

Акустичні прилади та системи

УДК 534.3

Імітаційне моделювання вимірювача інтенсивності звуку в задачах шумопеленгування

Козак А. В., ORCID [0000-0002-4756-7931](https://orcid.org/0000-0002-4756-7931)e-mail andrekaka1996@gmail.comЛарін П. М., ORCID [0000-0003-2820-6011](https://orcid.org/0000-0003-2820-6011)e-mail lphilip04@gmail.comКостюк Р. Ю., ORCID [0000-0002-6980-693X](https://orcid.org/0000-0002-6980-693X)e-mail r.ju.kostjuk@gmail.comКоржик О. В., д.т.н., проф., ORCID [0000-0001-6793-1676](https://orcid.org/0000-0001-6793-1676)e-mail ov.korjik@aae.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—Робота присвячена питанням імітаційного моделювання пристроїв і методів акустичних вимірювань. Розглянуто задачу вимірювання інтенсивності звуку, як однієї з важливіших характеристик акустичного поля, шляхом використання лише приймачів тиску. Відповідно до реалізації алгоритму визначення інтенсивності, моделювання пристрою вимірювання виконано на основі адитивних та мультиплікативних операцій. За допомогою інструментального лабораторного пакету програм LabVIEW® отримано програмну модель у вигляді симулятора інтенсиметра та пристрою виявлення рухомих шумовипромінюючих повітряних або підводних об'єктів.

Бібл. 9, рис. 4.

Ключові слова — повітряний шумопеленгатор; інтенсивність; характеристика направленості; прийомник градієнту тиску; фаза; амплітуда.

I. ВСТУП

На сьогодні проблема повітряного та підводного шумопеленгування широкосмугових шумовипромінюючих об'єктів викликає підвищену цікавість у зв'язку з розвитком парку безпілотних повітряних та підводних дистанційно керованих апаратів. [1], [2] Проте, відомості про акустичні характеристики таких пристроїв достатньо незначні. Зауважимо, що дані про спектральні характеристики шумовипромінювання повітряних об'єктів достатньо детально викладено в роботі. [3]

Однією з найбільш емних характеристик звукового поля є інтенсивність звуку, що для гармонійних процесів подається як середнє за період значення густини потоку потужності акустичного збурення робочого середовища. [4] Крім того, навіть короткочасне підвищення потужності акустичного процесу само по собі може бути подано як одна з ознак виявлення шуканого об'єкта. Однак, збільшення інтегрального рівня потужності процесу може бути надто короткочасним, щоби його можна було б вважати

вичерпно надійним чинником прийняття рішення щодо виявлення об'єкту. Тому, сама ситуація вимірювання інтенсивності має бути доповнена певними засобами трактив виявлення, а саме – елементами широкосмугової частотної фільтрації. [5] Таким чином, керуючись розумінням того, що підводні та повітряні апарати при русі утворюють шумоподібний сигнал, який за характером є близьким до звукоряду, та використовуючи (наприклад) відомості про спектральні характеристики повітряного безпілотного апарату з роботи [3], для найбільш інформативної ділянки спектру та умов впливу ізотропної перешкоди, можна побудувати пристрій, який може бути задіяний як для розв'язку задач вимірювання, так і для виявлення вказаних об'єктів. В зв'язку з цим, задача створення віртуальних інструментів для вимірювання основних характеристик акустичного поля та виявлення автономних рухомих об'єктів є актуальною і має розглядатися як крок до уніфікації та наочності шляхів апаратно-програмної реалізації засобів підводного та повітряного шумопеленгування. Це, власне, і визначає мету роботи.



II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

A. Алгоритм визначення інтенсивності за допомогою трьох приймачів тиску

Ідеологія побудови інтенсиметрів (приладів для вимірювання інтенсивності) не нова, вона достатньо широко представлена в джерелах. [6], [7] Зауважимо, що миттєве значення густини потоку потужності визначається співвідношенням:

$$W_n(t) = p(t) v_n(t), \quad (1)$$

де $p(t)$, $v_n(t)$ — миттєві значення тиску та коливальної швидкості в робочому середовищі при поширенні хвилі в напрямку вектор n .

