

УДК 534.131, 681.819

О. В. АВДЄЄВ, В. П. ЗАЄЦЬ, С. Г. КОТЕНКО**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОЛИВАНЬ ДЗВОНУ**

Проведені експериментальні дослідження звучання корабельного дзвону «ринда» та визначені частоти власних коливань. Побудована комп'ютерна модель дзвону яка повністю відповідає реальному дзвону за геометричними розмірами та фізико-механічних властивостей. Були визначені власні частоти та моди коливань. За експериментальними даними показано, що похибка визначення частот коливань дзвону в комп'ютерній моделі не перевищує 5 % та встановлено відповідність мод коливань частотам в спектрі звуку дзвона.

Ключові слова: власна частота, дзвін, метод кінцевих елементів, моди коливань, спектральний аналіз.

Вступ. Дзвін - інструмент, джерело звуку, що має куполоподібну форму і, зазвичай, язичок, який вдаряється зсередини по стінках інструменту. При цьому, в інших моделях, розгойдуватися може як купол дзвону, так і його язичок. У Західній Європі найбільш поширений перший варіант приведення дзвона в дію. У Росії всюди поширений другий, що дає можливість створювати дзвони надзвичайно великих розмірів таких, як «Цар-дзвін». Відомі також дзвони без язичка, по котрим б'ють молоточком або колодою зовні. Матеріалом для більшості дзвонів служить так звана дзвонова бронза, хоча відомі дзвони із заліза, чавуну, срібла, каменю, теракоти і навіть зі скла [1].

В даний час дзвони широко використовуються в релігійних цілях (заклик віруючих на молитву, вираз урочистих моментів богослужіння), в музиці, в якості сигнального засобу на флоті (ринда), у сільській місцевості невеликі дзвіночки вішаються на шию круппній худобі, маленькі дзвіночки часто використо-

вуються в декоративних цілях. Відомо вживання дзвонів в суспільно-політичних цілях (як набат, для скликання громадян на збори). Історія дзвонів налічує більше 4000 років. Найбільш ранні (XXIII-XVII століття до н. е.). Знайдені дзвони мали невеликі розміри і були виготовлені в Китаї. У Китаї також вперше створили музичний інструмент з декількох десятків дзвонів. У Європі аналогічний музичний інструмент (карильйон) з'явився майже на 2000 років пізніше [2].

Незважаючи на широке використання дзвонів математичний опис їх звучання й донині в повній мірі не виконано. В даній статті наведено експериментальне дослідження корабельного дзвону «ринда» та проведене його комп'ютерне моделювання.

Аналіз літературних джерел. Створення дзвонів завжди відносилось до ремесла, і їх звучання цілком залежало від вмінь та навичок ремісника, які найчастіше передавалися йому у спадщину. Відомі дзвонарі які досягли видатних успіхів у створенні

дзвонів з гармонійною структурою звуку цінувалися і свої знання оберігали як велику таємницю. Тому оцінити розвиток умінь та рівень знань в даній галузі можливо лише за аналізом експериментальних досліджень зразків дзвонів того часу.

Встановлено що основними параметрами, що визначають механізм звукоутворення у дзвонах є частоти і форми коливань вібратора. При ударі важким язичком по нижній частині дзвона в його оболонці збуджуються коливальні процеси складної структури, які складаються з поперечних, поздовжніх і зсувних форм коливань [3].

Дослідження налаштування руських церковних дзвонів, особливо старовинних (XVI-XVII століть), які відрізняються своєрідністю форми і розмірів, показали статистично значущі відхилення від голландського налаштування. Розподіл частот основних обертонів для руських церковних дзвонів і їх порівняння з голландським налаштуванням чітко показують відхилення в налаштуванні, в першу чергу першого і другого обертонів (інтервал між ними менше октави), що частково пояснює особливості їх звучання [4].

В Україні на підставі досвіду російських і болгарських вчених [5 – 7] виконані експериментальні дослідження акустичних властивостей найдревнішого зі збережених дзвона в Україні - дзвін «Мазепа» [8]. Профіль дзвона і його точні розміри були визначені за допомогою лазерного сканування. Форма оболонки дзвону «Мазепа» близька за своїми пропорціями до російських і болгарських дзвонів, особливо в частині нижнього поясу. Визначено спектральний склад звуку дзвону.

