



**Завалишин Д.А., Беляев М.Ю.,
Сазонов В.В.**

Определение характерных
частот упругих колебаний
конструкции международной
космической станции

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В. Определение характерных частот упругих колебаний конструкции международной космической станции // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2008. № 86. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2008-86>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
им. М.В. Келдыша

Д.А.Завалишин, М.Ю.Беляев, В.В.Сазонов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ЧАСТОТ
УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ
СТАНЦИИ**

Москва - 2008

Аннотация

Описаны результаты исследования свободных колебаний конструкции Международной космической станции (МКС), возникающих во время стыковки космических кораблей со станцией, их отстыковки от станции и в результате срабатывания двигателей системы ориентации Служебного модуля (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.

D.A.Zavalishin, M.Yu.Belyaev, V.V.Sazonov. Estimation of typical frequencies of elastic oscillations of the International Space Station body. We describe the results of the investigation of free oscillations of the International Space Station (ISS) body. These oscillations appeared during docking or undocking of the spacecrafts and as a result of firing of thrusters of the Service Module (SM) attitude control system. The investigation was realized basing on the measurements of the low-frequency accelerometer MAMS. We picked out 14 segment of data for the investigation. All these segments were obtained in 2005 and 2006. Then we analyzed on those data segments only subsegments that corresponded to the process of free elastic oscillations of the station body. The typical frequencies of such oscillations and corresponding damping constants were estimated. The comparative analysis of the results received for the different docking units and for the different SM thrusters sets was carried out.

1. Низкочастотные микроускорения на МКС. Низкочастотный акселерометр MAMS установлен в модуле Lab Американского сегмента МКС. Показания этого прибора использованы ниже для определения характерных частот упругих колебаний конструкции станции. MAMS измеряет кажущееся ускорение в собственной системе координат $z_1 z_2 z_3$, направления осей которой в строительной системе $x y z$ СМ задаются формулами $z_1 = -x$, $z_2 = -y$ и $z_3 = z$. Обе эти системы — правые, декартовы. Ось x параллельна продольной оси СМ и направлена от его агрегатному отсека к переходному отсеку, ось y 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. Почти все сколь угодно значимые возмущения имеют частоты менее 2 Гц.

Свободные колебания корпуса станции достаточно точно аппроксимируются свободными колебаниями линейной системы с конечным числом степеней свободы [1]. С учетом этого обстоятельства будем считать, что каждая векторная компонента n_x , n_y или n_z показаний MAMS имеет вид

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

Здесь t_0 , μ_k , ν_k и C_j — постоянные коэффициенты, C_0 учитывает постоянное смещение в данных измерений. В выражении (1) наибольший интерес представляют коэффициенты μ_k и ν_k , характеризующие свойства колебательной системы.

Построение аппроксимирующих выражений (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 данных, 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. Поддержание ориентации станции российскими средствами заключается в периодическом включении двигателей ориентации СМ или двигателей причаливания и ориентации транспортного грузового корабля "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 и включаются через несколько минут после ее окончания. Поэтому непосредственно перед контактом корабля и станции при стыковке или сразу после отхода корабля при отстыковке имеется промежуток времени, на котором станция с кораблем не связана 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 промежутках всех указанных типов, а чтобы полнее характеризовать эти промежутки, приводятся графики данных на достаточно продолжительных временных интервалах, включающих контакты кораблей со станцией и срабатывания реактивных двигателей.

2. Описание исследуемых данных. Для исследования были выбраны 14 отрезков данных MAMS, полученных в период с марта 2005 по июнь 2006 гг. На 7 соответствующих отрезках времени происходила отстыковка космических кораблей от станции, на 3 отрезках космические корабли стыковались со станцией, на 4 отрезках происходило срабатывание двигателей СМ (см. табл. 1, 2). На всех этих 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 шаттлов осуществляется к стыковочному узлу РМА-2 Американского сегмента (РМА — Pressurized Mating Adapter). Отобранные отрезки данных распределены следующим образом. Каждому стыковочному порту Российского сегмента отвечают по два отрезка (отрезки 1 — 6). Узлу РМА-2 отвечают четыре отрезка: две стыковки и две отстыковки (отрезки 7 — 10). Кроме того на двух временных интервалах 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. 1а, 2а, ..., 7а графиками компонент кажущегося ускорения n_x , n_y и n_z . Выделенные на этих отрезках участки, отвечающие свободным колебаниям, указаны на графиках отрезками горизонтальных прямых.

Общие сведения о выбранных отрезках данных, отвечающих стыковкам и отстыковкам кораблей, приведены в табл. 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 приве-

дены общие сведения об отрезках данных, полученных между 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 x , y или z соответственно. В табл. 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.

3. Методика исследования. Поиск характерных частот упругих колебаний конструкции МКС по отобраным отрезкам данных осуществлялся в три этапа. На первом этапе данные каждого отрезка непосредственно аппроксимировались выражением (1). При этом обычно 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 спектрального анализа. Заметим, что при изучении затухающих колебаний вида (1) спектральный анализ имеет ограниченное применение [2]. Оценки частот ν_k , полученные из анализа спектров, служили лишь первым приближением при решении нелинейной задачи метода наименьших квадратов по построению выражения (1). Такой способ отыскания первого приближения оказалось эффективным.

На втором этапе из исходных данных измерений вычитались значения выражения (1), построенного на первом этапе. Из полученного ряда остатков выбирался подынтервал, на котором высокочастотные колебания проявлялись наиболее заметно. Такой подынтервал назывался укороченным рядом остатков. Укороченный ряд также аппроксимировался выражением (1), но с более высокими частотами, чем на первом этапе. Здесь удавалось выявить колебания со сравнительно высокими частотами — более 0.85 Гц. Такие колебания быстро затухают и имеют, как правило, малые амплитуды, что существенно 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 назывался отрезком окончательной обработки. На нем опять строилось выражение (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 ν_k , при этом оказывалась обычно 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 (1) выполнялось методом наименьших квадратов, точность определения коэффициентов 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, по-видимому, не выполнены.

4. Результаты построения аппроксимации. Результаты первого этапа построения аппроксимирующих выражений (1) на выбранных отрезках данных приведены в табл. 3 — 10. В табл. 3 для каждого отрезка и векторной компоненты ускорения указаны число N обнаруженных гармоник в выражении (1) и оценка σ стандартного отклонения ошибок аппроксимации данных этим выражением. В табл. 4 — 10 приведены оценки соответствующих параметров μ_k , ν_k , $A_k = \sqrt{C_{2k-1}^2 + C_{2k}^2}$ и их стандартные отклонения $\sigma_{\mu k}$, $\sigma_{\nu k}$, $\sigma_{A k}$. Для простоты письма индексы k в таблицах опущены. Величины ν_k и $\sigma_{\nu k}$ выражены в герцах, единицей измерения величин μ_k и $\sigma_{\mu k}$ служит c^{-1} , величин A_k , $\sigma_{A k}$ и σ — 10^{-3} м/с^2 .

Каждая из табл. 4 — 10 содержит характеристики двух отрезков данных. В случае табл. 4 — 8 эти отрезки относятся к одному и тому же стыковочному узлу. В случае табл. 9, 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.

Примеры аппроксимирующих выражений (1), построенных на первом этапе, приведены на рис. 1б, 2б, ..., 7б. Графики этих выражений изображены сплошной жирной линией, тонкой пунктирной линией с маркерами указаны данные измерений. Представленные на этих рисунках отрезки данных выделены из отрезков на соответствующих рис. 1а, 2а, ..., 7а. В случае компоненты n_x на отрезках 2 — 5, 7 — 12, компоненты n_y на отрезках 2, 5, 7 — 9, 11 и компоненты n_z на отрезках 1, 5, 8, 9, 12 первый этап построения аппроксимирующего выражения (1) дал окончательный результат.

Второй и третий этапы были выполнены для рядов остатков компоненты n_x отрезков 1 и 6, компоненты n_y отрезков 1, 3, 4, 6 и 10, компоненты n_z отрезков 2, 4, 6, 7 и 10 — 12. Результаты представлены в табл. 11 — 25 и на рис. 8 — 15. Таблицы устроены аналогично табл. 1 — 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 , ν_k , A_k и их стандартные отклонения. Для сравнения в табл. 11 — 25 повторены результаты первого этапа.

Рис. 8 — 15 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 значений аппроксимирующего выражения (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 (1) изображен жирной линией, график аппроксимируемых остатков — тонкой линией с маркерами. В нижней части рисунка помещены графики, представляющие результат третьего этапа. Жирной линией изображен график выражения (1), построенного на отрезке окончательной обработки, тонкой линией с маркерами — исходные данные MAMS.

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

5. Анализ 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, 0.4 Гц, 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 y , 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 $1.25 \div 1.35$ Гц (отрезки 1 — 4, первый и второй этап), частота 1.46 Гц (отрезок 4, первый этап), диапазон $1.57 \div 1.637$ 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 $1.633 \div 1.811$ Гц. Таким образом, частотный диапазон этих колебаний сдвинут несколько вправо по сравнению с диапазоном $1.57 \div 1.637$ 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 0.645 Гц, на отрезке 10 доминирует возмущение на частоте 0.489 Гц. В данных n_y основное возмущение на отрезка 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 $0.437 \div 0.471$ и $0.705 \div 0.834$ Гц. В данных n_z на отрезках 9, 10 также наблюдаются сильные возмущения в диапазоне частот $0.20 \div 0.53$ Гц. Данный диапазон включает в себя привычный диапазон частот $0.3 \div 0.4$ 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 [3].

