

# Дослідження доцільності застосування генетичного алгоритму для задач електроакустики

Зубков<sup>f</sup> А. Д., ORCID [0000-0001-8850-0023](https://orcid.org/0000-0001-8850-0023)

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

Дідковський<sup>g</sup> В. С., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-0807-822X](https://orcid.org/0000-0002-0807-822X)

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)

*Анотація*—У даній статті розглянуто адаптацію та застосування генетичного алгоритму для знаходження параметрів моделі електродинамічного перетворювача. Розглянуто переваги та недоліки даного методу порівняно із класичними методами ідентифікації із застосуванням доданої маси. Представлено виведення функції пристосованості для оцінки ідентифікованих параметрів що може також бути використана для ідентифікації інших типів електроакустичних перетворювачів. Було розглянуто теорію, що лежить в основі генетичних алгоритмів, і показано, як генетичні алгоритми працюють, збираючи найкращі рішення з невеликих структурних елементів, що володіють чудовими якостями. Далі було розібрано відмінності між генетичними і традиційними алгоритмами, в тому числі підтримку популяції рішень і використання генетичного уявлення рішень.

Після цього було описано сильні сторони генетичних алгоритмів, що включають можливість глобальної оптимізації і застосовність до завдань зі складним математичним представленням або взагалі без представлення і стійкість до шуму. Також були освітлені недоліки: необхідність спеціальних визначень і налаштування гіперпараметрів, небезпеки передчасної збіжності. На закінчення перераховано ситуації, коли застосування генетичних алгоритмів може дати перевагу. Цей алгоритм не прив'язаний до конкретної інженерної чи наукової галузі, що робить його універсальним, рівною мірою він використовується і в генетиці і у комп'ютерних науках. За допомогою генетичного алгоритму було визначено параметри та порівняно їх з більш класичним для акустики методом доданої маси. Порівняльна таблиця у роботі ілюструє високу точність генетичного алгоритму у порівнянні з методом доданої маси. В ході роботи над практичною частиною, також щоб покращити поведінку моделі на частотах вищих за резонансу, було вирішено ускладнити модель електричної підсистеми перетворювача та увести додаткові параметри: паралельний опір та паралельну індуктивність. Ускладнена модель, як наслідок, почала краще відповідати вимірним значенням у всій частотній області, а отже є більш точною. Це є прикладом зручності використання генетичного алгоритму при переході від ідентифікації однієї моделі зі специфічними параметрами до іншої. Результати даної роботи доводять, що використання генетичного алгоритму є доцільним для вирішення задач електроакустики адже його використання дозволяє швидко експериментувати та ідентифікувати більш складні моделі для яких метод доданої маси не може бути застосованим.

Також, у перспективі, генетичний алгоритм може бути застосований для ідентифікації моделей перетворювачів у часовій області, наприклад, нелінійних моделей електродинамічних перетворювачів або моделей у фазовому просторі, що є предметом майбутніх досліджень

*Ключові слова* — генетичний алгоритм; електродинамічний перетворювач; ідентифікація моделі; метод доданої маси; метод підбору параметра  $Bl$

## I. ВСТУП

Електродинамічний перетворювач є невід'ємною частиною багатьох сучасних пристроїв та електронних систем — від мініатюрних перетворювачів у мобільних телефонах та "розумних" годинниках, до великих і потужних, що використовуються для трансляції на стадіонах та концерт-холах. Адже саме електродинамічні перетворювачі є відповідальними за конвертацію електричної енергії у звукову, яка може бути сприйнята слухом людини. Саме тому, вивчення поведінки електродинамічних перетворювачів є предметом уваги багатьох науковців у сфері електроакустики, адже чим точнішою є модель перетворювача,

тим більше є можливостей для удосконалення його параметрів та контролю поведінки.

Класичною та найбільш уживаною моделлю електродинамічних перетворювачів є лінійна модель Тіля - Смолла, для ідентифікації якої використовується метод доданої маси [1], що є простим та зручним у використанні. Але його суттєвим недоліком є те, що він дозволяє ідентифікувати параметри лише простої моделі електродинамічного перетворювача, точності якої дуже часто не вистачає для практичних цілей. Більш сучасним та точним методом є метод підбору параметру  $Bl$  (коефіцієнта електромеханіч-



ної трансформації) [2]. Він дозволяє виміряти механічний та електричний імпеданс окремо та застосувати більш складні та точні моделі для їх представлення.