Незважаючи на те, що науковим дослідженням звуку дзвонів займаються багато десятиліть, аналіз літератури показав [9-11], що майже немає інформації про способи прогнозування звуку дзвонів, чи створення дзвонів з наперед заданим звучанням.

Одним із напрямків вирішення задачі прогнозування звуку дзвонів може бути побудова математичної моделі дзвону у вигляді фігури обертання із складним профілем, однак на сьогоднішній день дана задача не піддається строгому аналітичному вирішенню.

Іншим шляхом вирішення задачі прогнозування звуку дзвону може бути спосіб комп'ютерного моделювання дзвону з подальшим числовим розв'язком методом кінцевих елементів (МКЕ). Це спосіб обґрунтований тим, що МКЕ досить практичний для його використання на електронній обчислювальній техніці, такий як комп'ютер. Головним недоліком даного методу є не прогнозована точність розв'язку.

Тому в даній статті розглянуто питання можливості побудови комп'ютерної моделі дзвону й оцінки точності визначення власних частот коливань дзвону на основі експериментальних даних. А також аналіз можливих форм коливань дзвону.

Опис дзвону. Експеримент проводився на корабельному дзвоні «ринда». Цей музичний інструмент має наступні параметри: загальна висота 205 мм, зовнішній діаметр (діаметр губи) – 205 мм, стінка дзвона змінної товщини, матеріал з якого виготовлено дзвін – сплав латуні марки ЛЦ16К4 ($\rho=8300 \text{ кг/м}^3$), загальна вага становить 6,6 кг.

Геометричні параметри дзвону та детальна геометрія корпусу дзвона наведена на рис. 1, а, б відповідно [9].

До табл. 2 зведено значення параметрів наведених на рис. 2, б.

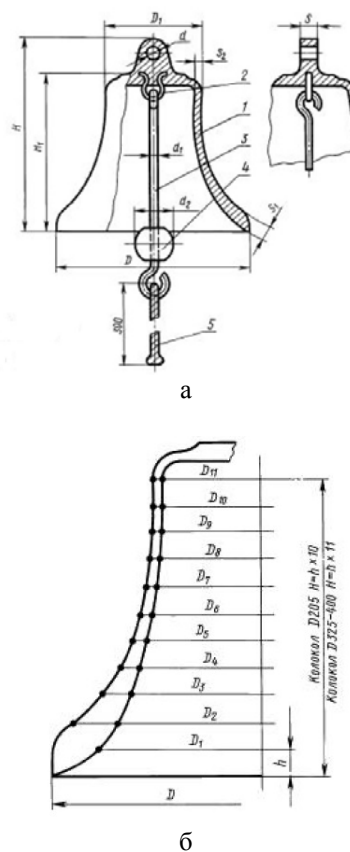


Рис. 1 – Корабельний дзвін Ринда у розрізі: а - конструктивні параметри; б - розмір корпусу дзвону; 1 – корпус; 2 – ушко; 3 – стержень; 4 – бойок; 5 – канат ринда-булінь

Таблиця 1 – Значення конструктивних параметрів дзвону

D_2 , мм	D_1 , мм	H , мм	H_1 , мм	S_2 , мм	S_1 , мм	S_2 , мм	d , мм	d_1 , мм	d_2 , мм
205	102	205	167	18	18	5,0	15	10	40

Таблиця 2 – Розміри корпусу дзвону

D , мм	H , мм	h , мм	$D_{\text{зовнішній}} / D_{\text{внутрішній}}$, мм									
			D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}
205	150	15	–	168	143	128	119	113	108	105	104	103
			157	137	122	113	105	101	97	95	94	92

Експериментальне дослідження звуку дзвонів. Проведення експерименту. Експеримент було проведено у заглушеній камері за нормальних умов навколишнього середовища та з використанням обладнання з діючими сертифікатами про повірку. Вимірювання проводилися в дальньому полі відстань від дзвону до точки вимірювання складала більше 5 довжин хвиль звуку найменшої частоти, що випромінюється дзвоном.

Методика проведення даного дослідження полягала у записі звучання інструменту, котрий знаходився у вільному полі. Звук був отриманий за допомогою удару язичка по внутрішній стінці дзвона на висоті 29 мм від губи дзвона. При цьому дзвін був не закріплений.

