, что предварительное тарирование тяги двигателей осуществлялось в автономном полете с использованием бортового измерителя приращения кажущейся скорости (БИПС). Значение тяги, полученное с использованием экспериментальной зависимости тяги от давлений и температур в магистралях двигательной установки грузового корабля, использовалось только для проверки полученного расчетным путем значения тяги. Погрешность определения массы МКС составила около 1% [9, 21].

5.1. Методика определения массы МКС с помощью двигателей ДПО ТГК "Прогресс"

Используется строительная система $Oy_1y_2y_3$ с началом в точке O – центре масс станции (см. п.1.1, рис. 1). Импульс, корректирующий орбиту станции, выдается вдоль оси Oy_1 этой системы координат. Во время выдачи импульса эта ось направлена по трансверсали к орбите станции. Из теоремы об изменении количества движения станции [32, 33] следует соотношение

$$Ma(t) = F_0 q(t) + F_1(t)$$
.

Здесь M – масса станции и пристыкованных к ней кораблей, t – время, a(t)– компонента кажущегося ускорения центра масс станции вдоль оси Oy_1 , q(t) – число работающих двигателей, F_0 – проекция на ось Oy_1 тяги одного двигателя, $F_1(t)$ – компонента вдоль оси Oy_1 главного вектора негравитационных внешних сил, действующих на станцию. Двигатели считаются одинаковыми, в $F_1(t)$ наибольший вклад вносят силы аэродинамического торможения.

Акселерометр MAMS позволяет измерять кажущееся ускорение a – одна из его осей чувствительности параллельна оси Oy_1 строительной системы координат. Пусть измерения получены для моментов времени t_n (n = 1, 2, ..., N), $a_n \approx a(t_n)$ – данные измерений. Значения кусочно-постоянной функции $q(t_n) = q_n$ известны из телеметрии, силой $F_1(t)$ можно пренебречь. Тогда отношение $\alpha = F_0 / M$ можно найти методом наименьших квадратов [37, 38] из условия минимума выражения

$$\begin{split} \Phi(\alpha) &= \sum_{n=1}^{N} (a_n - \alpha q_n)^2 = S_{qq} \alpha^2 - 2S_{aq} \alpha + S_{aa}, \\ S_{qq} &= \sum_{n=1}^{N} q_n^2, \quad S_{aq} = \sum_{n=1}^{N} a_n q_n, \quad S_{aa} = \sum_{n=1}^{N} a_n^2. \end{split}$$

Оценка указанного отношения имеет вид

$$\hat{\alpha} = \frac{S_{aq}}{S_{aq}}.$$
(5.1)

Примем, что ошибки в значениях a_n представляют собой некоррелированые случайные величины с нулевым средним значением и одинаковой дисперсией σ^2 . Тогда стандартное отклонение σ_{α} случайной величины $\hat{\alpha}$ и дисперсисия σ^2 оцениваются величинами

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma}{\sqrt{S_{qq}}}, \quad \sigma^2 = \frac{\Phi(\hat{\alpha})}{N-1} = \frac{1}{N-1} \left(S_{aa} - \frac{S_{aq}^2}{S_{qq}} \right). \tag{5.2}$$

Если отношение α найдено описанным способом и значение F_0 известно, то массу станции можно оценить по формуле

$$M = \frac{F_0}{\alpha}.$$
 (5.3)

Найдем погрешность формулы (5.3). Дифференциал этой формулы представим в виде

$$\frac{dM}{M} = \frac{dF_0}{F_0} - \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Полагая, что ошибки в определении α и F_0 независимы, относительную ошибку δ_M определения M на основании последнего соотношения оценим величиной

$$\delta_M = \sqrt{\frac{\sigma_\alpha^2}{\alpha^2} + \delta_F^2} \,. \tag{5.4}$$

Здесь δ_F – относительная ошибка в определении F_0 . Величины F_0 и δ_F находились в результате тарировки тяги ДПО ТГК "Прогресс-М".

5.2. Тарировка тяги двигателей грузового корабля

Тарировка тяги ДПО ТГК "Прогресс-М 42" проводилась 12.VIII.2004 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 ТГК была отключена.

