

УДК 534.3

В.С. Дидковский, д-р техн. наук, С.А. Лунева, канд. физ.-мат. наук, В.П. Заец

## Исследование акустических характеристик колокола «Мазепа» Софийского собора (Киев)

В статье рассмотрены экспериментальные исследования звука одного из старейших колоколов Украины – колокола «Мазепа». Проведен спектральный и спектрально-временной анализ звона колокола, определены основные частоты колебания и музыкальные интервалы звучания. Дана сравнительная характеристика звучания данного колокола с известными колоколами России и Болгарии.

In the article an experimental researches of sound of one of the eldest bells («Mazepa») in Ukraine are considered. The spectra and spectra-time analysis of bell ringing is embodied, main frequencies of oscillation and musical intervals of sounding are determined. Comparative description of bell sounding with the known bells of Russia and Bulgaria is given.

**Ключевые слова:** колокол «Мазепа», голландская система настройки, квинта, терция, спектр звука, диссонансное звучание.

### Введение

Колокола православных соборов Украины являются национальным культурным достоянием и имеют древнейшую историю, неразрывно связанную с развитием колокольно-литейного искусства стран Восточной Европы. Однако их паспортизации и исследованию физических характеристик до сих пор не уделялось должного внимания. На основании опыта российских и болгарских ученых выполнены экспериментальные исследования акустических свойств старейшего из сохранившихся колоколов – колокола «Мазепа». Проанализированы спектрально-временные характеристики его звучания и приведено сравнение их с аналогичными характеристиками российских и болгарских колоколов. По акустическим особенностям звук колокола Мазепа существенно отличается от звона идеального колокола голландской системы настройки. Звучание колокола «Мазепа» близко к звону колоколов православных церквей, вместе с тем, имеет свои уникальные особенности.

Колокольный звон – один из важнейших элементов национальной культуры. Особый стиль колокольного звона православных церквей, в котором основная роль принадлежит тембру и ритму. Основанного на настройке ко-

локолов по равномерно темперированному строю.

Звуковые качества колоколов Украины объединяют определенные свойства, присущие колоколам православных церквей. В целом их звучание оценивается как расстроенное (или диссонансное), а также обладающее особой звуковой силой, что связано со значительными размерами колоколов.

Несмотря на некоторые различия традиционных профилей, так называемых, русских колоколов исходные данные для их построения одинаковы, поэтому звучания колоколов православных церквей схожи. Вместе с тем, даже небольшие различия в толщине стенок колокола и в соотношении диаметра и высоты определенным образом влияют на внутреннюю структуру звука.

### 1. Экспериментальные исследования колокола «Мазепа»

Один из древнейших колоколов Украины – колокол «Мазепа», установленный на втором ярусе Триумфальной колокольни Софиевского Собора в Киеве. Собор является национальным памятником XI века. Колокол был отлит в 1705 году киевским мастером Афанасием Петровичем по заказу и на средства гетмана Ивана Мазепы. Это один из самых больших сохранившихся старинных бронзовых колоколов Украины (рис. 1).

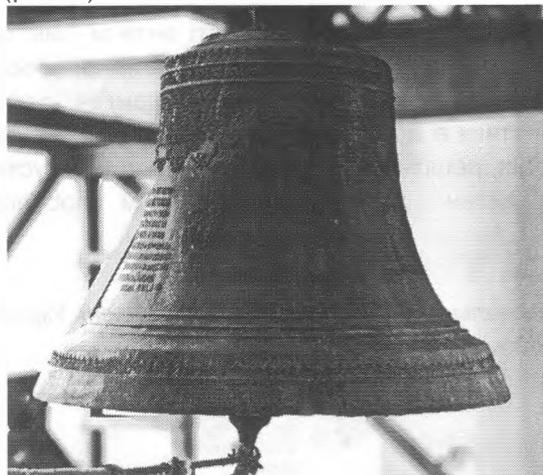


Рис. 1. Фото колокола «Мазепа»

Профиль колокола и его точные размеры были определены с помощью лазерного скани-

рования (рис. 2). Форма оболочки колокола «Мазепа» близка по своим пропорциям к русским и болгарским колоколам, особенно в части нижнего пояса.

