

УДК 534.134

Знаходження фізичних параметрів електродинамічного перетворювача методом використання параметра BL та методом доданої маси

Волков Д. Д., ORCID [0000-0001-6064-4981](https://orcid.org/0000-0001-6064-4981)

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" kpi.ua
Київ, Україна

Анотація—У даній статті представлені результати практичного порівняння двох методів знаходження фізичних параметрів електродинамічного перетворювача. Перший – класичний метод за допомогою доданої маси. Другий – запропонований метод оснований на використанні параметра BL . Розглянуті переваги та недоліки кожного з двох методів, а також похибки знайдених параметрів та їхня обґрунтованість.

Ключові слова — електродинамічний перетворювач; параметр BL ; додана маса.

I. ВСТУП

Задача знаходження фізичних параметрів електродинамічних перетворювачів є невід'ємною частиною процесу розробки та виробництва акустичних систем [1], [2]. Найбільш популярним для цього є метод доданої маси, що був запропонований Невіллом Тілем і Річардом Смоллом [3]–[5]. Цей метод є простим та надійним у використанні, не потребує коштовної техніки та значних обчислювальних потужностей. Але його найбільшим недоліком є безпосереднє додавання маси до рухомої частини перетворювача, що може його пошкодити та дуже часто є практично неможливим. Виміряти параметри перетворювача без фізичного втручання до рухомої частини можна за допомогою лазерної триангуляції (для вимірювання зміщення) [6] або доплерівської інтерферометрії (для вимірювання швидкості) [7].

Метод використання параметра BL (добутку індукції у зазорі магнітного кола та індуктивності звукової котушки) базується на вимірюванні зміщення рухомої частини перетворювача, а також струму через котушку перетворювача та напруги на його клеммах. Ці три характеристики дозволяють повністю визначити параметри електродинамічного перетворювача в електричній і механічній частинах окремо, тобто виміряти повний електричний імпеданс і повний механічний імпеданс. Після того, як імпеданси визначені, з ними можна працювати окремо, та застосовувати різні еквівалентні кола для подальшого визначення безпосередньо параметрів моделі перетворювача.

II. ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Для демонстрації переваг знаходження фізичних параметрів перетворювача методом використання параметра BL проведемо розрахунок на прикладі типового широкосмугового електродинамічного перетворювача розміром три дюйми. Для детального моделювання електричної коливальної системи було обрано модель Джона Вандеркоя [8], у якій комплексний опір котушки знаходиться як сума статичного опору R_{DC} , частотно залежного активного опору котушки $R_{VC}(f)$ та частотно-залежної індуктивності $L_{VC}(f)$. Це дозволяє врахувати в моделі складні фізичні ефекти, як-то вихрові струми, що виникають у металевих частинах магнітної системи.

Вимірявши механічний імпеданс перетворювача окремо від електричного для моделювання механічної системи можливо використати сучасні більш складні та точні моделі, але для наочності та можливості порівняти запропонований метод із методом доданої маси було обрано класичну модель [3] із статичними значеннями маси рухомої частини M_{ms} , загальної еквівалентної гнучкості C_{ms} та механічних втрат R_{ms} . Будемо вважати додану масу повітря включеною до M_{ms} , а акустичні втрати до R_{ms} .

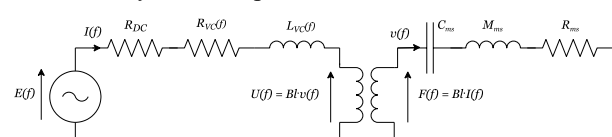


Рис. 1 Електро-механічна модель перетворювача



У якості збуджуючого сигналу $E(f)$ був використаний тональний сигнал із логарифмічно зростаючою частотою від 20 Гц до 2000 Гц, амплітудою $0.1 V_{rms}$. Вибір діапазону частот обумовлений тим, що тільки на низьких частотах усі точки поверхні мембрани рухаються синфазно. Також, на частотах вищих за 2000 Гц зміщення рухомої частини є меншими за розподільну здатність лазера, а збільшення вхідної напруги призведе до активації нелінійних ефектів у перетворювачі.

Комплексний електричний імпеданс котушки $Z_{el}(f)$ знаходиться як сума активного та реактивного компонентів:

$$Z_{el}(f) = R_{DC} + R_{VC}(f) + j2\pi f \cdot L_{VC}(f) \quad (1)$$

Розглядаючи дійсну та уявну частини у рівнянні (1) можна визначити опір котушки та її індуктивність:

$$R_{DC} + R_{VC}(f) = \text{Real}[Z_{el}(f)]$$

$$L_{VC}(f) = \frac{\text{Imag}[[Z_{VC}(f)]]}{2\pi f} \quad (2)$$

Таке знаходження частотно-залежних фізичних параметрів котушки перетворювача є неможливим за допомогою класичних методів доданої маси або об'єму, що є перевагою запропонованого підходу.