На борту ТГК "Прогресс-М" установлен бортовой измеритель приращения кажущейся скорости. Этот прибор выдает моменты времени, в которые приращение кажущейся скорости оказывается кратным 4 см/с. Для обработки показаний БИПС использовалось решение начальной задачи [32]

$$m\frac{dv}{dt} = \mu u$$
, $\frac{dm}{dt} = -\mu$, $v(0) = v_0$, $m(0) = m_0$,

где m – масса корабля, μ – ее секундный расход, v – компонента кажущейся скорости корабля вдоль его продольной оси, u – модуль проекции скорости истечения газов из сопел двигателей на продольную ось корабля. Начальный момент выдачи телеметрических данных принят за начало отсчета времени – точку t = 0. Согласно сказанному выше $\mu u = 8F_0$.

Решение выписанной задачи имеет вид

$$v = v_0 - u \ln\left(1 - \frac{\mu t}{m_0}\right) = v_0 + \frac{\mu \mu t}{m_0} + \frac{\mu \mu^2 t^2}{2m_0^2} + \frac{\mu \mu^3 t^3}{3m_0^3} + \frac{\mu \mu^4 t^4}{4m_0^4} + \cdots$$
 (5.5)

Поскольку $v_0 \approx 0$ и $\mu t \ll m$, главным членом в правой части (5.5) является второй.

На основании формулы (5.5) телеметрические данные БИПС сглаживались полиномами

$$v_{\rm sm}(t) = v_0 + v_1 t + v_2 t^2 + \dots + v_n t^n$$
 (5.6)

при n = 1, 2, ..., 5. Как уже говорилось, эти данные представляют собой последовательность моментов времени τ_k (k = 0, 1, ..., K - 1), $\tau_0 < \tau_1 < ... < \tau_{K-1}$, которые вбирались из условия $v(\tau_k) \approx k \Delta v$, $\Delta v = 4$ см/с. Однако, применяя метод наименьших квадратов, моменты τ_k будем считать заданными, а величины $v^{(k)} = k \Delta v$ – измерениями, содержащими случайные некоррелированные ошибки с нулевыми средними значениями и одинаковыми стандартными отклонениями σ_v . Определение коэффициентов сглаживающего полинома (5.6) сводилось к минимизации по ним выражения

$$\sum_{k=0}^{K-1} [v^{(k)} - v_{\rm sm}(\tau_k)]^2 \,.$$

Значение величины F₀ вычислялось по формуле

$$F_0 = \frac{m_0 v_1}{8}.$$
 (5.7)

Во время выдачи тарировочного импульса 12.VIII.2004 был получен отрезок данных длиной K = 114 (рис. 5.1). Результаты сглаживания этого отрезка представлены в табл. 5.1. Здесь приведены порядок *n* сглаживающего полинома, оценки v_j его коэффициентов, стандартные отклонения σ_j этих оценок, стандартное отклонение σ_v ошибок аппроксимации "измерений" $v^{(k)}$, а также значение величины

$$F_0 = \frac{m_0 v_1}{8} \,. \tag{5.8}$$



Рис. 5.1. Данные измерений БИПС. Момент *t* = 0 соответствует 08:04:52 ДМВ 12.08.2004.

n	1	2	3	4	5
<i>v</i> ₀ , м/с	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$-8.8 \cdot 10^{-3}$	$-7.2 \cdot 10^{-3}$	$-5.6 \cdot 10^{-3}$	$-4.8 \cdot 10^{-3}$
v_1 , m/c ²	0.13137	0.13357	0.13300	0.13203	0.13132
v_2 , м/с ³		$-6.37 \cdot 10^{-5}$	$-2.2 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$
v_3 , m/c ⁴			$-8.0 \cdot 10^{-7}$	$-6.5 \cdot 10^{-6}$	$-1.8 \cdot 10^{-5}$
<i>v</i> ₄ , м/с ⁵				$8.3 \cdot 10^{-8}$	$4.6 \cdot 10^{-7}$
$v_5, {\rm M/c}^6$					$-4.3 \cdot 10^{-9}$
σ_0 , м/с	$7.8 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$
σ_1 , м/с 2	$3.9 \cdot 10^{-5}$	$3.0 \cdot 10^{-5}$	$5.8 \cdot 10^{-5}$	$9.1 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$
σ_2 , м/с 3		$8.5 \cdot 10^{-7}$	$3.9 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$
σ_3 , м/с 4			$7.4 \cdot 10^{-8}$	$4.7 \cdot 10^{-7}$	$1.9 \cdot 10^{-6}$
σ_4 , м/с 5				$6.7 \cdot 10^{-9}$	$5.9 \cdot 10^{-8}$
σ_5 , м/с 6					$6.8 \cdot 10^{-10}$
$\sigma_{_V}$, m/c	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$8.1 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$	$4.4 \cdot 10^{-4}$
<i>F</i> ₀ , H	118.09	120.06	119.55	118.68	118.04
δ_F	$8.9 \cdot 10^{-4}$	$8.7 \cdot 10^{-4}$	$9.4 \cdot 10^{-4}$	$1.08 \cdot 10^{-3}$	$1.34 \cdot 10^{-3}$