Результати дослідження звуку дзвона «ринда». Спектральний аналіз звуку дзвона показав, що звук складається з яскраво виражених дискретних складових (рис. 2), частоти яких не утворюють ариф-

метичну прогресію (табл. 3), що характерна для струнних чи духових музичних інструментів.

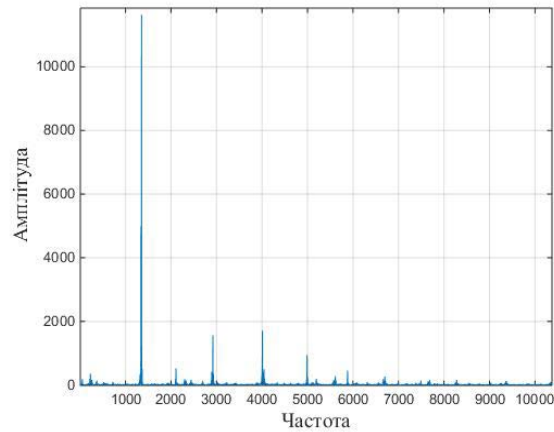


Рис. 2 – Спектр звуку дзвона Ринда

Таблиця 3 – Результати вимірювань

Параметр	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉
Частоти Гц	1353	2110	2920	4009	4991	5408	5619	6764	7492
F _n -F _{n-1}		757	810	1089	982	417	211	1145	728

В цілому звук даного дзвона характеризується лише першими дев'ятьма гармоніками. Після дев'ятої гармоніки спектр різко ущільнюється через що виокремити гармоніки стає неможливо. Розглядаючи спектрально-часову характеристику, теж неможливо виокремити більше ніж перші дев'ять частот нормальних коливань досліджуваного дзвона.

Через те, що у звучанні переважають середні та високі частоти, звук цього дзвона має дещо металевий характер.

Комп'ютерне моделювання. Побудова графічної моделі. Комп'ютерне моделювання проводилося в програмі Comsol. Дане програмне забезпечення дозволяє створювати тривимірну графічну модель гео-

метричні розміри якої повністю відповідають реальним досліджуваним музичним інструментам. Слід зазначити, що дзвін Ринда змодельований таким чином, що уся його оболонка є вільною. Фізичні параметри (а саме: густина, швидкість звуку, модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона) використаних матеріалів при моделюванні, повністю відповідають латуні ЛЦ16К4 з якої виготовлено дзвін.

Результати моделювання. За результатами комп'ютерного моделювання було отримано ряд частот та мод власних коливань досліджуваного дзвону. Ці частоти приведені у табл.4.

Форми коливань наведені на рис. 3–7.

Таблиця 4 – Отримані частоти для дзвона Ринда

Параметр	F ₁ , Гц	F ₂ , Гц	F ₃ , Гц	F ₄ , Гц	F ₅ , Гц	F ₆ , Гц	F ₇ , Гц	F ₈ , Гц	F ₉ , Гц
Форма коливань	2.0	2.1	3.0	3.1	4.0	2.2	3.2	4.1	5.0
Експериментальні значення	1353	2110	2920	4009	4991	5408	5619	6764	7492
Математично отримані значення	1353	2000	2880	3970	4915	5462	5757	6600	7370
Абсолютна похибка, Гц	0	110	40	39	76	54	138	164	122
Відносна похибка, %	0	-4,8	-1,4	-1,0	-1,5	1,0	2,5	-2,4	-1,6