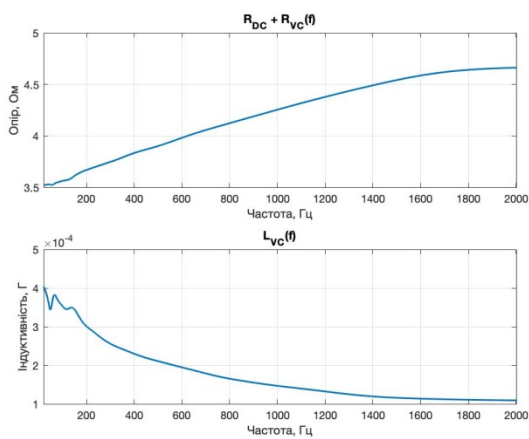


Рис.2 Частотна залежність опору котушки та індуктивності

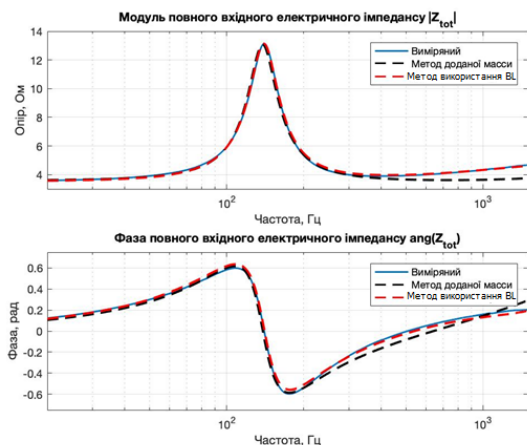


Рис. 3 Порівняння виміряного та змодельованого повного вхідного імпедансу Z_{tot}

ТАБЛИЦЯ 1. ПОРІВНЯННЯ ПАРАМЕТРІВ КОЛІВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МЕТОДОМ ПАРАМЕТРА BL ТА МЕТОДОМ ДОДАНОЇ МАСИ

	Метод параметра BL		Метод доданої маси	
	Середнє значення	Стандартне відхилення	Середнє значення	Стандартне відхилення
f_{res} , Гц	140	0	137.2	0.34
R_e , Ом	3.54	4.76e-4	3.59	2.4e-4
L_e , Г	1.45e-4	3.57e-6	1.39e-4	7.68e-6
Bl , Н/А	2.49	5.3e-3	2.43	3.8e-2
M_{ms} , кг	2.8e-3	5.3e-6	2.7e-3	8.4e-5
C_{ms} , м/Н	4.65e-4	8.89e-7	4.9e-4	1.7e-5
R_{ms} , кг/с	0.65	1.2e-3	0.62	1.96e-3

Для більш наочного порівняння методу доданої маси та методу використання параметра BL порівняємо виміряне значення повного вхідного імпедансу Z_{tot} та ідентифіковані моделі двома зазначеними методами.

Як можна побачити на Рис. 3, метод доданої маси та запропонований метод досить точно моделюють виміряний повний вхідний електричний імпеданс $Z_{tot}(f)$ на низьких частотах і на резонансі. Зі збільшенням частоти класична модель показує значну розбіжність із результатами вимірювань, адже не бере до уваги складні фізичні процеси у магнітній системі перетворювача.

III. ПОРІВНЯННЯ ЧИСЕЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ КОЛІВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ

Для демонстрації переваг описаного методу використання параметра BL та класичного методу доданої маси було проведено серію із десяти вимірювань кожним із методів і розраховано середнє значення для кожного фізичного параметра та відповідне значення стандартного відхилення.

Як можна бачити із таблиці 1, середні значення розрахованих параметрів обома методами є близькими один до одного. Проте, стандартні відхилення параметрів, знайдених запропонованим методом є на порядок меншими. Це доводить статистичну стабільність та високу повторюваність вимірювань запропонованого методу. Це досягається за рахунок того, що вимірюваний перетворювач фіксується для вимірювання одноразово та не піддається механічним впливам, на відміну від методу доданої маси, де для кожного нового вимірювання потрібно додавати та знімати додану масу на мембрану перетворювача.

ВИСНОВКИ

Для демонстрації переваг запропонованого методу використання параметра BL було розраховано фізичні параметри моделі електродинамічного перетворювача та порівняно із класичним методом ідентифікації за допомогою доданої маси. Моделювання повного вхідного електричного імпедансу $Z_{tot}(f)$ за допомогою методу параметра BL показує, що результати ближчі до реальних вимірювань, ніж метод доданої маси, особливо на частотах вище резонансу. Порівняння за допомогою методу оптимізації BL та моделі Вандеркоя для магнітної системи показує меншу похибку на високих частотах як для модуля повного вхідного імпедансу, так і для фази. Тим не



менш, параметри знайдені класичним методом доданої маси є близькими до знайдених методом параметра VL , що доводить його доцільність для швидких вимірювань на виробництві.

Зі статистичної точки зору, було продемонстровано вищу стабільність методу використання параметра VL , високу повторюваність результатів та меншу статистичну похибку порівняно із методом доданої маси. Крім того, значною перевагою методу параметра VL є можливість його використання для мініатюрних перетворювачів або перетворювачів із дуже тендітними мембранами (ВЧ перетворювачі). Тобто у всіх випадках, для яких фізичне втручання до рухомої частини (додавання маси або об'єму) є практично неможливим.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] E. L. Vinogradova, "Konstruirovaniye gromkogovoritelye so sglazhennymi chastotnymi kharakteristikami" [Designing

loudspeakers with smoothed frequency characteristics]. Moscow: Energiya, 1978.

