

Керування частотною характеристикою гучномовця за допомогою зміни його зовнішнього оформлення

Рябоконе П. О., ORCID [0000-0002-5079-465X](https://orcid.org/0000-0002-5079-465X)

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—У даній статті аналізується спосіб керування частотною характеристикою низькочастотного гучномовця шляхом зміни об'єму його акустичного оформлення – закритого ящика. Розрахунок виконується методом Тіля-Смола. Одержані результати порівнюються з відповідними характеристиками для відкритого зовнішнього оформлення.

Ключові слова — гучномовець; зовнішнє оформлення; закритий ящик; добротність гучномовця; добротність системи; об'єм зовнішнього оформлення.

I. ВСТУП

Гучномовці, як пристрої, призначені для ефективного випромінювання звуку в навколишнє повітряне середовище, в залежності від області використання відрізняються великим різноманітним конструкцій та частотним діапазоном [1]. Застосування таких пристроїв може мати різні напрямки: наприклад, звуко-режисери та режисери монтажу покладаються на контрольні монітори для критичного аналізу якості створених музичних або телевізійних програм; лектори і актори користуються акустичними системами для звукопідсилення виступів перед аудиторіями; слухачі використовують гучномовці для відтворення аудіозаписів, тощо [2].

Однак, кожен відтворюваний аудіозапис має різні характеристики, залежні від властивостей як випромінювача звуку, так і від мікрофону, умов проведення запису, якості електроакустичного тракту та багатьох інших параметрів. Музичний інструмент, людський голос чи будь-який інший пристрій, з урахуванням властивостей приміщення, в якому здійснюється запис, може звучати зовсім по-різному. Конструкція гучномовців відрізняється в залежності від того, який частотний діапазон він має випромінювати. Для роботи на низьких частотах необхідні дифузори великої площі, але вони не будуть встигати передавати коливання всією своєю поверхнею, що критично важливо для роботи на високих частотах. При цьому існуючі ширококоштові гучномовці з усіма застосованими заходами при їх проектуванні не можуть якісно відтворювати частотні складові на межах діапазонів. Таким чином, один і той самий гучномовець не здатен з великою точністю відтворювати різне за частотою звучання. Одним гучномовцем не вдається

передати всі аспекти тонкого звучання високих нот і всю глибину низькочастотного звучання басу [3].

Різні групи гучномовців мають різну за своєю формою та нерівномірністю частотну характеристику (ЧХ). Зазвичай, ЧХ — це основний параметр, який враховують при виборі гучномовця в залежності від діапазону відтворюваних частот. В результаті постає питання: що впливає на вигляд ЧХ і яким чином можна нею керувати.

Одним із способів підвищення ефективності випромінювання гучномовця і поліпшення його ЧХ, особливо в області низьких частот, слугує використання зовнішнього акустичного оформлення гучномовця [4].

Метою дослідження є аналіз впливу динамічної зміни об'єму зовнішнього оформлення гучномовця — закритого ящика, на кінцеву частотну характеристику всієї системи.

Ключовими задачами є: розрахунок частотної характеристики гучномовця в закритому ящику; порівняння отриманих результатів між собою та з розрахованими значеннями для гучномовця у відкритому ящику; аналіз отриманих даних з висновками щодо впливу зміни об'єму закритого акустичного оформлення на ключові характеристики системи, такі як резонансна частота, форма ЧХ та її нерівномірність.

II. ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ЗОВНІШНЬОГО ОФОРМЛЕННЯ

Окремо виділимо низькочастотні гучномовці. Значний позитивний вплив на характеристики такого пристрою здійснює перш за все його зовнішнє оформлення (або корпус). Справа в тому, що динамік,



здійснюючи випромінювання у вільному просторі, випромінює акустичний сигнал не лише фронтальною стороною, а й тильною. Ці коливання знаходяться у протифазі один до одного і таке явище називають акустичним коротким замиканням. Більше всього воно помітно при роботі на низьких частотах, адже в такому разі довжина хвилі більша за діаметр дифузора, і випромінювання фронтальною та тильною стороною послаблюють одне одного (якщо не повністю, то доволі суттєво). Однак, за допомогою розміщення гучномовця в зовнішньому оформленні, це явище може бути нівельовано або використано на користь [5].