Запись колокольного звона производилась на расстоянии 5 м от колокола с помощью мик-

рофона RFT с капсюлем МК-102. Аналого-цифровое преобразование сигнала производилось при помощи звуковой карты M-Audio Fast Track Pro, с 24-битным качеством и частотой дискретизации 22,05 кГц. Форма звукового сигнала представлена на рис. 3.

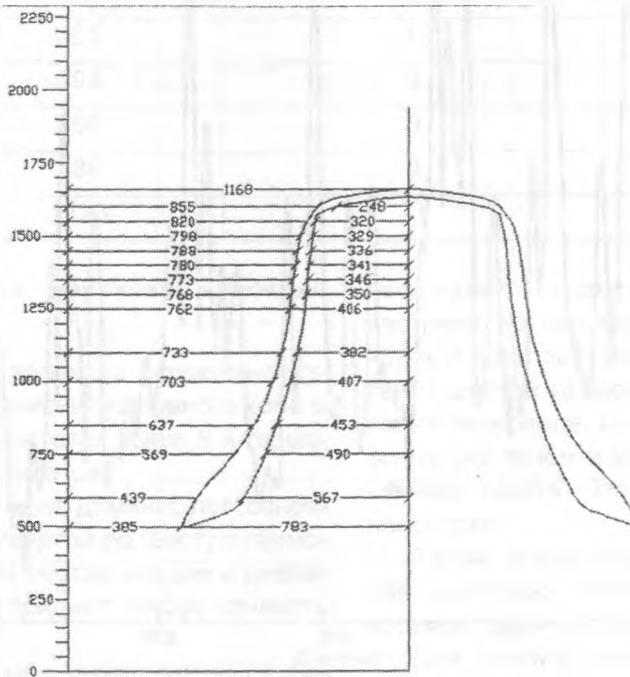


Рис. 2. Профиль колокола «Мазепа»