Середній за період T потік потужності визначаємо як інтенсивність I_n , для якої справедливим буде вираз:

$$I_n = \langle W_n \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) v_n(t) dt. \quad (2)$$

Якщо в якості приймальної системи обрати сукупність трьох ненаправлених мікрофонів (гідрофонів), то спосіб використання їх вихідних електричних напруг (відповідно до адитивних та мультиплікативних операцій) - забезпечить формування просторових каналів, з яких:

- перший канал – канал тиску p ;
- другий канал – канал градієнту тиску $\text{grad } p$.

Використовуючи відоме [4] співвідношення, що витікає з рівняння Ейлера та пов'язує тиск з коливальною швидкістю, можна записати:

$$v_n = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = -\text{grad} \left[\frac{1}{\rho_0} \int_0^t p dt \right], \quad (3)$$

де ω – колова частота, ρ – густина середовища, r – узагальнена координата.

За наявності двох ідентичних ненаправлених мікрофонів, які розміщені на малій відстані один від одного (меншій за половину довжини хвилі на обраній

частоті, $r \leq \frac{\lambda}{2}$), градієнт звукового тиску можна знайти на підставі наближеної формули

$$\frac{\partial p(t)}{\partial r} = \frac{p_1(t) - p_2(t)}{\Delta r} = \frac{\Delta p(t)}{\Delta r}, \quad (4)$$

де $p_1(t)$, $p_2(t)$ - тиски на мікрофонах пари 1 - 2. Внаслідок використання формули (4) дістаємо скінченно-різницьову апроксимацію функції, яка відповідає $\text{grad } p$. Співвідношення (2) – (4) дають змогу оцінити коливальну швидкість у точці, що збігається з акустичним центром системи двох мікрофонів і розташована посередині між ними:

$$v(t) = -\frac{1}{\Delta r \rho} \int [p_2(t) - p_1(t)] dt. \quad (5)$$

Тиск в цій точці наближено запишемо як:

$$p_3(t) \approx \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2}. \quad (6)$$

Тоді з урахуванням формул (2) – (6) шукана інтенсивність звука визначається як

$$I_n = \frac{1}{2\Delta r \rho T} \int \left\{ \int [p_2(t) - p_1(t)] dt \right\} dt \quad (7)$$

Зауважимо, що у випадку використання трьох мікрофонів виникає можливість виключення операції обчислення тиску для центральної точки за формулою (6). При цьому формула (7) трансформується до виду:

$$I_n = \frac{1}{\Delta r \rho T} \int p_3(t) \left\{ \int [p_2(t) - p_1(t)] dt \right\} dt \quad (8)$$

де $p_3(t)$ – є тиском на центральному (третьому) мікрофоні.

B. Структурна схема та імітаційний алгоритм

Отже, вирази (7) та (8) по суті визначають алгоритм побудови апаратного або імітаційного втілення пристрою для вимірювання інтенсивності. Проте, цей алгоритм має бути суттєво доповнено в частині:

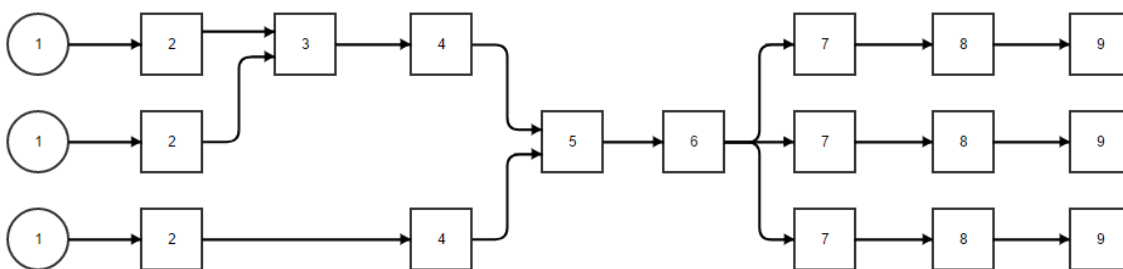


Рис. 1 Структурна схема пристрою вимірювання інтенсивності: 1 – приймачі тиску; 2 – попередні підсилювачі; 3 – зворотно підключений суматор; 4 – ши-рокосмугові фільтри; 5 – помножувач; 6 – інтегратор; 7 – третиноктавні ширококутові фільтри; 8 – квадратичний детектор, 9 – індикатори.

