

Розробка апаратно-програмного комплексу «Штучна голова» із використанням обладнання непрофесійного рівня

Дворник О. О., ORCID [0000-0003-4735-2225](https://orcid.org/0000-0003-4735-2225)

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем, ames.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Анотація—В даній роботі представлено результати досліджень принципової можливості створення апаратно-програмного комплексу для акустичної експертизи приміщень із використанням апаратного обладнання непрофесійного рівня. Показано, що для такого створення необхідно виконати коригування характеристики вимірювального тракту, врахувавши нерівномірність амплітудно-частотної характеристики підсистеми «гучномовець-мікрофон». Із використанням скоригованої таким чином двоканальної вимірювальної системи виконано експериментальні дослідження, спрямовані на оцінювання розбірливості мови, спотвореної реверберацією.

Ключові слова — штучна голова; розбірливість мови; реверберація; частотна характеристика; імпульсна характеристика приміщення.

I. ВСТУП

Тривалість досліджень, спрямованих на розробку апаратно-програмних комплексів «Штучна голова» (ШГ), налічує майже 50 років. Однією із перших спроб такого роду можна вважати створення в 1975 році ШГ під назвою KEMAR [1]. На Рис. 1 (а) показано переріз такої штучної голови.

В 1994 році піонером датської акустики Г. Расмуссеном засновано компанію GRAS Sound & Vibration, яка на сьогодні є світовим лідером у галузі звукової та вібраційної промисловості [2]. В основі діяльності цієї компанії є теоретичні та практичні нароби, отримані при розробці ШГ KEMAR. Основна відмінність між KEMAR та конкурентними стандартними імітаторами голови і торса (HATS) полягає в тому, що KEMAR заснований на великому статистичному дослідженні властивостей людського тіла. Це означає, що KEMAR HATS має ті ж акустичні властивості, що і пересічна людина. Результати конкурентних KEMAR розробок показано на Рис. 1б-1г. Зокрема, на Рис. 1б показано зовнішній вигляд ШГ HMS II.3 (Code 1230) [3], Neumann KU 100 [4].

Хоча зазначені системи виконано на високому професійному рівні, їх загальним суттєвим недоліком є висока вартість, що сягає 8-10 тисяч євро. Винятком є польська розробка B1-E [5], вартість якої не перевищує 1000 євро, хоча є певні сумніви щодо високого професійного рівня даної розробки. Слід, однак зазначити, що й ця ціна може бути зависокою для українських дослідників.

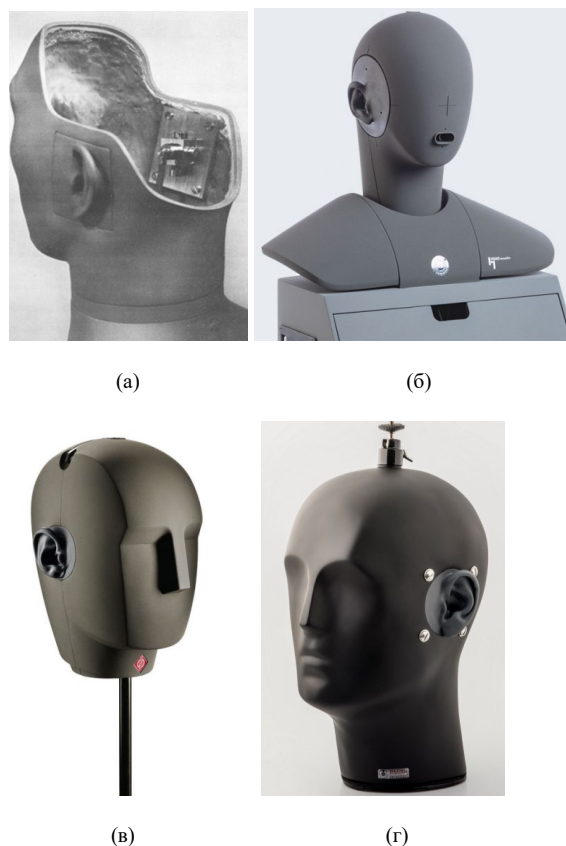


Рис. 1 Штучні голови: KEMAR (а), HMS II.3 (Code 1230) (б), Neumann KU 100 (в) та B1-E (г)

З огляду на це, актуальною видається задача створення не надто дорогого, але прийняттого з точки зору практичного застосування для акустичних вимірювань, програмно-апаратного комплексу ШГ.