Таблица 5.1. Результаты обработки данных измерений БИПС при тарировке ДПО

Расчет F_0 выполнен при $m_0 = 7191$ кг. Как видно из таблицы, стандартное отклонение σ_v при переходе от n = 1 к n = 2 уменьшается более чем в пять раз, а при переходе от n = 2 к n = 5 менее чем в два раза. Минимальное значение σ_1 достигается при n = 2, второе по величине – при n = 1. Построенные аппроксимирующие полиномы в случае n > 1 не вполне согласуются с решением (5.1). Некоторые их старшие коэффициенты отрицательны, тогда как в разложении решения (5.1) все коэффициенты при степенях t положительны. Ниже при оценке массы станции используются значения F_0 , полученные при n = 2 и n = 5. Как видно из таблицы, это два крайних случая по значениям v_1 и σ_1 .

Оценим точность определения *F*₀ по формуле (5.7). Дифференциал этой формулы имеет вид

$$\frac{dF_0}{F_0} = \frac{dm_0}{m_0} + \frac{dv_1}{v_1} \,.$$

Полагая, что ошибки в определении величин m_0 и v_1 независимы, относительную ошибку δ_F в определении F_0 на основании последнего соотношения можно представить следующим образом

$$\delta_F = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{v_1^2} + \delta_m^2} \,. \tag{5.9}$$

Здесь δ_m – относительная ошибка в определении m_0 . Приняв $\delta_m = 8.3 \cdot 10^{-4}$, получим для δ_F значения, указанные в табл. 5.1.

Альтернативная оценка F_0 была получена из анализа работы ДПО. Длительный опыт эксплуатации кораблей "Союз" и "Прогресс" дал обширный экспериментальный материал по зависимости тяги ДПО от давлений в баках с топливом и в системе наддува [48]. Анализ телеметрической информации показал, что стабилизация давления в магистралях двигательной установки грузового корабля при коррекции орбиты станции 20.VIII.2005 произошла на 160 секунде. До конца работы двигательной установки давления не практически не менялись. Это позволило заключить, что, начиная со 160 секунды, и до окончания работы двигателей ДПО их тяга составляла $F_0 = 116.1$ Н. Погрешность такого способа оценки тяги составляет $\delta_F = 0.02 \div 0.03$.

5.3. Оценка массы станции

Методика определения массы станции, описанная выше, была реализована четырьмя способами. В способе 1 в формулах (5.1), (5.2) использовались все данные измерений MAMS кажущегося ускорения a, относящиеся к временному интервалу выдачи корректирующего импульса. График этих данных представлен на рис. 5.2. График представляет собой ломаную, ординаты вершин которой суть данные измерений, а абсциссы образуют равномерную сетку с шагом h = 0.1 с.



Рис. 5.2. Данные измерений MAMS. Момент *t* = 0 соответствует 04:24:48 ДМВ 20.08.2004.

В способе 2 в формулы (5.1), (5.2) подставлялись сглаженные значения кажущегося ускорения. Сглаживание выполнялось согласно методике, описанной в п. 1.1. При этом сглаживание данных на рис. 5.2 выполнено при N = 3294, L = 280. График сглаживающего выражения $a_{\rm sm}(t)$ изображен на рис. 5.3 сплошной линией. Пунктирная линия на том же рисунке воспроизводит данные измерений. В способе 2 оценки массы вместо измеренных значений a_n использовались соответствующие сглаженные значения $a_{\rm sm}(t_n)$.



Рис. 5.3. Сглаживание данных измерений MAMS. Момент *t* = 0 соответствует 04:24:48 ДМВ 20.08.2004.