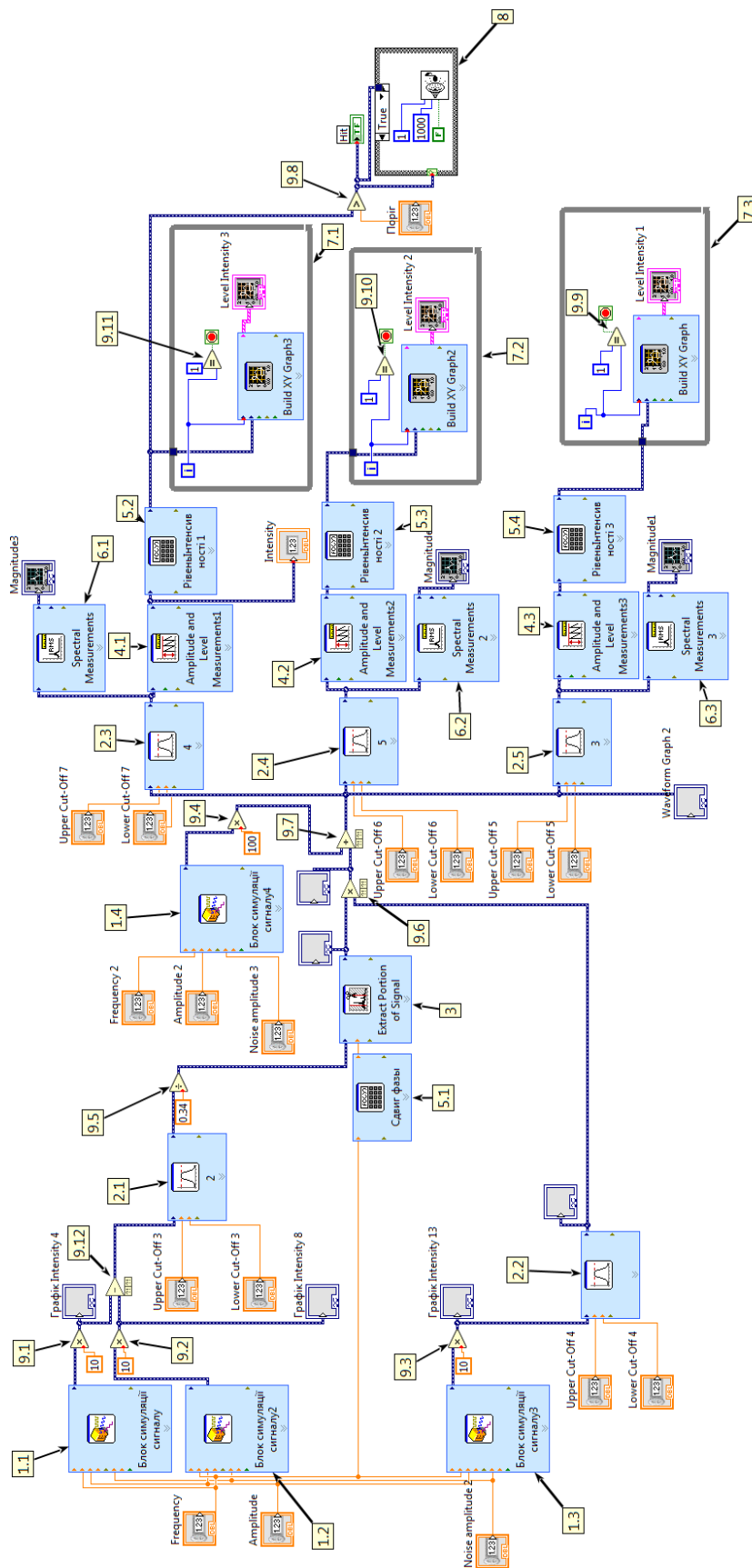


Рис. 2 Алгоритм програми вимірювання інтенсивності в програмному середовищі LabVIEW®



- приведення градієнту тиску до коливальної швидкості шляхом введення фазового зсуву в каналі різниці на 90^0 ;
- використання гребінки смугових фільтрів як елементу спектроаналізатора паралельного типу.

Відповідно до (8) та вказаних доповнень, на Рис. 1 наведено схему віртуального вимірювача інтенсивності.

