

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 534.647

doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-36-50

Третий закон Ньютона — это не догма. Это расчетная гипотеза

С.В. Аринчев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Newton's Third Law is not a Dogma but a Computational Hypothesis

S.V. Arinchev

Bauman Moscow State Technical University

■ Частотные испытания — важный этап разработки конструкции летательного аппарата. В эксперименте собственную частоту изделия идентифицируют по резонансному пику его амплитудно-частотной характеристики. Разные датчики вибростенда дают различные амплитудно-частотные характеристики. При этом резонансные пики, полученные разными датчиками для одной и той же собственной частоты изделия, расположены со сдвигом по частоте, составляющим примерно 1 Гц. Наличие сдвига затрудняет частотные испытания упругих конструкций с близкими собственными частотами. Для объяснения этого эффекта использован метод частиц. Частица — это материальная точка. Конструкция — совокупность частиц с упругими связями. Каждой частице соответствует своя модель конструкции. Каждая частица «имеет право» на свой собственный резонанс, «живет» в своей собственной параллельной реальности и ассоциирована с датчиком ускорений. Число одновременно рассматриваемых моделей равно числу датчиков. Результаты независимого анализа конкретной модели относятся только к соответствующей частице. При оценке взаимодействия частиц третий закон Ньютона использован не в полном объеме. Силы действия и противодействия по-прежнему приложены к разным частицам, действуют по одной прямой и противоположны по знаку. Но эти силы неодинаковые. Проведено моделирование частотных испытаний упругих систем с двумя и тремя степенями свободы.

Ключевые слова: частотные испытания, упругие конструкции, третий закон Ньютона, метод частиц

■ Experimental modal analysis is an important stage in the development of a flying vehicle structure. In the experiment, the eigenfrequency of the structure is identified by a corresponding resonance peak of its amplitude-frequency response characteristic. Different sensors in the vibration machine provide different amplitude-frequency response characteristics. The resonance peaks obtained through different sensors for one and the same eigenfrequency of the structure are located with a frequency shift of approximately 1 Hz. This frequency-shift effect is an obstacle for the experimental modal analysis of structures with closely located oscillation modes. This paper explains the frequency-shift effect using the

particle approach. A particle is a point mass, and a structure is a system of particles connected by springs, with each particle associated with its own structural model. Each particle has a “right” for its own resonance and “lives” in its own parallel reality. Each particle is associated with an acceleration sensor. The number of simultaneously considered models is equal to the number of sensors. The obtained modal-analysis results are related only to the corresponding particle. Newton’s third law of the particle interaction is not used in full when assessing the particles’ interaction. The action and reaction forces are still applied to different particles along the same line in the opposite directions, but these forces are different. Modal-analysis simulation is limited to the 2-DOF and the 3-DOF oscillation models.

Keywords: experimental modal analysis, elastic linkages, Newton’s third law, particle approach

Усложнение конструкции летательного аппарата неизбежно повышает плотность ее частотного спектра. На рис. 1 приведен пример модального анализа сборки пластин в программном пакете MSC.Nastran. Видно, что разность частот собственных колебаний сборки может составлять около 0,1 и 0,01 Гц.

Особенности экспериментального модального анализа сложных конструкций летательных аппаратов рассмотрены в публикациях [1–5]. В работе [6] предложен метод модального анализа конструкций с близкими собственными частотами. В эксперименте частота собственных колебаний конструкции идентифицируется по резонансному пику амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) изделия. Если

датчиков несколько, то каждый из них дает свою АЧХ. При этом резонансные пики АЧХ, полученные разными датчиками для одной и той же собственной частоты изделия, расположены со сдвигом по частоте, составляющим примерно 1 Гц.

Эффект сдвига резонанса по частоте имеет место и при бесконтактных лазерных измерениях [7, 8]. На практике результирующую резонансную частоту получают, как правило, осреднением совокупности измеренных АЧХ [2, 9, 10].

Внешний вид балки из полипропилена и результаты ее частотных испытаний приведены на рис. 2, а. Задействованы три датчика (четвертый задний черный датчик на монтажной плите вибростенда контролирует работу

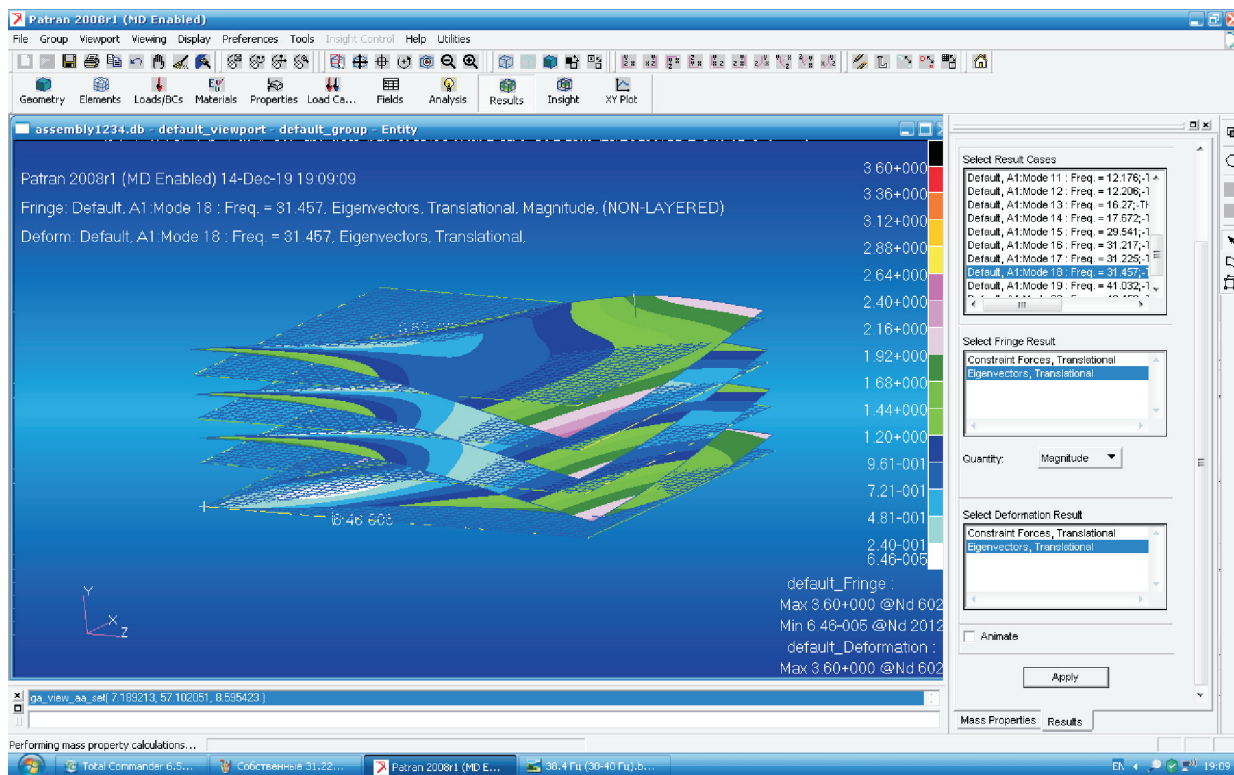
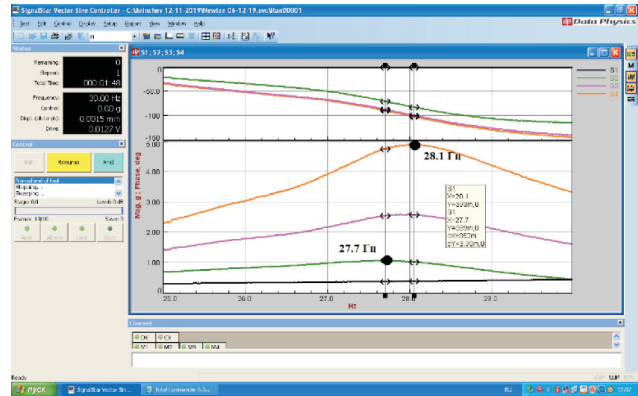
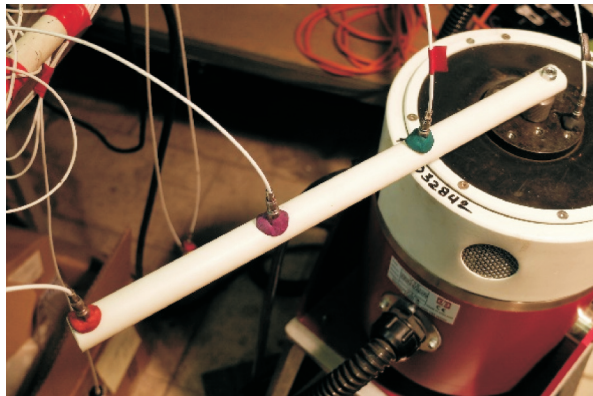
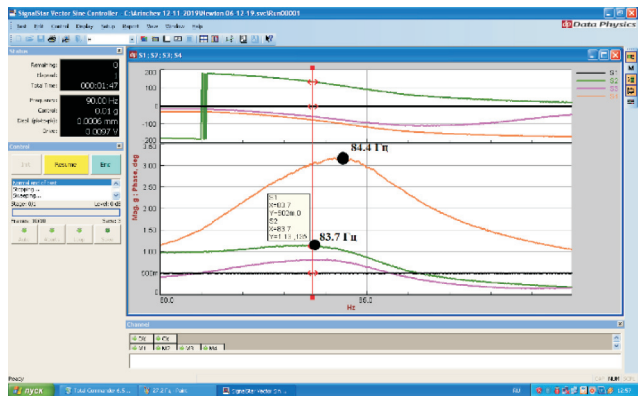
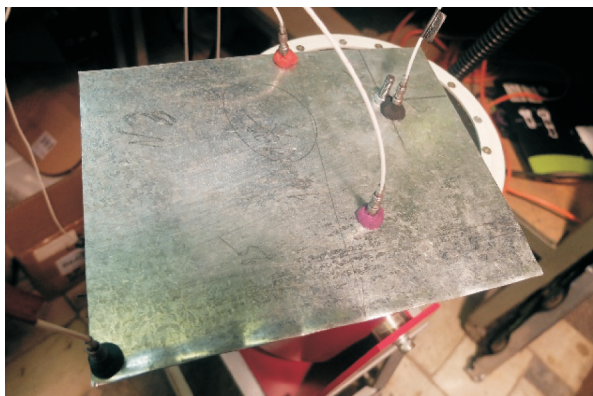