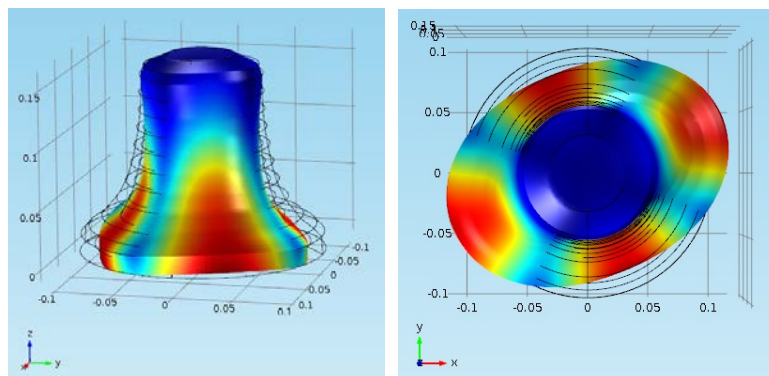
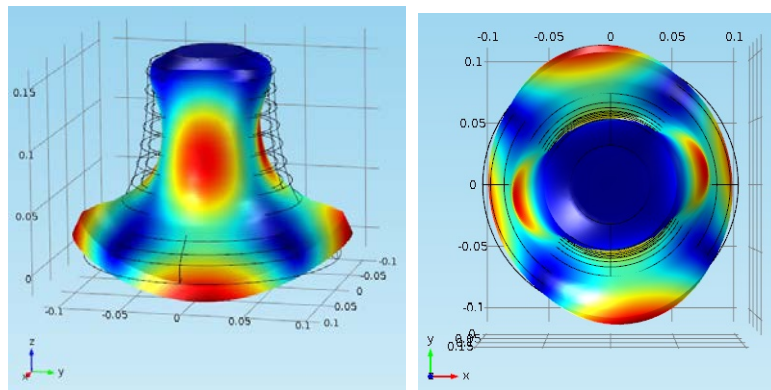
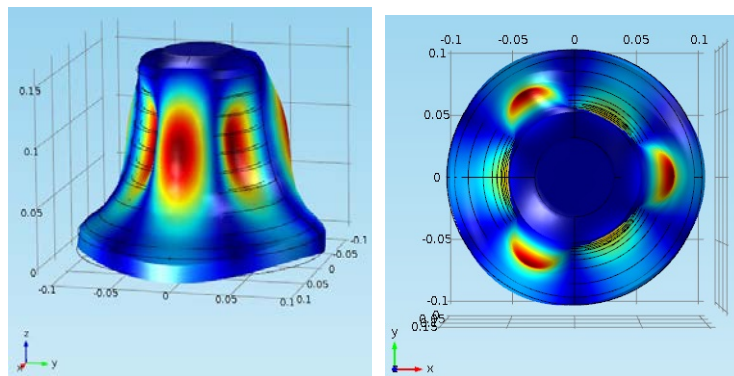
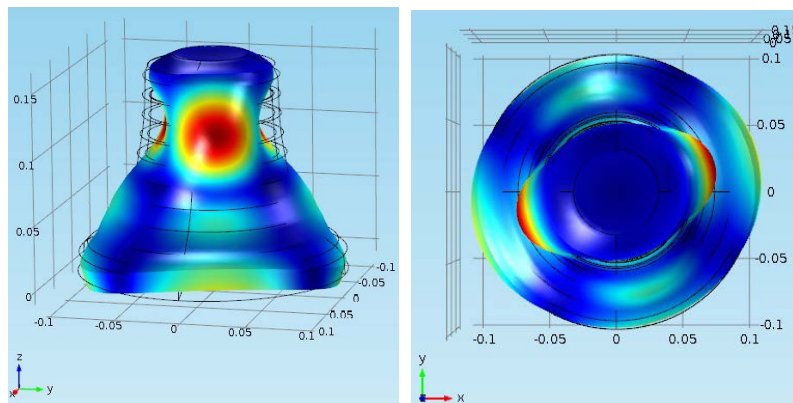
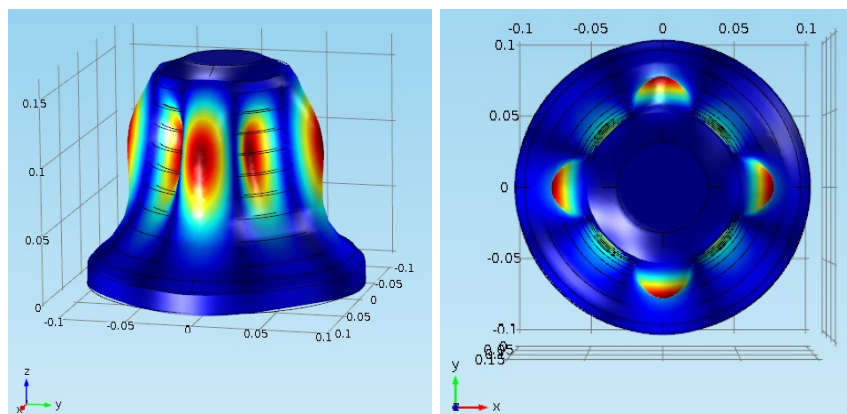


