АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XX 1974 Вып. 5

УДК 534.3:681.8

ОБ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ РЕЗОНАНСНЫХ КОРПУСОВ ЩИПКОВЫХ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

М. В. Гриднев

Рассмотрена форма импульса соударения металлического шара с подставкой для струн щипкового музыкального инструмента (гитары) и установлено нормированное время ударного импульса. Рассчитано время соударения шара с подставкой для струн с учетом характеристик упругости; получено согласование расчета с экспериментальными данными для гитары.

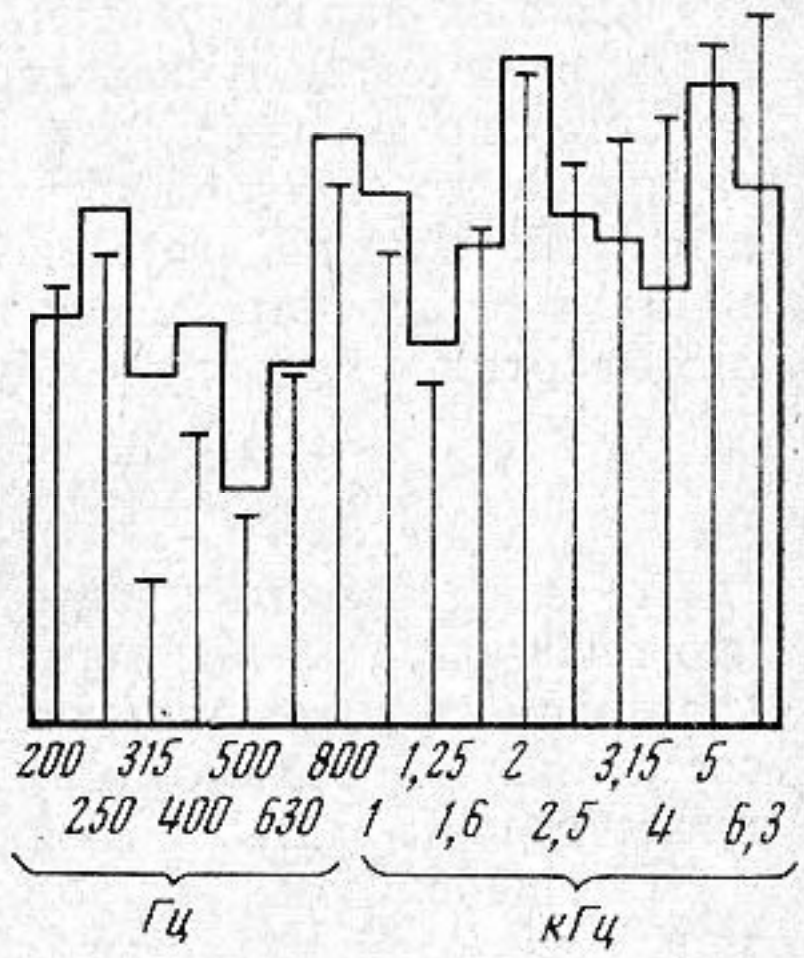
Предложен упрощенный метод снятия спектрограмм гитар, возбуждаемых импульсным способом, и приведены результаты его практического применения.

В настоящее время при акустических исследованиях музыкальных инструментов широко применяется метод снятия частотных характеристик, основанный на нормированном импульсном возбуждении резонансных корпусов инструментов. Впервые этот метод был использован А. В. Римским-Корсаковым и Н. Д. Шумовой [1]. Основным параметром, влияющим на частотные компоненты спектра импульсного отклика инструмента, является длительность ударного импульса, воздействующего на инструмент.

В работе [1] длительность ударного импульса определяется выражением

$$\tau = \frac{T}{\pi n}\sqrt{6K} = \frac{1}{\pi f_в}\frac{\sqrt{6K'}}{10} = 0{,}078\frac{\sqrt{K'}}{f_в}, \quad (1)$$

где T — период возбуждающей силы; $f_в$ — верхняя граничная частота исследуемого спектра; n — номер высшей гармоники; K — коэффициент, характеризующий спадание амплитуды с возрастанием частоты; K' — коэффициент спадания, выраженный в процентах.