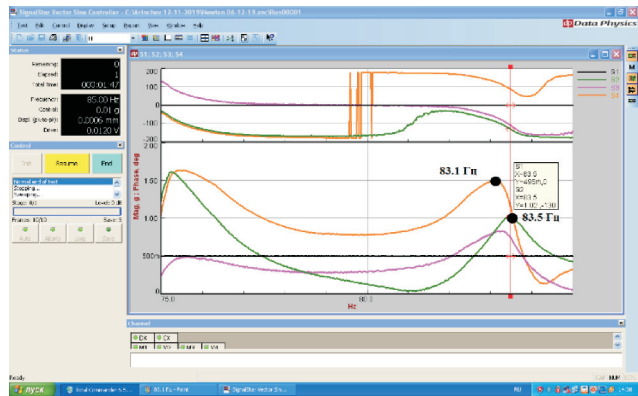
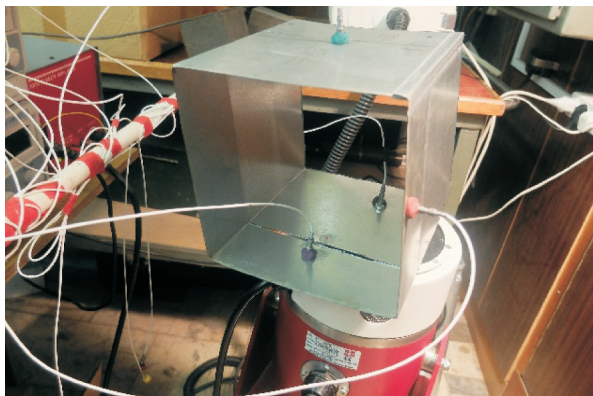
Рис. 1. Пример модального анализа сборки пластин в программном пакете MSC.Nastran



а



б



в

Рис. 2. Внешний вид изделий (слева) и результаты их частотных испытаний (справа):
а — балки из полипропилена; б — стальной пластины; в — стальной коробчатой оболочки

оборудования). Показаны три АЧХ для трех датчиков, цвет крепления датчика соответствует цвету кривой. Сдвиг резонансных пиков АЧХ по частоте составляет 0,4 Гц. Следует отметить, что для полимерных и композитных материалов сдвиг резонансного пика можно объяснить наличием значительного внутреннего трения [11–13].

Результаты частотных испытаний изделий с низким внутренним трением приведены на рис. 2, б и в. Задействованы три датчика. Для стальной пластины сдвиг резонансов по частоте составляет 0,7 Гц (см. рис. 2, б), для стальной коробчатой оболочки — 0,4 Гц (см. рис. 2, в). Испытания проведены в лаборатории динамических испытаний кафедры «Аэрокосмические

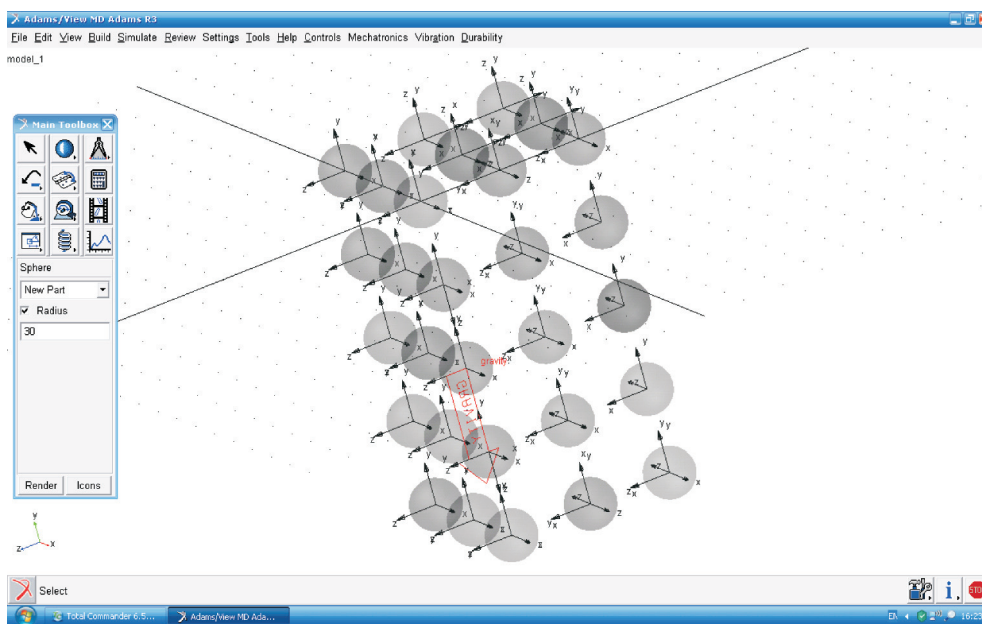
системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана на вибростенде V55 Data Physics [14].

Цель работы — показать, что данный экспериментальный эффект можно объяснить путем введения в рассмотрение неньютоновского упругого элемента.

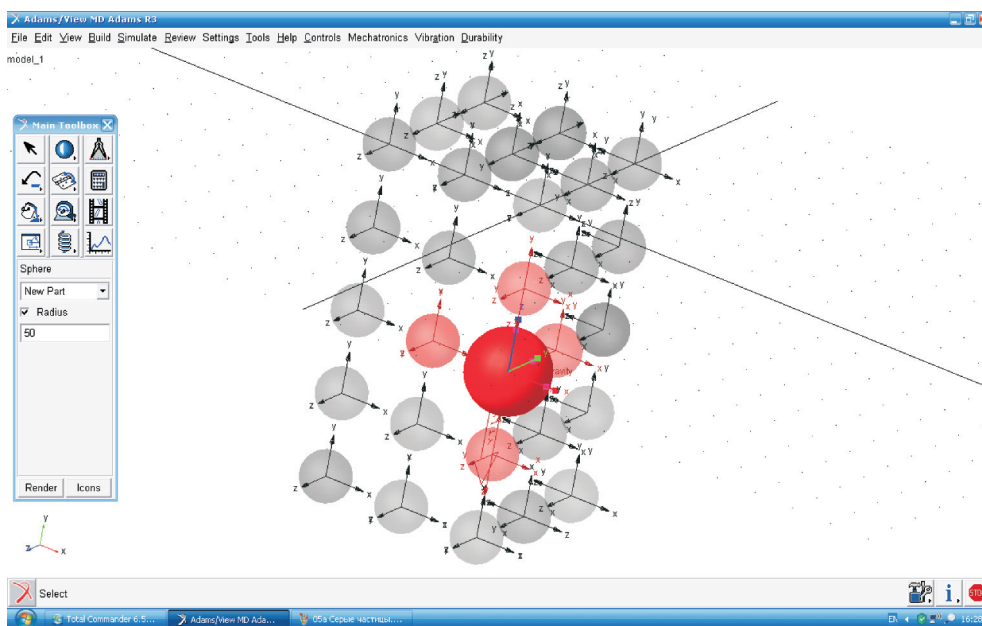
Основные допущения. Для объяснения эффекта сдвига резонансного пика АЧХ по частоте использован метод частиц [15–17]. Частица — это материальная точка. Конструкция — совокуп-

ность частиц. Чтобы понять изложенное далее, необходимо изменить свое отношение к частице. Обычно частицы ассоциированы с серыми безликими «рабами», беспрекословно выполняющими работу в рамках одной и той же модели (рис. 3, а).