В роботах [6], [7] представлено результати досліджень, виконаних на протязі 2020 року та спрямованих на створення апаратно-програмного комплексу «Штучна голова», призначеного для вимірювання бінауральних імпульсних характеристик та двоканального оцінювання розбірливості мови. Цей комплекс складається зі штучної голови, що містить модель зовнішнього вуха, апаратного та програмного забезпечення. Зовнішній вигляд створеного на кафедрі акустичних та мультимедійних електронних систем (АМЕС) НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» комплексу ШГ показано на Рис. 2.

Метою даної роботи є уточнення низки важливих питань, що стосуються створення, налагодження та експлуатації даного апаратно-програмного комплексу.

II. СТВОРЕННЯ ТА НАЛАГОДЖЕННЯ КОМПЛЕКСУ ШГ

При створенні комплексу ШГ важливим питання є пошук методів обчислення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) підсистеми «гучномовець-мікрофон», що необхідно для коригування АЧХ тракту.



(a)



(b)

Рис. 2 Комплекс «Штучна голова» [6], [7]: зовнішній вигляд (а), процес вимірювань (б)

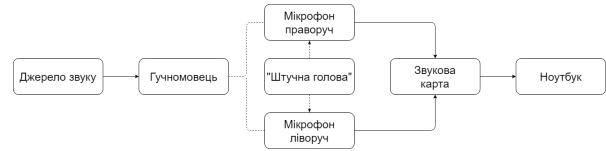


Рис. 3 Структурна схема процедури оцінювання ІХ приміщення

Структурну схему процедури оцінювання імпульсної характеристики (ІХ) приміщення за допомогою ШГ представлено на Рис. 3. Тестовий звуковий сигнал випромінюють за допомогою гучномовця, який розміщено у точці приміщення, де зазвичай розміщується диктор. Відгук приміщення на стимул реєструє пара мікрофонів, притиснутих до вушних раковин штучної голови, що розміщена в одній із точок приміщення, де зазвичай знаходяться слухачі. Оскільки АЧХ гучномовця та мікрофона не є ідеально рівномірними в смузі частот тестового сигналу, замість ІХ приміщення буде оцінено ІХ системи «гучномовець-приміщення-мікрофон».

$$h_{\Sigma}(t) = h_l(t) \otimes h_r(t) \otimes h_m(t) = h_r(t) \otimes h_{lm}(t),$$

де \otimes – символ згортки; $h_l(t)$ – імпульсна характеристика гучномовця; $h_m(t)$ – ІХ одного із мікрофонів; $h_{lm}(t) = h_l(t) \otimes h_m(t)$ – ІХ системи «гучномовець-мікрофон».

Згідно із рекомендаціями праць [8], [9], тестовим сигналом слугувала *mls*-послідовність із частотою дискретизації 44,1 кГц та бітовою глибиною 24. Враховуючи порівняно невисоку якість використаних гучномовців та мікрофонів, необхідно коригувати результати вимірювань ІХ приміщення.

