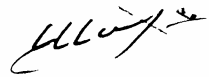


На правах рукописи



**ШЛЫЧКОВ Сергей Владимирович**

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОРПУСНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ**

Специальность 01.02.06 – динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры.

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва – 2004**

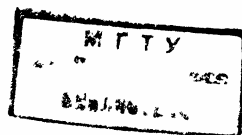
**ШЛЫЧКОВ Сергей Владимирович**

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОРПУСНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ**

Специальность 01.02.06 – динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры.

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва – 2004**



 А.Ю. Карначев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В работе рассматриваются элементы корпуса струнных музыкальных инструментов (МИ). В качестве объекта исследования принята акустическая гитара.

Основными элементами МИ являются: струны – источники механических колебаний, деки – усилители механических колебаний и акустические внутренние полости – резонаторы звуковых колебаний.

Традиционно основное внимание исследователей уделяется струнам. Не плохо изучены акустические свойства внутренних полостей. Значительно меньше внимания уделяется резонансным декам. В то же время дека, или звучащая доска является ключевым элементом конструкции МИ. “Звуки скрипки, гитары исходят от её деки, а не от струн, ибо дека в состоянии вторить тем звукам, которые первоначально вызывает струна”. Дека оказывает решающее влияние на формирование тембра, на силу и длительность звука. Однако динамические свойства резонансных дек исследованы недостаточно. Основные параметры деки установлены исключительно эмпирическим путём, применительно к конструкциям из резонансной древесины. Очевидно, дальнейшее совершенствование струнных МИ, разработка новых конструкций высокого класса на основе современных материалов, установление критериев качества связано с развитием теории и методов математического моделирования.

Актуальность работы определяется необходимостью решения прикладной научно-технической проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное и социально-культурное значение.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является создание методики исследования динамики корпусных элементов МИ. В этой связи в диссертации ставятся и решаются следующие задачи:

- Построение расчётных динамических моделей корпусных элементов конструкций струнных МИ.
- Разработка методики экспериментальных исследований механических колебаний деки.
- Определение физико-механических характеристик конструкционных материалов и установление пород древесины.
- Анализ влияния конструктивных и технологических факторов, начального НДС, индуцированного предварительным натяжением струн, уровня демпфирования на динамические характеристики деки.
- Исследование влияния акустического резонатора и струн на динамические характеристики деки.

**Научная новизна.** На защиту выносятся результаты, содержащие элементы научной новизны:

1. Методика исследования динамики тонкостенных элементов конструкций струнных МИ.

2. Математическая модель и вычислительные алгоритмы расчета параметров механических колебаний резонансных дек с учетом подкреплений и начального НДС, обусловленного предварительным натяжением струн.

3. Результаты физического и математического моделирования, устанавливающие зависимости динамических характеристик резонансных дек от конструктивных и технологических факторов.

**Достоверность результатов.** Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы обоснована:

- Строгим и последовательным применением классических положений механики: методов теории тонких пластин и оболочек, теории колебаний, вычислительной математики и механики, экспериментальных методов исследования.

- Проверкой разработанных методик и алгоритмов на большом числе тестовых задач.

- Соответствием полученных результатов данным классических решений, а также прямого эксперимента, поставленного на реальной конструкции.

**Практическая ценность.** На основе проведенных численных и экспериментальных исследований установлены новые закономерности, отражающие влияние конструктивных и технологических факторов на динамические характеристики деки. Установленные закономерности позволяют целенаправленно корректировать динамические характеристики резонансных дек с целью совершенствования существующих и создания перспективных конструкций. Разработанные методики и программы позволяют отказаться от проведения дорогостоящих натурных экспериментов и способствуют повышению качества проектирования МИ.

**Внедрение и реализация в промышленности.** Методики расчета и рекомендации по улучшению качества акустической гитары использованы в опытно-конструкторских разработках фирмы по производству музыкальных инструментов ЗАО "Этюд – Урал". Программы расчёта внедрены в учебный процесс МарГТУ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. Ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава по итогам НИР (Йошкар-Ола, МарГТУ, 1998-2004).