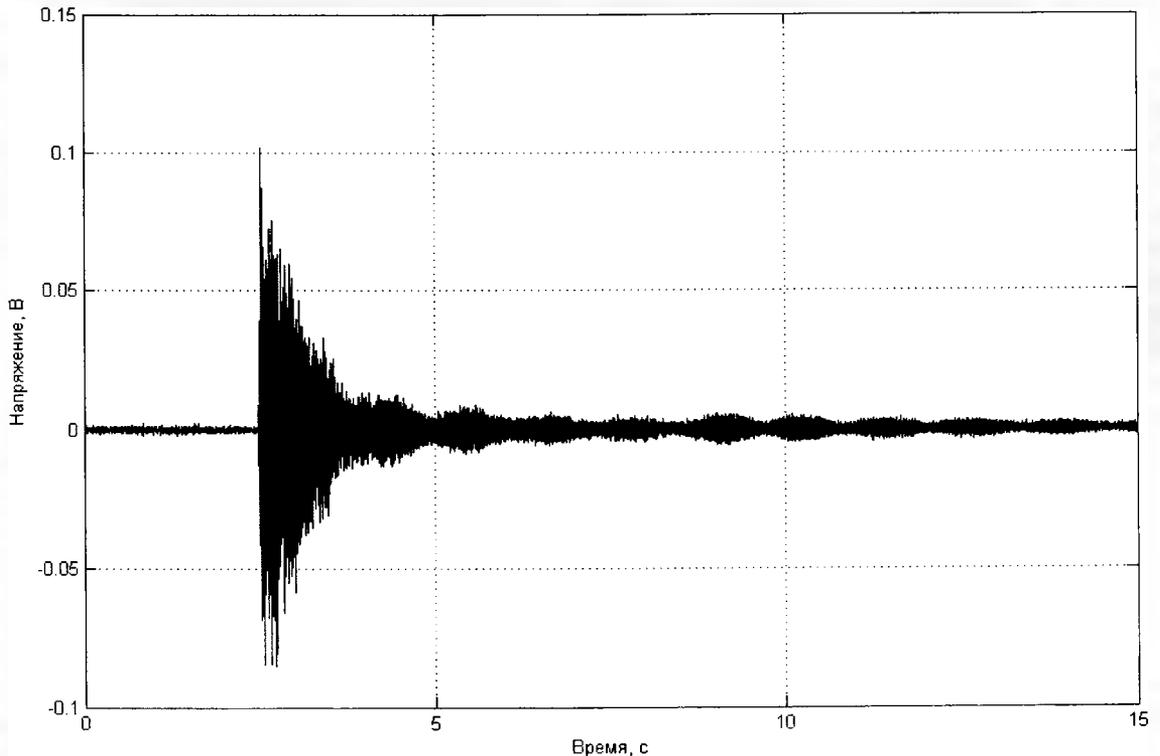


Рис. 3 Звуковой сигнал колокола, записанный на расстоянии 5 м

Дальнейшая обработка сигнала, произведенная в пакете Matlab с помощью БПФ, позволила получить спектральную и спектрально-временную характеристики сигнала (рис. 4, 5)

По результатам измерений и обработки данных составлена таблица акустических характеристик колокола (табл. 1).