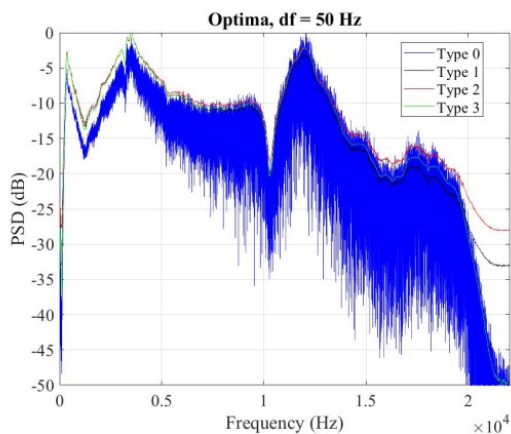
На Рис. 4 показано оцінки АЧХ підсистеми ГМ для 3-х видів гучномовців, отримані після запису та обробки сигналів в заглушеному приміщенні.

Порівнюючи наведені на Рис. 4 оцінки АЧХ, можна зробити висновок, що найкращим є гучномовець Genius. Результати оцінювання ІХ скоригованого вимірювального тракту із використанням гучномовця Genius показано на Рис. 5.

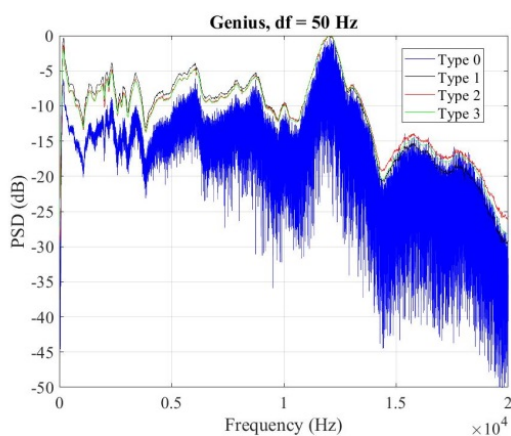
III. ВИПРОБУВАННЯ КОМПЛЕКСУ ШГ

Експериментальна перевірка спроможності розробленого комплексу мала показати принципову можливість використання електроакустичної апаратури побутового, не професійного, рівня для розв'язання вимірювальних завдань.

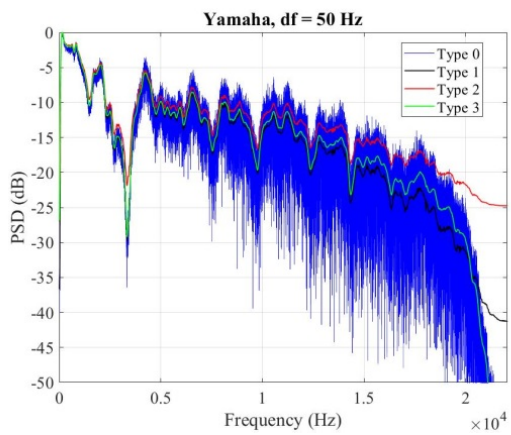
Для випробувань було обрано дві аудиторії кафедри АМЕС, малого та середнього розміру (Рис. 6). У певних точках приміщення (нумеровані кружечки) були розміщені мікрофони для реєстрації сигналу. На Рис. 7 наведено графіки оцінок ІХ розглянутих приміщень, із результатами вимірювання часу реверберації.



(a)



(б)



(в)

Рис. 4 Оцінки АЧХ підсистеми ГМ: гучномовці Optima (а), Genius (б) та Yamaha (в) відповідно [6]