2. 52-ой Межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов (Йошкар-Ола, 1999).
3. Всероссийской научно-технической конференции "Композиционные материалы в авиастроении и народном хозяйстве" (Казань, 1999).
4. 1-ой Российской конференции молодых ученых по математическому моделированию (Калуга, 2000).
5. Всероссийской научной конференции "Четвертые Вавиловские чтения" (Йошкар-Ола, 2000).
6. Всероссийской научно-технической конференции "Аэрокосмическая техника и высокие технологии" (Пермь, 2001).
7. VIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001).
8. XI сессии Российского акустического общества (Москва, 2001).
9. Акустической научной сессии (Нижний Новгород, 2002).
10. XX международной конференции по теории пластин и оболочек (Нижний Новгород, 2002).
11. XIII сессии Российского акустического общества (Москва, 2003).

Диссертационная работа докладывалась и получила одобрение на научных семинарах кафедр РК-5 (МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001, 2003), сопоставления материалов и прикладной механики (МарГТУ, 2001), теоретической механики и прикладной математики (МГУЛеса, 2002).

**Публикации.** По результатам исследований опубликованы 15 работ. Основное содержание диссертации изложено в работах [1–13].

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка использованной литературы из 180 наименований и приложений. Общий объем диссертации составляет 170 страниц, включая 52 иллюстрации и 24 таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснованы актуальность, научная новизна и практическая значимость.

За многие столетия в области разработки и изготовления МИ накоплен богатый опыт, сформированы определённые традиции. Выдающимися мастерами знаменитой кремонской школы (А.Амати, А.Гварнери, Д.Гварнери, А.Страдивари) созданы первоклассные образцы струнных МИ, до сих пор не превзойденные по своим достоинствам.

Рассматриваются характерные свойства элементов конструкций МИ. Отмечается, что конструкция идеальной деки сочетает в себе ряд достаточно противоречивых свойств и качеств. С одной стороны, хорошая дека должна быть

достаточно податливой. Чем выше её податливость, тем ниже и сильнее звук. С другой стороны, повышенная податливость приводит к значительным деформациям деки при акустической настройке МИ в результате натяжения струн колками.

Кроме того, для равномерного усиления составляющих спектра возбуждения дека должна обладать повышенной демпфирующей способностью. Однако повышенная демпфирующая способность приводит к сокращению длительности звучания и ухудшению качества МИ.

Гармонию “интересов” приходится искать путём компромиссов, имея в виду, в частности, следующие критерии качества: гладкий, относительно ровный характер резонансной кривой; низкая частота основного тона.

**В первой главе** приведены краткие сведения из истории музыкальной акустики. Отмечен вклад Аристотеля, С.Бетиуса, Г.Галилея, Г.Гельмгольца, Пифагора, Дж.У.Рэлея, Э.Хладни.

Рассматривается задача о механических колебаниях струны как источника звука. Эта задача занимала видное место в трудах Ж.Д'Аламбера, Д.Бернулли, Ж.Лагранжа, Ж.Савера, Б.Тэйлора, Л.Эйлера.

В работах Ю.А.Демьянова и Н.А.Комарова струна рассматривается как составной элемент МИ. Учитываются изменения длины и силы натяжения в результате прижима струны к ладу. Исследуются эффекты, связанные с колебательными движениями опорной конструкции. Результаты решений получены при отсутствии достоверных данных о динамических характеристиках опор, которые, прежде всего, определяются упругой податливостью деки.

Представлена номенклатура конструкционных материалов. Традиционно для дек струнных МИ используется резонансная ель – уникальное дорогостоящее природное сырьё. Выполнен патентный поиск, связанный с применением новых материалов. В качестве перспективных материалов рассматриваются волокнистые композиты: стеклопластики и углепластики.