Кроме указанных выше в данных отрезков 7 — 10 обнаружены также возмущения в частотных диапазонах $1.004 \div 1.1$ Гц, $1.43 \div 1.47$ Гц и $1.937 \div 2.085$ 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 $0.729 \div 0.764$ Гц. В данных n_z на отрезках 11 и 12, в отличие от отрезков 13 и 14, снова доминируют колебания в диапазоне $0.946 \div 0.951$ Гц, а также обнаружены возмущения на частотах 0.426 и 0.797 Гц.

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

Помимо приведенных частот, на отрезках 11, 13 в данных n_x и n_y на

первом этапе были выявлены характерные возмущения в диапазоне $1.216 \div 1.265$ Гц. На отрезках 11, 12 в данных n_y и n_z на втором этапе были найдены колебания с частотами $1.640 \div 1.667$ Гц.

Сопоставим полученные данные. Во время отстыковки процесс отталкивания и отхода корабля не происходит мгновенно. Кроме того, пружины отталкивателя 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 включения 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 [3].

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 $0.365 \div 0.432$ Гц и $0.733 \div 0.748$ Гц, для данных n_y — диапазоны $0.312 \div 0.432$ Гц и $0.701 \div 0.769$ Гц, для данных n_z — диапазоны $0.426 \div 0.471$ Гц и $0.705 \div 0.907$ 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 $1.7 \div 1.8$ Гц.

В случае стыковки шаттлов несколько увеличиваются по сравнению с российскими кораблями выявленные характерные частоты. Для шаттлов эти частоты лежат в диапазоне $0.197 \div 2.085$ Гц, для российских кораблей — в диапазоне $0.173 \div 1.94$ 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 $0.312 \div 0.382$ и $0.729 \div 0.770$ Гц. В случае работы двигателей по каналам К и Р значительную роль играют колебания в диапазоне частот $0.946 \div 0.951$ 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 диапазоне $1.216 \div 1.35$ Гц, $1.43 \div 1.47$ Гц и $1.57 \div 1.811$ Гц. При этом в данных компонент n_y и n_z удастся обнаружить более высокочастотные возмущения чем в данных компоненты n_x .

Рассмотрим теперь коэффициенты затухания колебаний μ_k , отвечающие наиболее часто встречающимся частотам ν_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 $0.042 \div 0.056 \text{ с}^{-1}$. Для стыковочного узла ФГБ — в интервале $0.05 \div 0.062 \text{ с}^{-1}$. 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 $0.019 \div 0.024 \text{ с}^{-1}$, что близко к значению, полученному для порта СМ. В случае измерений компоненты n_z этот коэффициент лежит в интервале $0.045 \div 0.084 \text{ с}^{-1}$. На отрезках стыковки шаттлов со станцией частота колебаний сдвигается вправо, а коэффициент затухания лежит в интервале $0.08 \div 0.6 \text{ с}^{-1}$. На отрезках срабатывания двигателей коэффициент затухания колебания находится в интервале $0.2 \div 0.4 \text{ с}^{-1}$.

Рассмотрим распределение значений коэффициентов затухания колебаний на частоте около 0.75 Гц. В случае российских кораблей эти значения лежат в диапазоне $0.075 \div 0.15 \text{ с}^{-1}$, в случае шаттлов — в диапазоне $0.02 \div 0.14 \text{ с}^{-1}$. 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 $0.07 \div 0.12 \text{ с}^{-1}$. 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_x и n_y лежат в интервале $0.06 \div 0.1 \text{ с}^{-1}$, для данных n_z этот коэффициент лежит в интервале $0.17 \div 0.29 \text{ с}^{-1}$.

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 $0.2 \div 0.4 \text{ с}^{-1}$.

Данная работа выполнена в рамках технического эксперимента "Среда МКС", проводимого на борту станции в соответствии с Российской программой научно-технических экспериментов, а также при поддержке РФФИ (проект 08-01-004467).

Литература

- [1] Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1968.
- [2] Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Выпуск 1. М.: Мир, 1974.
- [3] Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В. Применение данных акселерометра MAMS при оценке динамических характеристик МКС. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2005, № 101.

Таблица 1. Динамические операции на отрезках 1 – 10

Отрезок	Дата	Время начала операции	Стыков. узел	КА	Операция
1	2005.09.07	13:25:57	СМ	ТГК М53	Отстыковка
2	2006.03.03	13:06:10	СМ	ТГК М54	Отстыковка
3	2006.06.19	17:06:50	Пирс	ТГК М55	Отстыковка
4	2006.06.26	19:24:36	Пирс	ТГК М57	Стыковка
5	2005.04.24	21:44:40	ФГБ	ТК ТМА5	Отстыковка
6	2005.07.19	14:07:59	ФГБ	ТК ТМА6	Стыковка
7	2005.08.06	10:24:00	РМА-2	STS-114	Отстыковка
8	2006.07.15	13:07:46	РМА-2	STS-121	Отстыковка
9	2005.07.28	14:17:35	РМА-2	STS-114	Стыковка
10	2006.07.06	17:51:45	РМА-2	STS-121	Стыковка

Таблица 2. Времена выключения двигателей СМ на отрезках 11 – 14

Отрезок	Дата	Времена выключения двигателей СМ		
		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

Таблица 3. Характеристики отрезков, анализируемых на первом этапе

Отрезок	Компонента ускорения	t_0	M	N	s
1	n_x	13:26:12.898	430	1	0.109
	n_y	13:26:15.098	405	2	0.203
	n_z	13:26:11.000	64	4	0.049
2	n_x	13:06:35.391	640	1	0.061
	n_y	13:06:29.793	715	2	0.174
	n_z	13:06:32.094	88	4	0.111
3	n_x	17:06:55.047	70	4	0.109
	n_y	17:06:53.945	300	2	0.372
	n_z	17:06:56.645	160	1	0.261
4	n_x	19:24:54.742	100	4	0.347
	n_y	19:24:54.141	300	2	0.713
	n_z	19:25:01.336	240	2	0.138

Таблица 3 (продолжение). Характеристики отрезков, анализируемых на первом этапе.

Отрезок	Компонента ускорения	t_0	M	N	S
5	n_x	21:44:57.664	400	1	0.141
	n_y	21:44:56.496	400	1	0.429
	n_z	21:44:58.664	51	2	0.192
6	n_x	14:08:15.418	480	2	0.072
	n_y	14:08:46.211	230	1	0.106
	n_z	14:08:31.918	220	2	0.063
7	n_x	10:24:02.328	600	2	0.046
	n_y	10:24:03.328	600	2	0.190
	n_z	10:24:02.926	100	2	0.091
8	n_x	13:07:57.844	700	1	0.097
	n_y	13:07:56.445	700	1	0.248
	n_z	13:08:00.648	156	2	0.080
9	n_x	14:17:37.488	50	1	0.459
	n_y	14:17:38.891	84	4	0.529
	n_z	14:17:37.891	61	3	0.730
10	n_x	17:52:03.609	64	3	0.579
	n_y	17:52:05.508	150	3	1.194
	n_z	17:52:04.609	55	3	1.407
11	n_x	9:48:39.711	64	4	0.032
	n_y	9:48:40.402	76	4	0.076
	n_z	9:48:41.602	60	3	0.176
12	n_x	10:00:42.895	190	3	0.028
	n_y	10:00:43.992	190	2	0.075
	n_z	10:00:45.992	51	3	0.128
13	n_x	15:25:28.586	250	4	0.054
	n_y	15:25:28.785	100	3	0.285
	n_z	15:25:30.785	120	1	0.241
14	n_x	17:17:31.766	200	2	0.057
	n_y	17:17:32.566	196	2	0.133
	n_z	17:17:31.766	110	1	0.343

Таблица 4. Результаты первого этапа для стыковочного порта в корме СМ.

Компонента ускорения	Отрезок 1										Отрезок 2						
	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m	
n_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	
n_y	0.203	405	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	
			0.739	0.006	0.923	0.071	0.075	0.0060			0.701	0.012	0.789	0.077	0.122	0.0117	
n_z	0.049	64	-	-	-	-	-	-	0.111	88	-	-	-	-	-	-	-
			0.564	0.096	0.118	0.040	0.222	0.0919			0.173	0.119	0.244	0.109	0.267	0.0969	
			-	-	-	-	-	-			0.412	0.031	0.274	0.064	0.026	0.0349	
			-	-	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-	-
			0.907	0.018	0.661	0.043	0.204	0.0166			0.722	0.022	0.671	0.078	0.145	0.0216	
1.278	0.039	0.224	0.036	0.147	0.0402	0.944	0.075	0.151	0.068	0.100	0.0759						
1.789	0.041	0.179	0.031	0.118	0.0400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

Таблица 5. Результаты первого этапа для стыковочного узла "Пирс".