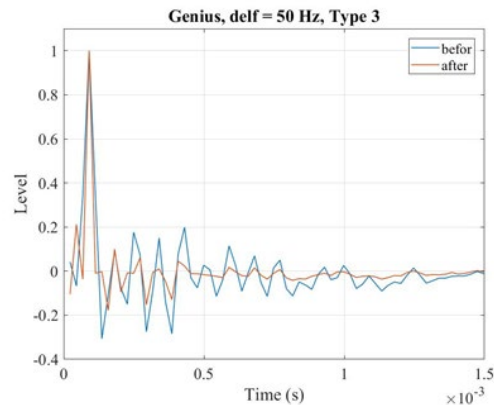


Рис. 5 Скоригована оцінка ІХ вимірювально тракту із гучномовцем Genius

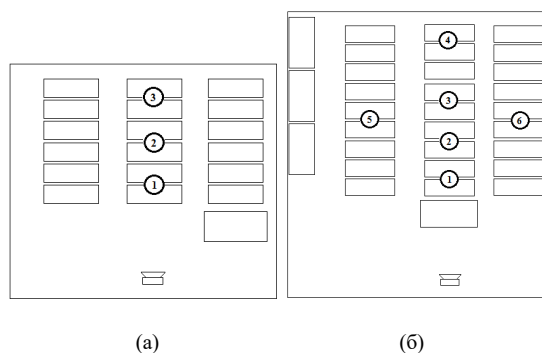
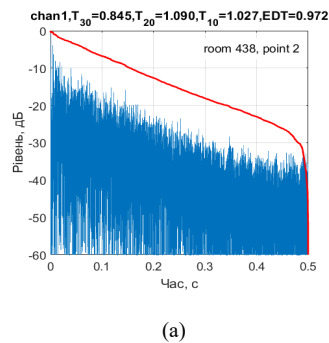
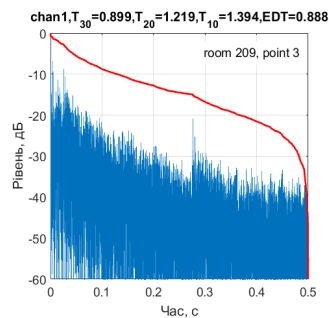


Рис. 6 Плани малої аудиторії 438 (а) та середньої аудиторії 209 (б) [7]



(а)

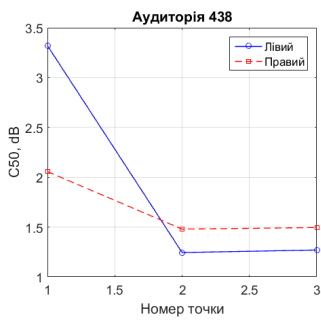


(б)

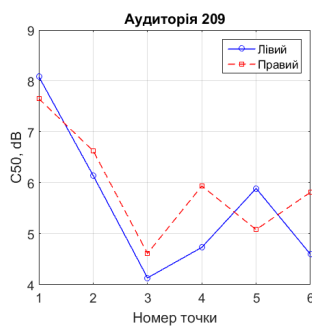
Рис. 7 ІХ та час реверберації для аудиторій 438 (а) та 209 (б) [7]

Оцінки характеристик C50 (індекс чіткості), ERB (відношення енергій прямого звуку та ранніх відбить), STI (індекс розбірливості) та словесної розбірливості W наведено на Рис. 8-11, відповідно.

DOI: [10.20535/2617-0965.eac.228437](https://doi.org/10.20535/2617-0965.eac.228437)

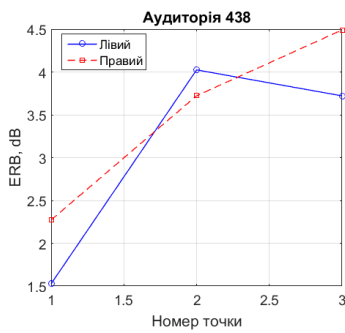


(а)

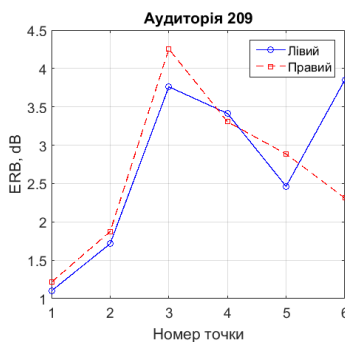


(б)

Рис. 8 Оцінки C50 для аудиторій 438 (а) та 209 (б)

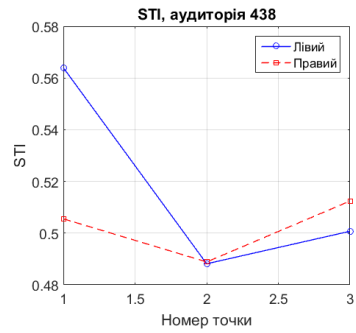


(а)