Рис. 3 – Результати моделювання дзвона Ринда для F₁

Рис. 4 – Результати моделювання дзвона Ринда для F_2 Рис. 5 – Результати моделювання дзвона Ринда для F_4 Рис. 6 – Результати моделювання дзвона Ринда для F_6 Рис. 7 – Результати моделювання дзвона Ринда для F_8

З отриманих даних чітко видно, що усі частоти власних коливань дзвонів що звучать є осесиметричними. Відносна похибка визначення частот власних

коливань дзвону з експериментальними значеннями складає не більше ніж $\pm 5\%$.

Моди коливань, що не звучать. За результатами комп'ютерного моделювання також було отримано ряд частот та форм власних коливань дзвонів, які

відсутні при звучанні у реальних музичних інструментах. Ці частоти та форми наведено у табл.9 на рис. 8 – 10.

Таблиця 5 –Отримані частоти для дзвона Ринда

Параметр	H ₁ , Гц	H ₂ , Гц	H ₃ , Гц	H ₄ , Гц	H ₅ , Гц	H ₆ , Гц
Частоти, отримані після моделювання	4338	4874	5680	6043	6475	7604

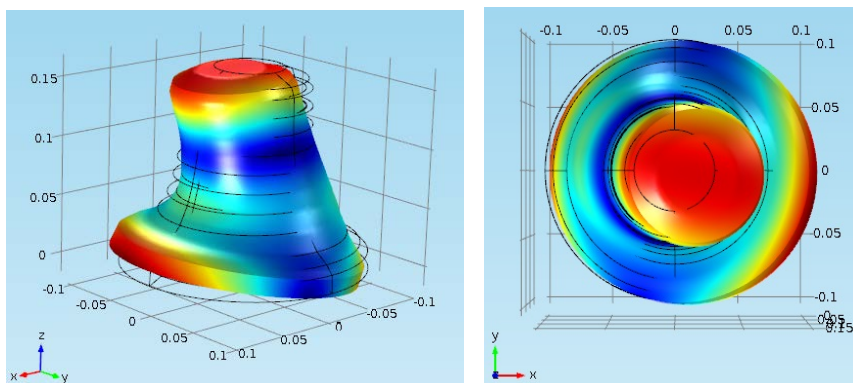


Рис. 8 – Результати моделювання дзвона Ринда для H₁

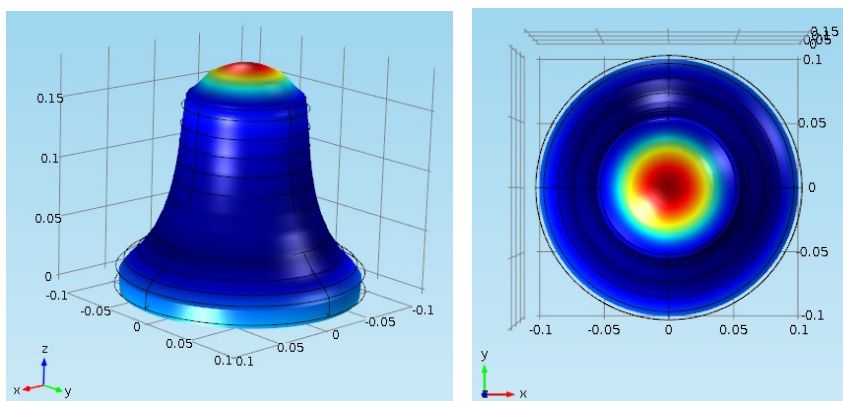


Рис. 9 – Результати моделювання дзвона Ринда для H₂

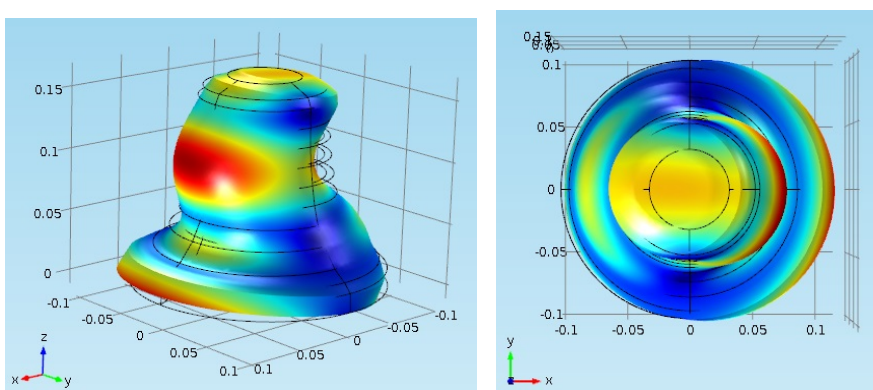


Рис. 10 – Результати моделювання дзвона Ринда для H₆

Обговорення результатів комп'ютерного моделювання коливань звону. З отриманих даних чітко видно, що власні коливання, які не впливають на утворення звуку у дзвонах, є вертикальними або асиметричними. Слід зазначити, що цих частот не було отримано при експериментальному дослідженні дзвонів.

Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено:

1. В даній статті розглянуто експериментальне та комп'ютерне дослідження звуку дзвонів. Показано що на відміну від переважної більшості музичних інструментів звук дзвону не є гармонічним.
2. Показано що власні частоти коливань дзвонів залежать від матеріалу та геометричних розмірів

дзвону та практично не залежать від способу збудження.

3. Оскільки на даний час не існує математичного апарату для описання форм власних коливань дзвонів та визначення їх частот була створена комп'ютерна модель яка дозволила вирішити поставлені задачі. Відносна похибка визначення частот власних коливань дзвону склала не більше $\pm 5\%$.