Компонента ускорения	Отрезок 3										Отрезок 4					
	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m
n_x	0.109	70	0.380	0.033	0.364	0.063	0.045	0.0325	0.347	100	0.392	0.042	0.636	0.176	0.073	0.0410
			0.759	0.044	0.426	0.084	0.162	0.0461			0.712	0.035	0.576	0.161	0.021	0.0370
			1.043	0.012	1.790	0.086	0.203	0.0116			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
n_y	0.372	300	0.384	0.006	0.136	0.115	0.042	0.0060	0.713	300	0.382	0.009	1.708	0.236	0.056	0.0100
			0.765	0.018	3.024	0.231	0.240	0.0183			0.728	0.005	5.643	0.284	0.094	0.0050
n_z	0.261	160	0.745	0.007	2.344	0.119	0.115	0.0070	0.138	240	0.745	0.006	0.810	0.052	0.077	0.0060
			-	-	-	-	-	-			1.463	0.020	0.489	0.067	0.146	0.0210

Таблица 6. Результаты первого этапа для стыковочного порта ФГБ.

Компонента ускорения	Отрезок 5										Отрезок 6					
	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m
n_x	0.141	400	0.389	0.001	1.974	0.044	0.054	0.0013	0.072	480	0.387	0.004	0.439	0.043	0.050	0.0041
			-	-	-	-	-	0.413			0.007	0.183	0.039	0.034	0.0073	
n_y	0.429	400	0.391	0.002	5.368	0.139	0.062	0.0017	0.106	230	0.400	0.004	0.796	0.038	0.060	0.0039
			-	-	-	-	-	0.441			0.008	0.215	0.022	0.052	0.0008	
n_z	0.192	51	-	-	-	-	-	-	0.063	220	0.778	0.033	0.098	0.028	0.109	0.0327
			0.851	0.037	1.009	0.130	0.151	0.0403			-	-	-	-	-	-
			1.619	0.057	0.763	0.137	0.207	0.0607			-	-	-	-	-	-

Таблица 7. Результаты первого этапа для стыковочного узла РМА-2.

Компонента ускорения	Отрезок 7										Отрезок 8					
	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m
n_x	0.046	600	0.387	0.001	0.503	0.010	0.024	0.0006	0.097	700	0.377	0.001	0.655	0.020	0.019	0.0008
			0.734	0.005	0.408	0.019	0.103	0.0005			-	-	-	-	-	-
n_y	0.190	600	0.387	0.001	1.576	0.042	0.023	0.0008	0.248	700	0.377	0.001	2.038	0.050	0.019	0.0006
			0.733	0.004	2.189	0.081	0.113	0.0042			-	-	-	-	-	-
n_z	0.091	100	0.437	0.005	0.605	0.035	0.084	0.005	0.080	156	0.471	0.013	0.242	0.031	0.045	0.0118
			0.752	0.008	0.138	0.022	0.020	0.007			0.705	0.005	0.643	0.032	0.057	0.0052

Таблица 8. Результаты первого этапа для стыковочного узла РМА-2.

Компонента ускорения	Отрезок 9										Отрезок 10							
	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m		
n_x	0.459	50	-	0.645	0.033	9.510	0.464	0.607	0.0279	0.579	64	0.489	0.047	10.82	1.537	0.598	0.0577	
			-	-	-	-	0.845	0.057	3.371			4.287	3.100	4.3480				
			-	0.264	0.039	3.807	0.672	0.217	0.0361			1.200	0.105	2.314	0.853	0.321	0.0941	
n_y	0.529	84	-	0.437	0.021	4.917	0.571	0.137	0.0195	1.194	150	0.322	0.026	8.250	3.414	0.536	0.2332	
			0.671	0.067	0.746	0.342	0.058	0.0764	0.479			0.168	4.033	6.724	0.446	0.6898		
			0.901	0.049	1.079	0.307	0.066	0.0442	-			-	-	-	-	-	-	-
			0.228	0.283	0.147	7.009	1.362	0.4042	0.197			0.275	6.536	8.393	0.294	0.3829		
n_z	0.730	61	-	0.531	0.142	1.627	1.318	0.258	0.2020	1.407	55	0.760	0.075	7.576	2.082	0.140	0.0543	
			-	0.834	0.033	3.557	0.572	0.048	0.0319			-	-	-	-	-	-	
			-	-	-	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-	-

Таблица 9. Результаты первого этапа для двигателей СМ по каналам К и Р.

Компонента ускорения	Отрезок 11										Отрезок 12						
	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m	
n_x	0.032	64	0.383	0.032	0.249	0.026	0.045	0.0264	0.028	190	-	-	-	-	-	-	-
			0.566	0.328	0.002	0.005	0.649	0.3040			0.532	0.027	0.196	0.049	1.505	0.4537	
			-	-	-	-	-	-			0.739	0.013	0.073	0.012	0.049	0.0140	
			0.949	0.017	0.306	0.023	0.088	0.0170			0.946	0.008	0.203	0.014	0.103	0.0079	
			1.265	0.073	0.131	0.079	0.315	0.0720			-	-	-	-	-	-	

Таблица 9. Результаты первого этапа для двигателей СМ по каналам К и Р (продолжение).

Компонента ускорения	Отрезок 11										Отрезок 12						
	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m	
n_y	0.076	76	0.381	0.013	0.578	0.042	0.025	0.013	0.075	190	0.377	0.017	0.122	0.026	0.038	0.0161	
			0.704	0.047	0.220	0.053	0.090	0.043			0.738	0.007	0.485	0.031	0.093	0.0072	
			0.944	0.024	0.435	0.054	0.099	0.024			-	-	-	-	-	-	-
			1.265	0.074	0.201	0.059	0.217	0.076			-	-	-	-	-	-	-
n_z	0.176	60	0.426	0.065	0.482	0.081	0.213	0.090	0.128	51	0.648	0.061	0.617	0.216	0.225	0.0515	
			0.688	0.032	0.089	0.048	0.282	0.115			0.797	0.033	1.110	0.500	1.033	0.5493	
			-	-	-	-	-	-			0.946	0.050	1.235	0.307	0.290	0.0356	
			0.951	0.019	1.750	1.658	0.168	0.022			-	-	-	-	-	-	

Таблица 10. Результаты первого этапа для двигателей СМ по каналам Р и Т.

Компонента ускорения	Отрезок 13										Отрезок 14					
	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m	S	M	n	S _n	A	S _A	m	S _m
n_x	0.054	250	0.365	0.018	0.104	0.033	0.014	0.0170	0.057	200	0.382	0.002	0.726	0.019	0.033	0.0019
			0.407	0.034	0.056	0.012	0.018	0.0352			-	-	-	-	-	-
			0.748	0.005	0.364	0.020	0.072	0.0048			0.770	0.007	0.347	0.023	0.082	0.0067
			1.218	0.004	0.314	0.017	0.040	0.0036			-	-	-	-	-	-
n_y	0.285	100	0.312	0.038	1.013	0.298	0.545	0.1673	0.133	196	0.383	0.001	2.535	0.046	0.039	0.0014
			0.764	0.016	1.777	0.164	0.111	0.0147			0.769	0.004	1.116	0.050	0.065	0.0041
			1.216	0.029	0.503	0.120	0.009	0.0307			-	-	-	-	-	-
			0.729	0.008	2.334	0.120	0.123	0.0084			0.764	0.010	2.365	0.162	0.089	0.0100
n_z	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

Таблица 11. Результаты анализа компоненты n_x на отрезке 1.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
1	13:26:12.898	0.109	430	0.432	0.002	0.673	0.026	0.024	0.0015
2	13:26:13.098	0.065	49	0.477	0.208	0.075	0.060	0.171	0.2133
				0.708	0.158	0.076	0.054	0.273	0.1768
				1.252	0.040	0.402	0.053	0.113	0.0386
				1.626	0.084	0.183	0.051	0.156	0.0876
3	13:26:13.098	0.065	49	0.433	0.029	0.706	0.065	0.049	0.0249
				0.713	0.097	0.124	0.056	0.089	0.1312
				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 12. Результаты анализа компоненты n_y на отрезке 1.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
1	13:26:15.098	0.203	405	0.432	0.001	1.752	0.051	0.026	0.0012
				0.739	0.006	0.923	0.071	0.075	0.0060
2	13:26:15.098	0.028	18	0.900	0.303	0.036	0.020	0.975	0.3563
				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
				1.658	0.075	0.598	0.045	0.333	0.0490

Таблица 13. Результаты анализа компоненты n_z на отрезке 1.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
1	13:06:32.094	0.111	88	0.173	0.119	0.244	0.109	0.267	0.0969
				0.412	0.031	0.274	0.064	0.026	0.0349
				0.722	0.022	0.671	0.078	0.145	0.0216
				0.944	0.075	0.151	0.068	0.100	0.0759
2	13:06:35.191	0.016	33	0.545	0.397	0.094	0.051	1.029	0.3423
				1.091	0.204	0.089	0.047	1.097	0.4531
				1.637	0.028	0.262	0.018	0.203	0.0294
3	13:06:35.191	0.049	50	0.415	0.058	0.106	0.029	0.242	0.0522
				0.755	0.063	0.988	0.170	0.489	0.0483
				1.079	0.402	0.668	0.280	1.486	0.3897
				1.683	0.078	0.312	0.063	0.392	0.0745

Таблица 14. Результаты анализа компоненты n_y на отрезке 3.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
1	17:06:53.945	0.372	300	0.384	0.006	0.136	0.115	0.042	0.0060
				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
				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
				1.773	0.056	1.829	0.148	0.274	0.0631

Таблица 15. Результаты анализа компоненты n_z на отрезке 3.