Задачу ідентифікації параметрів моделі електродинамічного перетворювача також можна представити як задачу оптимізації. При такому формулюванні шуканими є оптимальні параметри моделі, при яких значення виміряного сигналу перетворювача є максимально близькими до змодельованих. Таке представлення дає можливість застосовувати різні методи оптимізації для ідентифікації параметрів моделі. Одним із універсальних, сучасних та потужних методів оптимізації є генетичний алгоритм. Окрім широкого використання у комп'ютерних науках [3], генетичний алгоритм також використовується у фінансах та економіці [4], системах контролю [5], штучному інтелекті [6] та багатьох інших сферах. Не дивлячись на широкий спектр можливих застосувань генетичного алгоритму, його безпосереднє застосування для вирішення задач електроакустики описується вперше у даній статті. Основною перевагою даного методу над класичним методом ідентифікації за допомогою доданої маси, є його універсальність та можливість застосування єдиного алгоритму для ідентифікації різних моделей електроакустичних перетворювачів. Це дає можливість дослідникам швидко тестувати розроблені моделі не витрачаючи час на розробку додаткового методу ідентифікації.

## II. ОПИС ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Генетичні алгоритми використовуються для вирішення задач оптимізації і моделювання шляхом послідовного підбору, комбінуння і варіації шуканих параметрів з використанням механізмів, що нагадують біологічну еволюцію. Особливістю генетичного алгоритму є акцент на використанні оператора «схрещення», який виконує операцію рекомбінацію рішень-кандидатів, роль якої аналогічна ролі схрещення в живій природі [7].

Задача кодується таким чином, щоб її вирішення могло бути представлено в вигляді масиву, подібного до інформації складу хромосоми. Цей масив часто називають саме так «хромосома». Випадковим чином в масиві створюється деяка кількість початкових елементів «осіб» або початкова популяція. Особи оцінюються з використанням функції пристосованості, в результаті якої кожній особі присвоюється певне значення пристосованості, яке визначає можливість виживання особи. Після цього з використанням отри-маних значень вибираються особи, допущені до схрещення (селекція). До осіб застосовуються «генетичні оператори» (в більшості випадків це оператор схрещення (crossover) і оператор мутації (mutation)), створюючи таким чином наступне покоління осіб. Особи наступного покоління також оцінюються застосуванням генетичних операторів, і виконується селекція і мутація. Так моделюється еволюційний процес, що продовжується декілька життєвих циклів (поколінь), поки не буде виконано критерій зупинки алгоритму. Таким критерієм може бути:

- знаходження глобального, або оптимального вирішення;

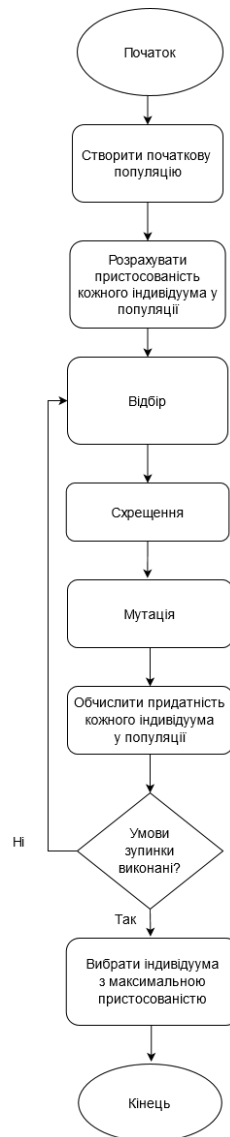


Рис. 1 Блок-схема виконання генетичного алгоритму

- вичерпання числа поколінь, що відпущені на еволюцію;
- вичерпання часу, відпущеного на еволюцію.

## III. АДАПТАЦІЯ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Основні етапи роботи генетичного алгоритму залишаються практично незмінними незалежно від задачі. Зв'язок між алгоритмом та реальною проблемою та його адаптація виконується через призначення індивідуумів, їх хромосом та функції пристосованості до реальних фізичних величин та параметрів моделі.

У нашому випадку треба вирішити задачу знаходження параметрів моделі типового дводюймового електродинамічного перетворювача, зображеного на Рис. 2.

Дані, необхідні для ідентифікації моделі перетворювача було отримано за допомогою вимірювального стенду на Рис. 2 згідно зі схемою на Рис. 3.