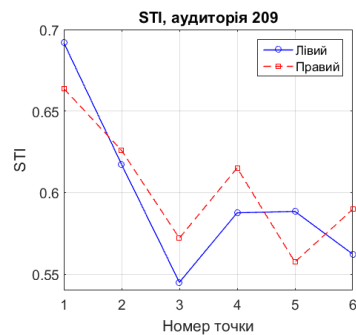


(б)

Рис. 9 Оцінки ERB для аудиторій 438 (а) та 209 (б)

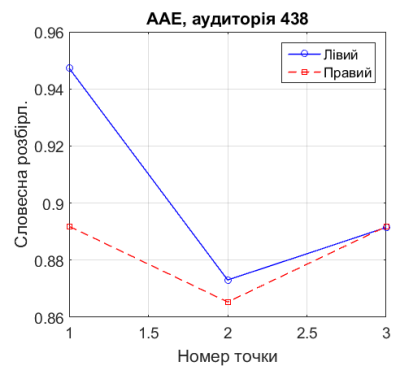


(а)

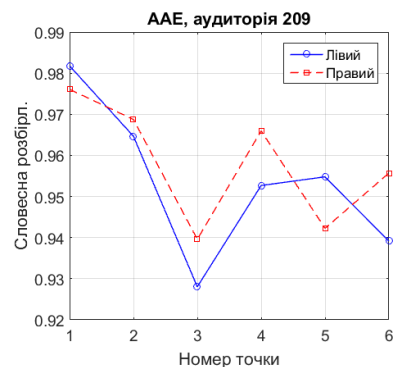


(б)

Рис. 10 Оцінки STI для аудиторій 438 (а) та 209 (б)



(а)



(б)

Рис. 11 Оцінки словесної розбірливості W для аудиторій 438 (а) та 209 (б)



Згідно отриманим оцінкам, ефект підвищення розбірливості мови біля задньої стінки аудиторії 438, порівняно із серединою приміщення, є значно виразнішим для оцінок розбірливості мови (Рис. 10-11), ніж для коефіцієнту C50 (Рис. 8). Що стосується аудиторії 209, де було виконано вимірювання ще й біля бокових стінок (точки з номерами 5 та 6), бачимо, що біля бокових стінок аудиторії розбірливість мови є також вищою, ніж в центрі приміщення.

Узагальнюючи, можна сказати, що в аудиторіях, подібних розглянутим в даній роботі, користь ранніх відбиттів, за критерієм розбірливості мови, є різною в різних частинах приміщення, й біля стін приміщення вона є більшою, ніж в середині приміщення.

ВИСНОВКИ

Представлено результати досліджень принципової можливості створення апаратно-програмного комплексу для акустичної експертизи приміщень із використанням апаратного обладнання непрофесійного рівня. Показана необхідність коригування АЧХ вимірювального тракту. Виконано експериментальні дослідження, спрямовані на оцінювання розбірливості мови, спотвореної реверберацією, що підтвердило працездатність розроблено комплексу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] M. D. Burkhard and R. M. Sachs, "Anthropometric manikin for acoustic research," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 58, no. 1, pp. 214–222, 1975, PMID: 1150969. DOI: [10.1121/1.380648](https://doi.org/10.1121/1.380648)

Надійшла до редакції 11 березня 2021 р.

[2] "Head & Torso Simulators." URL:

<https://www.grasacoustics.com/products/head-torso-simulators-kemar>. [Accessed: 08-Mar-2021].

[3] "Artificial Head & Binaural Recording | HEAD acoustics." URL:

<https://www.head-acoustics.com/products/artificial-head-binaural-recording>. [Accessed: 08-Mar-2021].

[4] "Neumann KU 100 (dummy head)." URL:

<https://sennheiserstore.com.ua/ru/ku-100-dummy-head.html>. [Accessed: 08-Mar-2021].