Способы 3 и 4 поясняются графиком функции q(t) на рис. 5.4. Напомним, эта кусочно-постоянная функция задает число ДПО, задействованных в момент времени t. Сравнение графиков на рис 5.3 и 5.4 показывает, что в формулах (5.1), (5.2) целесообразно оставить лишь значения ускорения a_n , для которых $q(t_n) = \max q(t) = 8$. Во-первых, суммарная тяга ДПО на этих участках наиболее стабильна; во-вторых, калибровка ДПО проводилась при одновременной работе именно восьми двигателей. В способе 3 в формулах (5.1), (5.2) учитывались лишь измерения a_n , 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 a_n использовались сглаженные значения $a_{\rm sm}(t_n)$.



Рис. 5.4. Число работающих ДПО. Момент *t* = 0 соответствует 04:24:48 ДМВ 20.08.2004.

Результаты определения массы станции четырьмя описанными способами приведены в табл. 5.2 – 5.4. Табл. 5.2 построена при $F_0 = 118.04$ н $\delta_F = 1.3 \cdot 10^{-3}$, табл. 5.3 – при $F_0 = 120.06$ н и $\delta_F = 8.7 \cdot 10^{-4}$, табл. 5.4 – при $F_0 = 116.1$ н $\delta_F = 0.02$. Расчеты для таблиц 5.2, 5.3 выполнялись с одинаковыми наборами величин a_n и $a_{\rm sm}(t_n)$, поэтому значения N и σ в этих таблицах совпадают. В расчетах для табл. 5.4 учитывались лишь те a_n или $a_{\rm sm}(t_n)$, для которых $t_n > 160$ с. В частности, в способах 3 и 4 учитывались данные, относящиеся к пяти из десяти упоминавшихся выше интервалов постоянства функции q(t).

Способ	N	σ , м/с 2	М, кг	δ_M	δ°_M
1	3124	$1.4 \cdot 10^{-6}$	187668	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$
2		$1.3 \cdot 10^{-6}$	188434	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$
3	629	$1.0 \cdot 10^{-6}$	182120	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$6.5 \cdot 10^{-3}$
4		$6.1 \cdot 10^{-7}$	182053	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$6.9 \cdot 10^{-3}$

Таблица 5.2. Определение массы при $F_0 = 118.04$ H, $\delta_F = 1.3 \cdot 10^{-3}$.

Таблица 5.3. Определение массы при $F_0 = 120.06$ H, $\delta_F = 8.7 \cdot 10^{-4}$.

Способ	N	σ, м/c ²	М, кг	δ_M	δ°_M
1	3124	$1.4 \cdot 10^{-6}$	190878	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$4.1 \cdot 10^{-2}$
2		$1.3 \cdot 10^{-6}$	191657	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-2}$
3	629	$1.0 \cdot 10^{-6}$	186235	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
4		$6.1 \cdot 10^{-7}$	185167	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$

Таблица 5.4. Определение массы при $F_0 = 116.1$ H, $\delta_F = 0.02$.

Способ	N	σ, м/c ²	M, кг	δ_M	δ°_M
1	1527	$1.5 \cdot 10^{-6}$	184514	$2.01 \cdot 10^{-2}$	$6.6 \cdot 10^{-3}$
2		$1.1 \cdot 10^{-6}$	185154	$2.01 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
3	370	$1.9 \cdot 10^{-6}$	182376	$2.02 \cdot 10^{-2}$	$5.1 \cdot 10^{-3}$
4		$1.3 \cdot 10^{-6}$	182237	$2.01 \cdot 10^{-2}$	$5.9 \cdot 10^{-3}$

Рассмотрим сначала табл. 5.2, 5.3. Указанная в них относительная погрешность δ_M рассчитана по формулам (5.4), (5.8). По результатам проведенной перед описываемым экспериментом инвентаризации проектное значение массы станции (вместе с ТГК "Прогресс") на момент начала выдачи корректирующего импульса 20.VIII.2004 г. составляло $M^\circ = 183311$ кг [52]. 193