Фиг. 1

Если задаться значениями верхней граничной частоты исследуемого спектра ($f_в$) и коэффициентом спадания амплитуды (K'), можно определить по формуле (1) длительность ударного импульса. Так, для верхней граничной частоты $f_в$=6000 *гц* в зависимости от выбранного значения K' (например, от 1 до 25%) можно использовать ударный импульс длительностью от $13\cdot10^{-6}$ до $65\cdot10^{-6}$ *сек*. Однако получить на практике такое время соударения без принятия специальных мер невозможно.

Известны различные способы уменьшения времени соударения (см., например, [1]). Б. А. Янковский для получения времени удара порядка 70·

$\cdot 10^{-6}$ *сек* использовал специальную площадку из самшита, наклеиваемую сургучом на подставку для струн исследуемого инструмента. Удар шариком производился в этом случае по самшитовой площадке. Однако применение специальных площадок вносит искажения в спектр отклика гитары. На фиг. 1 приведены спектрограммы одной и той же гитары при различном возбуждении. Сплошным контуром обведена спектрограмма отклика инструмента при ударе шариком непосредственно по подставке, а штрихами — при ударе по самшитовой площадке размером $9\times9\times6$ *мм*^{3}. Сравнение показывает, что спектрограммы значительно отличаются друг от друга. Так, на второй спектрограмме заметно снижено излучение в низкочастотной области (особенно на частотах 315 и 400 *гц*) и увеличено в высокочастотной. Увеличение спектральных линий в зоне частот 3150—6300 *гц* можно объяснить уменьшением времени соударения, а уменьшение излучения на отдельных низких частотах, по-видимому, является следствием действия самшитовой площадки как механоакустического фильтра. Следует отметить, что искажение спектрограммы в низкочастотной области (200—630 *гц*) недопустимо, так как именно в этой области присутствуют форманты, ответственные за положительные тембровые качества звучания инструмента. Поэтому использование самшитовой площадки для импульсного возбуждения корпуса гитары нецелесообразно. К тому же применение специальной площадки требует дополнительного времени на ее установку, что увеличивает время снятия частотной характеристики инструмента и приводит к порче лакового покрытия, а это, несомненно, затрудняет использование подобного метода снятия частотной характеристики в условиях массового производства музыкальных инструментов.

Цель данной работы —рассмотрение возможности снятия частотной характеристики резонансного корпуса гитары для контроля качества продукции в условиях массового производства при использовании метода возбуждения ударом стального ширика по подстановке инструмента без специальных ударных площадок.

Обсудим вопрос определения времени соударения соприкасающихся тел с учетом их характеристик упругости и рассмотрим верхнюю границу спектра частот, излучаемых гитарой при возбуждении подобного рода.

Согласно теории Герца [2], нарастание и спад силы взаимодействия соударяющихся тел описываются полуволной косинусоиды. Приняв форму импульса силы, действующей на подставку струн гитары при соударении с металлическим шаром, в виде полуволны косинусоиды, мы можем определить верхнюю границу возбуждаемого спектра гитары соотношением [3]:

$$f_в = 1{,}5/\tau, \tag{2}$$

где τ — длительность процесса соударения. При этом следует иметь в виду, что такое определение верхней границы спектра условно: в сигнале, излучаемом инструментом при импульсном возбуждении, есть отличные от нуля составляющие с частотами, превышающими $f_в$, которыми, однако, можно пренебречь из-за малой их интенсивности.

Таким образом, для возбуждения колебаний отдельных элементов гитары с частотой, например, до $f_в=7000$ *гц* необходим ударный импульс длительностью $\tau=1{,}5/f_в=214\cdot10^{-6}$ *сек.* (Заметим, что спектр излучения гитары заключен обычно в диапазоне от 120 до 6000 *гц*).