В якості середовища програмування було обрано середовище лабораторно-інструментального пакету LabVIEW®. Програма вимірювань наведена на Рис. 2 та містить чотири основних групи пристроїв-інструментів відповідно до положень робіт [8] та [9], а саме:

- пристрої симуляції;
- пристрої формування сигналів різниці, суми та фазового зсуву;
- пристрій паралельної фільтрації;
- група індикаторів.

Так, відповідно до позначень алгоритму, з панелі користувача (Front Panel) на блоки симуляції сигналу 1.1 - 1.3 видаються задані користувачем значення параметрів вхідних сигналів суміші «сигнал + шум». Гармонійні сигнали заданої амплітуди та частоти, поступають з блоків симуляції сигналу (Simulate Signal Express VI) на попередні підсилювачі 9.1-9.3, з деяким коефіцієнтом підсилення. Після попереднього підсилення сигнали з блоків 1.1 та 1.2 пристроїв симуляції поступають на диференційний підсилювач,

що виконує віднімання 9.12 (канал різниці). Цей сигнал одночасно з сигналом із блока 1.3 симуляції (прямий канал) подаються на октавні смугові фільтри 2.1 та 2.2 (Bandpass Filter VI), інформація про смуги яких задається з панелі користувача (Front Panel). Вказані фільтруючі пристрої забезпечують початкову частотну селекцію, формуючи загальний частотний діапазон досліджень.

Після фільтрації в блоці 2.1 сигнал подається на блок 9.5, що імітує фазовий набіг для мікрофонної бази, що складається з мікрофонів 1 та 2 (блоки 1.1 та 1.2).

З виходу блоку 9.5, що імітує базу, сигнал подається на фазообертач блок 3 (Extract Portion of Signal VI), кут повороту фази якого залежить від вхідної частоти та результатів обробки блоком 5.1, що реалізується за певною формулою.

В результаті, перемноживши сигнали прямого каналу та каналу різниці за допомогою блоку 9.6, добуток подається на суматор 9.7, за допомогою якого вводиться завада (білий шум) з блоку симуляції сигналу 1.4, інформація про яку також задається користувачем. Сигнал завади з 1.4 попередньо підсилюється в блоці 9.4.

Застосовуючи три тритинооктавні фільтри 2.3 - 2.5 (Bandpass Filter VI), дані про смуги яких задаються з панелі користувача (Front Panel), алгоритм передбачає використання принципів спектрального аналізу паралельного типу. Для візуалізації та перевірки роботи смугових фільтрів наведено їх спектрограми з використанням блоків 6.1 - 6.3 (рис 3).

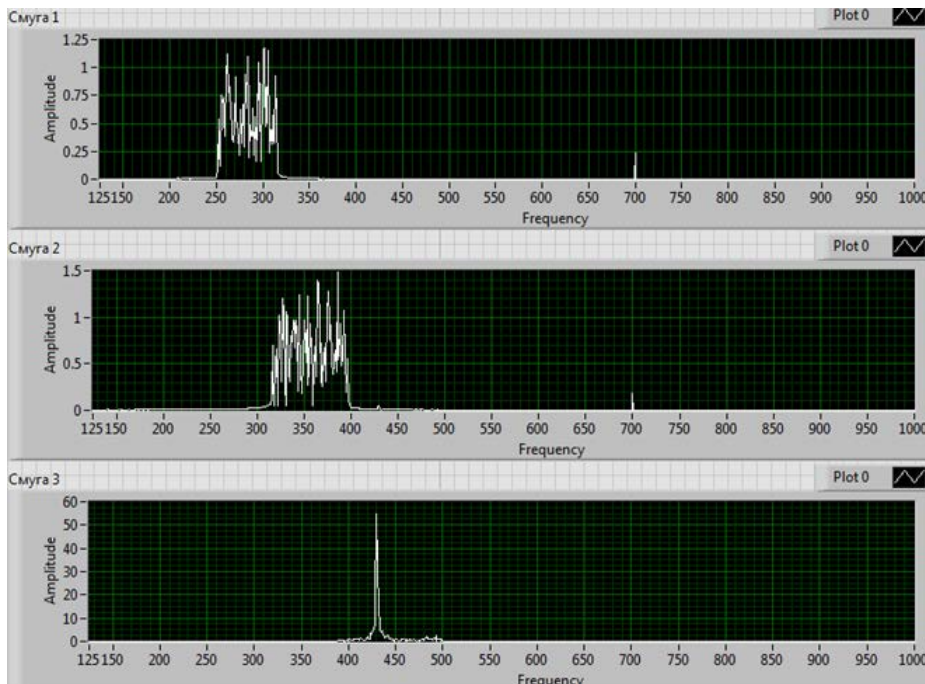


Рис. 3 Графіки спектрів шумового процесу («сигнал+шум») на виходах трьох частотних каналів