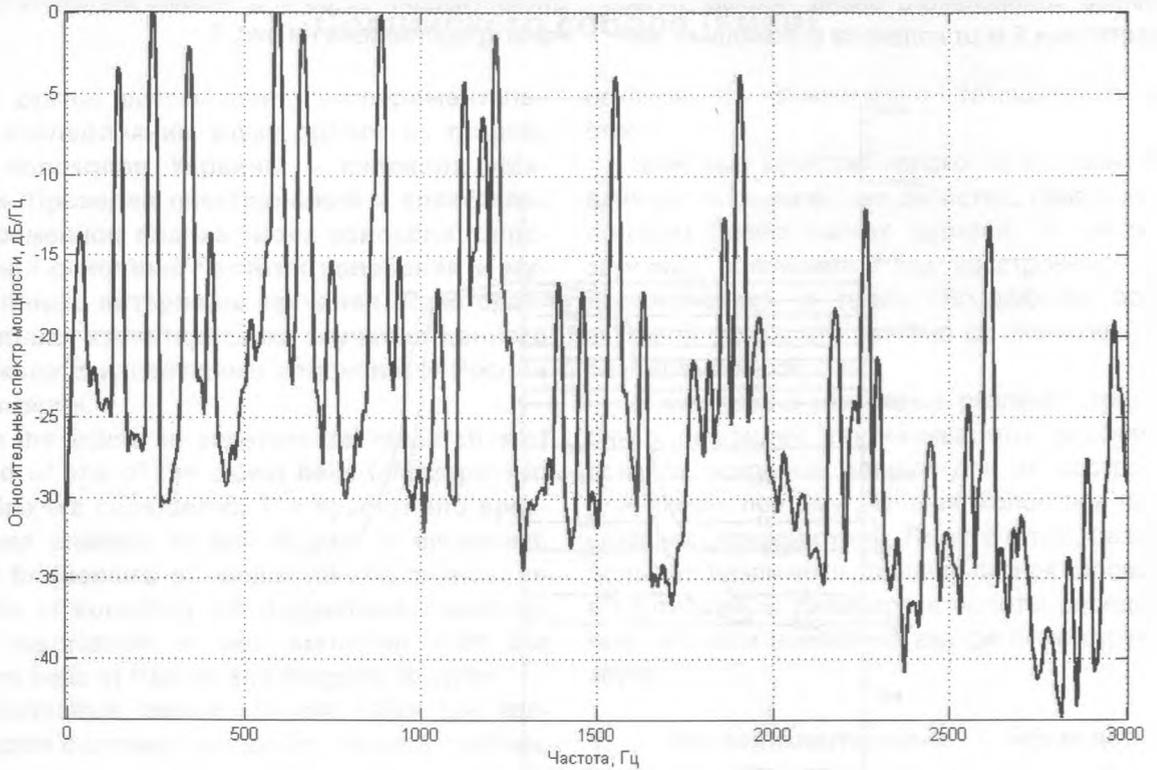


Рис. 4 Спектр колокольного звона колокола Мазепа

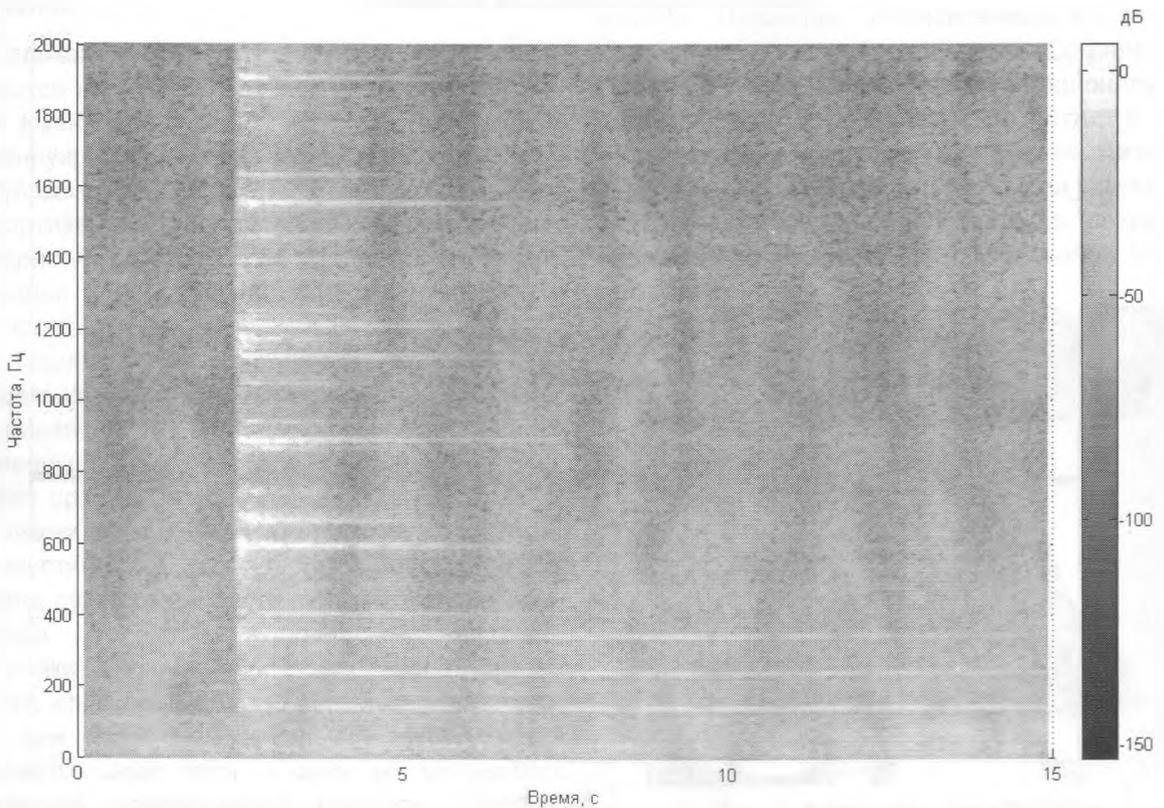


Рис. 5 Спектрально-временная характеристика колокольного звона

Таблица 1. Частотно-временные характеристики колокольного звона

Акустические параметры	Частота звучания $f_n$ , Гц	Относительный уровень звучания обертона, дБ	Стандартное время затухания, (-60 дБ) T, с
$f_0$	144	-10	65
$f_1$	242	0	23
$f_2$	344	0	18
$f_3$	405	-12	7,8
$f_4$	593	0	5,0
$f_5$	666	0	2,9
$f_6$	888	0	4,3
$f_7$	1123	-3	4,9

## 2. Анализ и оценка звучания колокола «Мазепа»

В целом, звучание колокола характеризуется образованием 14 гармоник основного тона в пределах 6 октав. На частотах выше 8-й гармоники спектр резко уплотняется.