Отнесемся к каждой частице с уважением (рис. 3, б). Главная частица реальности — ярко-красная. Соседняя частица — бледно-розовая. Дальние частицы — серые. Будем считать, что каждая главная частица имеет право на свой



а



б

Рис. 3. Графическое представление частиц-рабов (а) и частиц, имеющих право на собственный резонанс (б)

собственный резонанс и живет в собственной параллельной реальности.

В контексте частотных испытаний каждая главная частица ассоциирована с датчиком ускорений, и ей соответствует своя модель упругой конструкции. Эти модели различаются способом взаимодействия рассматриваемой частицы с соседями. Результаты частотных испытаний каждой конкретной модели относятся только к соответствующей главной частице (к ассоциированному датчику).

Будем считать, что в своей параллельной реальности *главная частица отталкивает сильнее, чем притягивает*. При этом (вопреки третьему закону Ньютона) сила действия не равна силе противодействия. Это означает, например, что жесткость c_2 упругого элемента, соединяющего соседние частицы массами m_1 и m_2 во второй реальности (рис. 4), расщепляется на жесткости c_{21s} и c_{22s} , работающие в противоположных направлениях. В первой реальности c_2 расщепляется на жесткости c_{21f} и c_{22f} . Здесь и далее индекс «s» помечает параметры второй реальности, индекс «f» — параметры первой реальности.

Результирующая частотная матрица системы несимметрична. Формы колебаний — неортогональные. Особенности решения задачи на собственные значения для действительной несимметричной матрицы рассмотрены в работе [18].

Частотные испытания системы с двумя степенями свободы. Проведено моделирование частотных испытаний рассматриваемой системы (рис. 4) с моногармоническим возбуждением. Внешнее воздействие $D \sin(pt)$, обозначенное на рис. 4 зеленой стрелкой, — кинематическое с заданной амплитудой смещения D монтажной плиты, t — время. Частота возбуждения p «сканируется» с постоянной скоростью v_p в заданном интервале $[p_0, p_{\text{end}}]$. Учет коэффициентов трения d_1 и d_2 (показанных на рис. 4 желтыми стрелками) обязателен. В противном случае резонансные пики АЧХ не идентифицируются.

Система с двумя степенями свободы (см. рис. 4) состоит из двух частиц: главной (ярко-красной) и соседней (бледно-розовой). Частицы — это материальные точки, движущиеся только поступательно.

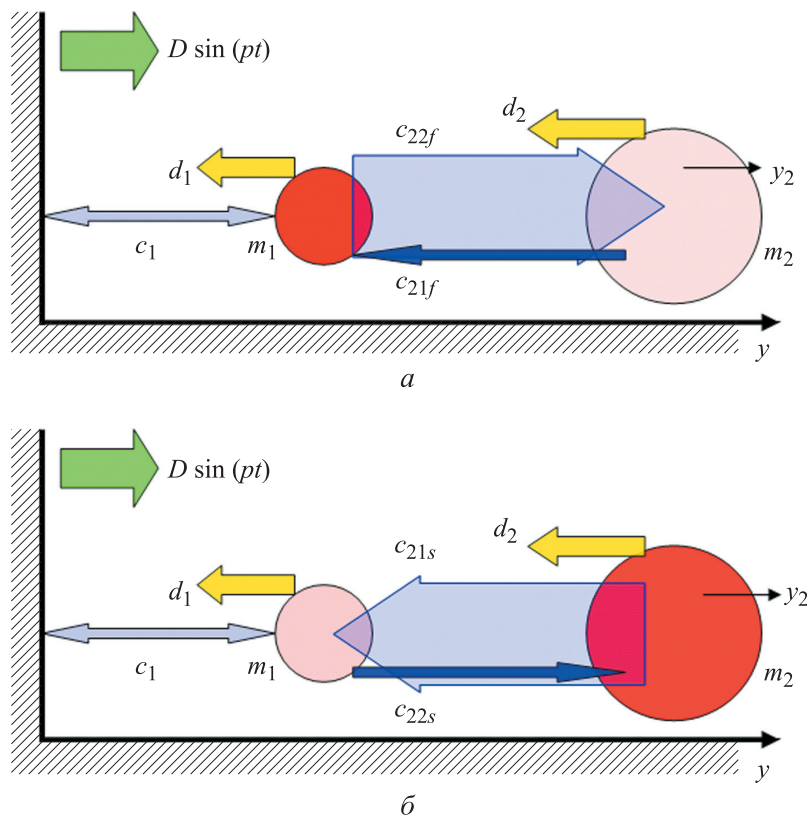


Рис. 4. Расчетные модели системы с двумя степенями свободы для первой (а) и второй (б) независимых реальностей

В рамках принятых допущений каждая главная частица системы «живет» в своей собственной параллельной реальности. Главная частица ассоциирована с датчиком ускорений. В каждой из двух реальностей главная частица имеет свою модель. На рис. 4 упругие элементы обозначены синими стрелками. Главная частица отталкивает сильнее, чем притягивает. Жесткость упругого элемента, расположенного между частицами, расщеплена. Чем больше жесткость, тем толще стрелка.

Уравнения динамики системы для двух реальностей имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} -m_1 \ddot{y}_1 - c_1(y_1 - D \sin pt) + c_{21f}(y_2 - y_1) - d_1 \dot{y}_1 &= 0; \\ -m_2 \ddot{y}_2 - c_{22f}(y_2 - y_1) - d_2 \dot{y}_2 &= 0; \\ -m_1 \ddot{y}_3 - c_1(y_3 - D \sin pt) + c_{21s}(y_4 - y_3) - d_1 \dot{y}_3 &= 0; \\ -m_2 \ddot{y}_4 - c_{22s}(y_4 - y_3) - d_2 \dot{y}_4 &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

где $y_1 - y_4$ — смещения частиц; c_1 — жесткость упругого элемента, соединяющего частицу массой m_1 с соседней частицей.

Следует отметить, что частотные испытания с моногармоническим возбуждением — это нестационарный процесс. Уравнения (1) определяют задачу Коши с нулевыми начальными условиями. Эти уравнения интегрируются методом Рунге — Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага. Требуемый переходный процесс реализуется в два этапа.

На первом этапе осуществляется «раскачка» монтажной плиты в течение десяти периодов

колебаний с постоянной частотой p_0 . При этом амплитуда смещения $D(t)$ нарастает от нуля до некоторого заданного значения со скоростью v_D .

На втором этапе частота возбуждения $p(t)$ постепенно нарастает в заданном интервале сканирования $[p_0, p_{end}]$ со скоростью v_p . Левая граница интервала сканирования составляет 0,1 от наименьшей первой частоты колебаний, правая — 1,2 от наибольшей второй частоты колебаний.

Планирование частотных испытаний начинается с оценки собственных частот и форм колебаний системы. Частотная матрица первой реальности имеет вид

$$A = \begin{bmatrix} -m_1 \lambda^2 - c_1 - c_{21f} - d_1 \lambda & c_{21f} \\ c_{22f} & -m_2 \lambda^2 - c_{22f} - d_2 \lambda \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где λ — характеристический показатель.

Матрица (2) — несимметричная с действительными коэффициентами. Задача на собственные значения является квадратичной. Ее решения — комплексные собственные значения характеристического показателя $\lambda_{1f}, \lambda_{2f}$ и комплексные собственные векторы

$$y_f^1 = \begin{Bmatrix} y_1^1 \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad y_f^2 = \begin{Bmatrix} y_1^2 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

первой реальности. Второй (единичный) элемент собственного вектора — нормирующий. Решения для второй реальности аналогичны.