Перейдем к определению времени соударения металлического шара с подставкой для струн гитары с учетом характеристик упругости. Для этого примем следующие условия. Деку музыкального инструмента будем рассматривать как пластинку, жестко закрепленную по контуру. Подставку для струн, по которой производится удар при импульсном возбуждении инструмента, следует рассматривать как пластинку, жестко связанную с упругим основанием — декой инструмента. Заметим, что упругие свойства деки оказывают влияние на собственные частоты колебаний подставки, но

не влияют на силу взаимодействия при соударении подставки для струн с металлическим шаром, из которой определяется время соударения [4].

Поэтому будем считать, что определяющими параметрами, влияющими на время соударения тел, являются характеристики упругости подставки для струн музыкального инструмента и металлического шара.

Для определения времени соударения двух тел используем формулу [4]:

$$\tau = Bk^{3/5}, \tag{3}$$

где

$$B = \left[\frac{32}{\sqrt{\pi v_0}\left(\frac{3}{2m_1} + \frac{6}{m_2}\right)} \right]^{2/5}. \tag{4}$$

Здесь v_0 — начальная скорость сближения центра инерции шара и подставки, m_1 и m_2 — массы первого и второго тела соответственно, k — коэффициент, зависящий от геометрии соприкасающихся поверхностей и характеристик упругости материалов.

Так как подставка жестко связана с декой музыкального инструмента, который в свою очередь жестко закрепляется в массивном штативе, вторым слагаемым в выражении (4) можно пренебречь, полагая массу второго тела (m_2) бесконечно большой. Тогда выражение (4) для рассматриваемого случая примет вид

$$B = \left[\frac{32}{\frac{3}{2m_1}\sqrt{\pi v_0}} \right]^{2/5}. \tag{5}$$

Коэффициент k определяется согласно работе [4], по формуле

$$k = \sqrt[3]{\frac{9}{16R}\left(\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_{\text{пр}}^2}{E_{\text{пр}}}\right)^2}, \tag{6}$$

где R — радиус металлического шара, E и ν — характеристики упругости его материала (для стали $E = 2 \cdot 10^{11}$ $н/м^2$, $\nu = 0{,}28$); $E_{\text{пр}}$ и $\nu_{\text{пр}}$ — приведенные характеристики упругости подставки (ударной площадки).

Приведенный модуль упругости для анизотропной пластинки можно определить формулой [4, 5]:

$$E_{\text{пр}} = \frac{E_x(1+2\gamma_1\lambda^2+\gamma_2\lambda^4)(1-\nu_{\text{пр}}^2)}{(1+\lambda^2)^2}, \tag{7}$$

где

$$\gamma_1 = \frac{E_{xy}}{E_x} + 2\frac{G}{E_x}; \quad \gamma_2 = \frac{E_y}{E_x}; \quad \lambda = \frac{a}{b}. \tag{8}$$

Здесь E_x, E_y, E_z — модули упругости по направлениям вдоль волокон, поперек волокон и в перпендикулярном направлении соответственно; E_{xy} — модуль упругости в плоскости xy, который определяется выражением [6] $E_{xy} = E_x\nu_{xy}$; a и b — продольный и поперечный размеры анизотропной пластинки соответственно; G — модуль сдвига.

Приведенный коэффициент Пуассона $\nu_{\text{пр}}$ анизотропного материала выражается соотношением [7]:

$$\nu_{\text{пр}} = \frac{\frac{\nu_{xy}}{E_x} + \frac{\nu_{zy}}{E_y} + \frac{\nu_{xz}}{E_z}}{\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{1}{E_z}} \tag{9}$$

где ν_{xy}, ν_{zy}, ν_{xz} — коэффициенты Пуассона в плоскостях xy, zy, xz соответственно.

Численные значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона для различных анизотропных материалов приведены в табл. 1. Там же даны рассчитанные значения приведенных характеристик упругости и отношений линейных размеров для исследованных пластинок (подставок струн гитары).