По громкости звучания доминируют основной тон, вторая и с четвертой по шестую гармоники, то есть частотные составляющие в диапазоне 200 – 900 Гц, что придает тембру сочность и глубину.

В момент удара тембр звука шумовой с металлическим оттенком, обусловленным высокочастотными составляющими сигнала.

Практически, через 8 с после удара остается слышимым звучание только гудящего ( $f_0$ ), основного тона ( $f_1$ ) и второй гармоники ( $f_2$ ). Звук становится печальным и диссонансным с хорошо ощутимой амплитудной модуляцией.

Соотношения частотных и музыкальных интервалов колокольного звона продемонстрированы в табл. 2 и на рис. 6

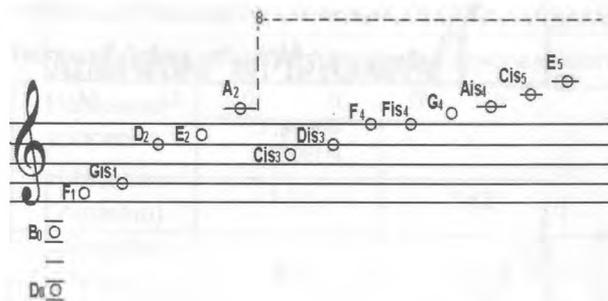


Рис. 6 Нотная запись музыкальных интервалов колокольного звона

Характерной особенностью звука колокола «Мазепа» является образование большой сексты между гудящим тоном и основной частотой, основной частотой и третьей гармоникой, третьей и пятой, пятой и седьмой, седьмой и

двенадцатой гармониками. Колокол как бы настроен по секстам, что определяет его мнорный темп звучания. Между основной частотой и шестой гармоникой образуется три квинтовых интервала, причем первый из них, между основным тоном и второй гармоникой, – уменьшенная квинта, что придает звучанию диссонантности.

Также впечатление расстроенности звучания усиливаю полутоновые интервалы между восьмой, девятой и десятой гармониками.