Серед основних типів зовнішнього акустичного оформлення виділяють такі різновиди:

А. Нескінченний екран, згорнутий щит або відкритий ящик.

Цей тип оформлення орієнтований на дотримання наступних умов: він має являти собою нескінченно велику поверхню, в якій буде встановлений гучномовець, і мати великий тиловий об'єм. На практиці використовують плоскі екрани кінцевих розмірів, в тому числі, їх згорнуті варіанти (згорнутий щит). Однак навіть таке оформлення потребує достатньо великих габаритних розмірів. Мінімальний розмір таких корпусів становить чверть від довжини хвилі (від центру головки гучномовця до бічної межі корпусу). Існують також варіації з отворами в задній стінці ящика (відкритий ящик), однак це дозволяє зменшити розміри приблизно на 30 %, що досі є не ефективним з боку ергономіки [6]. В той же час, вплив такого оформлення на кінцеву ЧХ системи, її форму та нерівномірність, є найменш суттєвим [7].

В. Закритий ящик.

Один з найбільш простих і розповсюджених типів зовнішнього оформлення. Суть полягає в тому, що головка гучномовця вбудовується в стінку повністю закритого ящика. Частота резонансу гучномовця, як і його ЧХ в такій конструкції значним чином визначається рухомою масою дифузора та гнучкістю об'єму повітря всередині [5]. Ця варіація зовнішнього оформлення є вже набагато зручнішою з боку ергономіки, ніж попередні моделі, і явище акустичного короткого замикання тут також усунене.

С. Корпус з фазоінвертором.

Складна у проектуванні варіація корпусу, яка має велику кількість підтипів. Основна ідея в цьому разі полягає у використанні випромінювання тильної сторони динаміка, що виділяє цей варіант оформлення серед розглянутих вище. Змінюючи фазу коливань, що випромінюються тильною стороною дифузора, вдається покращити характеристики вихідного сигналу. Зазвичай це виконується застосуванням акустичного фільтра, реалізованого у вигляді трубки чи отвору у фронтальній стінці закритого ящика [8]. Серед поширених варіацій такого корпусу — корпус з лабіринтом, з пасивним випромінювачем, з двома камерами, тощо.

Однак, не дивлячись на ефективність корпусів з фазоінверторами, вони все ще залишаються достатньо складними у проектуванні, тому зовнішнє

оформлення у вигляді закритого ящика на сьогодні є актуальним і широко використовуваним.

III. РОЗРАХУНКИ ЗАКРИТОГО ЯЩИКА

Одним з найефективніших способів розрахунку параметрів низькочастотного закритого оформлення гучномовця є застосування так званих параметрів Тіля-Смола (Thiele-Small). В цьому випадку гучномовець розглядається як фільтр другого порядку, і в більшості характеризується такими основними параметрами: загальна добротність, частота резонансу та об'єм ящика [9].

Для проведення дослідження використаний гучномовець, розрахований автором за наступним технічним завданням:

Номинальна електрична потужність $P_e = 25$ Вт; повний електричний опір гучномовця $Z = 16$ Ом; номінальний діапазон частот 40...5000 Гц; Коефіцієнт нелінійних спотворень $K_f = 16$ %; середній стандартний звуковий тиск $p_{ст} = 1,35$ Па; конструкція магніту – магніт керновий.

Отриманий розмір дифузора гучномовця становить $S_d = 0,1$ м². Частотна характеристика гучномовця у відкритому ящику, розрахована за методикою, наведеною в роботі [6], для об'єму ящика $V = 0,38$ м³ із площею отворів на задній стінці $S_{от} = 0,47$ м² наведена далі на рис. 3, 4.

Більш детально розглянемо загальну схему гучномовця в закритому зовнішньому оформленні (рис. 1), та виділимо характеристики, необхідні для подальшого розрахунку.