Таблица 1

Наименование пород древесины	Модули упругости, 10^9 $н/м^2$				Модуль сдвига, 10^9 $н/м^2$	Коэффициенты Пуассона		Коэффициенты отношений модулей		Отношение линейных размеров подставки
	E_x	E_y	E_{xy}	$E_{пр}$	G	ν_{xy}	$\nu_{пр}$	γ_1	γ_2	λ
Бук	13,7	2,24	1,0	2,1	1,93	0,073	0,28	0,355	0,163	6,0
Береза	16,3	1,10	1,2	1,3	1,66	0,034	0,27	0,165	0,063	6,0
Клен	10,0	1,52	0,73	1,6	1,11	0,083	0,31	0,310	0,151	6,0

Таблица 2

Порода древесины подставки	$k \cdot 10^6$, $сек^{3/4} \cdot м^{1/3}/кГ^{2/3}$	$k^{3/5} \cdot 10^3$, $сек^{4/5} \cdot м^{1/5}/кГ^{2/5}$	$\tau \cdot 10^6$, $сек$
Бук	2,318	0,4776	183
Клен	3,883	0,5667	217
Береза	3,319	0,5028	192

Определим время соударения при ударе металлического шара по подставке для струн гитары. Подставка изготовляется из древесины бука, березы или клена, поэтому целесообразно определить время соударения шара с подставкой, изготовленной из древесины указанных пород.

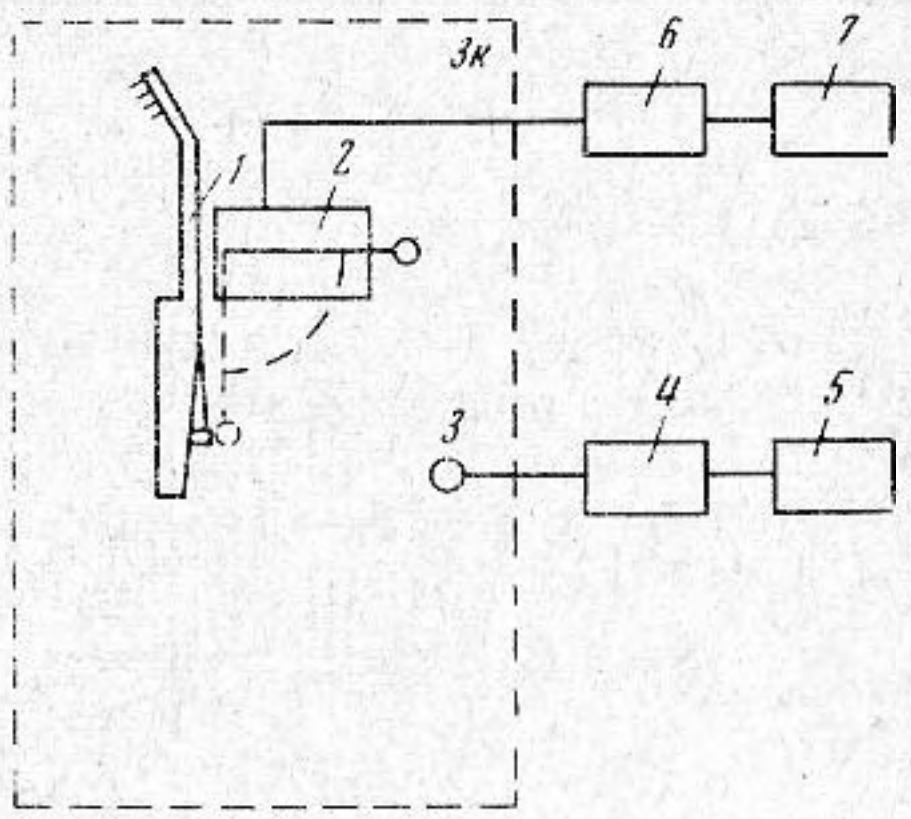
Начальную скорость сближения (v_0) металлического шара диаметром $d=10$ *мм* и подставки для струн примем равной 0,75 *м/сек* в соответствии с расчетом, который опускается в данном описании. Коэффициент B определим по формуле (5). Он оказывается равным 0,3823 $сек^{1/5} \cdot кг^{2/3}/м^{1/5}$. Коэффициент k и время соударения найдем по формулам (6) и (3). Полученные расчетом значения времени соударения τ металлического шара с подставками из разных материалов приведены в табл. 2.