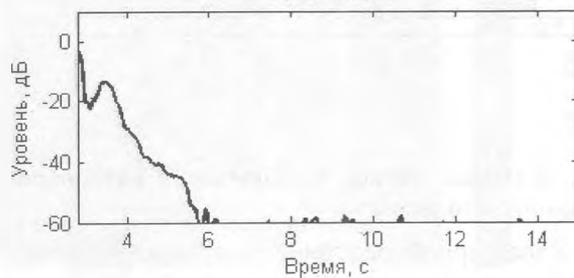
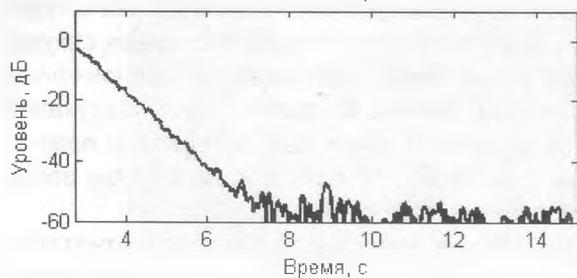
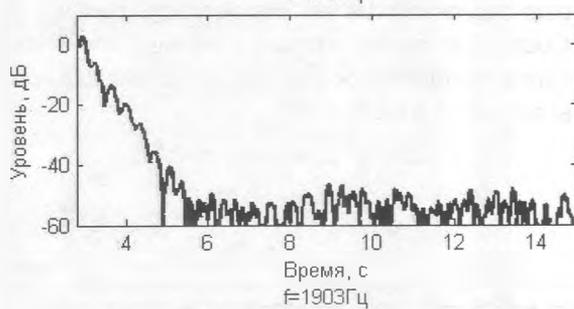
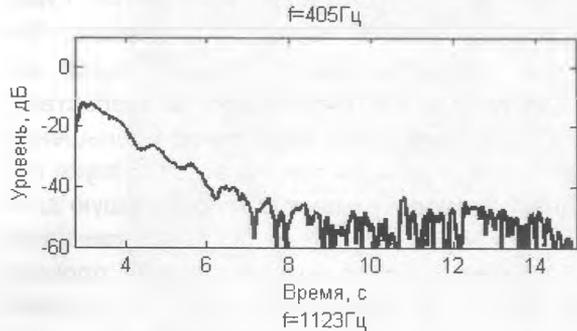
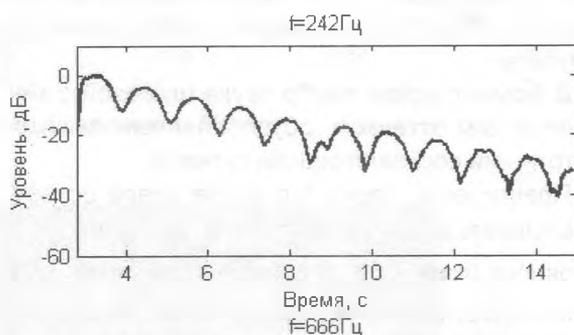
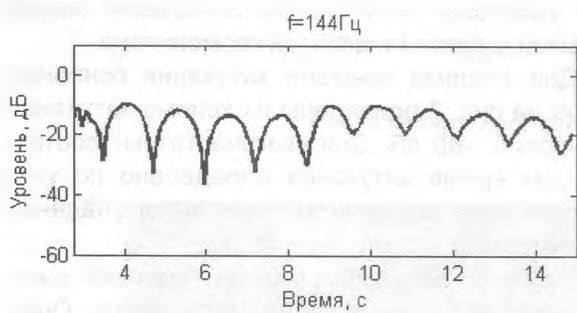
Для анализа времени затухания основных тонов на рис. 7 приведены их кривые затухания до уровня -60 дБ. Для низкочастотных составляющих время затухания определено по углу наклона прямой, аппроксимирующей спадание уровня звука.