Схема, представлена на рис.1, являє собою чотириполюсник, що складається з електричної та механічної частин з коефіцієнтом електромеханічної трансформації $K = 29$. $U = 18$ В – напруга електричної сторони гучномовця; $I = 1,4$ А – струм електричної сторони гучномовця; $R_{зк} = 13$ Ом – опір звукової котушки; $L_{зк} = 13 \cdot 10^{-4}$ Гн – індуктивність звукової котушки; V – коливальна швидкість гучномовця; $C_{\Sigma} = \frac{C_k \cdot C_{ш}}{C_k + C_{ш}} = 1,08 \cdot 10^{-4} \frac{\text{М}}{\text{Н}}$ – сумарна гнучкість системи, у якій c_k – гнучкість керну, $c_{ш}$ – гнучкість центруючої шайби; $C_y = \frac{V_y}{\rho_0 c_0^2 S_d^2} = 8,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{М}}{\text{Н}}$ – гнучкість замкненого об'єму ящика, в якій V_y – об'єм ящика, $\rho_0 = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – густина повітря, $c_0 = 343 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ – швидкість звуку в повітрі; $m_{\Sigma} = 0,096$ кг – маса системи; $R_{em} = 30$ Ом – механічний опір втрат; $R_g = R' \rho_0 c_0 S_d$ – опір випромінювання, в якому R' – безрозмірний коефіцієнт опору випромінювання.

Перейдемо до електричної схеми такого гучномовця, зобразивши її на рис. 2.



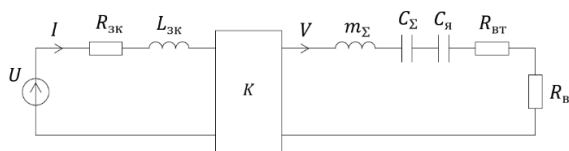


Рис. 1 Загальна схема гучномовця в закритому зовнішньому оформленні

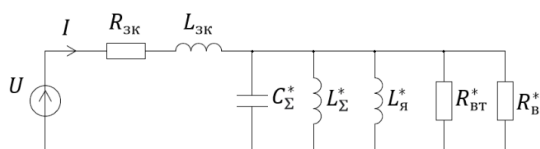


Рис. 2 Електрична схема системи гучномовець – закритий ящик

Елементи C_{Σ}^* , L_{Σ}^* , $L_{я}^*$, $R_{вт}^*$, $R_{н}^*$ – внесені в електричну схему механічні елементи, які розраховуються з використанням коефіцієнту електромеханічної трансформації на основі співвідношень, наведених в роботі [6]. Варто відмітити те, що характер реактивності елементів, при перерахунку з механічної сторони на електричну, змінюється на протилежний [6].

Оскільки величина електричної потужності $P_e = U \cdot I \approx I^2 \cdot R_{зк}$, то величину струму можна знайти за формулою $I = \sqrt{\frac{P_e}{R_{зк}}}$.

Спростимо схему, поєднавши одноімennі елементи, включені паралельно.

Зважаючи на малість величини $L_{зк}$ (тобто, малість опору $\omega L_{зк}$ на низьких частотах), елементом $L_{зк}$ можна знехтувати. Тоді спрощену схему можна розглядати, як фільтр 2-го порядку (наявність двох реактивних елементів), що і дозволяє застосувати методику Тіля-Смола для розрахунку об'єму та величини гнучкості ящика.

Зупинимось на головних параметрах, які знадобляться в розрахунках:

Частота резонансу без оформлення $f_s = 46$ Гц;

Власна загальна добротність $Q_{ts} = 0,18$;

Еквівалентний об'єм $V_{as} = 0,17$ м³.

Останній визначається як закритий об'єм повітря, гнучкість якого дорівнює гнучкості підвіски [10].