Рис. 2 Вимірюваний електродинамічний перетворювач

Вимірними величинами є:  $x(t)$  – зміщення рухомої частини перетворювача,  $e(t)$  – напруга (еквівалентна напрузі на клеммах перетворювача),  $i(t)$  – струм (еквівалентний струму через перетворювач).

Першим етапом адаптації генетичного алгоритму до нашої задачі є вибір моделі перетворювача, параметри якої треба ідентифікувати. Для початку було обрано просту модель у частотній області зображену на Рис. 4.

На Рис.4 :  $E(f)$  – напруга на клеммах перетворювача;  $I(f)$  – струм через котушку перетворювача;  $Bl$  – коефіцієнт електромеханічної трансформації;  $F(f)$  – сила, що діє на рухому частину;  $V(f)$  – швидкість рухомої частини;  $U(f)$  – зворотна електрорушійна сила.

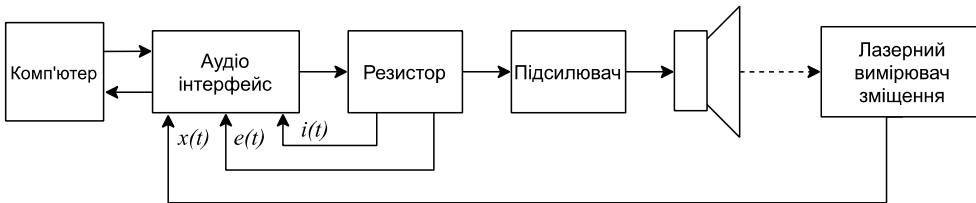


Рис. 3 Схема вимірювань

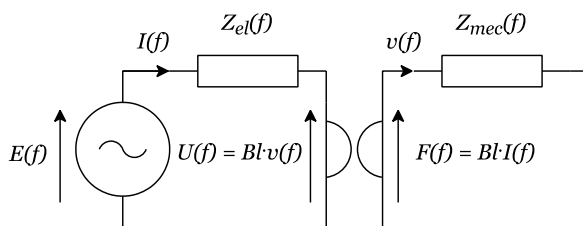


Рис. 4 Електро-механічна модель перетворювача

Імпеданси  $Z_{el}(f)$  та  $Z_{mec}(f)$  є відповідно електричний імпеданс котушки та механічний імпеданс рухомої частини, які знаходяться як:

$$Z_{el}(f) = R_e + j \cdot 2\pi \cdot f \cdot L_e, \quad (1)$$

$$Z_{mec}(f) = R_{ms} + j \cdot 2\pi \cdot f \cdot M_{ms} + \frac{K_{ms}}{j \cdot 2\pi \cdot f}, \quad (2)$$

де:  $f$  – частота;  $R_e$  – опір котушки при постійному струмі;  $L_e$  – індуктивність котушки;  $R_{ms}$  – механічний опір;  $M_{ms}$  – маса рухомої частини;  $K_{ms}$  – жорсткість підвісу;  $j$  – уявна одиниця.

На другому етапі треба визначити, які параметри будуть виступати у ролі хромосом індивідумів. У нашому випадку, візьмемо невідомі параметри моделі із рівнянь (1) і (2) та параметр  $Bl$  у якості хромосом індивідума, окрім параметра  $R_e$ , що є опором котушки статичному струму та може бути вимірний безпосередньо омметром, та жорсткості підвісу  $K_{ms}$ , що може бути розрахована, знаючи масу рухомої

частини  $M_{ms}$  та резонансну частоту перетворювача  $f_{res}$  як  $K_{ms} = M_{ms} \cdot (2\pi \cdot f_{res})^2$ . Таким чином, індивідум для застосування у генетичному буде мати чотири хромосоми та виглядатиме як:

$$I = [L_e, Bl, R_{ms}, M_{ms}]. \quad (3)$$

І в останню чергу, треба визначити функцію пристосованості, яка буде об'єктивно показувати алгоритму, на скільки один індивідум краще за іншого. У нашому випадку, було обрано середньоквадратичну похибку між вимірними відгуками перетворювача та змодельованими, як показано у рівняннях (4) – (6).

$$E_1 = MSE_{\omega} \left[ \frac{E(\omega) - R_e + j\omega L_e + \frac{Bl^2}{j\omega M_{ms} + \frac{K_{ms}}{j\omega} + R_{ms}}}{I(\omega)} \right], \quad (4)$$

$$E_2 = MSE_{\omega} \left[ \frac{V(\omega) - \frac{Bl}{j\omega M_{ms} + \frac{K_{ms}}{j\omega} + R_{ms}}}{I(\omega)} \right], \quad (5)$$

$$E_{tot} = E_1 + E_2, \quad (6)$$

де:  $MSE_{\omega}$  – середньоквадратична похибка (mean squared error)