Рассмотрим пример импульсного возбуждения резонансного корпуса гитары, который применяется для измерения частотного спектра (определения спектрограммы) отклика инструмента. Блок-схема установки для определения спектрограммы при импульсном возбуждении представлена на фиг. 2.

Исследуемый инструмент *1* устанавливается в штативе в вертикальном положении. Гитара крепится за верхнюю часть грифа и нижнюю часть корпуса специальными зажимами. Возбуждение инструмента осуществляется с помощью специально разработанного устройства *2*, принцип действия которого основан на свойствах физического маятника. Устройство *2* крепится к штативу при помощи скобы, снабженной регулировочными и стопорными винтами для точной установки расстояния до места удара (между 5-й и 6-й струнами) по подставке инструмента.

Во время измерения спектрограммы отклика резонансного корпуса гитары при импульсном возбуждении сигнал принимается конденсаторным микрофоном *3* типа 4111 (производство фирмы «Брюль и Къер», Дания), расположенным по оси гитары на расстоянии 0,7 *м* от деки инструмента на уровне резонаторного отверстия, и передается на анализатор спектра *4* типа FSp-80 (производство ГДР), состоящий из двух отдельных блоков-приборов: визуального прибора типа SG.1 и блока *RC*-фильтров типа F1.1.

Изображение спектрограммы с экрана ЭЛТ визуального прибора фотографируется при помощи фотоприставки *5*. Устройство для импульсного возбуждения приводится в действие дистанционно посредством приставки *6*. Питание электрическим током приставки *6* и устройства *2* осуществляется от источника питания *7*. Дистанционное управление работой ударного устройства позволяет проводить измерения в заглушенной камере в отсутствие экспериментатора.



Фиг. 2

Контроль времени соударения осуществляется следующим образом. Место подставки, по которому производится удар шаром, обклеивается металлической фольгой толщиной 0,05 *мм* или покрывается графитовой пылью. Контакт металлический шар ударника — фольга включен в цепь с батареей и электронным частотомером типа Ч3-12. Время соударения фиксируется по цифровому индикатору частотомера.

Перед тем как перейти к обсуждению результатов снятия спектрограмм отклика резонансного корпуса гитары, рассмотрим экспериментальные данные, касающиеся времени соударения металлического шара ударного устройства с подставкой гитары.