Попередньо виберемо декілька сімейств ЧХ за значенням загальної результуючої добротності. Як відомо, для фільтра 2-го порядку вона розраховується за частотою резонансу гучномовця в закритому ящику та власною загальною добротністю [6]:

ТАБЛИЦЯ 1 РОЗРАХОВАНІ ВАРІАНТИ ОФОРМЛЕННЯ

Загальна добротність Q_{tc}	Частота резонансу f_c , Гц	Об'єм закритого ящика V_e , м ³	Гнучкість закритого ящика C_a , м/Н
0.5	127	0,028	18
0.7	177	0,014	9
1	253	0,0052	3,4
1.4	354	0,0029	1,9
2	506	0,0014	0,9

$$Q_{tc} / Q_{ts} = f_c / f_s$$

де f_c – резонансна частота в оформленні, Q_{tc} – загальна результуюча добротність.

Звідси можна виразити значення частоти резонансу для гучномовця в акустичному оформленні. За допомогою графіку для визначення об'єму [6], за відношенням добротностей знайдемо потрібний об'єм акустичної системи V_e .

Далі розрахуємо гнучкість ящика за відомою формулою. Результати занесемо до таблиці 1.

За механічною частиною схеми, наведеною на рис. 1, можна розрахувати остаточні параметри системи гучномовець - закритий ящик.

$$F = Bl \cdot I = 40 \text{ Н},$$

$$V = \frac{F}{\sqrt{(R_{em} + R_e)^2 + (\omega m_{\Sigma} - \frac{1}{\omega C_e})^2}}, \text{ де } \omega = 2\pi f,$$

$$C_e = \frac{C_{\Sigma} \cdot C_{я}}{C_{\Sigma} + C_{я}}.$$

Випромінюваний звуковий тиск:

$$P(f) = \frac{R_e \cdot V}{S_d}.$$

Розрахуємо залежність звукового тиску та рівнів звукового тиску від частоти для різних об'ємів закритого ящика, та порівняємо їх з результатами для відкритого ящика.

IV. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати представлені графічно на рис. 3 та рис. 4. Як видно з результатів, частота резонансу в закритому зовнішньому оформленні вища, ніж у відкритому. Виокремимо цей результат у вигляді відношення $f_c : f_e$ та занесемо в таблицю 2.

Аналізуючи отримані дані, можна зазначити, що зі зміною внутрішнього об'єму закритого ящика (а отже, його загальної добротності), вдається вплинути як на частоту резонансу, так і на пікові амплітудні значення в цих частотах, видозмінюючи ЧХ.

Варто відмітити, що результат, наведений на рис. 3 і рис. 4 досягається при врахуванні у відкритому зовнішньому оформленні впливу випромінювання лише однієї сторони дифузора.

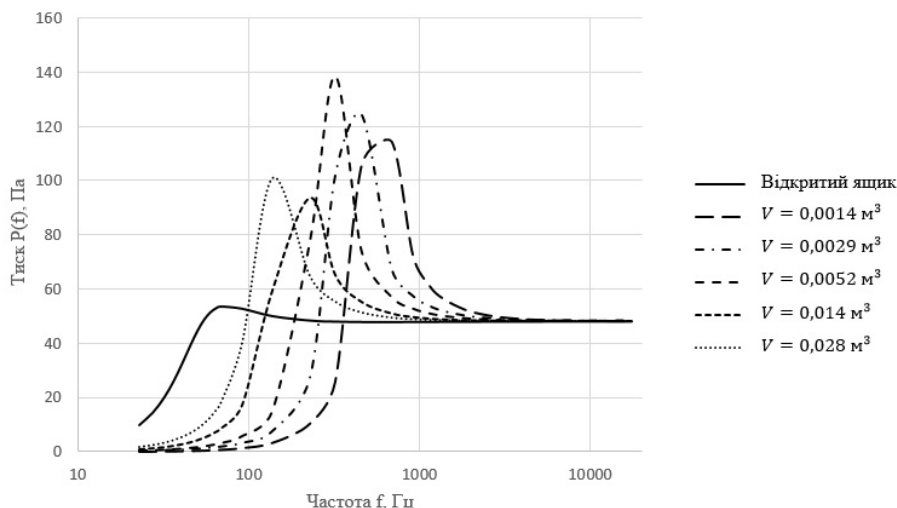


Рис. 3 Залежність звукового тиску від частоти для різних варіантів акустичного оформлення