Этап	Время	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
1	17:06:56.645	0.261	160	0.745	0.007	2.344	0.119	0.115	0.0070
2	17:06:56.645	0.147	50	0.746	0.018	1.696	0.121	0.105	0.0178
				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 16. Результаты анализа компоненты n_y на отрезке 4.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
1	19:24:54.141	0.713	300	0.382	0.009	1.708	0.236	0.056	0.0100
				0.728	0.005	5.643	0.284	0.094	0.0050
2	19:24:54.141	0.317	57	0.941	0.103	1.629	0.687	0.186	0.0950
				1.130	0.162	1.944	0.944	0.430	0.1801
				1.633	0.168	0.565	0.499	0.055	0.1628
				1.804	0.073	3.853	0.752	0.383	0.0733
3	19:24:54.141	0.539	57	0.396	0.052	1.177	0.315	0.049	0.0592
				0.720	0.016	6.616	0.436	0.157	0.0193
				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 17. Результаты анализа компоненты n_z на отрезке 4.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
1	19:25:01.336	0.138	240	0.745	0.006	0.810	0.052	0.077	0.0060
				1.463	0.020	0.489	0.067	0.146	0.0210
2	19:25:01.336	0.053	59	0.960	0.045	0.361	0.064	0.245	0.0493
				1.352	0.602	0.372	0.152	1.237	0.4623
				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
				1.496	0.049	0.419	0.092	0.040	0.0501

Таблица 18. Результаты анализа компоненты n_x на отрезке 6.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
1	14:08:15.418	0.072	480	0.387	0.004	0.439	0.043	0.050	0.0041
				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
				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
				1.906	0.157	0.203	0.083	0.113	0.1508

Таблица 19. Результаты анализа компоненты n_y на отрезке 6.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
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
				0.748	0.024	0.235	0.024	0.087	0.0242

Таблица 20. Результаты анализа компоненты n_z на отрезке 6.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
1	14:08:31.918	0.063	220	0.441	0.008	0.215	0.022	0.052	0.0008
				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
3	14:08:31.918	0.036	34	0.395	0.119	0.096	0.033	0.374	0.0917
				0.967	0.103	0.522	0.163	2.676	0.8970
				1.540	0.123	0.206	0.051	0.334	0.0933

Таблица 21. Результаты анализа компоненты n_z на отрезке 7.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
1	10:24:02.926	0.091	100	0.437	0.005	0.605	0.035	0.084	0.0050
				0.752	0.008	0.138	0.022	0.020	0.0070
2	10:24:02.926	0.013	35	1.004	0.152	0.024	0.001	0.178	0.2527
				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
				0.808	0.122	0.406	0.140	0.310	0.2111

Таблица 22. Результаты анализа компоненты n_y на отрезке 10.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
1	17:52:05.508	1.194	150	0.232	0.044	2.087	1.341	0.093	0.0656
				0.322	0.026	8.250	3.414	0.536	0.2332
				0.412	0.017	6.196	1.205	0.082	0.0165
2	17:52:05.508	0.156	43	0.597	0.023	1.556	0.129	0.003	0.0214
				1.005	0.085	2.363	0.349	0.813	0.0960
				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

Таблица 23. Результаты анализа компоненты n_z на отрезке 10.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
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 24. Результаты анализа компоненты n_z на отрезке 11.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
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 25. Результаты анализа компоненты n_y на отрезке 12.

Этап	t_0	S	M	n	S_n	A	S_A	m	S_m
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

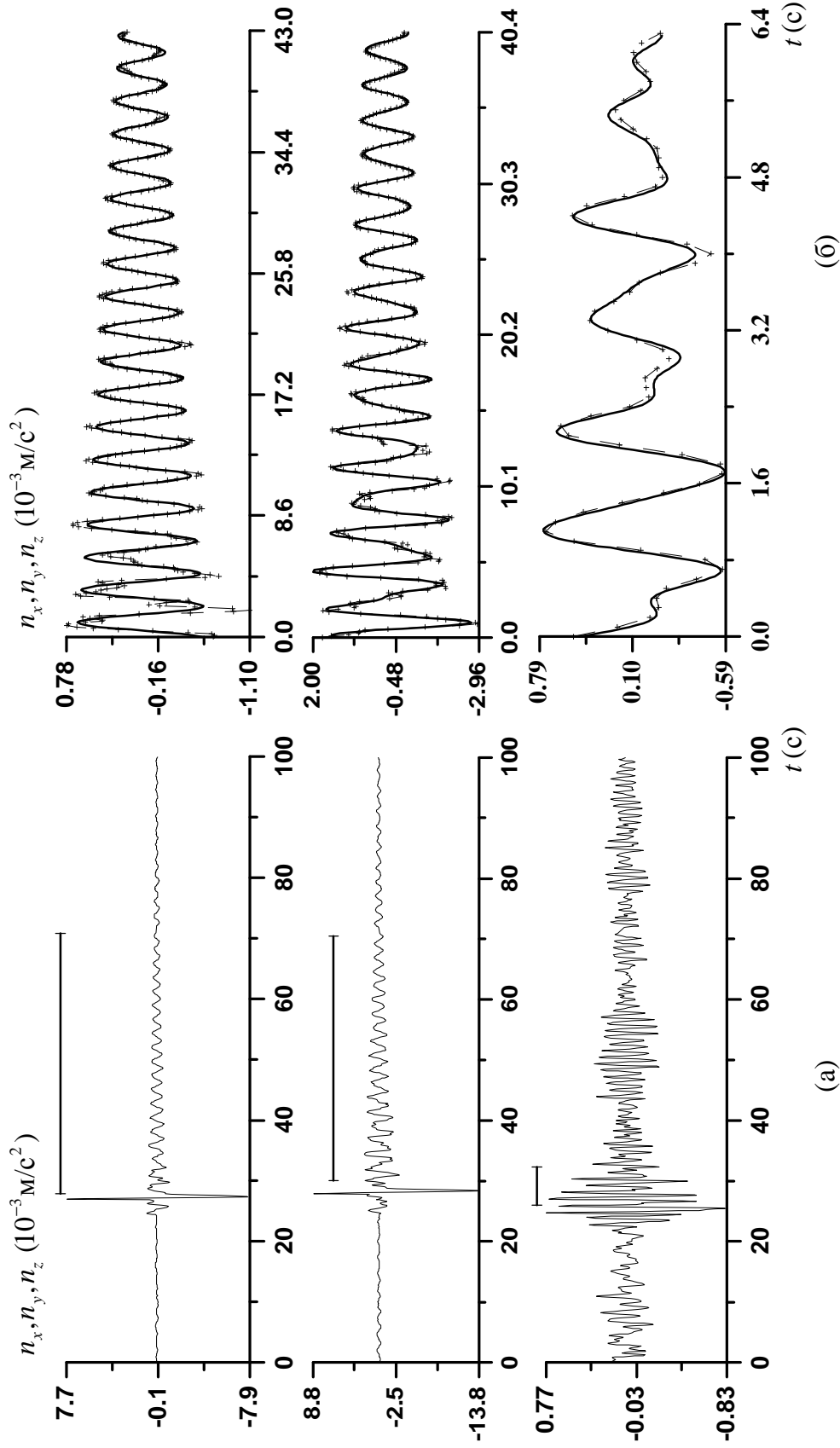


Рис. 1. Отрезок данных 1: отстыковка от стыковочного порта СМ 2005.09.07; а) исходные данные MAMS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результат их аппроксимации.