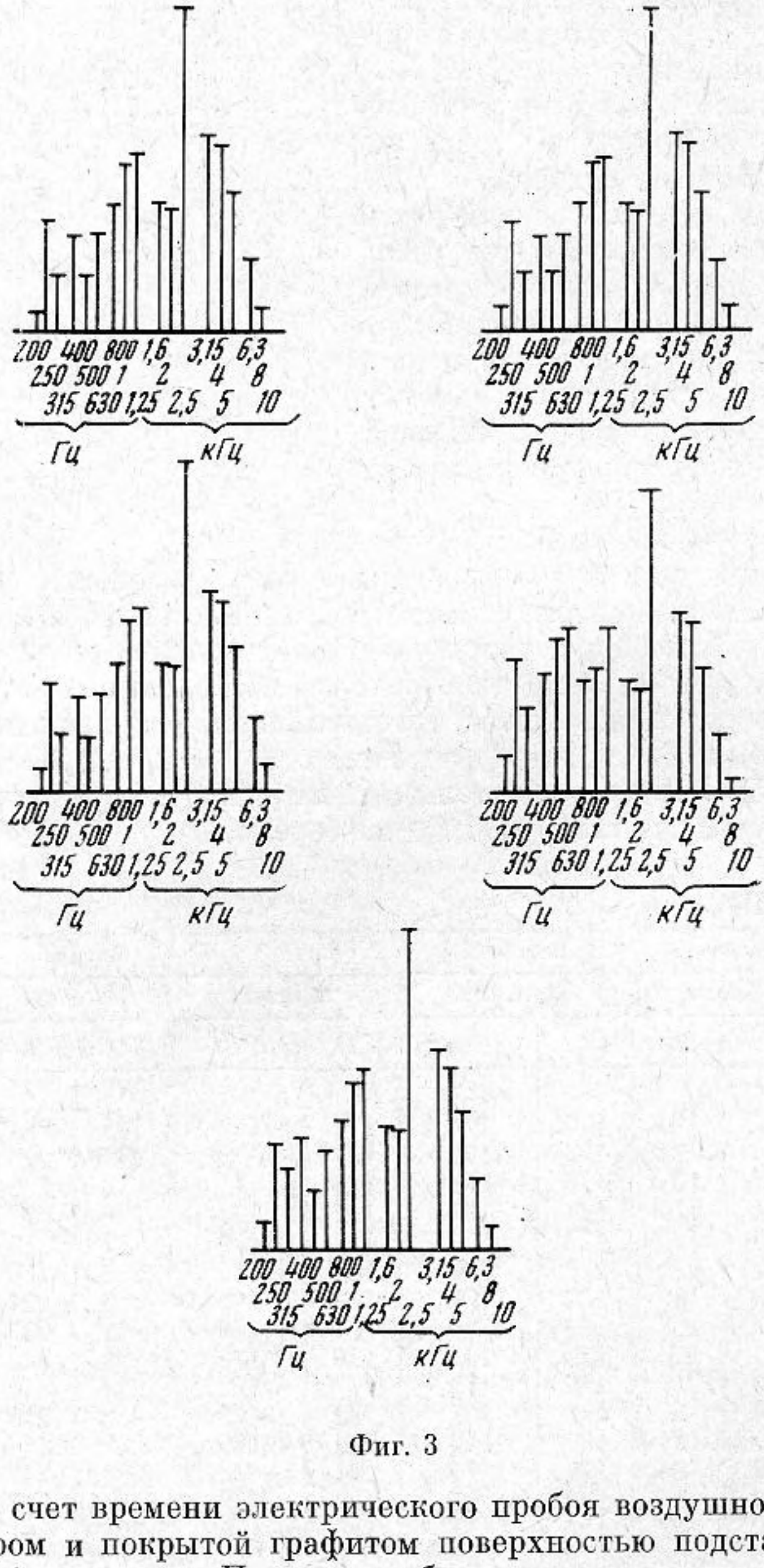
Время соударения было проверено на нескольких однотипных инструментах массового производства, изготовленных фабрикой им. Луначарского, г. Ленинград. Значения τ в единицах 10^{-6} *сек*, полученные в экспериментах для пяти гитар, приведены в табл. 3. Подставки гитар № 1—3 были изготовлены из бука, гитар № 4, 5 — из березы.

Таблица 3

№ измерения	Гитара 1		Гитара 2		Гитара 3		Гитара 4		Гитара 5	
	№ опыта		№ опыта		№ опыта		№ опыта		№ опыта	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	171	170	170	171	176	172	220	224	220	221
2	174	174	173	169	177	176	229	220	219	220
3	172	169	175	163	177	171	219	220	215	220
4	174	170	174	168	177	177	206	220	216	220
5	173	175	172	178	178	179	217	219	220	220
6	175	175	177	180	182	183	218	230	219	220
7	173	187	173	181	177	182	220	227	219	231
8	179	182	177	180	174	179	222	235	215	222
9	179	179	179	181	176	179	227	240	223	226
10	179	176	179	179	177	179	228	241	220	224
11	176	181	178	162	182	178	235	245	230	234
12	170	185	180	179	182	189	230	240	224	237
13	172	188	172	179	181	178	230	247	229	239
14	176	184	179	186	180	172	227	250	259	232
15	178	182	177	187	180	175	227	251	258	231

Из табл. 3 следует, что время соударения было неодинаковым как при испытании различных образцов гитар, так и при испытании одной и той же гитары. В течение одной серии испытаний колебания времени соударения достигали в среднем ±8%, в отдельных случаях — до 15%. Колебания времени соударения от инструмента к инструменту составили в среднем 15%. При перестановке одного и того же инструмента колебания длительности соударения оставались в этих же пределах.