Таким чином, значення  $E_1$  у рівнянні (4) відповідає похибці моделювання повного вхідного електричного імпедансу  $Z_{tot}(\omega)$ , а значення  $E_2$  у рівнянні (5) — механічного імпедансу  $Z_{mec}(\omega)$ . Сумарна похибка  $E_{tot}$  у рівнянні (6) буде використовуватися як функція пристосованості у генетичному алгоритмі.

Таким чином, чим менше значення похибки  $E_{tot}$ , тим краще хромосоми конкретного індивідуума апроксимують дану модель електродинамічного перетворювача і тим більша вірогідність, що цей індивідуум передасть свої гени у наступне покоління. Алгоритм буде повторюватися до тих пір, поки не буде знайдена найменша можлива похибка апроксимації моделі.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Генетичний алгоритм, описаний вище було реалізовано за допомогою мови програмування Python™ із використанням бібліотеки DEAP, яка містить основні оператори, що необхідні для функціонування генетичного алгоритму [8].

Як можна бачити на Рис. 5, мінімальна похибка індивідуума та середня похибка у популяції стрімко зменшуються і вже через декілька поколінь залишаються майже незмінними. Також, можемо бачити, що середня похибка у популяції є дуже близькою до похибки кращого індивідуума. Це каже про те, що вже через декілька поколінь усі індивідууми у популяції є близькими до оптимального значення. Така швидка збіжність алгоритму вказує на те, що застосування генетичного алгоритму для нашої задачі є можливим, а також, що обрана функція пристосованості (рівняння (4) – (6)) є вдалою.

Як можна побачити на рисунку 6, відгук моделі із параметрами, ідентифікованими за допомогою генетичного алгоритму є дуже близьким до моделі, ідентифікованої методом доданої маси, що доводить можливість використання генетичного алгоритму для ідентифікації класичної моделі електродинамічного

перетворювача. Більш детальне порівняння параметрів моделі, знайдених двома методами представлено у таблиці 1:

ТАБЛИЦЯ 1 ПОРІВНЯННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ІДЕНТИФІКОВАНОЇ МЕТОДОМ ДОДАНОЇ МАСИ ТА ГЕНЕТИЧНИМ АЛГОРИТМОМ

	Метод доданої маси	Генетичний алгоритм
$f_{res}$ , Гц	137.2	138
$R_{es}$ , Ом	3.54	3.54
$L_{es}$ , Г	1.39e-4	1.31e-4
Bl, Н/А	2.43	2.43
$M_{ms}$ , кг	2.7e-3	2.8e-3
$K_{ms}$ , М/Н	2.04e3	2.1e3
$R_{ms}$ , кг/с	0.62	0.63

Таким чином, було показано, що генетичний алгоритм здатний ідентифікувати параметри моделі електродинамічного перетворювача, зображеної на рисунку 3 та описаною формулами 1 та 2, при цьому точність ідентифікованої моделі є порівнюваною із точністю класичного метода доданої маси. Для досягнення більшого співпадіння вимірених та змодельованих значень необхідно використовувати більш складні моделі перетворювачів, наприклад, моделі описані у [9] або моделі у фазовому просторі [10]. Застосування генетичного алгоритму також є можливим для ідентифікації зазначених моделей, що є предметом майбутніх досліджень.