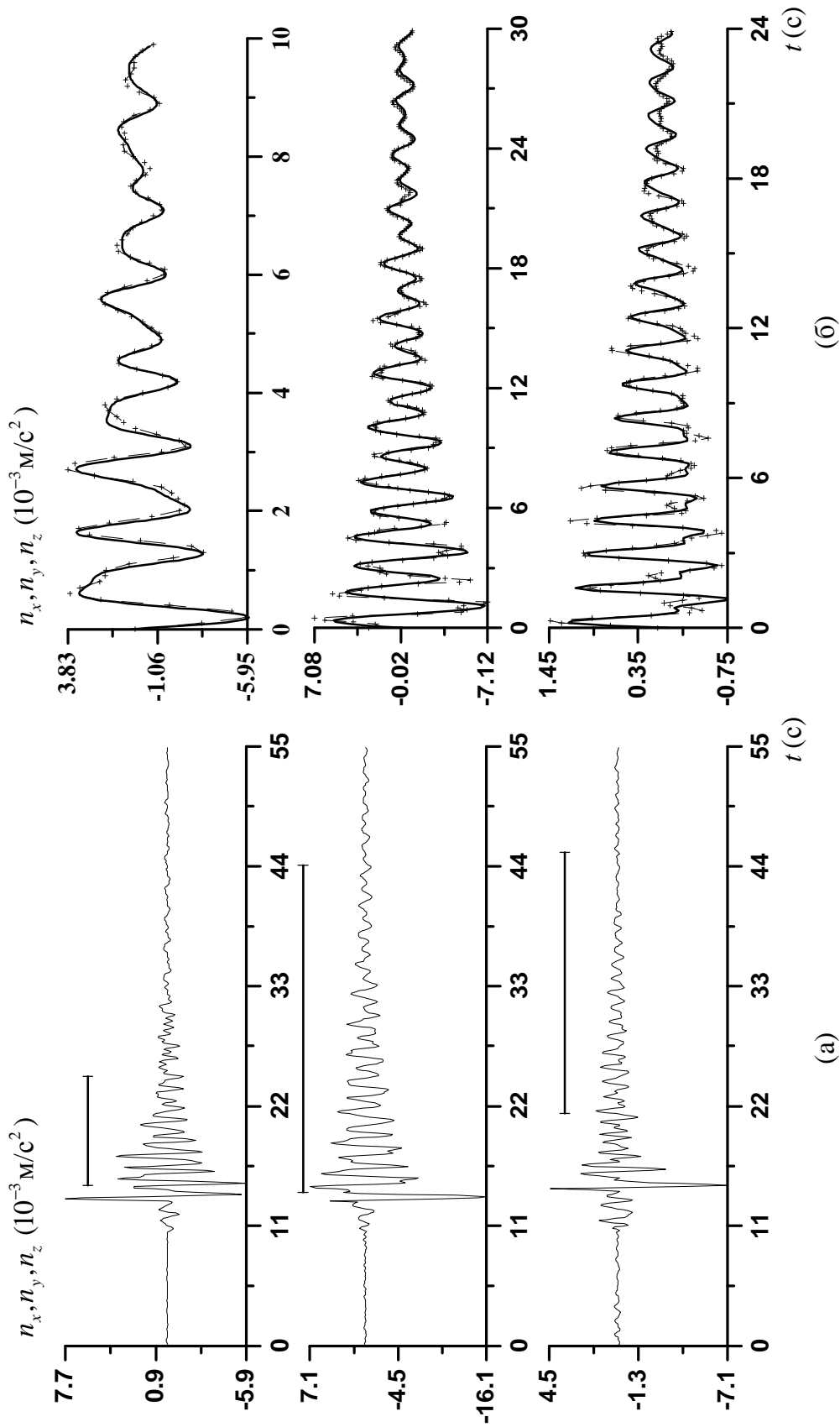


Рис. 2. Отрезок данных 4: стыковка к стыковочному узлу ‘Пирс’ 2006.06.26; а) исходные данные MAMS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результат их аппроксимации.

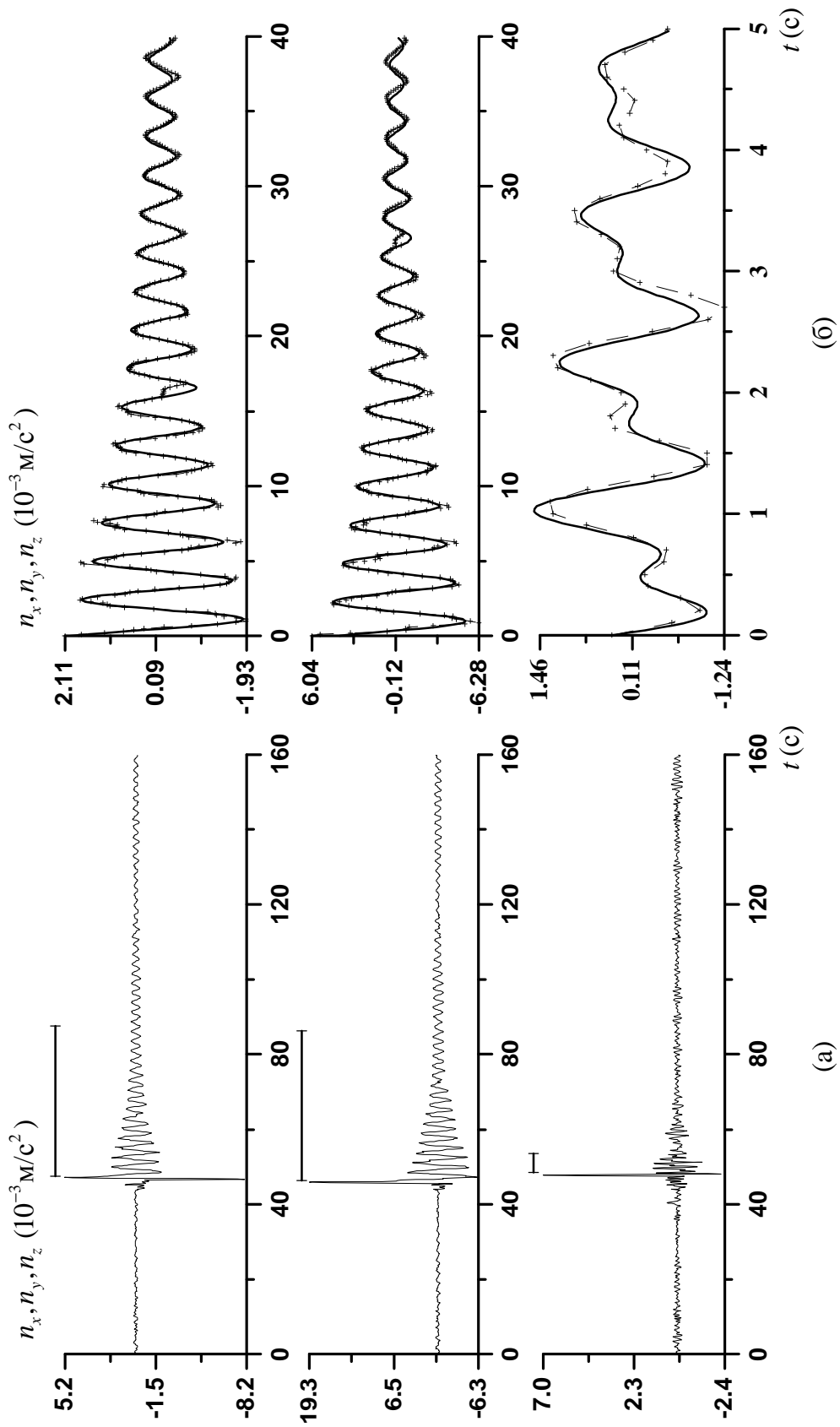


Рис. 3. Отрезок данных 5: отстыковка от стыковочного узла ФГБ 2005.04.24; а) исходные данные MAMS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результат их аппроксимации.

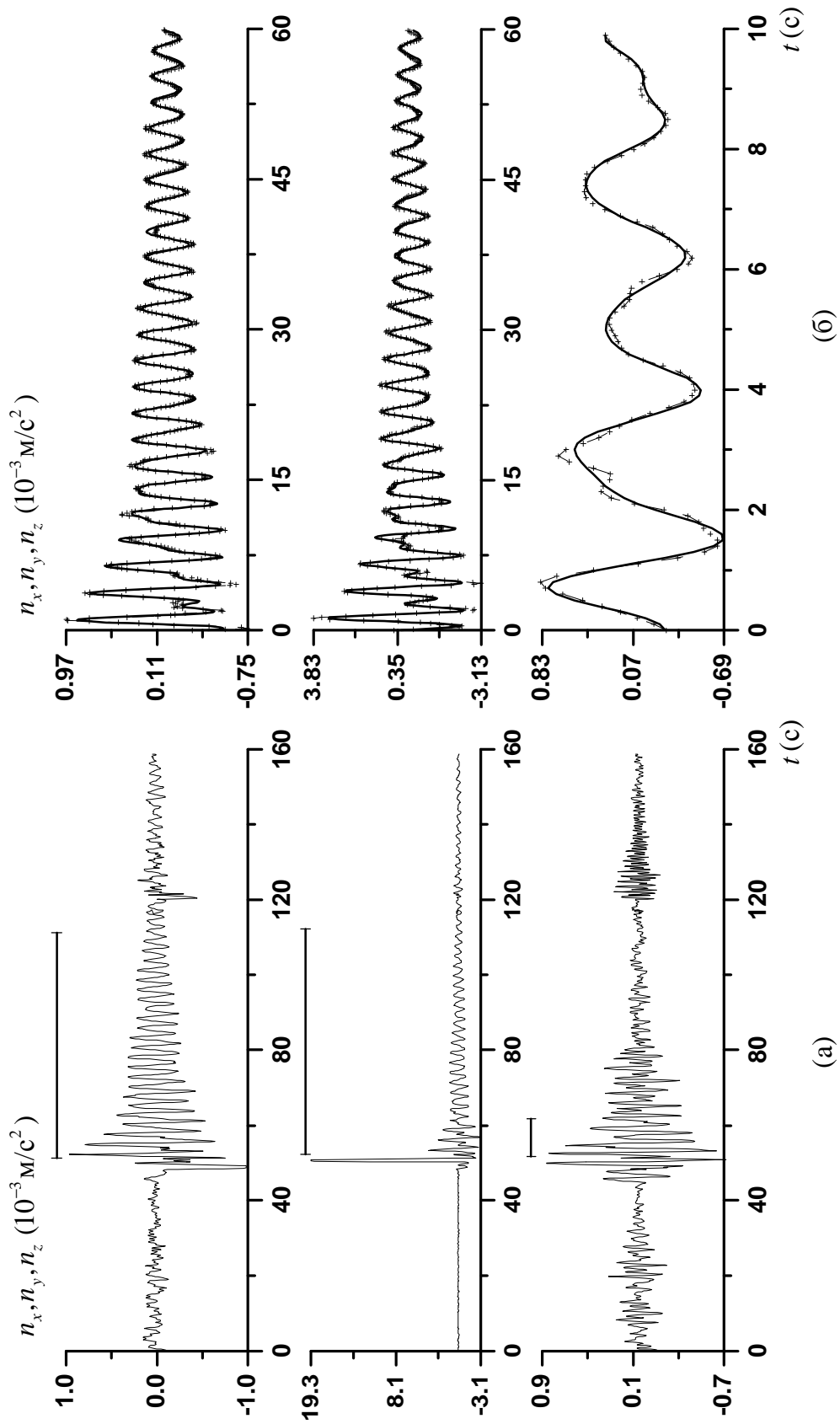


Рис. 4. Отрезок данных 7: отстыковка от стыковочного узла РМА 2005.08.06; а) исходные данные MAMS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результат их аппроксимации.