Представлены характерные конструкции резонансных дек. Дека – это тонкостенная пространственная конструкция, имеющая ряд специфических особенностей: переменные кривизна поверхности и толщина стенки; сложная конфигурация контура; неоднородная слоисто-волокнистая структура материала при ярко выраженной анизотропии физико-механических свойств; наличие поля начальных напряжений; асимметричный набор рёбер жёсткости. Причём, размеры и конфигурация деки, даже в пределах одного вида, отличаются большим разнообразием.

Выполнен обзор исследований динамики тонкостенных конструкций. Отмечены работы Н.А.Алфутова, С.А.Амбарцумяна, В.Л.Бидермана, В.В.Болотина, Г.А.Ванина, В.В.Васильева, Л.Доннела, В.В.Новожилова,

Ю.Н.Работнова, Э.Рейсснера, С.П.Тимошенко, В.И.Феодосьева, Л.А.Шапалова.

В качестве метода исследования принят метод конечных элементов (МКЭ). Инженерная интерпретация МКЭ представлена в монографиях Р.Галлагера, О.Зенкевича, Д.Норри, В.А.Постнова, Л.Сегерлинда, Ж.ДеФриза. Математические аспекты МКЭ рассмотрены в книгах С.Ю.Еременко, Г.Стренга и Дж.Фикса. Программы и вычислительные алгоритмы – в работах Б.Айрона и С.Ахмади, К.Бате и Е.Вилсона, У.Уивера и П.Джонстона. Особенности применения МКЭ к расчету многослойных пластин и оболочек – в работах Н.А.Алфутова, П.А.Зиновьева, Б.Г.Попова, Р.Б.Рикардса и А.К.Чате.

К настоящему времени в нашей стране и за рубежом опубликован ряд работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованиям струнных МИ. Отмечаются работы Г.Г.Звёздкиной, Г.Колдерсмита, В.Г.Порвенкова, А.В.Римского-Корсакова. В этих работах расчётные схемы деки представляются в виде круглой и прямоугольной пластинок. Очевидно, что такие упрощенные схемы не способны адекватно описать поведение реальной конструкции.

В настоящее время для исследований динамики МИ привлекаются современные вычислительные и экспериментальные методы. Известные публикации содержат разрозненный набор данных, который может быть использован лишь для качественного сопоставительного анализа.

Во второй главе представлена методика расчета корпусных элементов конструкций струнных МИ. Для дискретизации конструкции применяются оболочечный и стержневой КЭ, разработанные Б.Г.Поповым. Расчетные соотношения строятся на основе смешанной вариационной формулировки Хеллингера-Рейсснера при независимой аппроксимации полей перемещений и деформаций.

Задача динамики описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + ([C] - [R])\{q\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

Здесь  $[M]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$  и  $[R]$  – матрицы, характеризующие инерционные, диссипативные и упругие свойства конструкции;  $\{F(t)\}$  – вектор обобщенных вынуждающих сил. Источником возбуждения считаются упругие вибрации струн.

Предварительное натяжение струн индуцирует начальное НДС. Параметры НДС находятся из решения системы линейных алгебраических уравнений

$$[C]\{q_m\} = \{F_m\}, \quad (2)$$

где  $\{F_m\}$  – вектор нагрузок.



Система дифференциальных уравнений (1) описывает вынужденные колебания предварительно напряженной динамической системы относительно равновесного состояния (2). Для нахождения  $p$  низших собственных форм и частот применяется метод итераций в подпространстве собственных векторов. Считается, что  $p \ll m$ , где  $m$  – число степеней свободы.

Амплитуды установившихся вынужденных колебаний определяются путём разложения движения по  $p$  низшим собственным формам. Уравнения (1) в главных координатах имеют вид:

$$\ddot{Z}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{Z}_j + \omega_j^2 Z_j = f_j(t), \quad (j = 1, 2, \dots, r) \quad (3)$$

Здесь  $\{f_j(t)\} = [\Phi]^T \{F(t)\}$  – обобщенная сила,  $\xi_j$  и  $\omega_j$  – относительное демпфирование и круговая частота для  $j$ -ой собственной формы,  $r = \min(2p, p+8)$ .

