

# Акустичні та мультимедійні системи

УДК 534.1

А.В. Авдеев, В.П. Заец

*Национальный технический университет Украины  
"Киевский политехнический институт", Киев*

## ЗВУЧАНИЕ ОРКЕСТРОВЫХ КОЛОКОЛОВ

*В данной статье рассматривается влияние длины труб оркестровых колоколов на их звучание. Показаны результаты натурных измерений звучания оркестровых колоколов Yamaha модель SN 500. Предложен способ аналитического расчета частот первых пяти гармоник данного инструмента. Созданы предпосылки для анализа звука церковных колоколов.*

**Ключевые слова:** акустика, характеристики, оркестровые колокола, колокола, музыкальный инструмент.

### Вступление

**Колокол** – инструмент, источник звука, имеющий куполообразную форму и, обычно, язык, ударяющийся изнутри о стенки. При этом, в различных моделях раскачиваться может как купол колокола, так и его язык.

В Западной Европе наиболее распространен первый вариант приведения колокола в действие. В России повсеместно распространён второй, что даёт возможность создавать колокола чрезвычайно больших размеров («Царь-колокол»). Известны также колокола без языка, по которым бьют молоточком или бревном снаружи. Материалом для большинства колоколов служит так называемая колокольная бронза, хотя известны колокола из железа, чугуна, серебра, камня, терракоты и даже из стекла [1].

В настоящее время колокола широко используются в религиозных целях (призыв верующих на молитву, выражение торжественных моментов богослужения), в музыке, в качестве сигнального средства на флоте (рында), в сельской местности небольшие колокольчики вешаются на шею крупному скоту, маленькие колокольчики часто используются в декоративных целях. Известно употребление колокола в общественно-политических целях (как набат, для созыва граждан на собрание).

История колокола насчитывает более 4000 лет. Самые ранние (XXIII – XVII век до н. э.) из найденных колоколов имели небольшие размеры и были изготовлены в Китае. В Китае также впервые создали музыкальный инструмент из нескольких десятков колоколов. В Европе аналогичный музыкальный инструмент (карильон) появился почти на 2000 лет позднее [3].

Однако в симфонических оркестрах используют так называемые оркестровые колокола, как альтернатива обычным. По этому исследования проводились именно на колоколах такого типа.

### Оркестровые колокола и их характеристики

**Оркестровые колокола** (нем. Röhrenglocken, англ. tubular bell) – ударный инструмент симфонического оркестра (идиофон). Набор 12 – 18 цилиндрических металлических трубок диаметром 25—38 мм, подвешенных в раме-стойке (высота около 2 м). Ударяют колотушкой, головка которой обтянута кожей. Современные колокола снабжены демпфером. В оркестре колокола имитируют колокольный звон.

На рис. 1 приведен пример оркестровых колоколов, которые чаще всего используются в оркестрах.



Рис. 1. Современные оркестровые колокола

Также как и колокол «Мазепа» из статьи [4], в оркестровых колоколах высота звука зависит от той или другой длины цилиндров, от большего или меньшего диаметра – сила. Цилиндры поддаются точному строю и не столь массивны, как классические колокола.

Из различных типов колоколов, которые были использованы в оркестре на протяжении веков, трубчатые колокола, расположенные хроматически как симфонические куранты, которые стали частью стандартных инструментов в современной опере и симфонических оркестрах. Их основная роль – выступать в качестве замены обычным колоколам в оркестре. Трубчатые колокола были разработаны как легкий и портативный прибор для повседневного использования в оркестре. Их звук был задуман как ближайший к церковным колоколам.

Кроме трубчатых в прошлом также использовались в качестве заменителей колокола твердые

стальные пруты (стержни).

Нами были проведены исследования оркестровых колоколов производителя Yamaha (модель СН 500), которые находятся в Харьковской филармонии, с целью выявления зависимости частот основного тона и обертонов от их геометрических размеров.

Этот инструмент имеет следующие параметры: диаметр трубы равен 12 мм, толщина трубы равна 2 мм, материал – хромированная латунь, общий вес около 84 кг.

Измерения проводились при помощи измерительного оборудования с действующими сертификатами о поверке. Результаты измерений обрабатывались в программном пакете Matlab

Измеренные частоты первых пяти гармоник приведены в табл. 1.

График зависимости частоты первых пяти гармоник от длины трубы приведен на рис. 2.