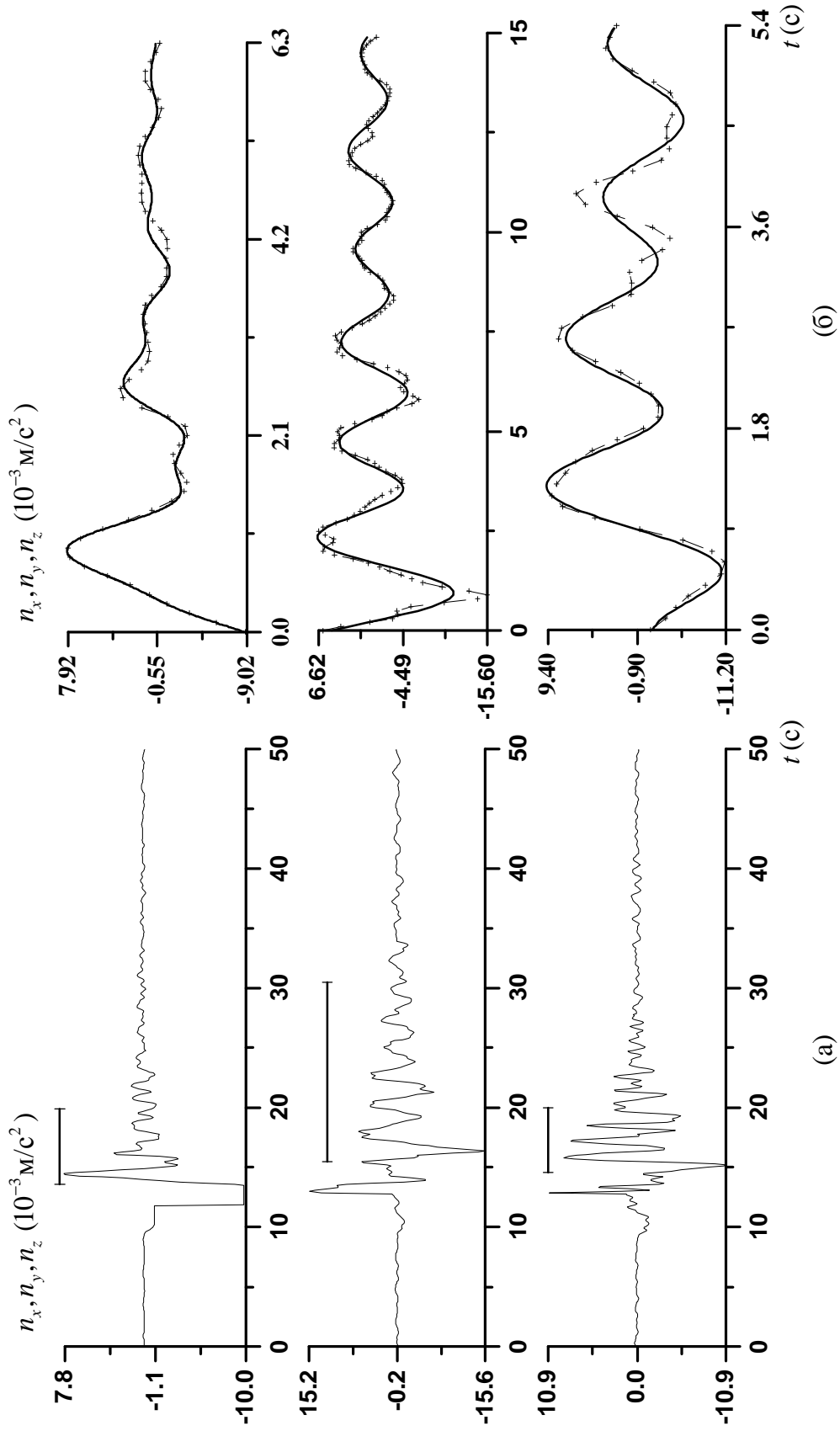


Рис. 5. Отрезок данных 10: стыковка к стыковочному узлу РМА-2 2006.07.06; а) исходные данные MAMS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результат их аппроксимации.

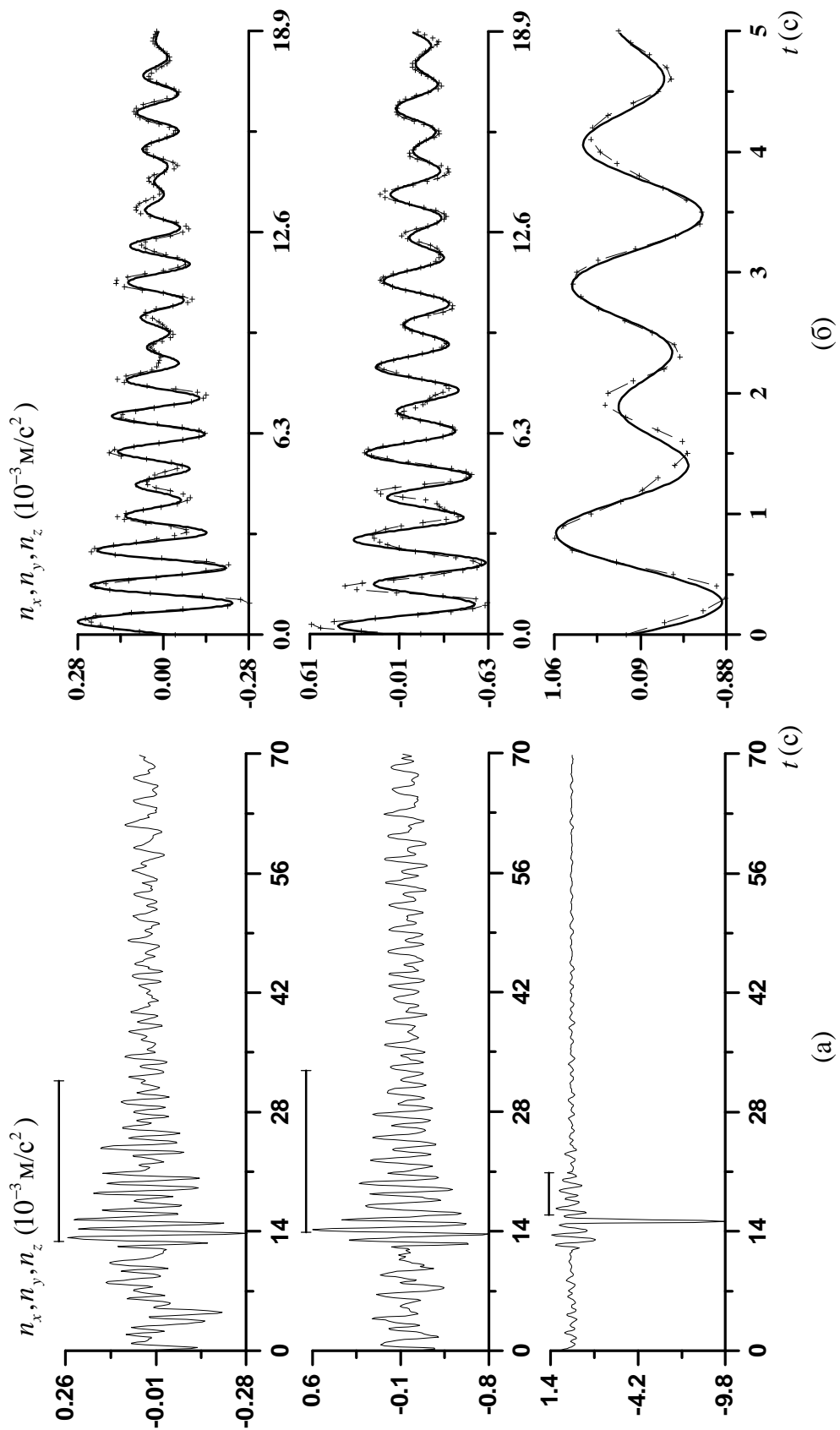


Рис. 6. Отрезок данных 12: срабатывание двигателей СМ по каналам К и Р 2006.03.03; а) исходные данные MAMS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результат их аппроксимации.