Для описания рассеяния энергии используется модель пропорционального демпфирования. Считается, что

$$[B] = M \sum_{j=1}^p \gamma_j [M^{-1} \tilde{C}]^j, \quad [\tilde{C}] = [C] - [R], \quad (4)$$

где  $\gamma_j$  – параметры Рэлея, которые при известных коэффициентах демпфирования находятся из решения системы уравнений

$$\xi_j = \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_1}{\omega_j} + \gamma_2 \omega_j + \gamma_3 \omega_j^3 + \dots + \gamma_p \omega_j^{(2p-3)} \right). \quad (5)$$

В условиях ограниченной информации относительное демпфирование для высших форм колебаний определяется на основе экстраполяции:

$$\xi_j = \xi_1 \left( \frac{\omega_j}{\omega_1} \right)^e, \quad \xi_1 = \frac{\delta}{2\pi}, \quad (0,5 \leq e \leq 0,7) \quad (6)$$

Здесь  $\delta$  – логарифмический декремент колебаний.

В третьей главе представлена конструкция резонансной деки классической гитары. Расчётная схема конструкции представляется в виде динамической системы с 9668 степенями свободы. Используются 990 треугольных плоских и 140 стержневых КЭ.

В зависимости от натяжения струн колками исследовано упругое деформирование. На рис.1 для трёх вариантов конструкций: деки без подкреплений (пружинок), деки с 3 и 4 пружинками – построены эпюры прогибов. Расчёты проведены как для шарнирно-опертой, так и для защемлённой по контуру пластинок. Результаты расчётов подтверждаются полученными экспериментальными данными.

С целью сравнительной оценки эффективности и точности расчетной

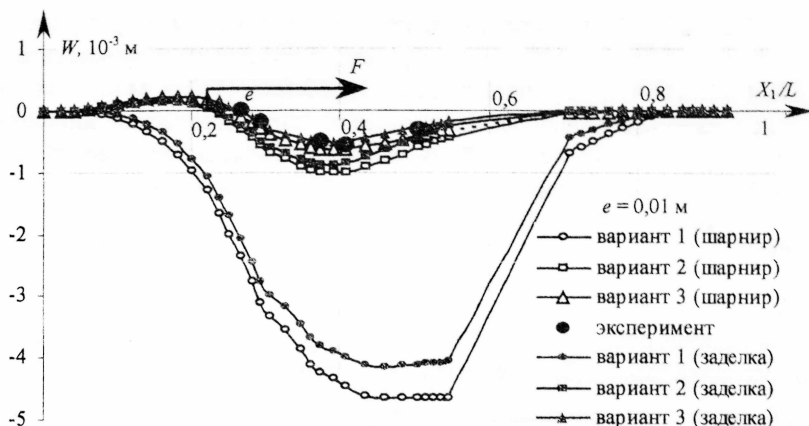


Рис. 1

модели МКЭ проведён расчёт ряда тонкостенных конструкций. Рассмотрены задачи растяжения–сжатия и изгиба пластинок при статическом нагружении. Показано, что при увеличении числа КЭ имеет место сходимость приближённых решений МКЭ к точным аналитическим решениям. Для получения приемлемой точности по напряжениям (в пределах 3%) требуется более мелкая конечно-элементная сетка, чем по перемещениям.

Рассмотрены задачи динамики пластинок. Определены значения частотных коэффициентов для 16 низших собственных форм. Результаты расчётов сопоставлены с классическими решениями С.Игути и В.В.Болотина, полученного асимптотическим методом. Сравнительный анализ результатов при числе КЭ  $N = 256$  показал, что различие собственных частот не превышает 0,1%.