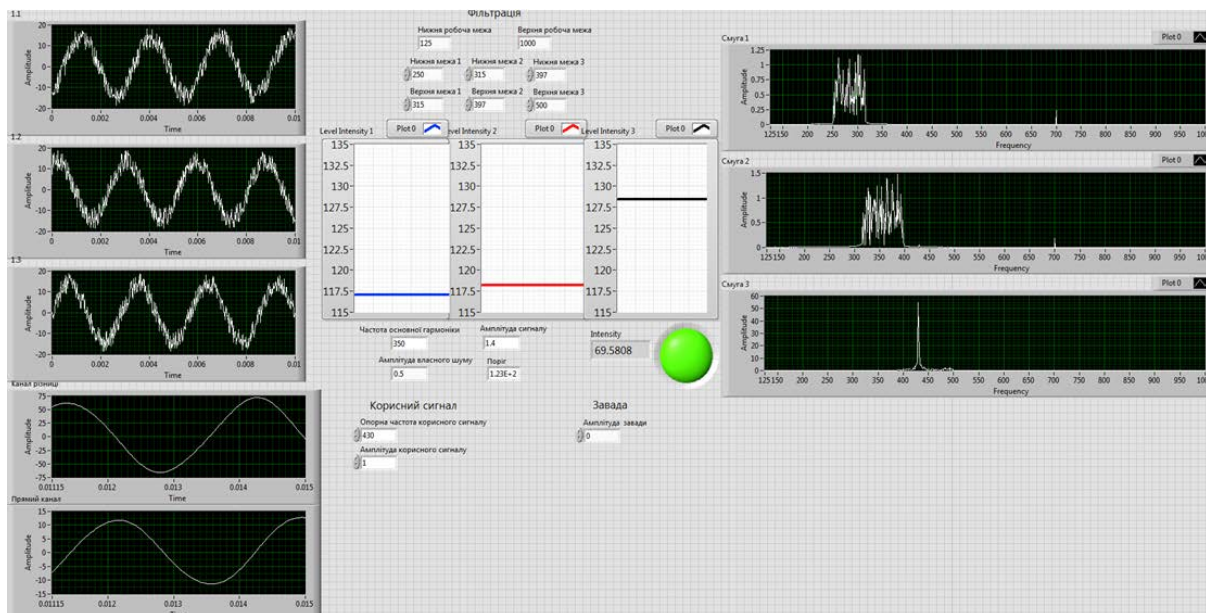


Рис. 4 Результати вимірювань рівня інтенсивності та спектрограми процесу «сигнал+шум»

Після операцій спектрального аналізу обчислюються середньоквадратичні значення напруг сигналів (блоки 4.1 - 4.3, (Amplitude and Level Measurements Express VI), що відповідає шуканій величині інтенсивності. У подальшому отримане значення інтенсивності перераховується до рівня інтенсивності по відомим формулам переходу:

$$L_{\text{дБ}} = 10 \lg \frac{I_n}{I_0}, \text{ де } I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2 \quad (9)$$

Цей перерахунок забезпечується блоками 5.2 - 5.4, а візуалізація результатів — блоками 7.1 - 7.3. Робота блоків полягає у формуванні компактного індикатора, для комфортного сприйняття інформації.

Результати вимірювань рівня інтенсивності та спектрограми процесу «сигнал + шум» по виходах трьох частотних каналів – наведено на рис. 4.