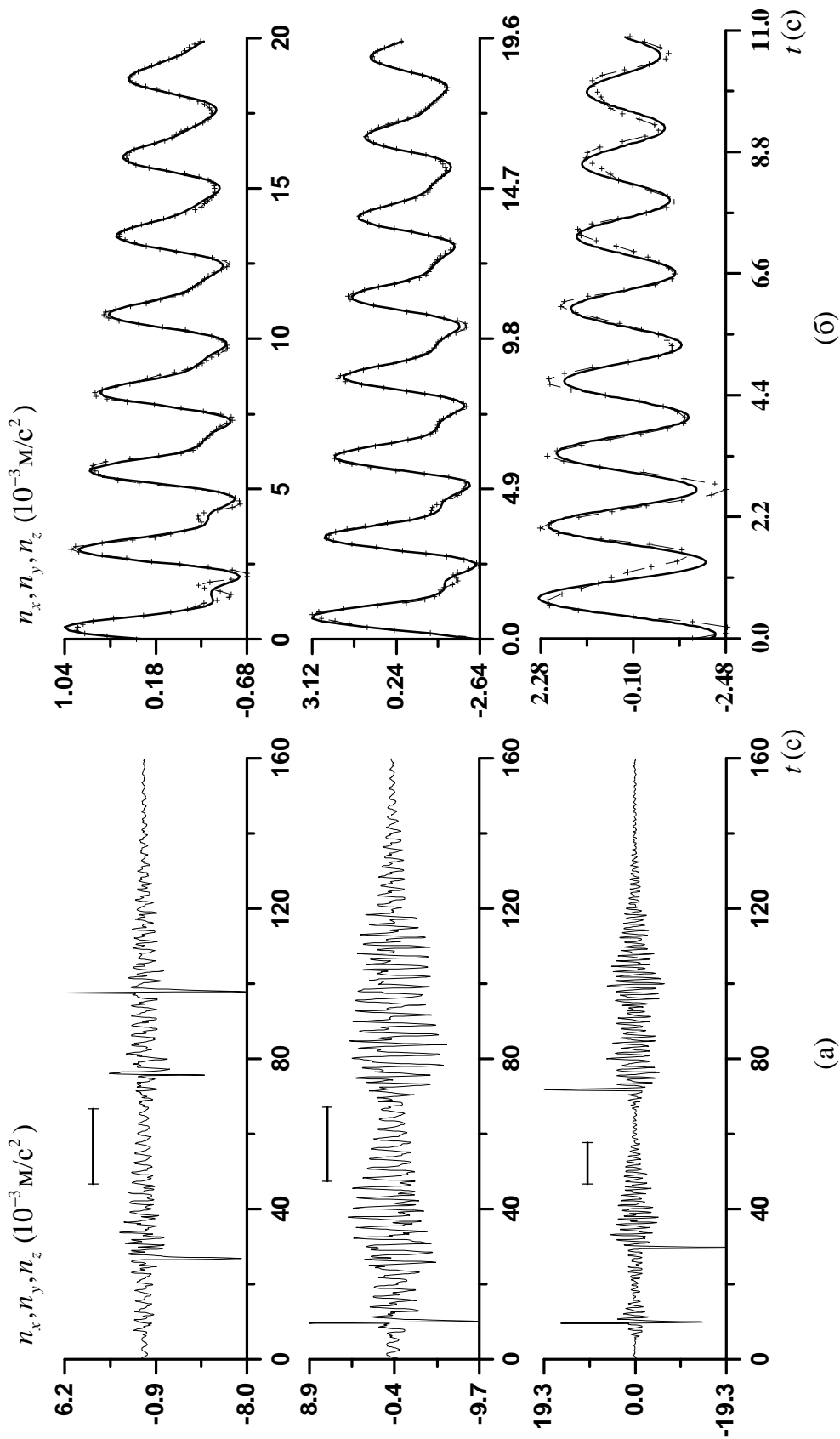


Рис. 7. Отрезок данных 14: срабатывание двигателей СМ по каналам Р и Т 2006.06.19; а) исходные данные MAMS; б) данные, отвечающие свободным колебаниям, и результаты их аппроксимации.

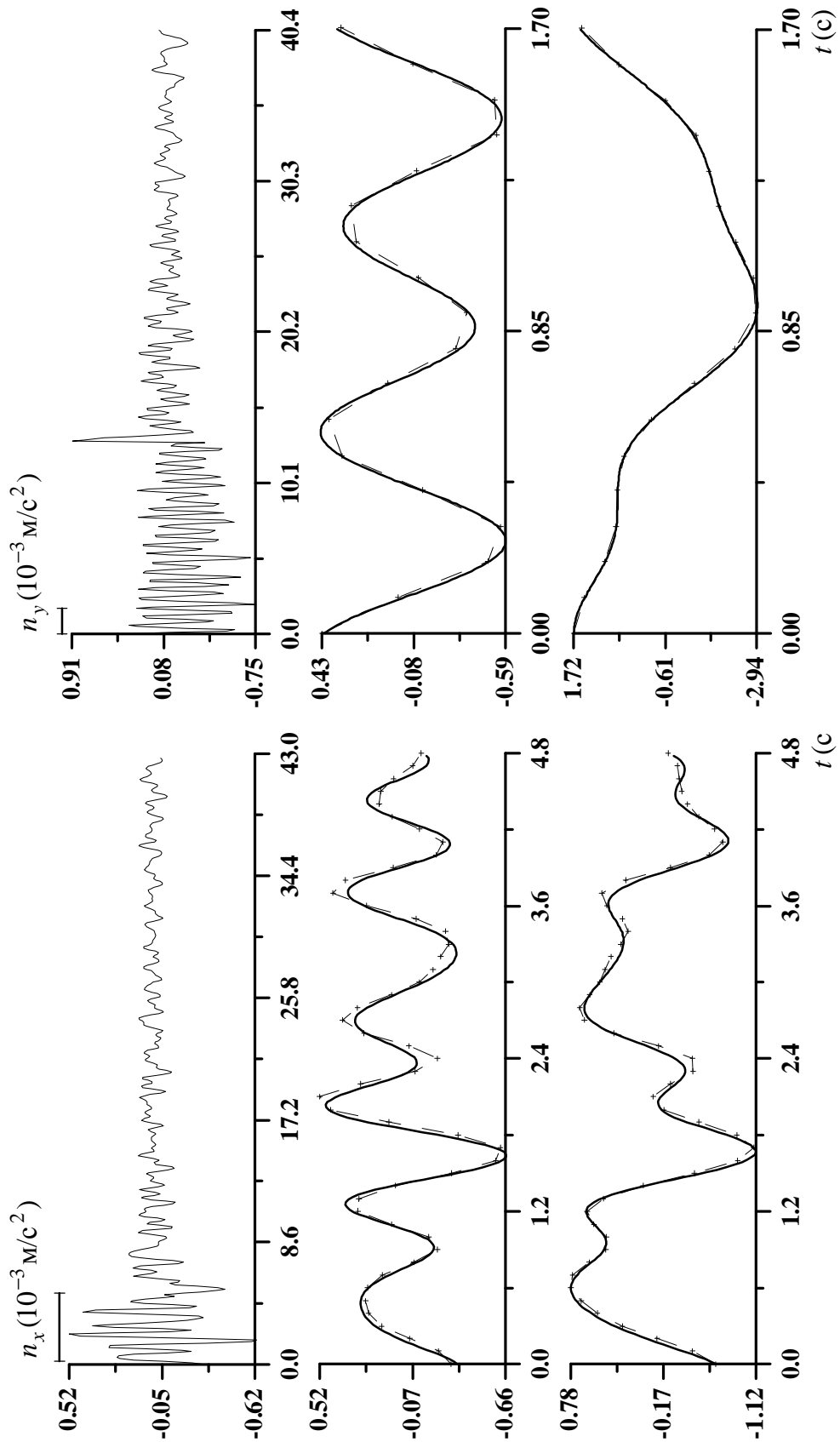


Рис. 8. Отрезок данных 1.

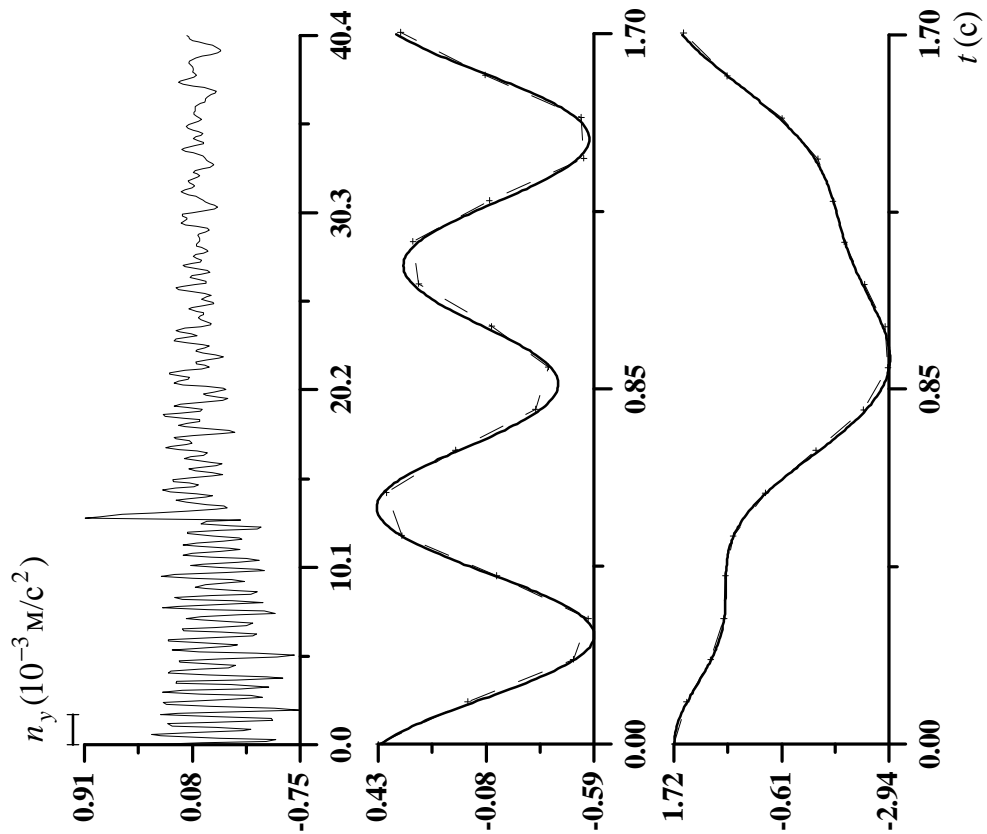


Рис. 9. Отрезок данных 1.