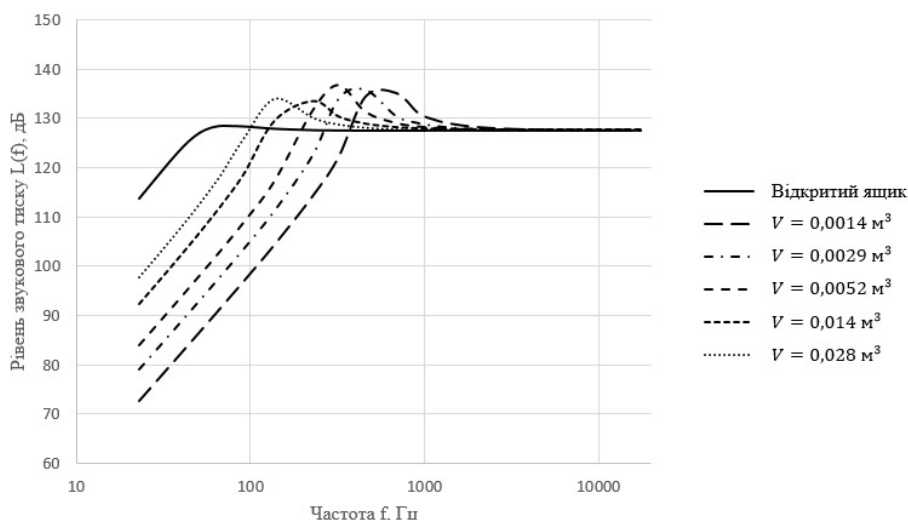


Рис. 4 Залежність рівнів звукового тиску від частоти для різних варіантів акустичного оформлення

Таблиця 2 Порівняння частоти резонансу

Об'єм закритого ящика V_{θ} , м ³	0,0014	0,0029	0,0052	0,014	0,028
$f_c : f_{\theta}$	11	7,7	5,5	3,85	2,75

Зміщення частоти резонансу системи в бік більш високих частот і посилення звукового тиску на резонансі загалом погіршує ЧХ системи (знижує відтворення низькочастотних компонентів звуку і збільшує нерівномірність ЧХ). Але певні варіанти з такого сімейства частотних характеристик можуть бути виправдані в залежності від відтворюваного діапазону частот і при бажанні підкреслити низькочастотні складові (наприклад, у рок-музиці).

В разі потреби у згладженому низькочастотному звучанні доречно використовувати системи з низькою загальною добротністю і збільшеним внутрішнім об'ємом або відкрите зовнішнє оформлення.

ВИСНОВКИ

Здійснено огляд існуючих варіантів зовнішнього оформлення гучномовця. Для проведення дослідження обране зовнішнє оформлення у вигляді закритого ящика.

Виконані розрахунки і порівняння частотної характеристики та значень резонансної частоти гучномовця у відкритому і закритому зовнішніх оформленнях для різних об'ємів закритого ящика.

Об'єм закритого акустичного оформлення суттєво впливає на резонансну частоту та форму частотної характеристики гучномовця. Різниця між найменшим розрахованим об'ємом (0,0014 м³) та найбільшим (0,028 м³) призводить до зниження резонансної

частоти на 379 Гц. Порівнюючи з відкритим акустичним оформленням, найменший розрахований об'єм ящика призводить до збільшення резонансної частоти системи в 2,75 рази, тоді як найбільший – збільшує її в 11 разів.

Зменшення об'єму закритого оформлення гучномовця призводить до зменшення його частотного діапазону за рахунок низьких частот і, одночасно, зростання нерівномірності частотної характеристики.