На блоках графічного відображення 1.1 - 1.3 представлені вхідні сигнали, що дає можливість оцінити їх форму, амплітуду та фазову відмінність. На виходах блоків 1.1 - 1.3 сигнали з різною фазою. Індикатори Level Intensity 1 - 3 є пристроями відображення результату програми. На кожному з графічних блоків показано значення рівня інтенсивності в дБ. Різниця значень між 1 и 2 блоками індикації енергетично підтверджує правильність роботи фільтрів — чим більша смуга, тим більший рівень інтенсивності в ній, при однакових вхідних умовах. В той же час значення рівня інтенсивності на блоці індикації Level Intensity 3 суттєво відрізняється від значень на блоках індикації Level Intensity 1 та 2 через те, що він є сигнальним і в цьому можна впевнитись на блоці графічного відображення «Смуга 3». Під поняттям сигнальний мається на увазі, що корисний сигнал лежить в одній із трьох частотних смуг. У даному випадку сигнал фіксується у третій смузі, тому ця смуга є сигнальною. Сигнальна лампа спрацювала, бо значення рівня

інтенсивності в сигнальній смузі перевищило значення порогу. Окрім того, в результаті було отримано реальне значення інтенсивності.

На завершальному етапі результат вимірювання рівня інтенсивності подається на схему сигналізації, блок 8. Після задання на панелі користувача (Front Panel) певного порогу за допомогою блоку вводу числової інформації, відбувається перевірка умови перевищення значення порогу за допомогою блоку порівняння 9.8 [8, 9]. Таким чином відбувається розв'язок задач вимірювання і виявлення шуканих об'єктів.

ВИСНОВКИ

В результаті моделювання за допомогою програмного пакету LabVIEW® для прийомного модуля з трьох (або двох) дискретних перетворювачів тиску:

- розроблено симулятор пристрою визначення інтенсивності;
- показано можливість застосування розробленого симулятора для розв'язання задач виявлення повітряних та підводних автономних об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] J. Romeo, "UAV Design Challenges: Game On," 01 June 2016. [Online]. Available: <http://www.digitaleng.news/de/uav-design-challenges-game-on/>.
- [2] F. A. Azis, M. S. M. Aras, M. Z. A. Rashid, M. N. Othman and S. S. Abdullah, "Problem Identification for Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV): A Case Study," *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 554-560, 2012. DOI: [10.1016/j.proeng.2012.07.211](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.211)
- [3] V. F. Samohin, S. P. Ostrouhov and P. A. Moshkov, «Eksperimentalnoe issledovanie istochnikov shuma bespilnogo letatel'nogo apparata s vintovym dvigatelem v tolkayuschem ustroystve [Experimental study of noise sources of an unmanned



- aerial vehicle with a screw-ring propulsor in a pushing arrangement],» *Electronic Journal "Proceedings of the MAI"*, no. 70, 2013.
- [4] V. T. Grinchenko, I. V. Vovk and V. T. Matsyipura, *Osnovy akustyky: Navchalnyi posibnyk [Basics of Acoustics: Textbook]*, Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Hydromechanics., 2009, p. 867.
- [5] V. S. Didkovskiy, O. V. Korzyk and O. H. Leiko, *Shumy i vibratsii: Navchalnyi posibnyk [Noise and vibration. Textbook]*, Kyiv: Imeks LTD, 2010, p. 334.
- [6] G. K. Skrebnev, *Kombinirovannyye gidroakusticheskie priemniki [Combined sonar receivers]*, St.-Peterburg: Elmor, 1997, p. 200.
- [7] V. S. Didkovskiy, V. Y. Akimenko, O. I. Zaporozhets, V. G. Savin and V. I. Tokarev, *Osnovy akustychnoi ekolohii: Navchalnyi posibnyk [Fundamentals of Acoustic Ecology: Textbook]*, Kirovograd: Imeks LTD, 2002, p. 515.
- [8] A. V. Kozak, L. P. M. та R. Y. Kostiuk, «Modeliuvannya prystroiu vymiriuvannya Intensyvnosti zvuku ta formuvannya prostorovoi selektyvnosti v povitri [Simulation of sound intensity measurement device and forming spatial selectivity in the air],» in *X International Scientific Conference of Young Scientists*, Kyiv, Ukraine, 2017.
- [9] R. Y. Kostyuk, A. V. Kozak та P. M. Larin, «Rozrobka shliakhiv stvorennia mikrofonu dlia system vytrymky z povitriam [Microphone path development for air proofing systems bearing],» in *X International Scientific Conference of Young Scientists*, Kyiv, Ukraine, 2017.