[5] "B1-E Dummy Head (without the BE-P1 Binaural Microphones) – Binaural Enthusiast." URL:

<https://binauralenthusiast.com/product/etiam-ullamcorper-dolor-5/>. [Accessed: 08-Mar-2021].

[6] O. O. Dvornyk, D. I. Motomiuk, M. V. Didkovska, and A. M. Prodeus, "Artificial Software Complex 'Artificial Head'. Part 1 Adjusting the Frequency Response of the Path," *Microsystems, Electron. Acoust.*, vol. 25, no. 1, pp. 56–64, Jul. 2020, DOI: [10.20535/2523-4455.mea.198431](https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.198431).

[7] O. O. Dvornyk, D. I. Motomiuk, M. V. Didkovska, and A. M. Prodeus, "Artificial Software Complex 'Artificial Head'. Part 2 Evaluation of Speech Intelligibility in Classrooms," *Microsystems, Electron. Acoust.*, vol. 25, no. 3, pp. 48–55, Dec. 2020, DOI: [10.20535/2523-4455.mea.209928](https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.209928).

[8] M. Jeub, M. Schäfer, and P. Vary, "A binaural room impulse response database for the evaluation of dereverberation algorithms," in *DSP 2009: 16th International Conference on Digital Signal Processing, Proceedings*, 2009, DOI: [10.1109/ICDSP.2009.5201259](https://doi.org/10.1109/ICDSP.2009.5201259).

[9] "IKS: Aachen Impulse Response Database." URL:

<https://www.iks.rwth-aachen.de/en/research/tools-downloads/databases/aachen-impulse-response-database/>. [Accessed: 08-Mar-2021].



Development Of Hardware and Software Complex "Dummy Head" with the Use of Non-professional Equipment

O. O. Dvornyk, ORCID [0000-0003-4735-2225](https://orcid.org/0000-0003-4735-2225)

Department of Acoustics and Acoustoelectronics, ames.kpi.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)
Kyiv, Ukraine

Abstract—This paper presents the results of research on the fundamental possibility of creating a hardware and software complex for acoustic examination of premises using non-professional equipment. The "Dummy Head" complex is designed to measure the characteristics of the binaural impulse and assess the intelligibility of two-channel speech. The peculiarity of this complex is that it contains electro-acoustic equipment of various qualities, including household appliances with mediocre quality characteristics.

The paper shows that for such a creation it is necessary to adjust the characteristics of the measuring path taking into account the non-uniformity of the amplitude-frequency characteristics of the subsystem "speaker-microphone". Since the amplitude-frequency characteristic of the speaker-microphone subsystem takes the smallest values at the edges of the frequency range, and the variance of the mutual spectrum estimation of the speaker-microphone system is the largest at the right edge of the frequency range, it is advisable to use the regularization method to achieve the required calculation accuracy. Such a correction can be performed by controlled division of the frequency response of the speaker-room-microphone system to the previously obtained estimate of the amplitude-frequency characteristic of the speaker-microphone subsystem. The problem of such calculations is the distribution operation, because the amplitude-frequency response of the speaker-microphone subsystem may contain small numerical values that will overflow the bit grid of the computer system and will fall on the computer. However, it is obvious that if to ensure proper control of the amplitude-frequency characteristics of the speaker-microphone subsystem, such a distribution can be practically implemented.

The paper also shows that the results of language intelligibility assessment in two small and medium-sized classrooms showed that speech intelligibility in the middle of the room may be less than near the wall of the room. These results are consistent with the results of previous studies, where language intelligibility was assessed by objective and subjective methods for other audiences. It should be noted that although estimates of the widely used C50 coefficient are consistent with estimates of speech intelligibility, the phenomenon of increased speech intelligibility near the walls of the room is more pronounced when using estimates of speech intelligibility. Using a two-channel measurement system configured in this way, experimental studies were conducted to assess the intelligibility of speech distorted by reverberation.

Keywords — *dummy head; speech intelligibility; reverberation; frequency response; impulse response.*