Таблица 1

Результаты исследований

Нота	Собственные частоты колебаний					Длина трубы, м
	1	2	3	4	5	
<i>C 52</i>	166,8	320	522,1	769,8	1065	1,61
<i>C# 53</i>	177,6	339,1	554,4	823,6	1125	1,547
<i>D 54</i>	188,4	360,6	592,1	872	1195	1,512
<i>D# 55</i>	199,1	382,2	624,4	920,5	1243	1,458
<i>E 56</i>	209,9	403,7	662,1	974,3	1329	1,428
<i>F 57</i>	220,7	430,6	699,8	1033	1410	1,38
<i>F# 58</i>	236,8	457,5	742,8	1082	1485	1,349
<i>G 59</i>	247,6	479,1	791,3	1152	1566	1,304
<i>G# 60</i>	263,7	511,4	839,7	1222	1636	1,238
<i>A 61</i>	279,9	543,7	888,2	1291	1728	1,22
<i>A# 62</i>	296	576	936,6	1372	1862	1,175
<i>B 63</i>	317,6	608,3	995,9	1426	1954	1,161
<i>C 64</i>	339,1	651	1055	1534	2077	1,119
<i>C# 65</i>	355,2	683,6	1108	1604	2174	1,074
<i>D 66</i>	376,8	737,5	1173	1679	2271	1,053
<i>D# 67</i>	403,7	780,5	1254	1798	2433	1,012
<i>E 68</i>	425,2	823,6	1313	1921	2551	0,988
<i>F 69</i>	452,1	872	1388	2002	2718	0,955
<i>F# 70</i>	484,4	931,3	1485	2147	2869	0,918
<i>G 71</i>	511,4	979,7	1566	2234	2987	0,894

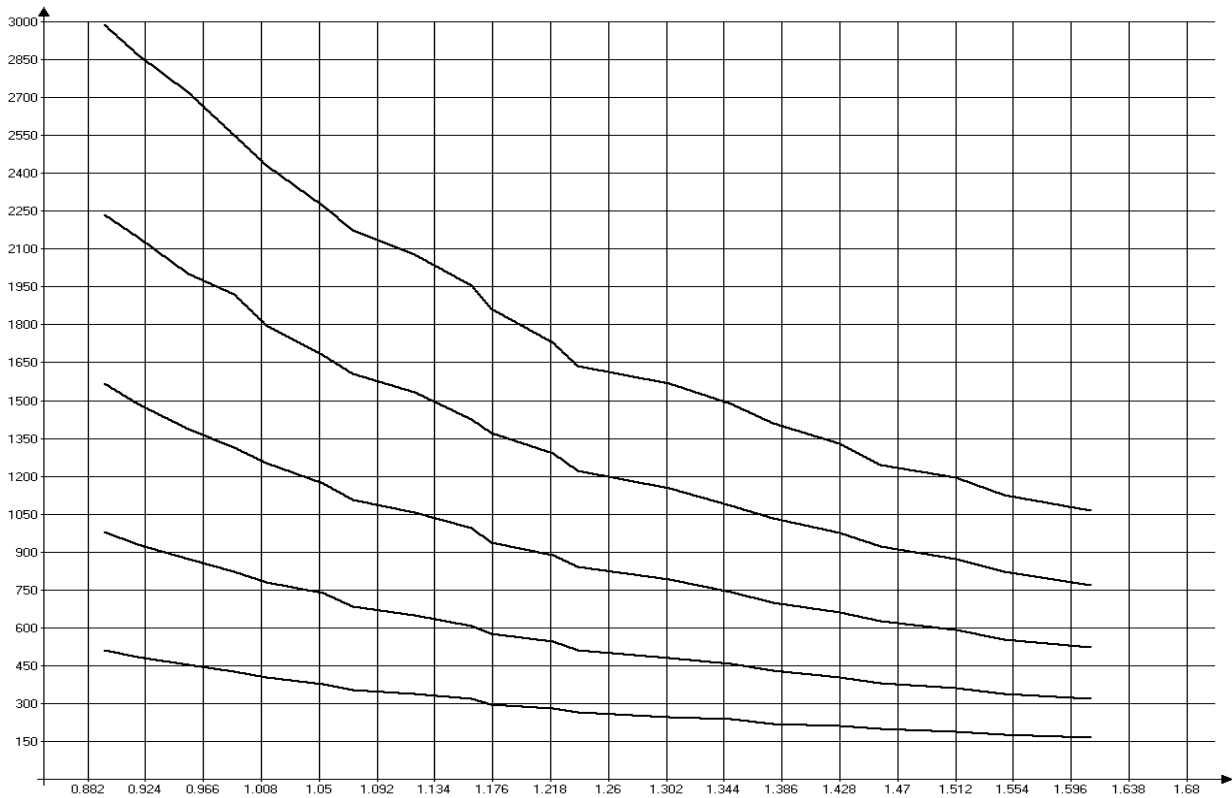


Рис. 2. График зависимости частоты первых пяти гармоник от длины трубы

Частоты высших гармоник не образуют арифметическую прогрессию, как это характерно для струнных и духовых музыкальных инструментов, а имеют более сложную зависимость. Так, соотношение между частотой основного тона и частотами гармоник в целом для всех оркестровых колоколов данной модели одинаково и приведены в табл. 2. Такие соотношения между частотой основного тона и гармоник требуют дальнейшего изучения и анализа.

После глубокого литературного поиска было найдено соответствие данным соотношениям частот в виде нормальных колебаний свободного стержня.