Выполнен анализ влияния мембранных усилий на изгибную жёсткость стенки. С этой целью рассмотрена задача устойчивости. Сходимость решений "сверху" показывает, что расчетная модель МКЭ при крупной сетке получает более жесткой, чем реальная конструкция.

Результаты расчётов подтверждают эффективность и достоверность разработанных расчётных моделей и вычислительных алгоритмов.

**В четвертой главе** представлены результаты расчётно-экспериментальных исследований. Экспериментальная установка спроектирована и изготовлена на базе лаборатории композитных технологий МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Исследовались вынужденные колебания деки при силовом моногармоническом возбуждении

$$F(t) = F_0 \sin \Omega t, \quad (7)$$

где  $F_0$  и  $\Omega$  – амплитуда и круговая частота. Возбуждение на деку передавалось от электромагнитного вибратора посредством traversы и "прикладывалось" последовательно в трех разных точках – 1, 2, 3 (рис.4). Для измерения вибрационной нагрузки использовался кольцевой тензометрический динамометр, для регистрации виброускорений – миниатюрный пьезоэлектрический датчик. По результатам измерений определялась приведенная амплитуда колебаний:

$$q_0 = \frac{k \cdot a_0}{F_0 \Omega^2}, \quad (8)$$

где  $a_0$  – амплитуда виброускорения,  $k = 10^4$  – масштабный множитель.

Таким образом построен ряд АЧХ: деки с подкреплениями (рис.2) и деки без подкреплений (рис.3). Данные физических экспериментов показаны кружка-

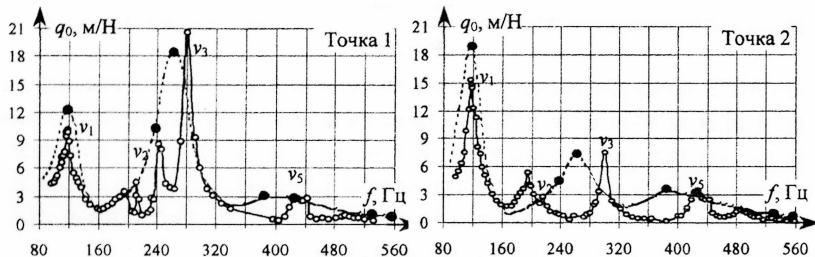


Рис.2

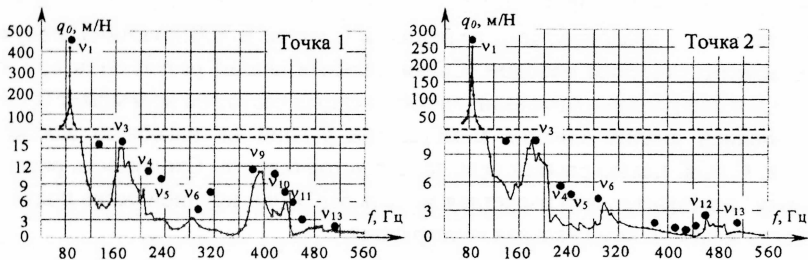


Рис.3

ми, соединенными сплошными линиями; результаты расчётов – жирными точками (амплитуды на резонансных частотах), соединенными штриховыми линиями. Сравнительный анализ АЧХ показывает, что подкрепление деки рёбрами жёсткости заметно уменьшает амплитуды колебаний основного тона и делает более ровным состав резонансных амплитуд. При этом АЧХ деки зависит от точки приложения вибрационной нагрузки

Полученные АЧХ использованы для определения констант демпфирования. Демпфирующая способность деки оценивалась интегрально по ширине

полосы первого “пика” резонансной кривой (по первому тону колебаний). Для деки с подкреплениями логарифмический декремент  $\delta = 0,377$ ; для деки без подкреплений  $\delta = 0,157$ . Расчётные АЧХ получены на основе экстраполяции (6) при  $e = 0,7$ .