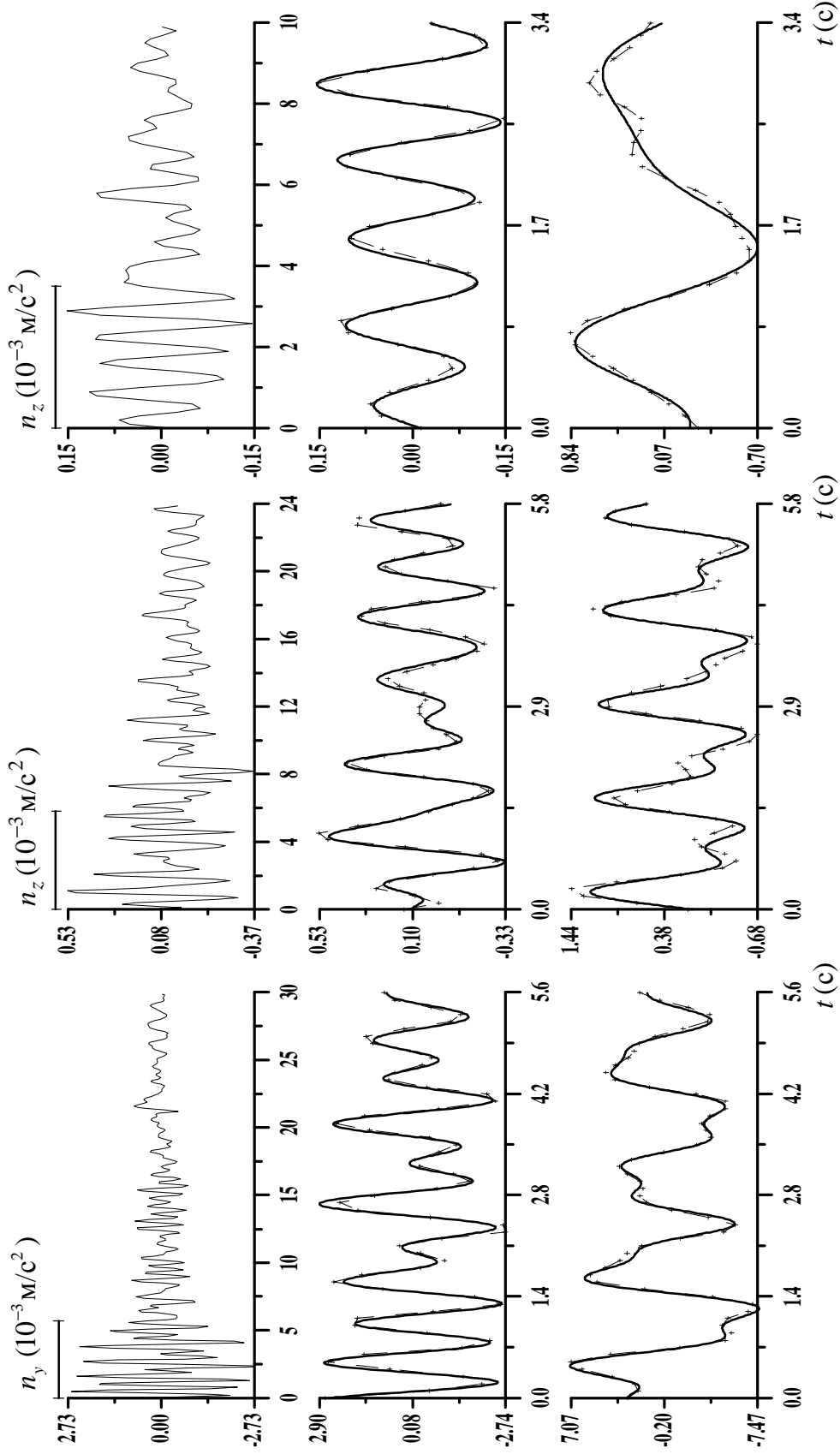


Рис. 10. Отрезок данных 4

Рис. 11. Отрезок данных 4.

Рис. 12. Отрезок данных 7.

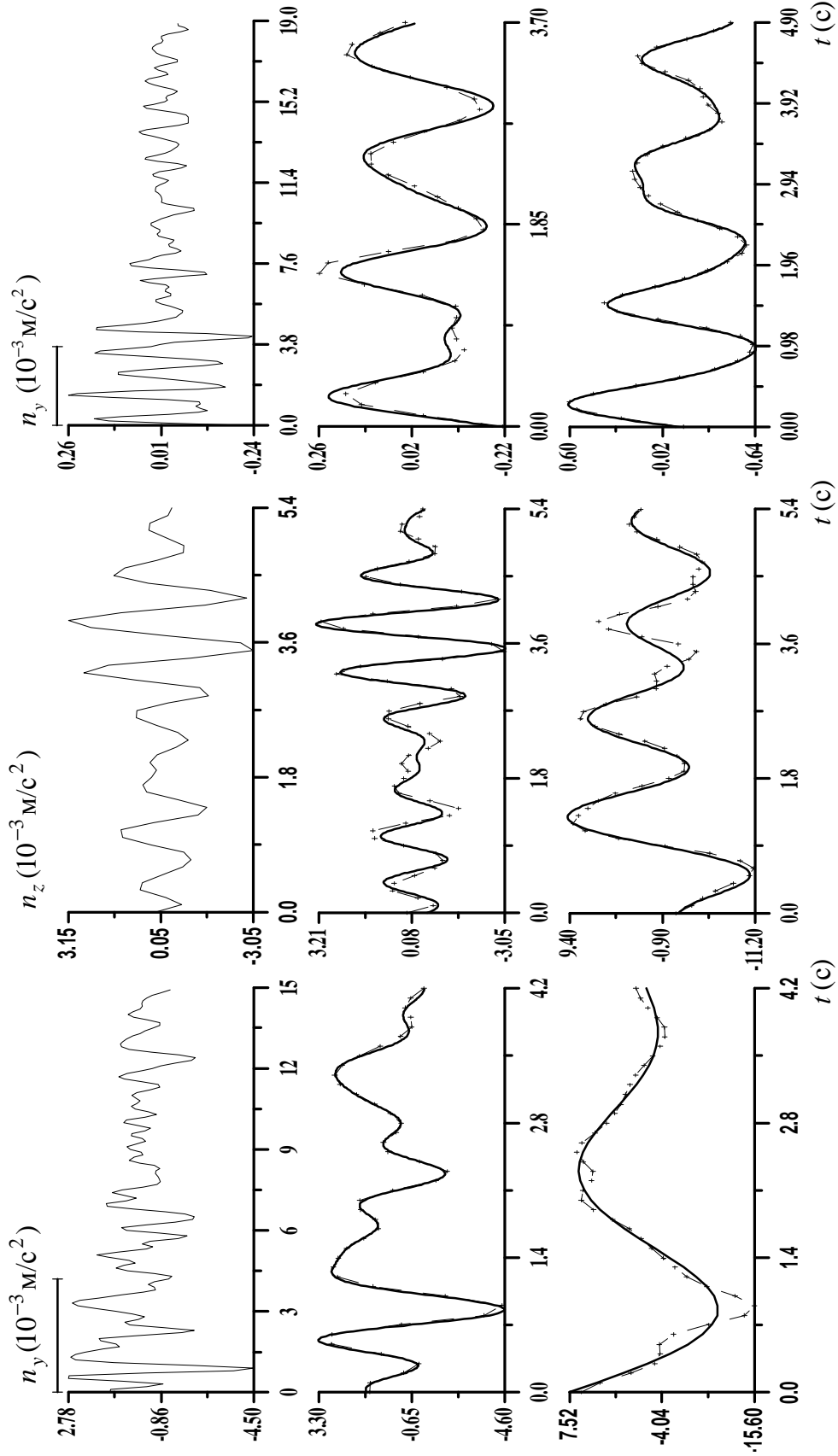


Рис. 13. Отрезок данных 10.

Рис. 14. Отрезок данных 10.

Рис. 15. Отрезок данных 12.