Если считать это значение точным, то фактическую относительную погрешность определения массы станции можно оценить, как $\delta_M^{\circ} = |M - M^{\circ}|/M^{\circ}$. Значения δ_M° также приведены в таблицах. Согласно таблицам, способы 1 и 2 обеспечивают точность определения массы в несколько процентов. Следует отметить, что использование при вычислении F_0 полинома второй степени дает практически те же значения M, что и пятой степени, но с меньшей погрешностью δ_M . Так в случае полинома второй степени для способов 1 и 2 имеем $\delta_M = 2.4 \cdot 10^{-3}$ и $\delta_M = 2.2 \cdot 10^{-3}$ соответственно; в случае полинома пятой степени для тех же способов $\delta_M = 2.7 \cdot 10^{-3}$ и $\delta_M = 2.4 \cdot 10^{-3}$ (см. табл. 5.2). С другой стороны, использование полинома пятой степени при оценке δ_M° дает гораздо лучшие результаты по сравнению с полиномом второй степени. Так в случае полинома пятой степени. Так в случае полинома пятой степени для тех же способов 1 и 2 имеем $\delta_M^{\circ} = 2.4 \cdot 10^{-2}$ и $\delta_M^{\circ} = 2.8 \cdot 10^{-2}$ соответственно; в случае полинома второй степени. Так в случае полинома пятой степени для тех же способов 1 и 2 имеем $\delta_M^{\circ} = 2.4 \cdot 10^{-2}$ и $\delta_M^{\circ} = 2.8 \cdot 10^{-2}$ соответственно; в случае полинома второй степени для тех же способов $\delta_M^{\circ} = 4.1 \cdot 10^{-2}$ и $\delta_M^{\circ} = 4.6 \cdot 10^{-2}$.

Способы 3 и 4 оказались заметно точнее способов 1 и 2. Погрешность δ_M способа 4 при значениях $F_0 = 118.04$ Н и $F_0 = 120.06$ Н оказалась всего 0.16 % и 0.13 %, погрешность δ_M° не превысила 1 %.

Перейдем к табл. 5.4. Приведенные в ней оценки массы станции ближе к M° , чем в табл. 5.2, 5.3. В частности, способ 3 дал $\delta_M^{\circ} = 0.5\%$. К сожалению, значение $\delta_F = 0.02$, обусловленное конструкцией двигательной установки, нельзя уменьшить, поэтому оценки δ_M в данном случае значительно хуже соответствующих оценок, приведенных в табл. 5.2, 5.3.

В процессе уточнения реального значения тяги ДПО ТГК были получены два крайних значения, определяющих разброс возможных экспериментальных оценок массы МКС. Теоретическая оценка значения массы станции находится в полученном интервале значений. Таким образом, удалось проверить и подтвердить теоретическую оценку массы станции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Систематически исследованы микроускорения на борту МКС в малоизученном частотном диапазоне 0.01÷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.

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.

Обработаны результаты экспериментов по уточнению массы МКС на основании измерений микроускорений. Использованы измерения микроус-корения 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 %.

Литература

- 1. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1968.
- Бабкин Е.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Обыденников С.С., Сазонов В.В., Стажков В.М. Первые результаты определения микроускорений на российском сегменте международной космической станции, препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2001, № 83.
- 3. Бабкин Е.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Обыденников С.С., Сазонов В.В., Стажков В.М. Измерение и моделирование микроускорений на МКС // Труды XXXVI научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Казань: "Унипресс", - 2002.
- 4. Бабкин Е.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Сазонов В.В., Стажков В.М. Определение квазистатической компоненты микроускорения, возникающего на борту Международной космической станции // Космические исследования. 2004. Т. 42. № 2, С. 162-171.
- 5. Бабкин Е.В., Беляев М.Ю., Крикалев С.К., Марков А.В., Рябуха С.Б., Стажков В.М. Технические эксперименты на борту МКС по измерению фоновых микровозмущений // Материалы XLII научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Калуга: ИД "Эйдос", - 2007.
- Бабушкин И.А., Богатырев Г.П., Глухов А.Ф., Путин Г.Ф. и др. Изучение тепловой конвекции и низкочастотной микрогравитации на орбитальном комплексе *Мир* при помощи датчика «Дакон» // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 2. С. 161-169.
- Банит Ю.Р., Завалишин Д.А., Стажков В.М. Оценка динамических параметров орбитальных станций в полете // Материалы IX Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, Нижний Новгород, 22-28 августа 2006.
- 8. Беляев М.Ю., Брюханов Н.А., Рябуха С.Б., Стажков В.М., Лукьящен-

ко А.В., Обыденников С.С. Микровозмущения, возникающие в процессе эксплуатации Российского сегмента Международной космической станции // Космонавтика и ракетостроение. 2007. №1(46).