4. Під час комп'ютерного моделювання було показано, що всі моди коливання дзвону які відповідають частотам що присутні в звуку є осесиметричними. Проте теоретично існують також й інші моди коливань дзвонів частоти яких не випромінюються і які не виявлено в ході проведення експерименту.

5. Побудована комп'ютерна модель може бути використана для побудови дзвонів з наперед заданими акустичними характеристиками, а також для аналізу звуку стародавніх дзвонів за відомими їх фізико-механічними та геометричними параметрами.

Список літератури: 1. Пухначёв, Ю. В. Загадки звучащего металла [Текст] / Ю. В. Пухначёв. – М.: Наука, 1974. – 128 с. 2. Rombouts, L. Singing Bronze: A History of Carillon Music [Text] / L. Rombouts // Presses Universitaires de Louvain. – 2014. – 366 p. 3. Тосин, С. Г. Колокола и звоны в России. 2-е изд., переработ. и доп. [Текст] / С. Г. Тосин // Новосибирск: Сибирский хронограф, 2002. 4. "Колокола. История и современность" (сборник статей) [Текст] / Сост. Ю. В. Пухначев, отв. редактор Б. В. Раушенбах. – М.: "Наука", 1985. – 304 с. 5. Нюнин, Б. Н. Создание колоколотейного производства на базе АМО ЗиЛ [Текст] / Б. Н. Нюнин // «Академия Тринитаризма». – М., Эл № 77-6567, публ.10611. 6. Нюнин, Б. Н. Расчено-экспериментальное исследование виброакустических характери-

стик старых русских и современных колоколов [Текст] / Б. Н. Нюнин, А. С. Ларюков, И. С. Юдин // Сб. Музыка колоколов. – С.-Б.: РИИИ, 1999. 7. Trifonov, T. The bells chime – an acoustical, mathematical and technological challenge [Text] / T. Trifonov, T. Georgiava // Proceedings of the National Scientific Conference on Acoustics. – Varna, 2008. 8. Дидковский, В. С. Исследование акустических характеристик колокола «Мазепа» Софийского собора (Киев) [Текст] / В. С. Дидковский, С. А. Лулева, В. П. Заец // Электроника и связь. – 2011. – № 2(61). – С. 146–152. 9. ГОСТ 8117-74 Колокола судовые. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 7 с. 10. Авдеев, А. В. Звучание оркестровых колоколов [Текст] / А. В. Авдеев, В. П. Заец // Системы обработки информации. – 2014. – Вып. 7. – С. 10–13. 11. Авдеев, А. В. Объективные характеристики звучания колоколов. [Текст] / А. В. Авдеев // Мир науки и инноваций. – 2015. – Т. 5., Вып. №1 (1). – С. 59–62.