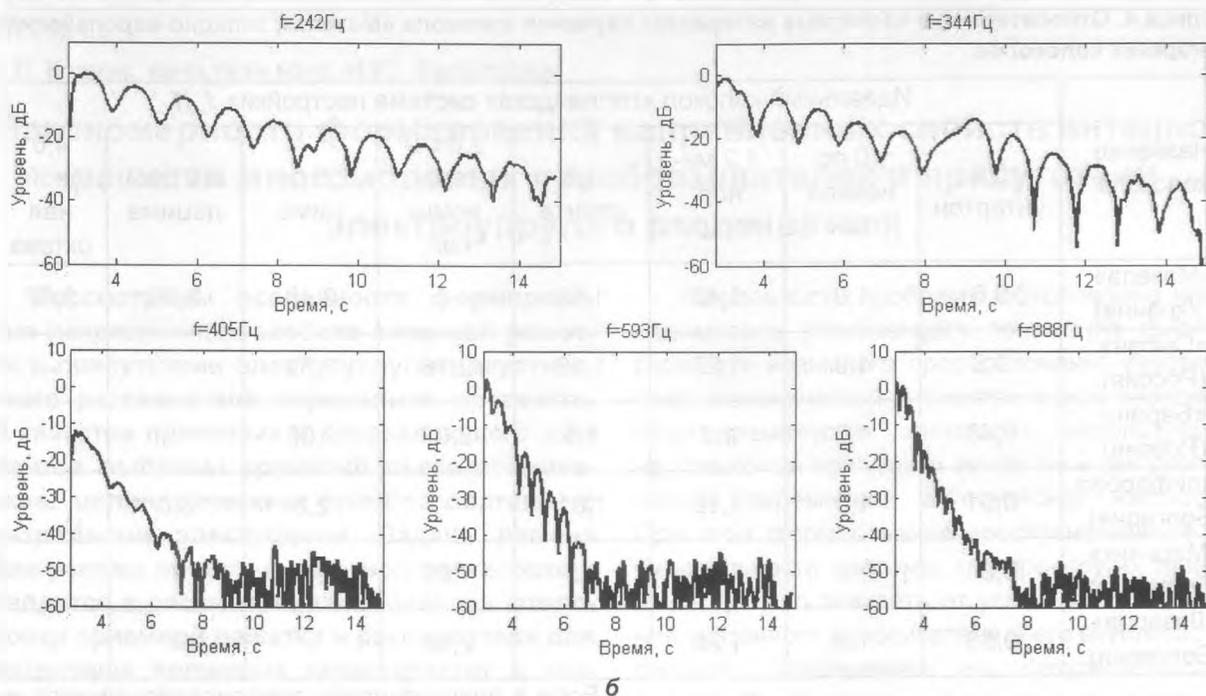
Характер затухания разных гармоник колокольного звона существенно отличается. Гудящий тон ( $f = 144$  Гц) начинает затухать на более низкой интенсивности, затем через несколько секунд его интенсивность возрастает, после чего начинается медленное уменьшение уровня тона. Гудящий тон остается в звуке последним, поскольку имеет самую большую длительность звучания – 63 с. Основной тон начинает затухать с более высокого уровня, процесс затухания практически равномерный. Вторая гармоника (уменьшенная квинта) подобно гудящему тону возрастает через несколько секунд, после удара, затем наблюдается равномерный процесс затухания. В целом, время затухания больших секст и квинтовых интервалов практически одинаково, то есть в колокольном звоне они слышимы одновременно.

На кривых затухания обертонов отчетливо видны колебания амплитуды, что свидетельствует о появлении биений, особенно хорошо слышимых на низких частотах. Их причиной является возникновение двух близко расположенных форм колебаний оболочки («дуплетов»),

Таблица 2. Основные частоты звучания и музыкальные интервалы в нотной записи колокольного звона

№ п.п	Частота звучания $f_n$ , Гц	Относительный частотный интервал $f_n/f_1$	Ближайшие частоты музыкальных нот, Гц	Интервалы между нотами в центах
0	144	0,6 большая секста	146,8 $D_0$	-891
1	242	1 основной тон	247 $B_0$	0
2	344	1,42 уменьшенная квинта	349,2 $F_1$	596
3	405	1,68 большая секста	415,3 $Gis_1$	901
4	593	2,45 Децима	587,3 $D_2$	1506
5	666	2,75 уменьшенная дуодецима	659,3 $E_2$	1706
6	888	3,67 Уменьшенная двойная октава	880 $A_2$	2205





б

Рис. 7. Затухание основных тонов колокольного звона: гармоники сигнала образующие большие сексты (а) и квинты (б).

которые обусловлены несимметричностью колокола и другими дефектами, образовавшимися при его отливке.

В среднем время атаки звука составляет 10-40 мс, время спада низших обертонов – 20-63 с, высших обертонов 2-6 с.

### 3. Сравнительный анализ звука различных колоколов

Полученные данные об основных частотах звучания колокола «Мазепа» сопоставлены с аналогичными характеристиками российских и болгарских колоколов (табл. 3, 4). Для сравнения выбраны колокола Ростовского кафедрального собора – известный колокол «Сысой» значительных размеров, отлитый в 1688 г., и коло-

кол «Баран» (1654 г.), а также болгарские колокола монастыря «St. Nativity of Virgin Mary» в г. Килифарово, колокол «Мельник» и один из старейших колоколов Европы «Лазаров» в Пчелице (1220 г.).