- Беляев М.Ю., Завалишин Д.А., Егоров Н.А., Спаржин 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.
- 10.Беляев М.Ю., Зыков С.Г., Рябуха С.Б., Сазонов В.В., Сарычев В.А., Стажков В.М. Математическое моделирование и измерение микроускорений на орбитальной станции "Мир" // Известия Академии наук. Механика жидкости и газа. 1994. Т.29. № 5. С. 594-601.
- 11.Бессонов О.А., Полежаев В.И. Математическое моделирование конвекции в датчике «Дакон» в условиях реального космического полета // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 2. С. 170-178.
- 12. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Выпуск 1. М.: Мир, 1974.
- 13. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М., Наука, 1973, 350стр.
- 14.Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, М.: Физматгиз, 1963, 708 с.
- 15. Гидромеханика и тепломассообмен в невесомости, М.: Наука, 1982.
- 16.Глухов А.Ф., Порошин Д.В. Отчет по экспериментам с моделью датчика конвекции «Дакон-М» с целью отработки технологии и идеологии управления свойствами газовой среды в конвективной камере датчика при помощи изменения давления // ПГУ. Кафедра общей физики. Пермь. 2004. 9с.
- 17.Завалишин Д.А. Уточнение динамических характеристик МКС в полете // Труды XL 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.

- 18. 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.
- 19.3авалишин 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.
- 20. 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.
- 21. 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.
- 22. 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.
- 23. 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.
- 24.3юзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И., Путин Г.Ф., Соболева Е.Б. Конвективные движения околокритических жидкостей в условиях реальной невесомости // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 2. С. 188-200.
- 25.Калашников Ф.К., Левтов В.Л., Лесков Л.В., Романов В.В. Система виброзащиты бортовой технологической аппаратуры // Известия Академии наук. Механика жидкости и газа. 1994. № 5. С. 15-21.

- 26.*Карман Т., Био М.* Математические методы в инженерном деле. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1948.
- 27.Крикалев С.К., Беляев М.Ю., Марков А.В., Рябуха С.Б., Стажков В.М., Бабкин Е.В. Влияние физических упражнений экипажа МКС на микрогравитационную обстановку в Российском сегменте станции // Труды XLII научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Калуга: ИД "Эйдос", - 2007.
- 28. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. М.: Физматгиз, 1961.
- 29. Левтов В.Л., Романов В.В., Иванов А.И., Рябуха С.Б., Сазонов В.В. Результаты летно-космических испытаний виброзащитной платформы ВЗП-1К на станции "Мир", препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2000, № 46.
- 30.Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1958.
- 31. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач методом наименьших квадратов. М.: Наука, 1986.
- 32. *Маркеев А.П.* Теоретическая механика: Учебное пособие для университетов. М.: Наука, 1990.
- 33.Навигационное обеспечение полета орбитального комплекса "Салют-6" – "Союз" – "Прогресс". – М.: Наука, 1985.
- 34.Никитин С.А., Полежаев В.И., Сазонов В.В. Об измерении квазистатической компоненты микроускорения на борту ИСЗ с помощью датчика конвекции // Космические исследования. – 2001. Т. 39, № 2, с. 179-187.
- 35.*Никитин С.А., Полежаев В.И., Сазонов В.В.* О влиянии микроускорений на распределение примеси в расплаве полупроводника в космическом полете // Космические исследования. 2003. Т. 41. № 5. С. 533-548.
- 36. Отнес Р. Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982.

- 37.Полежаев В.И., Белло М.С., Верезуб Н.А. и др. Конвективные процессы в невесомости. М.: Наука, 1991, 240 с.
- 38.Полежаев В.И., Никитин С.А., Горбунов А.А. и др. "Математическое моделирование конвекции и теплообмена в датчике "Дакон-М", разработанном для реализации на РС МКС КЭ "Изгиб" с использованием НА "Дакон-М", научно-технический отчет по ОКР, ИПМех РАН, №4-06, 2006.
- 39.Путин Г.Ф., Глухов А.Ф. и др. Результаты летно-космических испытаний датчика конвекции "Дакон" // Космические исследования. 2001.
 Т.39. № 2.
- 40.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.
- 41.*Сазонов В.В., Зыков С.Г.* Микроускорения на борту ИСЗ. Анализ и использование данных измерений бортовых акселерометров, препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 1995, №79.
- 42.*Сазонов В.В., Зыков С.Г.* Расчет и измерение низкочастотной составляющей микроускорения на борту ИСЗ, препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 1996, № 31.
- 43.*Сазонов В.В., Комаров М.М., Беляев М.Ю., Зыков С.Г., Стажков В.М.* Оценка квазистатической компоненты микроускорения на борту искусственного спутника Земли, препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 1995, № 45.
- 44.Сазонов В.В., Комаров М.М., Полежаев В.И., Никитин С.А., Ермаков М.К., Зыков С.Г., Стажков В.М., Рябуха С.Б., Асеведо Х., Либерман Е. Микроускорения на орбитальной станции "Мир" и оперативный анализ гравитационной чувствительности конвективных процессов тепло-массопереноса // Космические исследования. 1999. Т. 37. № 1. С. 86-101.
- 45.Сазонов В.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Стажков В.М., Бабкин Е.В.