Надійшла до редакції 17 червня 2017 р.

УДК 534.3

Имитационное моделирование измерителя интенсивности звука в задачах шумопеленгации

Козак А. В., ORCID [0000-0002-4756-7931](https://orcid.org/0000-0002-4756-7931)

e-mail andrekaka1996@gmail.com

Ларин Ф. Н., ORCID [0000-0003-2820-6011](https://orcid.org/0000-0003-2820-6011)

e-mail lphilip04@gmail.com

Костюк Р. Ю., ORCID [0000-0002-6980-693X](https://orcid.org/0000-0002-6980-693X)

e-mail r.ju.kostjuk@gmail.com

Коржик А. В., д.т.н., проф., ORCID [0000-0001-6793-1676](https://orcid.org/0000-0001-6793-1676)

e-mail ov.korjik@aae.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—Работа посвящена вопросам имитационного моделирования устройств и методов акустических измерений. Рассмотрена задача измерения интенсивности звука, как одной из важнейших характеристик акустического поля, путем использования только приемников давления. Согласно реализации алгоритма определения интенсивности, моделирование устройства измерения выполнены на основе аддитивных и мультипликативных операций. С помощью инструментального лабораторного пакета программ LabVIEW® получено программную модель в виде симулятора интенсивметра и устройства обнаружения движущихся шумовизлучающих воздушных или подводных объектов.

Библ. 9, рис. 4.

Ключевые слова — воздушный шумопеленгаторы; интенсивность; характеристика направленности; приемник градиента давления; фаза; амплитуда.

UDC 534.3

Designing of sound intensity measuring simulator for bearing tasks



A. V. Kozak, ORCID [0000-0002-4756-7931](https://orcid.org/0000-0002-4756-7931)

e-mail andrekaka1996@gmail.com

Ph. M. Larin, ORCID [0000-0003-2820-6011](https://orcid.org/0000-0003-2820-6011)

e-mail lphilip04@gmail.com

R. Yu. Kostjuk, ORCID [0000-0002-6980-693X](https://orcid.org/0000-0002-6980-693X)

e-mail r.ju.kostjuk@gmail.com

O. V. Korzhyk, Dr.Sc.(Eng.), Prof., ORCID [0000-0001-6793-1676](https://orcid.org/0000-0001-6793-1676)

e-mail ov.korzjik@aae.kpi.ua

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

Abstract—Work is devoted to problems of simulation devices and methods of acoustic measurements. The problem of measuring the sound intensity as one of the most important characteristics of the sound field by using only pressure receivers. According to the algorithm determining the intensity measurement device simulation performed based additive and multiplicative operations. With instrumental laboratory Lab View software model received intensity-metr simulator software and mobile device detection air or underwater noise-radiation objects.

The main reason for using Lab View is that this tool-graphic package, oriented to object programming, essentially provides the construction of an algorithm for the desired procedure for the device to be implemented. At the same time, the user interface is simple and accessible, it is possible to use a wide range of input data and a variety of indicator and recording devices. In this case, the program body in the LabVIEW® environment is created in the form of a graphical diagram reflecting the sequence of mathematical operations that determine the operating principle of the device. Thus, the chain: "mathematical expression - block diagram - program" is practically realized by objects of the program algorithm.

A simulator has been developed that allows not only to measure the intensity of acoustic perturbation of the working medium in true and relative units, but also to ensure the operation of the device for detecting a useful signal against the background of isotropic sound noise represented by white noise. Simulation of the receiving acoustic device was carried out on the basis of a model combining the capabilities of pressure receivers and receivers of oscillation speed. In this case, the number of pressure receptacles can vary - from two to three. In the topic there is a variant of the receiving device, consisting of three pressure receptacles.

The resulting software algorithm, formally, contains four groups of device-tools, namely:

- devices for simulating input signals;
- devices for the formation of signals of difference, sum and phase shift;
- filtering devices that provide the formation of a working frequency band and filtering devices that realize the principle of the parity-type spectrum analyzer;
- group of indicators.

The obtained results are proposed to be considered as the initial ones for the creation of simulators of air and underwater sound-direction finding on the basis of combined receivers.

Ref. 9, fig. 4.

Keywords — aerial sound locator; intensity; directional pattern; gradient receivers of pressure; phase; amplitude.