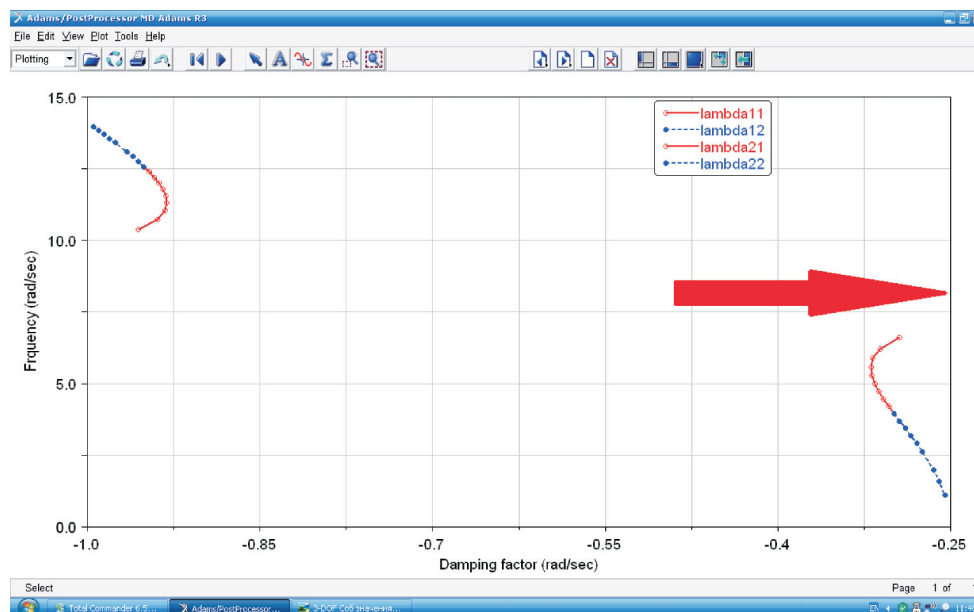


Рис. 5. Эволюция собственных значений характеристического показателя модели системы с двумя степенями свободы на комплексной плоскости

Собственные значения характеристического показателя λ частотной матрицы \mathbf{A} — это корни характеристического полинома

$$a_0\lambda^4 + a_1\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_3\lambda + a_4 = 0, \quad (3)$$

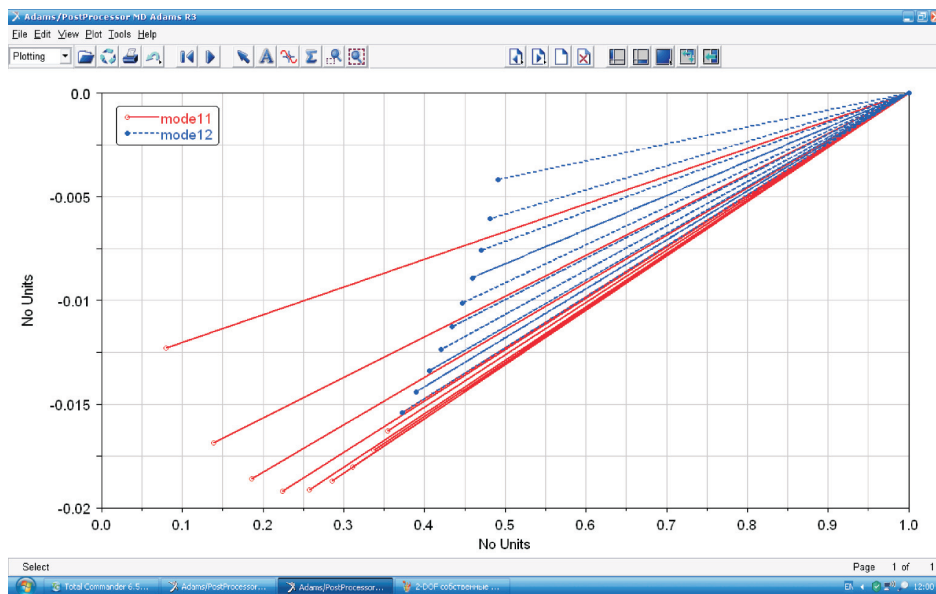
где $a_0 = m_1m_2$; $a_1 = d_1m_2 + d_2m_1$; $a_2 = c_1m_2 + c_{21f}m_2 + c_{22f}m_1 + d_1d_2$; $a_3 = c_1d_2 + c_{21f}d_2 + c_{22f}d_1$; $a_4 = c_1c_{22f}$.

Корни уравнения (3) отыскиваются методом Ньютона — Рафсона. На рис. 5 показана эволюция собственных значений характеристического показателя на комплексной плоскости (с изменением расщепленных жесткостей упру-

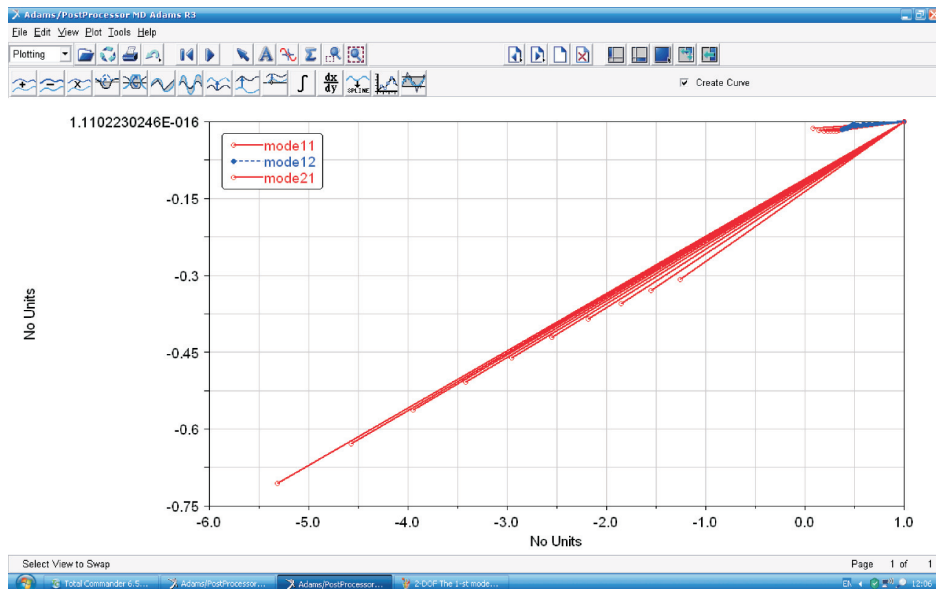
гих связей). С увеличением степени несимметрии матрицы \mathbf{A} уменьшается запас динамической устойчивости модели.

При определении j -го собственного вектора, соответствующего j -му собственному значению, учитывается его единичная нормировка:

$$\begin{bmatrix} -m_1\lambda_j^2 - c_1 - c_{21f} - d_1\lambda_j & c_{21f} \\ c_{22f} & -m_2\lambda_j^2 - c_{22f} - d_2\lambda_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1^1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad j = 1, 2.$$



a



б

Рис. 6. Формы колебаний первого (*a*) и второго (*б*) тонов на комплексной плоскости

В заданной нормировке (с учетом равенства нулю определителя частотной матрицы)

$$y_j^1 = m_2 \lambda_j^2 / c_{22f} + d_2 \lambda_j / c_{22f} + 1, \quad j = 1, 2.$$

Эволюция форм колебаний первого и второго тонов на комплексной плоскости (с изменением расщепленных жесткостей упругих связей) приведена на рис. 6, а и б соответственно. На рис. 6, б формы колебаний второго тона показаны на фоне форм колебаний первого тона.

Следует отметить, что рассматриваемая система с несимметричной частотной матрицей является неконсервативной вследствие трения и так называемого «парного взаимодействия» степеней свободы [18]. Поэтому полученные формы колебаний неортогональные. Для исследования неортогональности форм исходная квадратичная задача на собственные значения с вектором y сводится к линейной задаче на собственные значения с вектором x удвоенной размерности:

$$y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} \Rightarrow x = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \lambda y_1 \\ \lambda y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix};$$

$$y_j = \begin{Bmatrix} y_1^j \\ 1 \end{Bmatrix} \Rightarrow x_j = \begin{Bmatrix} y_1^j \\ 1 \\ \lambda_j y_1^j \\ \lambda_j \end{Bmatrix}.$$

Введем в рассмотрение матрицу инерции M , матрицу демпфирования G и несимметричную матрицу жесткости C :

$$M = \begin{bmatrix} -m_1 & 0 \\ 0 & -m_2 \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} -d_1 & 0 \\ 0 & -d_2 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} -c_1 - c_{21f} & c_{21f} \\ c_{22f} & -c_{22f} \end{bmatrix}.$$

Тогда исходная квадратичная задача для вектора y имеет вид

$$Ay = 0; \quad \lambda^2 My + \lambda Gy + Cy = 0.$$

Линейная задача на собственные значения для вектора x определяется выражением

$$(B + \lambda Q)x = 0,$$

где

$$B = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix}; \quad Q = \begin{bmatrix} G & M \\ M & 0 \end{bmatrix}.$$

Скалярное произведение векторов $\Delta = (x^2, Bx^1) —$ степень неортогональности собственных форм колебаний. На рис. 7 приведена зависимость этого безразмерного параметра Δ от жесткости c_{21f} (Н/м). Если формы колебаний неортогональны, то силы инерции, возникающие при смещениях по одной форме колебаний, совершают работу на смещениях по другой форме колебаний.