Наблюдаемые расхождения в значениях времени соударения связаны, возможно, с наличием небольшого поверхностного эффекта из-за недостаточной обработки подставки гитары, а также с разбросом значений физико-механических констант материала, из которого были изготовлены подставки. Возможно также, что здесь играет роль кажущееся увеличение времени



Фиг. 3

соударения за счет времени электрического пробоя воздушного промежутка между шаром и покрытой графитом поверхностью подставки, находящимися под напряжением. Последнее обстоятельство, однако, не должно влиять на время соударения металлического шара и не покрытой графитом подставки, т. е. в условиях, когда снимается спектрограмма отклика гитары.

Следует заметить, что наибольшее время соударения, полученное при испытаниях гитары с подставкой из березы, оказалось меньше требуемой длительности импульса, позволяющей исследовать частотные компоненты спектра отклика резонансного корпуса данного инструмента до частоты

6000 *гц*. Это указывает на возможность снятия спектрограммы корпуса гитары без использования специальных ударных площадок.

Для увеличения точности спектрограммы необходимо снимать ее 5—10 раз с последующим усреднением по каждой частотной области. Для выявления ошибок в спектральных линиях откликов гитар с разными подставками спектры были теоретически рассчитаны. При этом длительность процесса соударения τ выбиралась на основании экспериментальных данных (табл. 3) путем усреднения первых десяти измерений. Для гитар с подставками из бука усредненная длительность составила $176 \cdot 10^{-6}$ *сек*, для гитар с подставками из березы — $222 \cdot 10^{-6}$ *сек*. На основании расчетных данных были определены значения поправок, которые рекомендуется вводить для спектральных линий отклика гитар с подставками из березы в области от 2500 до 6300 *гц*.

С учетом поправок, приведенных ниже, можно проводить сравнительные испытания гитар с подставками из бука и березы до частоты 6000 *гц*:

Частота (*гц*)	2500	3150	4000	5000	6300
Поправка (*дб*)	1,0	1,7	4,2	5,4	12,8

При помощи описанной выше установки были сняты спектрограммы отклика резонансного корпуса гитар, возбуждаемых ударным импульсом. Пример одной из спектрограмм, снятой пятикратно, показан на фиг. 3. Как видно, повторяемость амплитуд спектрограммы вполне удовлетворительна. Расхождения в значениях амплитуд при повторных измерениях находятся в пределах возможной ошибки анализатора FSp-80, которая составляет в рассматриваемом диапазоне частот ±2%.

Возможность удобного и быстрого снятия спектрограмм гитар можно рекомендовать для количественной оценки качества звучания серийных инструментов по форматному методу [8], согласно которому достаточно знать величины спектральных линий отклика гитары до частоты 630 *гц*.

В заключение следует отметить, что приведенные выше результаты расчета времени соударения по предлагаемой методике удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Это позволяет надеяться на то, что предлагаемый метод определения времени соударения металлического шара и подставки гитары можно использовать в научных и практических целях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *А. В. Римский-Корсаков, Н. Д. Шумова.* Об одном методе снятия частотных характеристик. ЖТФ, 1938, *8*, 16, 1478—1485.
2. *H. Hertz.* J. Math (Crelle), 1882, 92.
3. *Б. В. Павлов.* Акустическая диагностика механизмов. М., «Машиностроение», 1971.
4. *Н. А. Кильчевский, А. Х. Константинов.* Поперечный упругий удар шаром по анизотропной пластинке. Прикл. механ., 1966, *2*, 2, 1—4.
5. *С. П. Тимошенко.* Теория упругости. М.— Л., ОНТИ, 1937.
6. *С. А. Амбарцумян.* Теория анизотропных оболочек. М., Физматгиз, 1961.
7. *А. Н. Митинский.* Упругие постоянные древесины как ортотропного материала. Тр. Лесотехнической академии им. С. М. Кирова. Л., 1948, № 63, 27—35.
8. *М. В. Гриднев.* Формантный метод оценки качества звучания гитар. М., ММП РСФСР ЦБНТИ, 1973.

Научно-исследовательский
и конструкторско-технологический институт
музыкальной промышленности,
Московская область

Поступила
30 ноября 1972 г.