- [2] I. A. Aldoshina and A. G. Voyshvillo, "Vysokokachestvennyye akusticheskiye sistemy i izluchateli" [High-quality acoustic systems and emitters]. Moscow: Radio i svyaz, 1985.
- [3] A. N. Thiele, "Loudspeakers in Vented Boxes: Part 1," J. Audio Eng. Soc., vol. 19, no. 5, pp. 382–392, 1971.
- [4] A. N. Thiele, "Loudspeakers in Vented Boxes: Part 2," J. Audio Eng. Soc., vol. 19, no. 6, p. 516, 1971.
- [5] R. H. Small, "Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis," J. Audio Eng. Soc., vol. 20, no. 5, pp. 383–395, 1972.
- [6] J. N. Moreno, "Measurement of Loudspeaker Parameters Using a Laser Velocity Transducer and Two-Channel FFT Analysis," J. Audio Eng. Soc., vol. 39, no. 4, pp. 243–249, 1991.
- [7] U. Seidel and W. Klippel, "Fast and Accurate Measurement of the Linear Transducer Parameters," in 110th Convention of the Audio Engineering Society, 2001.
- [8] J. Vanderkooy, "A Model of Loudspeaker Driven Impedance Incorporating Eddy Currents in the Pole Structure," J. Audio Eng. Soc., vol. 37, no. 3, pp. 119–128, 1989.

Надійшла до редакції 01 грудня 2019 р.

УДК 534.134

Нахождение физических параметров электродинамического преобразователя путем использования параметра VL и методом добавленной массы

Волков Д. Д., ORCID [0000-0001-6064-4981](https://orcid.org/0000-0001-6064-4981)

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина

Аннотация—В данной статье представлены результаты практического сравнения двух методов нахождения физических параметров электродинамического преобразователя. Первый - классический метод с помощью добавленной массы. Второй - предложенный метод основан на использовании параметра VL . Рассмотрены преимущества и недостатки каждого из двух методов, а также погрешности найденных параметров и их обоснованность.

Ключевые слова — электродинамический преобразователь; параметр VL ; добавлена масса.



Finding the Physical Parameters of the Electro-Dynamic Converter by the Method of Using the Parameter BL and the Method of Mass Added

D. D. Volkov, ORCID [0000-0001-6064-4981](https://orcid.org/0000-0001-6064-4981)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua
Kyiv, Ukraine

Abstract— The task of finding the physical parameters of electrodynamic transducers is an integral part of the process of development and production of speakers [1,2]. The most popular method for this is the added mass method proposed by Neville Theel and Richard Small. This method is simple and reliable to use, does not require expensive technology and considerable computing power. But its biggest disadvantage is the direct addition of mass to the moving part of the converter, which can damage it and very often is practically impossible.

The paper proposes a method of using the parameter BL (the product of the induction in the gap of the magnetic circuit and the inductance of the sound coil) is based on measuring the displacement of the moving part of the converter, as well as the current through the coil of the converter and the voltage at its terminals. These three characteristics make it possible to fully determine the parameters of the electrodynamic converter in the electrical and mechanical parts separately, ie to measure the total electrical impedance and the total mechanical impedance. Once the impedances have been determined, they can be handled individually, and different equivalent circuits can be applied to further determine directly the parameters of the converter model.

To demonstrate the benefits of finding the physical parameters of the converter, using the BL parameter, an example of a typical three-inch wide-band electrodynamic converter was calculated. For detailed modeling of the electrical oscillation system, the model of John Vanderkoy was chosen, in which the complex resistance of the coil is the sum of the static resistance of the RDC, the frequency-dependent active resistance of the coil RVC (f) and the frequency-dependent inductance LVC (f). This allows the model to account for complex physical effects, such as eddy currents that occur in the metal parts of the magnetic system.

A series of ten measurements were performed by each method and the mean for each physical parameter and the corresponding standard deviation were calculated.

Simulation of the full electrical input impedance $Z_{tot}(f)$ using the BL parameter method shows that the results are closer to real measurements than the added mass method, especially at frequencies above resonance. Comparison using the BL optimization method and the Vanderkoy model for the magnetic system shows less error at high frequencies for both the full input impedance module and the phase. However, the parameters found by the classical method of added mass are close to those found by the method of the parameter BL, which proves its feasibility for rapid measurements in production.

From a statistical point of view, the stability of the BL parameter utilization method, the high repeatability of the results, and the smaller statistical error compared to the added mass method were demonstrated. In addition, a significant advantage of the BL parameter method is the ability to use it for miniature converters or converters with very fragile membranes (RF converters). That is, in all cases where physical interference with the movable part (adding mass or volume) is practically impossible.

Keywords — *electrodynamic converter; parameter BL; added mass.*