Результаты моделирования частотных испытаний системы с двумя степенями свободы, по-

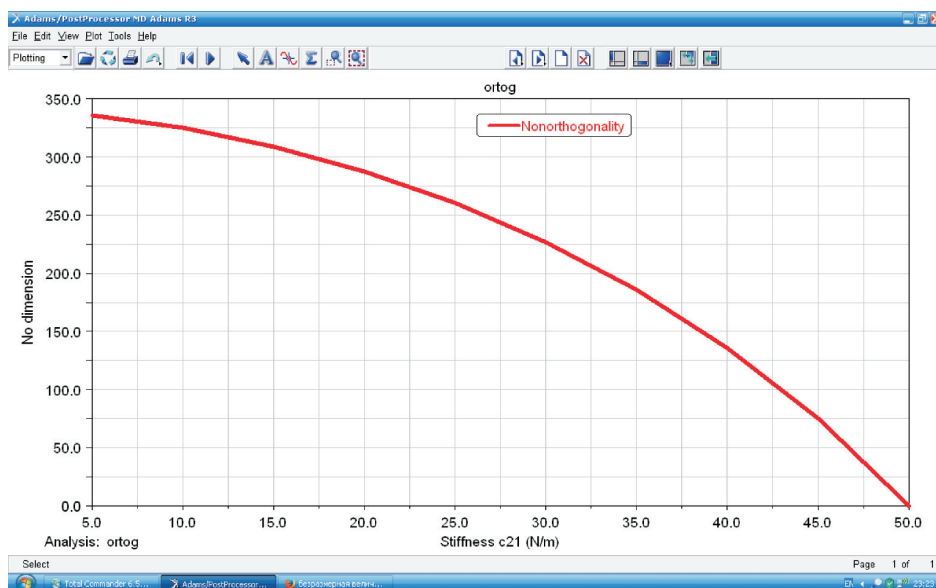


Рис. 7. Зависимость степени неортогональности Δ собственных форм колебаний первого и второго тонов от жесткости c_{21f}

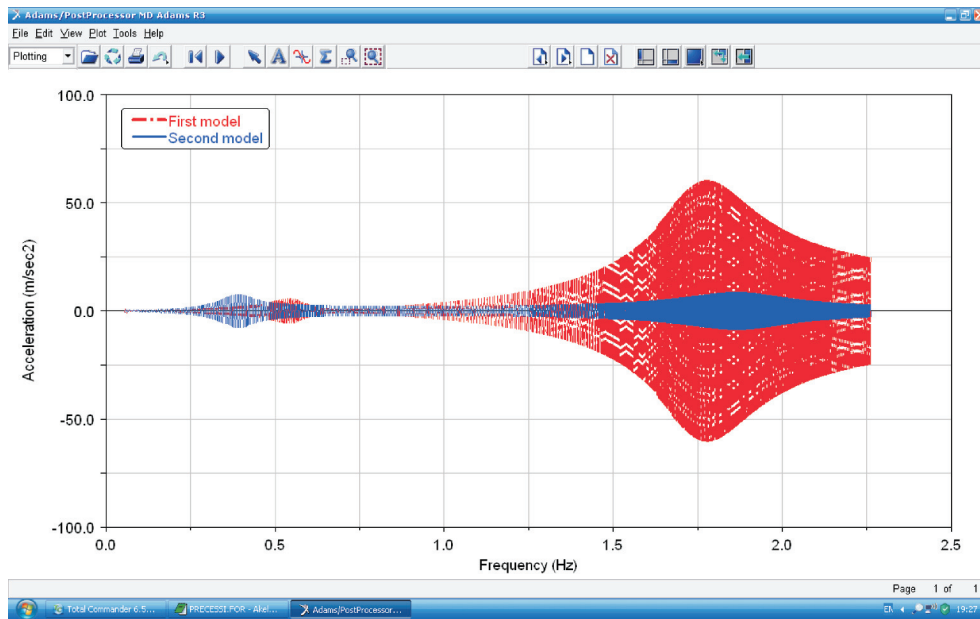


Рис. 8. Эффект сдвига по частоте резонансных пиков модели системы с двумя степенями свободы для первой (---) и второй (—) реальностей

лученные путем решения задачи Коши для уравнений (1) с нулевыми начальными условиями, приведены на рис. 8. В первой реальности датчик ускорений поставлен на первую частицу, во второй — на вторую частицу.

На рис. 8 показан график зависимости измеренных ускорений (м/с^2) частиц от частоты (Гц) вынужденных колебаний при моногармоническом возбуждении по смещению (монтажной плиты вибростенда) заданной амплитуды. Сдвиг резонансных пиков АЧХ составляет примерно 0,4 Гц. Имеет место качественное соответствие полученных результатов с данными, приведенными на рис. 2.

Приняты следующие значения параметров модели и эксперимента: $m_1 = 1$ кг; $m_2 = 2$ кг; $c_1 = 100$ Н/м; $c_{21f} = 40$ Н/м; $c_{22f} = 60$ Н/м; $c_{21s} = 60$ Н/м; $c_{22s} = 40$ Н/м; $d_1 = 2$ кг/с; $d_2 = 1$ кг/с. Продолжительность первого и второго этапов испытаний — 182,7 и 1000 с соответственно. Скорость сканирования частоты $\nu_p = 0,00298$ Гц/с.

Частотные испытания системы с тремя степенями свободы. Рассмотрим систему, состоящую из трех частиц (рис. 9): главной (ярко-красной), соседней (бледно-розовой) и дальней (серой). Будем считать, что каждая частица живет в своей реальности. Расчетные модели для трех независимых реальностей приведены на рис. 9.

Частотные испытания спланируем и проведем по изложенной выше методике. Уравнения динамики для трех реальностей имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 -m_1 \ddot{y}_1 - c_1(y_1 - D \sin pt) + c_{21f}(y_2 - y_1) - d_1 \dot{y}_1 &= 0; \\
 -m_2 \ddot{y}_2 - c_{22f}(y_2 - y_1) + c_3(y_3 - y_2) - d_2 \dot{y}_2 &= 0; \\
 -m_3 \ddot{y}_3 - c_3(y_3 - y_2) - d_3 \dot{y}_3 &= 0; \\
 -m_1 \ddot{y}_4 - c_1(y_4 - D \sin pt) + c_{21s}(y_5 - y_4) - d_1 \dot{y}_4 &= 0; \\
 -m_2 \ddot{y}_5 - c_{22s}(y_5 - y_4) + c_{32s}(y_6 - y_5) - d_2 \dot{y}_5 &= 0; \\
 -m_3 \ddot{y}_6 - c_{33s}(y_6 - y_5) - d_3 \dot{y}_6 &= 0; \\
 -m_1 \ddot{y}_7 - c_1(y_7 - D \sin pt) + c_2(y_8 - y_7) - d_1 \dot{y}_7 &= 0; \\
 -m_2 \ddot{y}_8 - c_2(y_8 - y_7) + c_{32t}(y_9 - y_8) - d_2 \dot{y}_8 &= 0; \\
 -m_3 \ddot{y}_9 - c_{33t}(y_9 - y_8) - d_3 \dot{y}_9 &= 0,
 \end{aligned} \quad (3)$$

где $y_1 - y_9$ — смещения частиц; m_3 и d_3 — масса и коэффициент трения третьей частицы; c_3 — жесткость упругого элемента, соединяющего соседние частицы массами m_2 и m_3 ; c_{32s} , c_{33s} и c_{32t} , c_{33t} — жесткости, на которые расщепляется жесткость c_3 во второй и третьей реальностях.

Уравнения (3) определяют задачу Коши с нулевыми начальными условиями. Эти уравнения интегрируются методом Рунге — Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага. Требуемый переходный процесс реализуется в два этапа, которые рассмотрены выше.