По Г. Лэмбу [5] эти колебания можно найти по следующим формулам:

для симметричных колебаний:

$$\eta = C \left( \cos\left(\frac{1}{2} ml\right) \operatorname{ch}(mx) + \operatorname{ch}\left(\frac{1}{2} ml\right) \cos(mx) \right) \times \cos(nt + \varepsilon); \quad (1)$$

для антисимметричных колебаний:

$$\eta = C \left( \sin\left(\frac{1}{2} ml\right) \operatorname{sh}(mx) + \operatorname{sh}\left(\frac{1}{2} ml\right) \sin(mx) \right) \times \cos(nt + \varepsilon); \quad (2)$$

Таблица 2

Соотношения между частотой основного тона и частотами гармоник

Длина, м	2 РЧ/1 РЧ	3 РЧ/1 РЧ	4 РЧ/1 РЧ	5 РЧ/1 РЧ
1,61	1,918	3,130	4,615	6,385
1,547	1,909	3,122	4,637	6,334
1,512	1,914	3,143	4,628	6,343
1,458	1,920	3,136	4,623	6,243
1,428	1,923	3,154	4,642	6,332
1,38	1,951	3,171	4,681	6,389
1,349	1,932	3,137	4,569	6,271
1,304	1,935	3,196	4,653	6,325
1,238	1,939	3,184	4,634	6,204

Окончание табл. 2

1,22	1,942	3,173	4,612	6,174
1,175	1,946	3,164	4,635	6,291
1,161	1,915	3,136	4,490	6,152
1,119	1,920	3,111	4,524	6,125
1,074	1,925	3,119	4,516	6,120
1,053	1,957	3,113	4,456	6,027
1,012	1,933	3,106	4,454	6,027
0,988	1,937	3,088	4,518	6,000
0,955	1,929	3,070	4,428	6,012
0,918	1,923	3,066	4,432	5,923
0,894	1,916	3,062	4,368	5,841
<b>Сер. знач.</b>	<b>1,929</b>	<b>3,129</b>	<b>4,556</b>	<b>6,176</b>
<b>Знач. для стержня</b>	<b>1,96</b>	<b>3,24</b>	<b>4,84</b>	<b>6,76</b>

### Выводы

Из результатов анализа данных, полученных после проведения эксперимента, можно сказать, что:

- частота звучания исследуемого инструмента зависит только от длины трубы и имеет обратно пропорциональную зависимость;
- рассматривать целесообразно только первые пять гармоник, поскольку дальше становится невозможным проводить анализ потому, что выше пятой гармоники все остальные становятся неразборчивыми;
- частоты первых пяти гармоник соотносятся так же, как и частоты нормальных продольных колебаний стержня;
- как модель оркестровых колоколов можно брать стальной стержень, так как его колебания идентичны колебаниям нашего инструмента.

В будущем это исследование можно использовать для моделирования звучания и определения формы колебаний обычных (церковных) колоколов, что будет уместно для исследования последних.

### Список литературы

1. Пухначёв Ю.В. Загадки звучащего металла / Ю.В. Пухначёв. – М.: Наука, 1974. – 128 с. – (Научно-популярная серия).
2. Духин И.А. Колокольные заводы Москвы / И.А. Духин. – М.: Грошев-дизайн, 2004. – 122 с.
3. Валенцова М. Мир звучащий и молчащий: Семантика звука и речи в традиционной культуре славян / М. Валенцова. – М., 1999.
4. Дидковский В.С. Исследование акустических характеристик колокола «Мазепа» Софийского собора (Киев) // В.С. Дидковский, С.А. Лунева, В.П. Заец / Электроника и связь. – 2011. – № 2(61). – С. 146-152.
5. Лэмб Г. Динамическая теория звука [пер. с англ. Н.С. Агеевой, под ред. М.А. Исаковича] / Г. Лэмб. – М.: ГИФМЛ, 1960.

Поступила в редколлегию 17.06.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.М. Порошин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

### ЗВУЧАННЯ ОРКЕСТРОВИХ ДЗВОНІВ

А.В. Авдєєв, В.П. Заєць

*У статті розглядається вплив довжини труб оркестрових дзвонів на їх звучання. Показані результати натурних вимірювань звучання оркестрових дзвонів Yamaha модель CH 500. Запропонований спосіб аналітичного розрахунку частот перших п'яти гармоник даного інструменту. Створені передумови для аналізу звуку церковних дзвонів.*

**Ключові слова:** акустика, характеристики, оркестрові дзвони, дзвони, музичний інструмент.

### SOUNDING ORCHESTRAL BELLS

A.V. Avdeev, V.P. Zaec

*This article examines an impact of the pipe length in orchestral bells on their sound. The results of sound field measurements of the Yamaha CH 500 orchestral bells are presented. A method for analytical calculation of frequencies of the first five harmonics for the instrument is proposed. Set the stage for the analysis of the church bells sounding.*

**Keywords:** acoustics, descriptions, orchestral bells, bells, musical instrument.