С целью идентификации конструкционных материалов в лаборатории сертификации древесины МарГТУ проведены специальные эксперименты. При помощи импульсного ультразвукового метода определены упругие постоянные, по ним установлены породы древесины.

С целью анализа низших собственных форм использовалась методика Хладни. Результаты экспериментов подтверждают расчётные данные.

В целом расчётные собственные частоты удовлетворительно согласуются с экспериментом. В то же время сопоставительный анализ расчетных и экспериментальных кривых (рис.2) выявил заметные различия: расчетные кривые более однородны по составу резонансных амплитуд и лишены отдельных пиков. Такие различия объясняются тем, что расчетная модель деки не учитывает влияние струн и резонатора, которые имеют собственные жёсткости и обладают собственными спектрами резонансных частот.

Струнный МИ в целом – это связанная упруго-акустическая система. Упругие колебания струн, деки и звуковые колебания давления связаны друг с другом. Для оценки влияния акустической внутренней полости и струн на динамические характеристики деки поставлен и проведен ряд дополнительных экспериментов. Использовались прибор “Навигатор”, методы вибродиагностики и цифрового спектрального анализа. Разработанное программное обеспечение ограничивалось анализом установившихся режимов колебаний.

Рассматривались конструкция гитары целиком, корпус гитары со снятыми струнами и дека (из корпуса вырезалось дно так, чтобы это минимально отразилось на условиях закрепления деки). Колебания возбуждались щипком баковой или дискантовой струн.

Результатом измерений стал набор дискретно-временных последовательностей (ускорений от времени):  $a = \{a[n] = f(nh)\}$ . Здесь  $h = 125$  мкс. – период дискретизации,  $n = 0, 1, \dots, N-1$ . Для получения амплитудно-временных зависимостей  $w = \{w[n]\}$  функции  $a = \{a[n]\}$  дважды интегрировались. С целью получения статистически состоятельных оценок использовались метод периодограмм Уэлча и взвешивание при помощи окна Наттолла. Спектральная плотность мощности (СПМ) определялась формулой:

$$P(f) = \frac{h}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} w[n] \exp\left(\frac{-i2\pi f n h}{N}\right) \right|^2, \quad P(f) = 10 \lg \left( \frac{P(f)}{\max(P(f))} \right). \quad (9)$$

В итоге получен ряд оценок СПМ в диапазоне до 1000 Гц.

Анализ результатов, полученных для десяти низших собственных частот, позволяет сделать следующие выводы:

- Спектральная кривая деки с резонатором содержит дополнительные пики – акустические резонансы.
- Спектральная кривая деки без резонатора получается более ровной по составу амплитуд, чем деки с резонатором. Очевидно, резонатор увеличивает амплитуды колебаний на резонансных частотах.
- Собственные частоты деки с резонатором и деки без резонатора мало отличаются друг от друга.
- Наличие струн оказывает слабое влияние на собственные частоты колебаний деки.

В пятой главе приводятся результаты численных экспериментов. Для трех вариантов конструкций подкрепления гитарной деки представлены картины распределений мембранных усилий, индуцированных натяжением струн колками. Показано, что нижняя часть деки (часть ниже подставки для струн) оказывается растянутой, верхняя часть – сжатой.

В зависимости от геометрических размеров, конструктивных факторов, а также начального НДС, проведён анализ спектров колебаний. Для трёх вариантов конструкций построены 10 низших собственных форм. В результате параметрического анализа установлено:

- Усиление деки рёбрами жёсткости оказывает существенное влияние на её собственные формы и частоты. Чем выше частота колебаний, тем сильнее проявляется это влияние.
- Начальное напряжённое состояние практически не влияет на спектр собственных форм и частот.
- Увеличение высоты пружинок с 10 до 14 мм обуславливает повышение собственных частот колебаний деки на 40...60%.
- Условия закрепления деки по контуру (шарнир или заделка) заметно влияют на собственные частоты. Это влияние особенно заметно отражается на второй и третьей собственных частотах (разница около 30%).
- При шарнирном закреплении контура собственные частоты колебаний деки получаются ближе к эксперименту, чем при заземлении.
- Влияние резонаторного отверстия в целом не велико. Низшие собственные частоты различаются на 10%. Различие на более высоких частотах выражено менее значительно.