Планирование частотных испытаний начинается с оценки собственных частот и форм

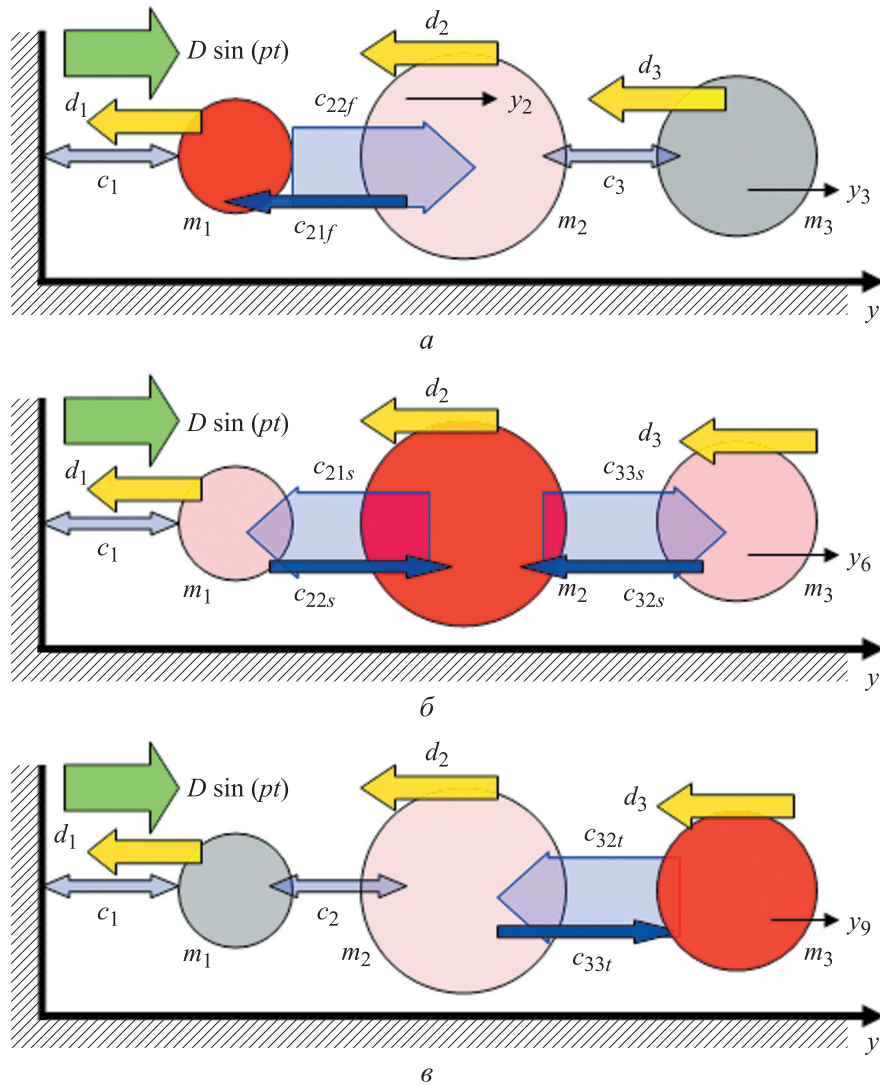


Рис. 9. Расчетные модели системы с тремя степенями свободы для первой (а), второй (б) и третьей (в) реальностей

колебаний системы. Несимметричная частотная матрица второй реальности системы с тремя степенями свободы имеет действительные коэффициенты:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix},$$

где $a_{11} = -m_1\lambda^2 - c_1 - c_{21s} - d_1\lambda$; $a_{12} = c_{21s}$; $a_{13} = 0$;
 $a_{21} = c_{22s}$; $a_{22} = -m_2\lambda^2 - c_{22s} - c_{32s} - d_2\lambda$; $a_{23} = c_{32s}$;
 $a_{31} = 0$; $a_{32} = c_{33s}$; $a_{33} = -m_3\lambda^2 - c_{33s} - d_3\lambda$.

Соответствующее частотное уравнение второй реальности имеет вид

$$a_0\lambda^6 + a_1\lambda^5 + a_2\lambda^4 + a_3\lambda^3 + a_4\lambda^2 + a_5\lambda + a_6 = 0,$$

где $a_0 = m_1m_2m_3$; $a_1 = d_1m_2m_3 + d_2m_1m_3 + d_3m_1m_2$;
 $a_2 = c_1m_2m_3 + c_{21s}m_2m_3 + c_{22s}m_1m_3 + c_{32s}m_1m_3 +$
 $+ d_1d_2m_3 + c_{33s}m_1m_2 + d_2d_3m_1 + d_1d_3m_2$;

$$a_3 = c_{22s}d_1m_3 + c_{32s}d_1m_3 + c_1d_2m_3 + c_{21s}d_2m_3 +$$

$$+ c_{33s}d_1m_2 + c_{33s}d_2m_1 + d_1d_2d_3 + c_1d_3m_2 +$$

$$+ c_{21s}d_3m_2 + c_{22s}d_3m_1;$$

$$a_4 = c_1c_{22s}m_3 + c_1c_{32s}m_3 + c_{21s}c_{32s}m_3 + c_1c_{33s}m_2 +$$

$$+ c_{21s}c_{33s}m_2 + c_{22s}c_{33s}m_1 + c_{33s}d_1d_2 + c_1d_2d_3 +$$

$$+ c_{21s}d_2d_3 + c_{22s}d_1d_3 + c_{32s}d_1d_3;$$

$$a_5 = c_{22s}c_{33s}d_1 + c_1c_{33s}d_2 + c_{21s}c_{33s}d_2 + c_1c_{22s}d_3 +$$

$$+ c_1c_{32s}d_3 + c_{21s}c_{32s}d_3; a_6 = c_1c_{22s}c_{33s}.$$

На рис. 10 показана эволюция собственных значений характеристического показателя модели системы с тремя степенями свободы на комплексной плоскости (с изменением жесткостей c_{21s} , c_{22s} , c_{32s} , c_{33s}). Имеет место уменьшение запаса динамической устойчивости модели. Прочие реальности рассматриваются аналогично.

На рис. 11, а приведены результаты моделирования частотных испытаний рассматриваемой системы с тремя степенями свободы путем

решения задачи Коши для уравнений (3) с нулевыми начальными условиями. В каждой реальности датчик ускорений поставлен на главную частицу.

Построены три графика зависимости измеренных ускорений (м/с^2) трех частиц от частоты вынужденных колебаний (Гц) при моногармоническом возбуждении по смещению

(монтажной плиты вибростенда) заданной амплитуды. Сдвиг третьего резонансного пика АЧХ составляет примерно 0,4 Гц. Имеет место качественное соответствие полученных результатов данным, приведенным на рис. 2.

На рис. 11, б показано, что для малого трения сдвиг (второго резонансного пика) по частоте практически отсутствует при $c_{21s} = c_{22s}$ и $c_{32s} = c_{33s}$