У колокола «Мазепа» гудящий тон составляет с основным тоном большую сексту, а не октаву, как у западноевропейских и российских колоколов. По заниженному первому интервалу настройки украинский колокол ближе к старинным болгарским колоколам («Мельник», «Лазаров»).

Вместо характерного для западноевропейских колоколов звучания минорной терции ( $f_2/f_1$ ) колокол «Мазепа» излучает уменьшенную квинту, а вместо квинты ( $f_3/f_1$ ) – большую

Таблица 3. Основные частоты звучания колокола «Мазепа», колоколов Ростовской звонницы и болгарских колоколов

Название колокола	Частоты, Гц					
	$f_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
«Мазепа» (Украина)	144	242	344	405	593	666
«Сысой» (Россия)	58	116	145	189	253	301
«Баран» (Россия)	148	308	369	461	639	816
Килифарово (Болгария)	302	592	698	954	1648	1774
«Мельник» (Болгария)	636	756	798	982	1378	1846
«Лазараев» (Болгария)	551	977	1211	2037	-	-

Таблица 4. Относительные частотные интервалы звучания колокола «Мазепа», западно-европейских и болгарских колоколов

Название колокола	Идеальный колокол «голландская система настройки» $f_n/f_{n-1}$							
	0,5 унтертон	1,0 основной тон	1,2 минор. терция	1,5 квинта	2,0 октава-номинал.	2,5 децима	3,0 дуо-децима	4,0 двойная октава
«Мазепа» (Украина)	0,6	1,0	1,42	1,68	-	2,45	2,75	3,67
«Сысой» (Россия)	0,5	1,0	1,25	1,63	2,18	2,59	-	-
«Баран» (Россия)	0,48	1,0	1,2	1,5	2,07	2,65	-	-
Килифарово (Болгария)	0,51	1,0	1,18	1,61	-	2,8	3,0	-
«Мельник» (Болгария)	0,84	1,0	1,06	1,3	1,82	2,5	-	-
«Лазаров» (Болгария)	0,56	1,0	1,24	-	2,08	-	-	-

сексту, что придает колокольному звону минорное диссонансное звучание. Заметим, что для звука колокола «Сысой» характерна большая терция, а, следовательно, мажорное, более светлое звучание. В болгарских колоколах эти интервалы приближаются к западноевропейским, хотя старинный колокол «Мельник» отличается диссонансным полутоновым интервалом ( $f_2/f_1$ ) и квартой вместо квинты ( $f_3/f_1$ ).

Интервал октава-номинал ( $f_4/f_1$ ) в звучании колокола «Мазепа» отсутствует, также, как и у колокола в Килифарово.

## Выводы

Таким образом, звон колокола «Мазепа» имеет общие черты со звуком колоколов православных церквей, в частности, российских и болгарских. Однако, звучание украинского колокола отличается своей уникальностью. Необычной является настройка колокола по большим секстам, что придает звучанию оттенки печали. Интересно, что большая секста служит дополнением минорной терции до октавы, и по тембральной окраске звучания они схожи.

Если в послезвучании западноевропейского колокола остаются октава и минорная терция, то в послезвучании колокола «Мазепа» - большая секста и уменьшенная квинта. В результате слышен похожий минорный звук, но с призвуком диссонансности, характерным для колоколов православных церквей.

## Литература

1. Нюнин Б.Н., Ларюков А.С., Юдин И.С. Расчено-экспериментальное исследование виброакустических характеристик старых русских и современных колоколов // Сб. Музыка колоколов. – С.-Б.: РИИИ, 1999.
2. Никаноров А.Б. Колокола и колокольные звоны Псково-печерского монастыря. – С.-Б.: РИИИ, 2000.
3. Trifonov T., Tsv. Georgiava. Web based approach to managing audio and video archive for unique Bulgarian bells // Proceedings of the Tenth International Conference on Acoustics. – Varna, 2008.
4. Trifonov T., Tsv. Georgiava. The bells chime – an acoustical, mathematical and technological challenge // Proceedings of the National Scientific Conference on Acoustics. – Varna, 2008.