При разработке МИ частоты собственных колебаний деки согласовываются с частотами колебаний струн. Дело в том, что при колебаниях на близких частотах в упругой системе проявляются биения и негармоничности оберто-

нов. На основе сопоставительного анализа спектров частот для двух вариантов конструкций деки и струн установлено преимущество одного из вариантов. Дека и струны рассматривались как парциальные динамические системы.

В шестой главе представлены результаты математического моделирования установившихся колебаний деки под действием вибраций струн (рис.4).

Составлены матрицы статических податливостей подставки для крепления струн. Показано, что наименьшую податливость в продольном направлении имеет точка крепления центральной струны, наибольшую – точки крепления басовой и дискантовой струн, расположенные по краям подставки.

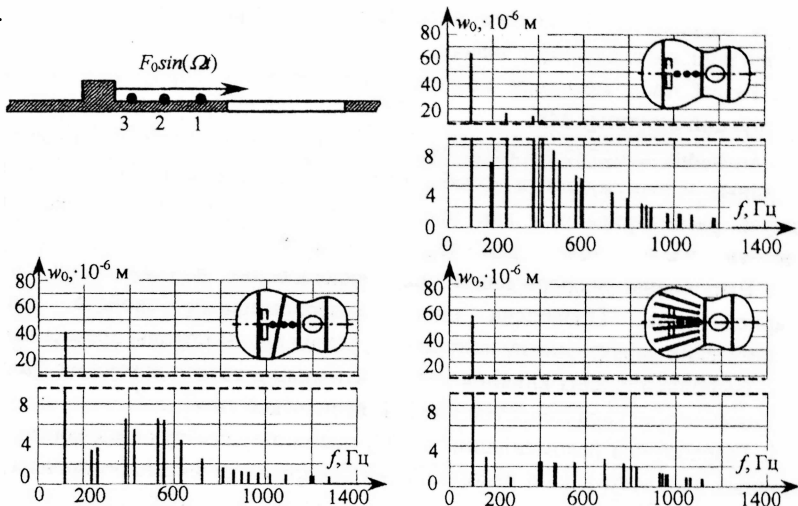


Рис.4

Динамические податливости представлены в виде спектров амплитуд, рассчитанных на резонансных частотах в диапазоне от 80 до 1400 Гц. Наибольшие динамические податливости наблюдаются в полосе до 630 Гц. Струны, расположенные по краям подставки, вызывают более сильные динамические реакции, чем центральная струна.

Исследованы зависимости спектров амплитуд виброперемещений точки 3 от схемы подкрепления (рис.4). Установлено, что комбинированная схема, сочетающая поперечное и веерное расположение пружинок, имеет более ровный и плотный спектр резонансных амплитуд, чем схема с поперечным расположением пружинок. Для симметричных схем подкреплений наблюдается резкое различие амплитуд виброперемещений точек 1, 2 и 3 на первой и второй собственных частотах. Это различие объясняется тем, что первая собст-

венная форма является симметричной, а вторая – кососимметричной. Каждая точка деки имеет свой собственный спектр резонансных амплитуд.

Рассмотрены зависимости спектров резонансных амплитуд от высоты рёбер жёсткости и уровня демпфирования. Установлено, что с увеличением демпфирования резонансные амплитуды уменьшаются, состав спектра амплитуд становится более однородным.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

Получено решение прикладной научно-технической проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное и социально-культурное значение, в рамках которой решены следующие задачи:

1. Разработана методика исследований динамики корпусных элементов конструкций струнных МИ.