Bibliography (transliterated): 1. Puhnyachyov, Yu. V. (1974). Zagadki zvuchashego metalla. Moscow: Nauka, 128. 2. Rombouts, L. (2014). Singing Bronze: A History of Carillon Music. Presses Universitaires de Louvain, 366. 3. Tosin, S. G. (2002). Kolokola i zvonyi v Rossii. 2-e izd., pererabot. i dop. Novosibirsk: Sibirskiy khronograf. 4. Sost, Yu. V. Puhnyachev, B. V. (1985). Kolokola. Istoriya i sovremennost. Moscow, Nauka, 304. 5. Nyunin, B. N. (2003). Sozdanie kolokololiteynogo proizvodstva na baze AMO ZiL. Akademiya Trinitarizma, Moscow, El # 77-6567, publ.10611. 6. Nyunin, B. N., Laryukov, A. S., Yudin, I. S. (1999). Rascheno-eksperimentalnoe issledovanie vibroakusticheskikh harakteristik staryih russkikh i sovremennyih kolokolov. Muzyka kolokolov. 7. Trifonov, T., Georgiava, T. (2008). The bells chime – an acoustical, mathematical and technological challenge. Proceedings of the National Scientific Conference on Acoustics. Varna. 8. Didkovskiy, V. S., Luneva, S. A., Zaets, V. P. (2011). Issledovanie akusticheskikh harakteristik kolokola «Mazepa» Sofiyskogo sobora (Kiev). Elektronika i svyaz, № 2(61), 146–152. 9. GOST 8117-74 (2002). Kolokola sudovyye. Tehnicheskie usloviya. Moscow, Izd-vo standartov, 7. 10. Avdeev, A. V., Zaets, V. P. (2014). Zvuchanie orkestrovyyih kolokolov. Sistemy obrabotki Informatsiyi, 7, 10–13. 11. Avdieiev, A. V. (2015). Objective characteristics sound bells. Mir nauki i innovatsiy, T. 5. Issue №1 (1), 59–62.

Надійшла (received) 04.11.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Авдеев Александр Владимирович – магістр, Кафедра акустики та акустоелектроніки, Национальный технический университет Украины «КПИ», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056, тел.: (093) 091-12-34

Авдеев Александр Володимирович – магістр, Кафедра акустики та акустоелектроніки, Национальный технический университет Украины «КПИ» пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056, тел. (093) 091-12-34

Avdeev Oleksandr Volodimirovich – magister, Department Acoustics and acoustoelectronics, National technical university of Ukraine «KPI», av. Peremogi, 37, Kyiv, Ukraine, 03056, tel.: (093) 091-12-34

Заец Виталий Пантелеевич – доцент, Кафедра акустики и акустоэлектроники, Национальный технический университет Украины «КПИ», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056, E-mail: zaetsv@i.ua. тел.: (066) 149-41-25.

Заець Віталій Пантелєйович – доцент, Кафедра акустики та акустоелектроніки, Национальный технический университет Украины «КПИ», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056, E-mail: zaetsv@i.ua. тел. (066) 149-41-25, ORCID 0000-0002-2232-9187

Zayets Vitaliy Panteleevich – docent, Department Acoustics and acoustoelectronics, National technical university of Ukraine «KPI», av. Peremogi, 37, Kyiv, Ukraine, 03056, E-mail: zaetsv@i.ua. tel.: (066) 149-41-25

Котенко Светлана Геннадьевна – асистент, Кафедра акустики и акустоэлектроники, Национальный технический университет Украины «КПИ», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056, E-mail: catdontlike@gmail.com, тел.: (063) 832-79-81. ORCID 0000-0001-6804-1413

Котенко Світлана Геннадіївна – асистент, Кафедра акустики та акустоелектроніки, Национальный технический университет Украины «КПИ», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056, E-mail: catdontlike@gmail.com, тел.: (063) 832-79-81.

Kotenko Svetlana Gennadijevna – assistant, Department Acoustics and acoustoelectronics, National technical university of Ukraine «KPI», av. Peremogi, 37, Kyiv, Ukraine, 03056, E-mail: catdontlike@gmail.com