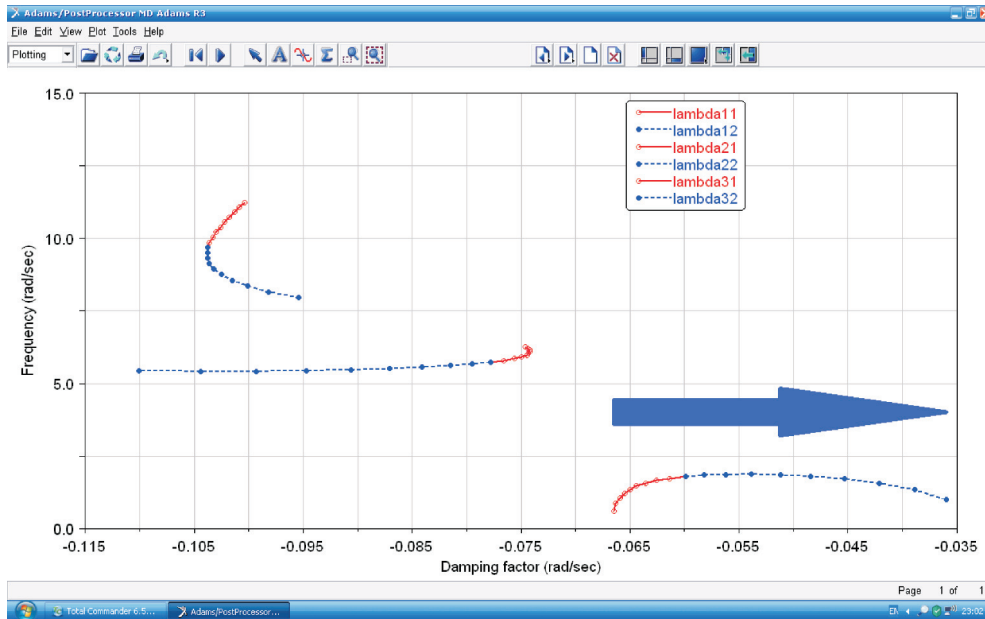
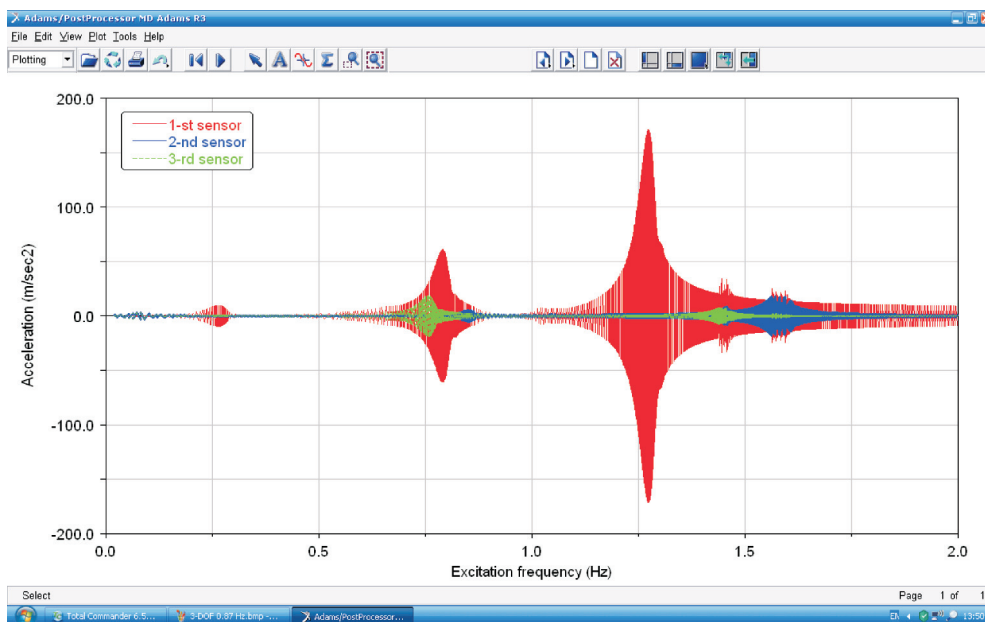
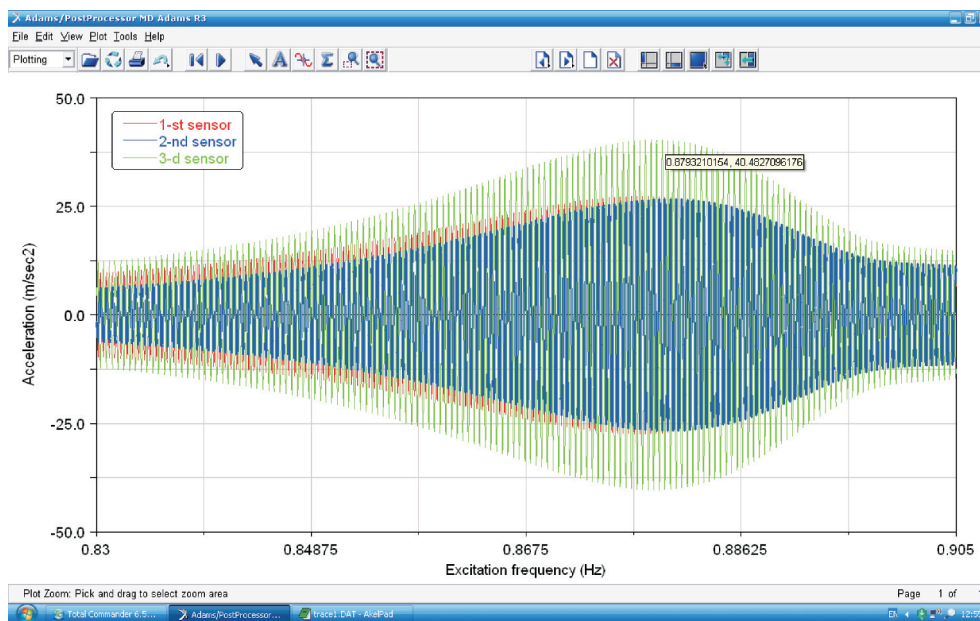


Рис. 10. Эволюция собственных значений характеристического показателя модели системы с тремя степенями свободы на комплексной плоскости



a

Рис. 11 (начало). Наличие (а) и отсутствие (б) сдвига по частоте резонансных пиков модели системы с тремя степенями свободы для первой (—), второй (—) и третьей (—) реальностей



б

Рис. 11 (окончание). Наличие (а) и отсутствие (б) сдвига по частоте резонансных пиков модели системы с тремя степенями свободы для первой (—), второй (—) и третьей (—) реальностей

т. е. если работает третий закон Ньютона. На рис. 11, б хорошо видны периодические изменения ускорений с частотой возбуждения.

Приняты следующие значения параметров модели и эксперимента: $m_1 = 1$ кг; $m_2 = 3$ кг; $m_3 = 2$ кг; $c_1 = 30$ Н/м; $c_2 = 50$ Н/м; $c_3 = 40$ Н/м; $c_{21f} = 40$ Н/м; $c_{22f} = 60$ Н/м; $c_{21s} = 60$ Н/м; $c_{22s} = 40$ Н/м; $c_{32s} = 32$ Н/м; $c_{33s} = 48$ Н/м; $c_{32t} = 48$ Н/м; $c_{33t} = 32$ Н/м; $d_1 = 0,2$ кг/с; $d_2 = 0,4$ кг/с; $d_3 = 0,3$ кг/с. Продолжительность первого и второго этапов испытаний — 384,4 и 3000 с соответственно. Скорость сканирования частоты $v_p = 0,0006307$ Гц/с.

Выводы

1. Рассмотрена задача частотных испытаний упругой конструкции. Предложено объяснение эффекта сдвига по частоте резонансных пиков АЧХ, идентифицируемых разными датчиками вибростенда.

2. Чтобы объяснить этот экспериментальный эффект, использован метод частиц, рассмотрен третий закон Ньютона для взаимодействия частиц как допущение расчета. При оценке взаимодействия частиц модели, сила действия не равна силе противодействия.

Литература

- [1] Чурилин С.А. Определение динамических характеристик раскрывающихся ферменных антенн с учетом результатов их частотных испытаний. *Решетневские чтения-2009. Тр. конф.*, Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2009, т. 1, с. 92–93.
- [2] Николаев С.М., Воронов С.А., Воронов П.С. Создание программного комплекса для автоматизации экспериментального модального анализа сложных механических конструкций. *Прикладная физика и математика*, 2015, № 5, с. 44–49.
- [3] Зимин В.Н., Колосков И.М., Мешковский В.Е., Таирова Л.П., Чурилин С.А. Экспериментальные исследования элементов космических конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3(15). URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/617.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2013-3-617
- [4] Бернс В.А., Долгополов А.В., Маринин Д.А. Модальный анализ конструкций по результатам испытаний их составных частей. *Доклады Академии Наук Высшей школы Российской Федерации*, 2014, № 1(22), с. 34–42.
- [5] Бернс В.А., Левин В.Е., Красноруцкий Д.А., Маринин Д.А., Жуков Е.П., Маленкова В.В., Лакиза П.А. Разработка расчетно-экспериментального метода модального анализа