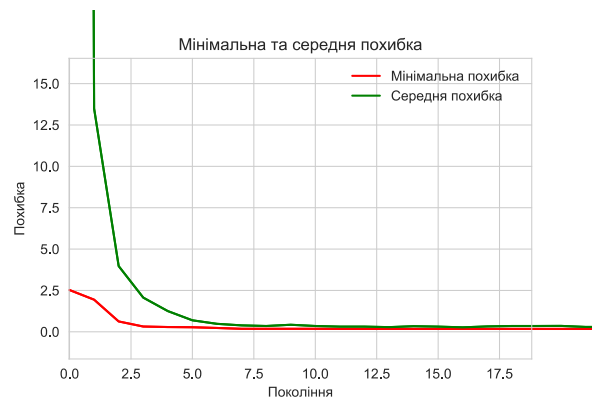


Рис. 5 Еволюція мінімальної та середньої похибки за поколіннями

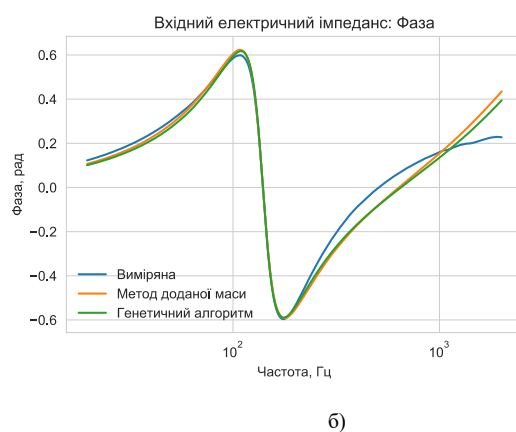
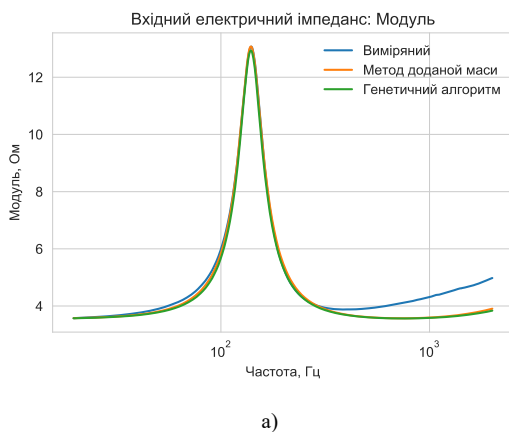


Рис. 6 Модуль і фаза повного вхідного електричного імпедансу



## ВИСНОВОК

У даній роботі було розглянуто застосування генетичного алгоритму для ідентифікації параметрів моделі електродинамічного перетворювача. Декілька спостережень, які хотілося б відмітити: запропонована функція пристосованості є вдалою, адже алгоритм дуже швидко сходиться та знаходить оптимальні значення за декілька ітерацій. Це доводить, що застосування генетичних алгоритмів є можливим для ідентифікації електродинамічних та інших акустичних перетворювачів.

Також було безпосередньо порівняно параметри моделі, ідентифіковані генетичним алгоритмом і класичним методом доданої маси і продемонстровано, що ці два методи показують однакову точність ідентифікованої моделі.

На відміну від методу доданої маси, що дозволяє ідентифікувати параметри лише лінійних моделей у частотному просторі, метод ідентифікації за допомогою генетичного алгоритму є універсальним та може бути застосованим до ідентифікації різноманітних та більш складних моделей, як то: моделі у фазовому просторі та нелінійні моделі. Таким чином, застосування генетичного алгоритму дає можливість створити універсальний “фреймворк” для тестування нових та існуючих моделей електроакустичних перетворювачів, що допоможе дослідникам економити час на розробку окремого методу ідентифікації для кожної моделі. Розробка подібного “фреймворку” є предметом майбутніх досліджень авторів.

Надійшла до редакції 23 лютого 2021 р.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] R. H. Small, “Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 20, no. 5, pp. 383–395, 1972.
- [2] D. D. Volkov, “Finding the physical parameters of the electrodynamic converter by the method of using the parameter BL and the method of mass added,” *Microsystems, Electron. Acoust.*, vol. 24, no. 6, pp. 65–68, Dec. 2019, DOI: [10.20535/2523-4455.2019.24.6.195547](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.6.195547).
- [3] S. N. Sivanandam and S. N. Deepa, “Applications of Genetic Algorithms,” in *Introduction to Genetic Algorithms*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 317–402, URL: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-73190-0\\_10](http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-73190-0_10).
- [4] S. Slimane and M. Benbouziane, “Portfolio Selection Using Genetic Algorithm,” *J. Appl. Financ. Bank.*, vol. 2, no. 4, pp. 143–154, 2012, URL: <https://www.sciencpress.com/download.asp?ID=347>.
- [5] Y. LI, K. C. NG, D. J. MURRAY-SMITH, G. J. GRAY, and K. C. SHARMAN, “Genetic algorithm automated approach to the design of sliding mode control systems,” *Int. J. Control*, vol. 63, no. 4, pp. 721–739, Mar. 1996, DOI: [10.1080/00207179608921865](https://doi.org/10.1080/00207179608921865).
- [6] S. Wang *et al.*, “A multi-approaches-guided genetic algorithm with application to operon prediction,” *Artif. Intell. Med.*, vol. 41, no. 2, pp. 151–159, Oct. 2007, DOI: [10.1016/j.artmed.2007.07.010](https://doi.org/10.1016/j.artmed.2007.07.010).
- [7] E. Wirsansky, *Hands-On Genetic Algorithms with Python*. Packt Publishing, 2020, ISBN: 9781838557744.
- [8] “DEAP documentation — DEAP 1.3.1 documentation.” [Online]. Available: <https://deap.readthedocs.io/en/master/>.
- [9] A. Novak, “Measurement of Loudspeaker Parameters: A Pedagogical Approach,” in *23rd International Congress on Acoustics: integrating 4th EAA Euroregio 2019*, 2019, DOI: [10.18154/RWTH-CONV-239247](https://doi.org/10.18154/RWTH-CONV-239247).
- [10] P. Brunet, “Nonlinear System Modeling and Identification of Loudspeakers,” Northeastern University, 2014, URL: <https://repository.library.northeastern.edu/files/neu:336724/fulltext.pdf>.