Определение квазистатической компоненты микроускорения на станции «Мир» // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 2. С. 136-147.

- 46. Сарычев В.А., Сазонов В.В., Савченко В.В., Тарнопольский В.И. О некоторых периодичностях в движении кометы Галлея относительно центра масс, препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 1987, № 133.
- 47.Семенов Ю.П., Григорьев Ю.И., Соловьев В.А., Благов В.Д., Курилов В.А., Бодин Н.Б., Ковтун В.С., Почукаев В.Н., Поляков В.С. Способ определения массы сборки космических объектов в процессе изменения параметров орбиты. Авторское свидетельство RU 2098326 C1.
- 48. Синярев С.Б., Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. М.: Оборонпром, 1957.
- 49. *Теребиж В.Ю*. Анализ временных рядов в астрофизике. М.: Наука, 1992.
- 50.Babkin E.V., Beliaev M.Yu., Efimov N.I., Zavalishin D.A., Sazonov V.V. Investigation of microgravity environment in ISS Service Module// Proceedings of the 17th International Symposium on Space Flight Dynamics. Moscow, Russia, June 16-20, 2003.
- 51.*Bogatyryov G.P., Putin G.F., Ermakov et al.* A system for analysis and measurement of convection aboard space station: objectives, mathematical and ground-based modelling/ AIAA 95-0890, 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan. 9-12, 1995, Reno, NV.
- 52.International Space Station. On-Orbit Assembly, Modeling and Mass Properties Data Book. JSC 26557 Revision AF, Volume 1, NASA.
- 53.Jules K., McPherson K., Hrovat K., Kelly E., Reckart T. International Space Station Increment-2, Microgravity Environment, Summary Report, May to August 2001. Microgravity Measurement and Analysis Project; Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, National Aeronautics and Space Administration.
- 54. Jules K., McPherson K., Hrovat K., Kelly E., Reckart T., Grodsinksy C. In-

ternational Space Station Increment-3. Microgravity Environment Summary Report, August to December 2001, Microgravity Environment Program, National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio.

- 55. Jules K., McPherson K., Hrovat K., Kelly E., Reckart T. International Space Station Increment-4/5, Microgravity Environment Summary Report, December 2001 to December 2002. Microgravity Environment Program, National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio.
- 56.Jules K., McPherson K., Hrovat K., Kelly E., Reckart T. International Space Station Increment-6/8, Microgravity Environment Summary Report, November 2002 to April 2004. Microgravity Environment Program, National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio.
- 57.Jules K., Hrovat K., Kelly E., McPherson K., Reckart T. A Status Report On The Characterization Of The Microgravity Environment Of The International Space Station, Acta Astronautica, Volume 55, Issues 3-9, August-November 2004, Pages 335-364.
- 58.Naumann R.J., Haulenbeek G., Kawamura H., Matsunaga K. A New Concept for Measuring Quasi-steady Microgravity Accelerations. Proc. First Internat. Symp. on Microgravity. Research & Applications in Physical Sciences and Biotechnology. 10-15 Sept. 2000. Sorrento, Italy (ESA SP-454, January 2001), 835-843.
- 59. *Polezhaev V.I.* Convection and Heat/Mass Transfer Processes under Space Flight Conditions // Fluid Dynamics, Vol. 41, No. 5, 2006, pp. 736–754.
- 60.Ulrich T.J., Bishop T.N. Maximum Entropy Spectral Analysis and Autoregressive Decomposition. Reviews of geophysics and space physics, 1975, vol. 12, No. 1, p. 183-200.