Зміна резонансної частоти системи при зменшенні об'єму закритого оформлення відбувається тим швидше, чим менше об'єм закритого ящика.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] V. S. Didkovskiy, S. A. Lunova, and O. V. Bohdanov, *Arkhitekturna Akustyka* [Architectural Acoustics]. Kyiv: NTUU "KPI," 2012, ISBN: 978-966-189.
- [2] M. Colloms and P. Darlington, *High Performance Loudspeakers*. Wiley, 2018, ISBN: 9781118413531.
- [3] G. Hill, *Loudspeaker Modelling and Design*. New York: Routledge, 2018, ISBN: 9781351116428.
- [4] L. L. Beranek and T. Mellow, *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Elsevier, 2012, ISBN: 9780123914217.
- [5] C. Ramón and F. Sales, "Design of loudspeaker enclosures: closed box," Universitat Politècnica de València, 2020.
- [6] I. A. Aldoshina et al., *Elektroakustika i zvukovoe veschanie* [Electroacoustics and sound broadcasting]. Moscow: Nauchno-tekhnicheskoe izdatelstvo "Goryachaya liniya-Telekom," 2007, ISBN: 5-93517-334-4.
- [7] E. N. Salmikova and L. G. Statsenko, *Akusticheskie sistemy* [Acoustic systems]. Moscow: Izdatelstvo "Prospekt," 2015, ISBN: 978-5-392-19206-9.
- [8] C. Ramón and F. Sales, "Design of loudspeaker enclosures: bass-reflex," Universitat Politècnica de València, 2020. URI: <http://hdl.handle.net/10251/136294>
- [9] J. Eargle, *Loudspeaker Handbook*. Boston, MA: Springer US, 2003, ISBN: 978-1-4419-5390-2.
- [10] I. A. Aldoshina, "Gromkogovoriteli 5.2 [Loudspeakers 5.2]," *Muzyikalnoe Oborudovanie*, no. 12 (168), pp. 51–58, 2008, [Online]. Available: <http://www.moinf.info/articles/loudspeakers-5-2>. (Access date: 01.04.2021).

Надійшла до редакції 26 березня 2021 р.

UDC 681.846.3

Control the Frequency Response of a Loudspeaker by Changing Its Enclosure

P. O Riabokon, ORCID [0000-0002-5079-465X](https://orcid.org/0000-0002-5079-465X)

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 article analyzes how to control frequency response of a loudspeaker by changing the volume of its closed-box enclosure. The calculation is performed by the method of Thiele-Small on the basis of a pre-calculated loudspeaker, the parameters of which are given in third section. This became possible because of the simplification of the circuit on figure 1 to the form of circuit on figure 2. This allowed us to consider it as a second order filter (presence of two reactive elements). Obtained results are compared with corresponding characteristics of open-box enclosure of the same loudspeaker, that was pre-calculated by the author too. Results are presented graphically in figure 3 and 4. As can be seen from them, the resonant frequency of the loudspeaker in the closed-box enclosure is higher than the resonant frequency of the loudspeaker in the open box. The result in the form of a ratio f_c / f_s is listed in table 2. Analyzing the obtained data, it can be noticed that with the change of the internal volume of the closed box (and hence its total quality factor), it is possible to affect both the resonance frequency and the peak amplitude values in these frequencies by changing the FR. The result shown in figure 3 and 4 is achieved by taking into account effect of radiation only on the one side of the driver (in the case of open-box enclosure). Closed box was calculating by taking into account both sides radiation of the driver.

Shifting the resonance frequency of the system towards higher frequencies and increasing the sound pressure on the resonance generally worsens the FR of the loudspeaker (reduces the reproduction of low-frequency components of sound and increases the unevenness of the frequency). However, certain variants of this group of frequency characteristics may be useful depending on the reproducible frequency range and need of emphasize the low-frequency components (for example, in rock music). If you need a smoothed low-frequency sound, it is appropriate to use systems with low overall quality and increased internal volume or open-box enclosure.

Therefore, the volume of the closed-box enclosure significantly affects the resonant frequency and the shape of the frequency response of the loudspeaker. Reducing the volume of the enclosure of the loudspeaker leads to a decrease in its frequency range due to low frequencies and at the same time increase in the unevenness of the frequency response. The change in the resonant frequency of the system as the volume of the closed-box enclosure decreases, the less the volume of the closed-box.

Keywords — loudspeaker; enclosure; closed box; quality factor of the loudspeaker; quality factor of the acoustic system; volume of the enclosure.