# Investigation of the Possibility of Applying a Genetic Algorithm for Electroacoustics Problems

A. D. Zubkov<sup>f</sup>, ORCID [0000-0001-8850-0023](https://orcid.org/0000-0001-8850-0023)

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

V. S. Didkovskyi<sup>g</sup>, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-0807-822X](https://orcid.org/0000-0002-0807-822X)

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

**Abstract**—This paper considers the adaptation and application of a genetic algorithm to find the parameters of the electrodynamic transducer model. The advantages and disadvantages of this method in comparison with the classical method of identification using added mass are considered. The derivation of the suitability function for estimating the identified parameters is presented, which can also be used to identify other types of electroacoustic transducers. The theory underlying genetic algorithms has been examined and shown how genetic algorithms work by assembling the best solutions from small structural elements with excellent qualities. Next, the differences between genetic and traditional algorithms were analyzed, including population support and the use of genetic representation of solutions.

After that, the strengths of genetic algorithms were described, including the possibility of global optimization and applicability to problems with complex mathematical representation or without representation at all, and noise resistance. Disadvantages were also highlighted: the need for special definitions and settings of hyperparameters, the danger of premature convergence. In conclusion, the situations when the use of genetic algorithms are listed

This algorithm is not tied to a specific engineering or scientific field, which makes it universal, it is equally used in genetics and computer science. The parameters were determined using a genetic algorithm and compared with the more classical method of added mass for acoustics. The comparative table in the work illustrates the high accuracy of the genetic algorithm in comparison with the method of added mass. During the work on the practical part, also to improve the behavior of the model at frequencies higher than the resonant, it was decided to complicate the model of the electrical subsystem of the transducer and introduce additional parameters: parallel resistance and parallel inductance. As a result, the complicated model began to correspond better to the measured values in the entire frequency domain, and is therefore more accurate. This is an example of the convenience of using a genetic algorithm in the transition from identification of one model with specific parameters to another. The results of this work prove that the use of a genetic algorithm is appropriate for solving electroacoustic problems because its application allows to quickly experiment and identify more complex models for which the added mass method can not be applied.

Also, in the future, genetic algorithm can be used to identify transducer models of in time domain, for example, nonlinear models of electrodynamic transducers or models in a state space, which is the subject of future research. This paper considers the adaptation and application of a genetic algorithm to find the parameters of the electrodynamic transducer model. The advantages and disadvantages of this method in comparison with the classical method of identification using added mass and the method of parameter selection BL are considered. The derivation of the fitness function for assessing the quality of the identified parameters is presented, which can also be used to identify other types of electroacoustic transducers. The directly measured values for the application of the algorithm are the voltage at the terminals of the converter, the current through the coil of the converter and the displacement of the moving part of the converter. The undoubted advantage of the genetic algorithm compared to classical identification methods is its versatility and the ability to quickly adapt and configure for research and experimentation with different models and different types of transducers used in acoustics.

This article describes the adaptation and application of a genetic algorithm to find parameters of an electrodynamic transducer model. The advantages and disadvantages of this method in comparison with the classical identification method using added mass are considered. The derivation of the fitness function for assessing quality of the identified parameters is presented, which can also be used to identify other types of electroacoustic transducer models.

**Keywords** — *genetic algorithm; electrodynamic transducer; model identification; added mass method; BL parameter selection method*