2. Созданы конечно-элементная модель и программа расчета параметров свободных и вынужденных колебаний корпусных элементов МИ. Элементы корпуса рассматриваются как предварительно напряженные тонкостенные конструкции с асимметричным набором рёбер жёсткости.

3. Выполнены экспериментальные исследования динамических свойств гитарной деки. Проведена оценка диссипативных свойств, физико-механических характеристик материалов, установлены породы древесины.

4. Выполнен анализ влияния конструктивных и технологических факторов на динамические характеристики деки классической гитары.

5. Разработаны рекомендации по улучшению существующих конструкций гитарных дек. Методика и рекомендации внедрены на фирме по производству музыкальных инструментов ЗАО "Этюд – Урал" и использованы в учебном процессе МарГТУ.

### **Основное содержание диссертации изложено в работах:**

1. Куликов Ю.А., Шлычков С.В. Компьютерная динамическая модель музыкального струнного инструмента как композитной конструкции // Композиционные материалы в авиастроении и народном хозяйстве: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Казань, 1999. – Ч.2. – С.36.

2. Куликов Ю.А., Шлычков С.В. Математическая постановка задачи расчета частотных характеристик гитарных дек музыкальных струнных инструментов // Четвертые Вавиловские чтения. – Йошкар-Ола, 2000. – Ч.3. – С.212–215.

3. Шлычков С.В. Оценка точности расчетной модели напряженно-деформированного состояния тонкостенных элементов музыкальных струнных инструментов // Исследовано в России. Электронный журнал. – 2000. – №18 – С.245–262. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2000/018.pdf>

4. Шлычков С.В. Анализ резонансных свойств тонкостенных элементов музыкальных струнных инструментов// Исследовано в России. Электронный журнал. – 2000. – №64. – С.924–942.  
<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2000/064.pdf>

5. Шлычков С.В. Оценка точности расчетной динамической модели тонкостенных элементов музыкальных струнных инструментов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2000. – 18 с. (Деп. в ВИНТИ 28.06.00; №1822–В00).

6. Куликов Ю.А., Шлычков С.В. Анализ собственных форм и частот верхней и нижней дек классической гитары // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2000. – Т.6, №4. – С.551–561.

7. Шлычков С.В. Расчетно-экспериментальное исследование резонансных свойств корпусных элементов музыкальных инструментов // Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2001: Сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Пермь, 2001. – С.304.

8. Шлычков С.В. Расчетно-экспериментальное исследование резонансных свойств корпусных элементов музыкальных инструментов// VIII Всерос. съезд по теоретической и прикладной механике: Аннот. докл. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2001. – С.612–613.

9. Шлычков С.В. Расчетно-экспериментальное исследование динамических свойств гитарной деки// Механика композиционных материалов и конструкций. – 2001. – Т.7, №3. – С.389–400.

10. Шлычков С.В. Исследование динамических свойств звукоизлучающих элементов музыкальных струнных инструментов: расчет и эксперимент// Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Сб. тр. XI-й сессии Рос. акустического общества. – М.: Геос, 2001. – Т.1. – С.222–225.

11. Шлычков С.В. Влияние уровня демпфирования гитарной деки на ее амплитудно-частотную характеристику// Тр. Нижегородской акустической научной сессии. – Н. Новгород: Изд-во “ТАЛАМ”, 2002. – С.334–336.

12. Кулиш Г.Г., Шлычков С.В. О влиянии диссипативных свойств на динамическую реакцию гитарной деки// XX Междунар. конф. по теории оболочек и пластин: Сб. докл. – Н. Новгород, 2002. – С.202–207.

13. Шлычков С.В. Влияние схемы подкреплений на динамическую реакцию гитарной деки // Акустические измерения. Аэроакустика. Геоакустика. Ультразвук. Электроакустика. Сб. тр. XIII-й сессии Рос. акустического общества. – М.: Геос, 2003. – Т.2. – С.285–288.



Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана, Зак 58 Тираж 50 экз.  
Дата разрешения к печати 20 апреля 2004г.

---