- крупногабаритных трансформируемых космических конструкций. *Космические аппараты и технологии*, 2018, т. 2, № 3(25), с. 125–133.
- [6] Григорьев Б.В. Анализ результатов частотных испытаний в случае близких собственных частот. *Ученые записки ЦАГИ*, 1993, т. 24, № 4, с. 124–127.
- [7] Дерусова Д.А., Вавилов В.П., Дружинин Н.В., Казакова О.И., Нехорошев В.О., Федоров В.В., Тарасов С.Ю., Шпильной В.Ю., Колубаев В.А. Неразрушающий контроль корпуса *subsat*-спутника с использованием лазерной виброметрии. *Дефектоскопия*, 2019, № 5, с. 57–64, doi: 10.1134/S0130308219050075
- [8] Болотов Б.П., Головкин А.Ю., Соломонов Д.Г. Расчетно-экспериментальный модальный анализ пластины из полимерного композиционного материала. *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*, 2017, т. 1, с. 43–46.
- [9] Пономарев И.С., Махнович С.В., Пантилеев А.С. Особенности экспериментального определения частот и форм собственных колебаний цилиндрической оболочки. *Научный вестник Новосибирского государственного университета*, 2016, № 3(64), с. 44–58, doi: <http://dx.doi.org/10.17212/1814-1196-2016-3-44-58>
- [10] Репин Р.В., Зенков С.Г., Яшкин О.С. Верификация результатов конечно-элементного анализа параметров вибрации оболочки по результатам частотных испытаний. *Труды ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова*, 2013, № 75(359), с. 69–78.
- [11] Дмитриев С.Н., Хамидуллин Р.К. Коррекция матрицы демпфирования с использованием экспериментальных значений коэффициентов модального демпфирования. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3, с. 1–12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/619.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2013-3-619
- [12] Бернс В.А., Жуков Е.П., Маринин Д.А. Построение матрицы демпфирования конструкции по результатам испытаний. *Решетневские чтения-2015. Тр. конф.*, Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2015, т. 1, с. 71–72.
- [13] Бернс В.А., Жуков Е.П., Маринин Д.А. Идентификация диссипативных свойств конструкций по результатам экспериментального модального анализа. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 4(109), с. 4–23, doi: 10.18698/0236-3941-2016-4-4-23
- [14] Система управления вибрационными испытаниями *SignalStar Vector2*. Руководство Пользователя. Начало работы. Корпорация Data Physics, 2025 Gateway Place, Suite 260, San Jose, CA 95110-1015, 60 с.
- [15] Arinchev S.V. Simulation of reversed torsion of the AlMg6 aluminium bar using the macro-molecule approach. *Proceedings of the XIII International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications. COMPLAS 2015*, Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain, 1–3 September 2015, Ebook_Complas_2015, pp. 429–439.
- [16] Arinchev S.V. Back from the solid temperature to kinetic energy of its macro-molecules. *Proceedings of the IV International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications. PARTICLES 2015*, Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain, 28–30 September 2015, Ebook_Particles_2015, pp. 909–920.
- [17] Arinchev S.V. Two-mass gyro-particle as the tool for supersonic aeroelasticity analysis. *Proceedings of the VI International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications. PARTICLES 2019*, Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain, 28–30 October 2019, Ebook_Particles_2019, pp. 644–655.
- [18] Аринчев С.В. *Теория колебаний неконсервативных систем*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 464 с.

References

- [1] Churilin S.A. Finding the dynamic characteristics of self-deployable frame antennae using the results of its frequency tests. *Reshetnevskiy chteniya-2009. Tr. konf.* [Reshetnev readings-2009. Conference proceedings]. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetneva publ., 2009, vol. 1, pp. 92–93.
- [2] Nikolayev S.M., Voronov S.A., Voronov P.S. Creating a software package for automating experimental modal analysis of complex mechanical structures. *Applied Physics and Mathematics*, 2015, no. 5, pp. 44–49 (in Russ.).

- [3] Zimin V.N., Koloskov I.M., Meshkovskiy V.E., Tairova L.P., Churilin S.A. Experimental investigations of space structure elements. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 3(15) (in Russ.). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/617.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2013-3-617
- [4] Berns V.A., Dolgoplov A.V., Marinin D.A. Modal analysis of structures based on the test of their components. *Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 1(22), pp. 34–42 (in Russ.).
- [5] Berns V.A., Levin V.E., Krasnorutskiy D.A., Marinin D.A., Zhukov E.P., Malenkova V.V., Lakiza P.A. Development of a calculation and experimental method for modal analysis of large transformable space structures. *Spacecrafts & Technologies*, 2018, vol. 2, no. 3(25), pp. 125–133 (in Russ.).
- [6] Grigor'yev B.V. Analysis of the results of frequency tests in the case of close natural frequencies. *TsAGI Science Journal*, 1993, vol. 24, no. 4, pp. 124–127 (in Russ.).
- [7] Derusova D.A., Vavilov V.P., Druzhinin N.V., Kazakova O.I., Nekhoroshev V.O., Fedorov V.V., Tarasov S.Yu., Shpil'noy V.Yu., Kolubayev V.A. Non-destructive testing of the cubsat satellite hull using laser vibrometry. *Defektoskopiya*, 2019, no. 5, pp. 57–64 (in Russ.), doi: 10.1134/S0130308219050075
- [8] Bolotov B.P., Golovkin A.Yu., Solomonov D.G. Settlement and experimental modal analysis of a plate made of a polymer composite material. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokieye tekhnologii i innovatsii*, 2017, vol. 1, pp. 43–46 (in Russ.).
- [9] Ponomarev I.S., Makhnovich S.V., Pantileyev A.S. Peculiarities of experimental determination of frequencies and shapes of eigenmodes of cylindrical shells. *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 3(64), pp. 44–58 (in Russ.), doi: <http://dx.doi.org/10.17212/1814-1196-2016-3-44-58>
- [10] Repin R.V., Zenkov S.G., Yashkin O.S. Verification of results of finite-element analysis of vibration parameters of the shell by the modal testing. *Transactions of the Krylova state research centre*, 2013, no. 75(359), pp. 69–78 (in Russ.).
- [11] Dmitriyev S.N., Khamidullin R.K. Damping matrix correction using experimental modal damping coefficients. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 3, pp. 1–12 (in Russ.). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/619.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2013-3-619
- [12] Berns V.A., Zhukov E.P., Marinin D.A. Structural damping matrix of construction according to test results. *Reshetnevskiy chteniya–2015. Tr. konf. [Reshetnev readings–2015. Conference proceedings]*. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetneva publ., 2015, vol. 1, pp. 71–72.
- [13] Berns V.A., Zhukov E.P., Marinin D.A. Identification of the Structures Dissipative Properties According to the Experimental Modal Analysis Results. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2016, no. 4(109), pp. 4–23 (in Russ.), doi: 10.18698/0236-3941-2016-4-4-23
- [14] *Sistema upravleniya vibratsionnymi ispytaniyami SignalStar Vector2* [SignalStar Vector2 Vibration Test Management System. User's manual. Beginning of work. Data Physics Corporation]. Rukovodstvo Pol'zovatelya. Nachalo raboty, Korporatsiya Data Physics, 2025 Gateway Place, Suite 260, San Jose, CA 95110-1015, 60 p.
- [15] Arinchev S.V. Simulation of reversed torsion of the AlMg6 aluminium bar using the macro-molecule approach. *Proceedings of the XIII International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications. COMPLAS 2015*, Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain, 1–3 September 2015, Ebook_Complas_2015, pp. 429–439.
- [16] Arinchev S.V. Back from the solid temperature to kinetic energy of its macro-molecules. *Proceedings of the IV International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications. PARTICLES 2015*, Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain, 28–30 September 2015, Ebook_Particles_2015, pp. 909–920.
- [17] Arinchev S.V. Two-mass gyro-particle as the tool for supersonic aeroelasticity analysis. *Proceedings of the VI International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications. PARTICLES 2019*, Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain, 28–30 October 2019, Ebook_Particles_2019, pp. 644–655.
- [18] Arinchev S.V. *Teoriya kolebaniy nekonservativnykh system* [Theory of oscillations of non-conservative systems]. Moscow, Bauman Press, 2002. 464 p.

Информация об авторе

АРИНЧЕВ Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, e-mail: arinchev@inbox.ru).

Information about the author

ARINCHEV Sergei Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Аринчев С.В. Третий закон Ньютона — это не догма. Это расчетная гипотеза. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 6, с. 36–50, doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-36-50

Please cite this article in English as:

Arinchev S.V. Newton's Third Law is not a Dogma but a Computational Hypothesis. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 6, pp. 36–50, doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-36-50



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет 2-е издание учебника А.А. Гурова, П.В. Слиткова, Ж.Н. Медных «Химия: теория и практика. Металлы и сплавы»

Учебник является оригинальным изданием и не имеет аналогов среди литературы по химии, используемой в учебном процессе технических университетов и вузов. По содержанию и структуре книга представляет собой совокупность учебника, задачника и практикума и состоит из трех разделов. Первый посвящен современным вопросам классификации, строения, получения и очистки металлов. Во втором разделе рассмотрены основные физические и химические свойства металлов. Третий раздел содержит материал, охватывающий сплавы и растворы в металлических системах.

Материал учебника изложен в доступной, но в то же время достаточно строгой форме. Некоторые темы в нем освещены более глубоко, чем в существующих учебниках, и, главное, методически удачнее. Приведенные на форзацах современные формы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева отражают существование проблем классификации, получения и изучения свойств некоторых элементов-металлов. Указана коррозионная стойкость большинства металлов-веществ, которая является одним из важнейших требований, предъявляемых к конструкционным металлическим материалам. Периодические системы с такой информацией в современных учебниках практически не приводились.

Учебник соответствует государственному образовательному стандарту по химии для технических направлений и специальностей и предназначен для студентов 1-3-го курсов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru