

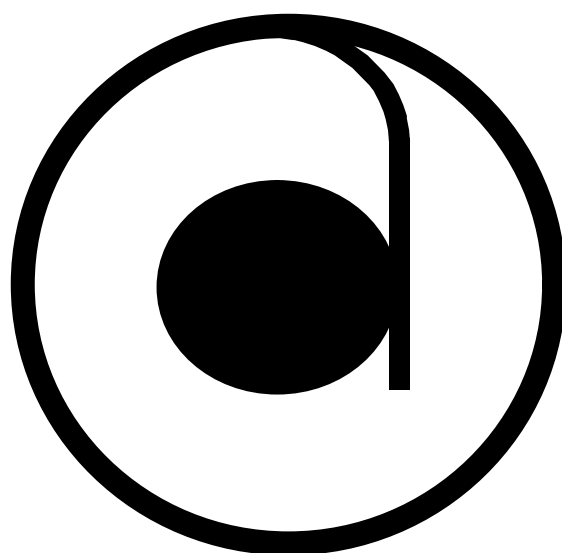
ISSN 1312-4897

# АКУСТИКА

година XXI

□ Брой 21

декември 2019 г.



НАЦИОНАЛНА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКА КОНФЕРЕНЦИЯ

*АКУСТИКА 2019*

25-26.10.2019 г.  
Варна

29-30.11.2019 г.  
София

**БЪЛГАРСКА АСОЦИАЦИЯ ЗА ОБЩЕСТВЕН КОНТРОЛ И УПРАВЛЕНИЕ НА ШУМА**  
**ИНСТИТУТ ПО МЕХАНИКА – БАН**  
**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ**  
**(Лаб. „Вибрации и акустичен шум“)**  
**ВИСШЕ ВОЕННОМОРСКО УЧИЛИЩЕ „Никола Йонков Вапцаров“**  
**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА**  
**СЪЮЗ ПО ЕЛЕКТРОНИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И СЪОБЩЕНИЯ**  
**(Национална секция по акустика)**  
**СПЕКТРИ ЕООД**

**Програмен комитет:**

**Председател:** проф. д-н М. Миховски

**Зам. председатели:** проф. д-р И. Кралов, доц. д-р Ек. Сираков, инж. Б. Михайлов

**Научни секретари:** д-р Й. Мирчев, д-р Й. Сивков

**Членове:** акад. Е. Горкунов, проф. д-н Б. Генов, проф. д-н В. Кавърджиков,  
проф. д-н А. Назаричев, проф. д-н А. Таджибаев, проф. д-р П. Джонджоров,  
проф. д-р И. Коларов, проф. д-р Е. Маноах, проф. д-р Н. Разиграев,  
доц. д-р Хр. Драганчев, доц. д-р Г. Евстатиев, доц. д-р А. Поволоцкая, доц. д-р В. Чириков

**ТЕМАТИКА:**

**Фундаментални и научно-приложни проблеми на акустиката**

**Физическа акустика, шум в околна/работна среда**

**Електроакустика, строителна акустика, акустика на зали**

**Обработка на звукови сигнали**

**Хидроакустика**

**Акустични и ултразвукови методи за изследване на материали и изделия**

**Стратегически шумови карти**

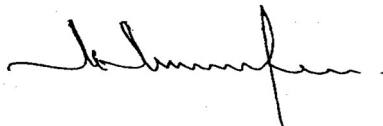
**Вибрационен мониторинг на машини, съоръжения и сгради**

**Въздействието на шум и вибрации върху човека**

---

В списание „Акустика“, год. XXI, бр. 21, 2019 г. са отпечатани докладите, включени в научната програма на Националната конференция „Акустика 2019“, проведена във Варна на 25-26.10.2019 г. и в София на 29-30.11.2019 г.

Председател на Програмния комитет:



(проф. д-н М. Миховски)

---

**Редакционна колегия:** проф. д-н М. Миховски, проф. д-р И. Кралов, доц. д-р Е. Беков,  
доц. д-р Кр. Иванова, доц. д-р И. Илиев, доц. д-р Н. Колев, доц. д-р Ек. Сираков, инж. Б. Михайлов

ISSN 1312-4897

Издателство: Технически университет – София  
София, 2019 г.

# СЪДЪРЖАНИЕ

Near Field of the Electro-Acoustic Transducer with an Elliptical Form.....	5
Georgi S. MARKOV, Ekaterinoslav S. SIRAКOV	
Близко поле на електро-акустичен преобразувател с елиптическа форма	
Георги С. МАРКОВ, Екатеринаслав С. СИРАКОВ	
Smartphone Applications for Generating Sound Signals.....	12
Ekaterinoslav S. SIRAКOV, Georgi S. MARKOV	
Приложения за телефони за генериране на звукови сигнали	
Екатеринаслав С. СИРАКОВ, Георги С. МАРКОВ	
Modeling, Simulation and Experimental Results of Piezo Ceramic Ultrasound Transducer .....	21
Emilian BEKOV, Plamen ANDREEV	
Моделиране, симулация и експериментални резултати на пиезо керамичен ултразвуков трансдюсер	
Емилиян БЕКОВ, Пламен АНДРЕЕВ	
Design of Phantom for Testing of Ultrasound Medical Equipment.....	27
Emilian BEKOV, Plamen ANDREEV	
Проектиране на фантом за тестване на ултразвукова медицинска апаратура	
Емилиян БЕКОВ, Пламен АНДРЕЕВ	
Study of Microprocessor System for Detection of Self Noise of an Underwater Object in Real-Time.....	33
Piyan ILIEV, Alexander KOLAROV	
Изследване на микропроцесорна система за откриване на собствен шум на подводен обект в реално време	
Илиян ИЛИЕВ, Александър КОЛАРОВ	
Underwater Sound Source Position Estimation with Four Hydrophones Time Difference of Arrival Estimation .....	40
Nikolai KOLEV, Peycho KALOYANCHEV	
Определяне на местоположението на подводен източник на звук чрез измервания на времезакъснението на сигнала в четири хидрофона	
Николай КОЛЕВ, Пейчо КАЛОЯНЧЕВ	
Complex Electromagnetic Research of Composite Materials on the Base of Iron Powder.....	47
Yordan MIRCHEV, Mitko MICHOVSKI, Valeriy VENGRINOVICH	
Комплексно електромагнитно изследване на композитни материали на основата на железен прах	
Йордан МИРЧЕВ, Митко МИХОВСКИ, Валерий ВЕНГРИНОВИЧ	
Contactless Ultrasonic Monitoring of Railway Using Surface Acoustic Waves .....	55
Krasimir STAYKOV, Damyan GANCHEV	
Безконтактен ултразвуков мониторинг на железен път чрез повърхностни акустични вълни	
Красимир СТАЙКОВ, Дамян ГАНЧЕВ	

Analysis of the Features of Dry Acoustic Contact as Applied to Inspection Pipelines with Low-frequency Guided Waves.....	62
Aleksandr I. BONDARENKO, Andrey L. SHEKERO, Alexander ALEXIEV	
Анализ особенностей сухого акустического контакта применительно к контролю протяженных трубопроводов низкочастотными направленными волнами	
Александр И. БОНДАРЕНКО, Андрей Л. ШЕКЕРО, Александър Р. АЛЕКСИЕВ	
Non-contact Measurement of Low Frequency Longitudinal Mode Velocity in Steel Wires.....	71
Victor V. KOZHUSHKO, Vladimir P. SERGIENKO, Alexander R. ALEXIEV	
Using COMSOL to Investigate the Effectiveness of Mufflers .....	75
Rosen RUSANOV, Krasimir NEDELICHEV, Petar IVANOV	
Използване на COMSOL за изследване на ефективността на конструкцията на шумозаглушителни устройства	
Росен РУСАНОВ, Красимир НЕДЕЛЧЕВ, Петър ИВАНОВ	
Synthesis of New Acoustic Barriers for Automotive and Railway Transport .....	84
Ivan KRALOV, Krasimir NEDELICHEV, Tatyana GEORGIEVA, Petar IVANOV	
Синтез на нови акустични екрани за автомобилен и релсов транспорт	
Иван КРАЛОВ, Красимир НЕДЕЛЧЕВ, Татяна ГЕОРГИЕВА, Петър ИВАНОВ	
Modeling of Noise Reduction Measures in a Residential-commercial Building. Acoustic Assessment of the Site and the Environment. Approach to Developed Acoustic Project .....	96
Milcho GEORGIEV	
Акустична оценка на сграда със смесено предназначение. Моделиране и мерки за намаляване на шума в сградата и в околната среда	
Милчо ГЕОРГИЕВ	
Investigation of Sound Insulation Properties of Most Common Partition Walls in Bulgaria .....	104
Aleksandar KIRECHEV, Zlatka MADZHAROVA	
Development, News and Products in the Field of Noise and Vibrations by Spectri Ltd .....	108
Boris MIHAYLOV, Ana PISKOVA	
Spectri Ltd and the Leaders in the Field of Rotary and Reciprocating Industrial Machines Vibrations Brüel & Kjaer Vibro.....	114
Boris MIHAYLOV, Alexandar MISHEVSKI	

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г.</p> <p>София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	Декември 2019 г.

## Near Field of the Electro-Acoustic Transducer with an Elliptical Form

Georgi S. MARKOV<sup>1</sup>, Ekaterinoslav S. SIRAKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bulgarian Navy, Varna, Bulgaria, e-mail: [georgi.s.markov@mail.bg](mailto:georgi.s.markov@mail.bg)

<sup>2</sup> Varna, Bulgaria, e-mail: [katiosirakov@avb.bg](mailto:katiosirakov@avb.bg)

### Abstract

In this work a theoretical analysis of the near region characteristics of sound field of a flat-elliptical membrane electro-acoustic transducer is presented. The mathematical dependencies for the generation of sound pressure from converters operating in a given frequency range are discussed. An equation is proposed for calculating the sound pressure level (SPL) in near region of an elliptical flat electro-acoustic transducer. Conclusions with practical applicability have been made for air and water environments.

**Keywords:** electro-acoustic transducer, elliptic membrane shape, theoretical analysis, near field.

## Близко поле на електро-акустичен преобразувател с елиптична форма

Георги С. МАРКОВ, Екатеринаслав С. СИРАКОВ

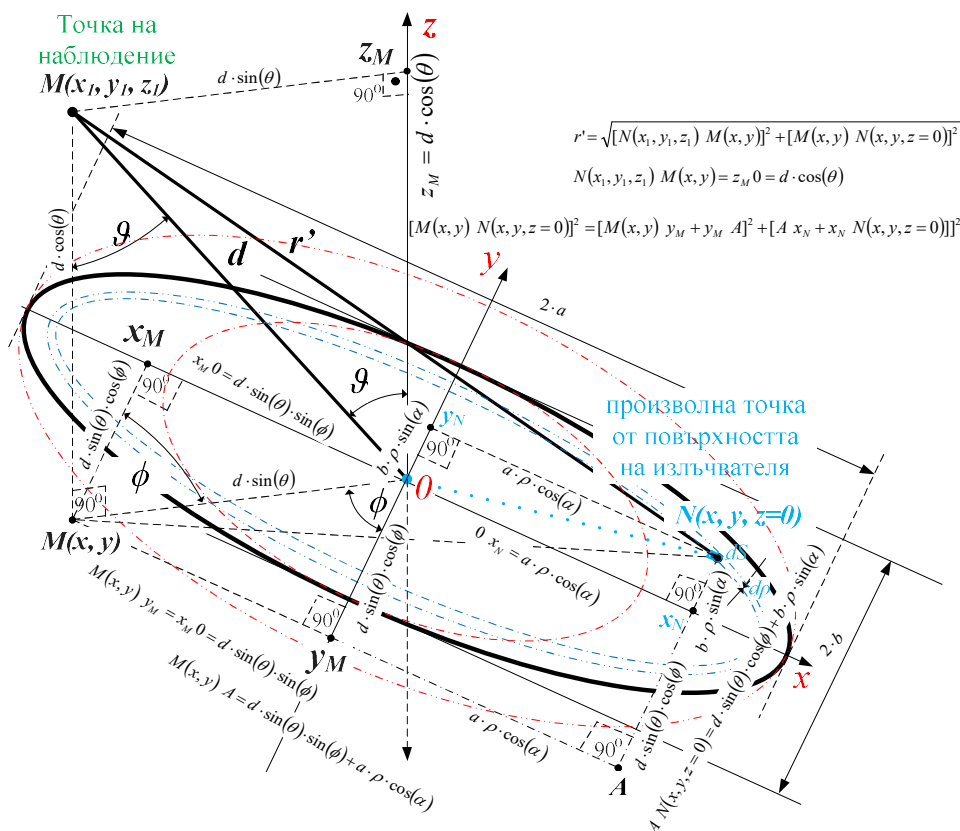
### 1. Увод

В тази статия е представен теоретичен анализ на пространствените характеристики на електро-акустичен преобразувател с плоска елиптична мембрана. Обсъдени са математическите зависимости за генериране на звуково налягане от преобразуватели, работещи в даден честотен диапазон. Предложено е уравнение, приложимо за изчисляване на звуково налягане, създавано от елиптичен плосък електро-акустичен преобразувател. Предложеният израз е използван за откриване на минимума в звуковото налягане, създавано от плосък елиптичен преобразувател. Проведен е експеримент за измерване на звуково налягане в близката зона, като резултатите са сравнени с аналитично изчислени резултати за доказване на достоверността на методологията. Направени са заключения за практическата приложимост за въздушна и водна среда.

### 2. Предпоставки и начини за разрешаване на проблема

Класическата теория за определяне на звуково налягане във всяка точка пред излъчващата повърхност на мембраната е математически представена от лорд Релей в неговата „Теория на звука“ [1]. Теорията на изчисленията на звуковото налягане е надградена до принципа на Хюйгенс-Френел, известен като интеграл на Релей [2÷10]:





Фиг. 2. Геометрична постановка за дефиниране точката на наблюдение  $M(x_1, y_1, z_1)$  и означения

### 3. Решение на представения проблем

След заместване на израза за разстоянието от елементарният излъчвател до точката на наблюдение (2) и израза за елементарната излъчваща повърхност на елиптическият излъчвател (3) в известния обобщен израз за изчисляване на звуково налягане (1) се получава предложеният от авторите израз за определяне на звуково налягане на плосък елиптически излъчвател:

$$p_\theta = \frac{\rho_S c_0 k v_m}{2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} DS \cdot \frac{\exp[-j \cdot k \cdot \sqrt{r'}]}{\sqrt{r'}} d\alpha d\rho \quad (4)$$

При:

$$DS = \sqrt{\{[\rho \cdot a \cdot \cos(\alpha)]^2 + [\rho \cdot b \cdot \sin(\alpha)]^2\} \cdot \{[a \cdot \cos(\alpha)]^2 + [b \cdot \sin(\alpha)]^2\} + \rho \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot (a^2 - b^2)}$$

$$r' = \sqrt{(d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) - \rho \cdot a \cdot \cos(\alpha))^2 + (d \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) - \rho \cdot b \cdot \sin(\alpha))^2 + (d \cdot \cos(\theta))^2}$$

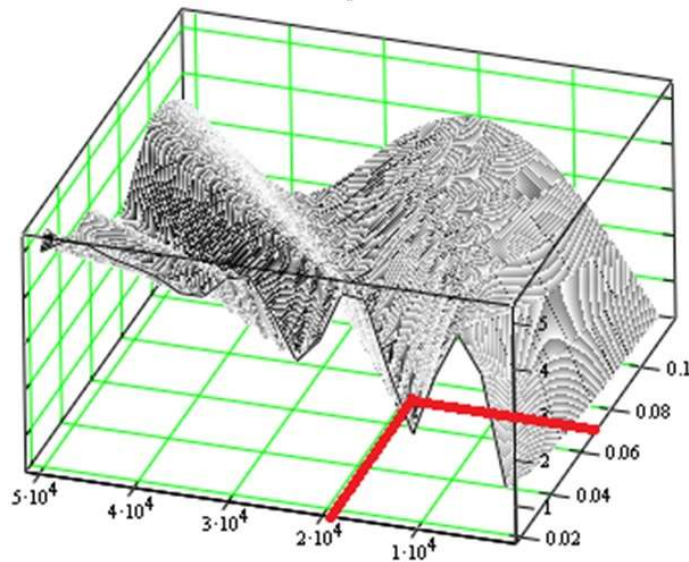
За изчисление на звуково налягане по оста на излъчване е необходимо да се реши израз (4) при ъгъл  $\theta = 0^\circ$ :

$$r'_{(\theta=0)} = \sqrt{(-\rho \cdot a \cdot \cos(\alpha))^2 + (-\rho \cdot b \cdot \sin(\alpha))^2 + d^2}, \quad 0 \leq \alpha \leq 2 \cdot \pi, \quad 0 \leq \rho \leq 1$$

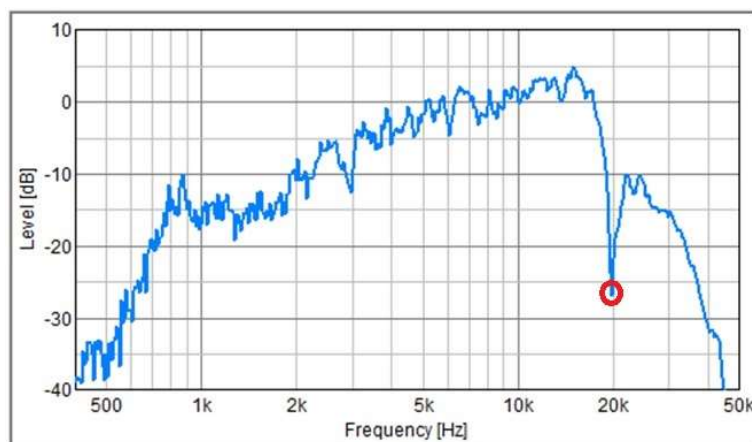
$$p_{(\theta=0)} = \frac{\rho_s c_0 k v_m}{2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} DS \cdot \frac{\exp[-j \cdot k \cdot \sqrt{r'_{(\theta=0)}}]}{\sqrt{r'_{(\theta=0)}}} d\alpha d\rho \quad (5)$$

#### 4. Резултати и дискусия

Предложените изрази за изчисление на звуково налягане могат да се решат в Mathcad и да се използват за откриване на минимума на звуковото налягане в близката зона. При решение на израза за елиптична повърхност за реален високоговорител може да се определят разстоянията от оста на излъчване където се проявяват минимума в звуковото налягане и да се сравнят с реални измервания за високоговорителя и да се анализира практическата приложимост на предложения израз за изчисления за проектиране на акустични излъчватели.



Фиг. 3. Графическо откриване на минимума в звуковото налягане в близката зона за високоговорител ВЕ 154, чрез изчисления в Mathcad



Фиг. 4. Експериментални резултати при измерване на АЧХ в близката зона за високоговорител ВЕ 154 при поставяне на микрофона на разстояние 7 см и тестов сигнал розов шум



Измерванията бяха извършени с измервателен микрофон МК201 [19] и предусилвател MV202 [20], лаптоп Lenovo R61i, Audio Codec: Conexant CX20549 и софтуера Realtime Analyzer [21].

От демонстрираните на фиг. 3 и фиг. 4 аналитични и експериментални резултати се доказва практическата приложимост на предложения математичен апарат за изследване на овални (елиптични и кръгли) излъчватели и определянето на желани от проектанта характеристики на звуковото поле спрямо геометричните характеристики на излъчвателя. Също така предложените изрази (4) и (5) са приложими за триизмерно изобразяване на зависимостта на звуковото налягане спрямо честотата и разстоянието от центъра на преобразувателя (фиг. 3).

## 6. Изводи и заключение

Класическите формули описани в учебните помагала [2÷5, 9] за плосък кръгъл излъчвател, използвани и в редица публикации [6, 7, 9, 10, 30] е база за сравнение и верификация на предложените в настоящата статия математични зависимости.

Редица изследвания на елиптични, конусни и куполни високоговорители е реализирал инж. Георги С. Марков [32÷37], първо самостоятелно, а след това по време на лабораторните упражнения водени от него по дисциплината Аудио Техника със студенти от 4 курс специалност КТТ (Комуникационна Техника и Технологии) и ТКМТ (Теле-Комуникации и Мобилни Технологии), ТУ – Варна (2016г., 2017г. и 2018 г.), които потвърждават предлаганите математически зависимости, за елиптичен преобразувател и потвърждават не приложимостта за научни изследвания на математическите зависимости за плосък бутален излъчвател [30], за всички типове мембрани и нуждата от тяхното надграждане за общ случай валиден както за кръгли плоски така и за елиптични и съответно за куполни, конусни и с друга геометрия акустични, хидроакустични и ултразвукови преобразуватели.

Дефинираните в доклада математични зависимости са основа за научни изследвания на акустични (високоговорители, слушалки, микрофони), хидроакустични (антени на: локатори, ехолоти, лагове, разговорни системи и други) и ултразвукови (използвани за диагностика в медицината и машиностроенето) преобразуватели.

## 6. Благодарности

Авторите изразяват своята благодарност на участниците в научния проект „Кръгъл огънат по цилиндрична повърхност бутален акустичен излъчвател“ [22], ТУ-Варна: доц. д-р Георги Евстатиев [23] – ръководител на проекта и колектив: д-р Ек. Сираков [24] - кат. Радиотехника, д-р Иван Лазаров [25] - кат. Математика, инж. Ат. Ангелова [26] - редовен докторант, студенти и дипломанти: инж. Аврам Антонов Аврамов, инж. Руси Маркин [27], инж. Живко Б. Арков [28] и инж. Мирослав Ив. Георгиев [29].

Използваната в научния проект методология за теоретичен анализ, изследвания и измерване на електродинамичен високоговорител са в основата на изследователската работа на студенти и дипломанти [27÷29], докторанти и млади учени [26], [30, 31], [32÷37], а и на настоящата статия.

### Литература:

1. Lord Rayleigh: The Theory of Sound: I and II (1896), 2nd ed. (Dover, New York 1945), Reprint, Vol. 2, chapter XIV, § 278, (1), p. 646 (125)
2. Вълчев И.Й., Електроакустика, Издателство Техника, София, 1975. стр. 93÷115

3. Вахитов Я.Ш., Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура, М.: Издательство Искусство, 1982, стр. 196÷198
4. Евстатиев Г., Основи на звукотехниката – ръководство, ТУ, Варна, 1990, стр. 21÷25.
5. Евстатиев Г., А. Клещов, И.Клюкин, Основи на хидроакустиката, ТУ Варна, 1990, стр. 88
6. Kinsler L.E., A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, Fundamentals of Acoustics 4th ed., John Wiley&Sons, New York, 2000, pp. 179÷181
7. Howard C.Q., B.S. Cazzolato, Acoustic Analyses Using Matlab, CRC Press, 2015, pp. 459÷505
8. Rossing T.D. (Ed.), Handbook of Acoustics, Springer; LLC, New York, 2007, 2014, 1286 pages, 3.13.4 Piston of Finite Size in a Rigid Baffle, p. 83
9. Сираков Ек., Електроакустика, Варна, Технически университет – Варна, ISBN 978-954-20-0435-6, 2008, стр. 57÷82
10. Möser M., Technische Akustik, Springer DE, ISBN 978-3-642-30932-8, 2012, 3.6.1 Schallfeld auf der Achse vor einer Kreis-Membran, pp. 111÷118
11. Ellipse <https://en.wikipedia.org/wiki/Ellipse>
12. Ellipse wolfram mathworld <http://mathworld.wolfram.com/Ellipse.html>
13. Ellipse <https://www.maplesoft.com/support/help/Maple/view.aspx?path=plottools%2FEllipse>
14. Analytic geometry, 3 dimensions distance [https://en.wikipedia.org/wiki/Analytic\\_geometry](https://en.wikipedia.org/wiki/Analytic_geometry)
15. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review by Granino A. Korn and Theresa M. Korn, Dover Publications, 2000, 17.3-3 The First Fundamental Form of a Surface, p.570
16. First fundamental form, <http://mathworld.wolfram.com/FirstFundamentalForm.html>
17. Lagrange's identity, [https://en.wikipedia.org/wiki/First\\_fundamental\\_form](https://en.wikipedia.org/wiki/First_fundamental_form)
18. Сираков Ек., Г. С. Марков, Формули за дефиниране характеристиката на насочеността за куполен електроакустичен преобразувател, Акустика 2018, стр. 25÷33
19. Measuring microphones MK201, [http://www.bswatech.com/web\\_proDetail350b.html?proId=229](http://www.bswatech.com/web_proDetail350b.html?proId=229)
20. Measuring preamplifier MV202, <https://reverb.com/item/30017409-rft-gefell-neumann-microphone-preamplifier-mv-202>
21. Realtime Analyzer <http://www.ymec.com/products/dssf3e/>
22. Евстатиев Г., Ек. Сираков, Ат. Ангелова, Кръгъл огънат по цилиндрична повърхност бутален акустичен излъчвател, НП2, ТУ-Варна, 2004г., стр. 2÷34
23. Евстатиев Г.К., С.Г. Евстатиев, Електродинамичен високоговорител и озвучително тяло. Патент за изобретение № BG 65 651 B1/06.07.2004
24. Sirakov E.S., Polar diagram of multiple driver loudspeaker systems, “XLII Int. Scientific Conference of Information Communication. ICEST 2007”, Volume 1, pp. 317÷320
25. Sirakov E.S., I. Lazarov, Extremums of the average output dissipation of a class AB audio amplifier. Proc. of ICEST 2003, 16÷18 October 2003, Sofia, Bulgaria, pp. 247÷248
26. Angelova A.A., E.S. Sirakov, G.K. Evstatiev. Theoretical Analysis of Frequency, Pulse and Transitional Characteristics of Loudspeaker (Part I), Proc. of ICEST 2004, Bitola, Macedonia, pp. 737÷738
27. Маркин Р., Изследване на импедансната характеристика на електродинамичен високоговорител с персонален компютър, Акустика, год. VIII, бр. 8, 2006, стр. 43÷48

28. Арков Ж.Б., Анализ на диаграма на насоченост на двулентово озвучително тяло, Списание Акустика, бр. 9, 2007, София, ISSN 1312-4897, стр. 27÷33
29. Георгиев М.И., Изследване на преходната характеристика на озвучително тяло с MatLab, СНС, ТУ-Варна, 2004
30. Илиев Ил., Ек. Сираков, Хр. Живомиров. Изследване на акустичната близка зона на кръгъл излъчвател., Международна научна конференция UNITECH 2013, Габрово, том 2(2), стр. 59÷63
31. Илиев Ил., Ек. Сираков, Хр. Живомиров, Acoustic Examination of the Anechoic Chamber in Technical University – Varna, Акустика 2014, брой 16, 2014 г. ISSN 1312-4897, стр. 131÷138.
32. Markov G., Ек. Sirakov, Теоретичен анализ на пространствените характеристики на кръгъл бутален акустичен преобразувател с конусна форма на мембраната, Акустика 2017, ISSN 1312-4897, pp. 49÷52
33. Markov G., Ек. Sirakov, Теоретичен анализ на звуковото налягане по оста на излъчване на кръгъл акустичен преобразувател с конусна форма на мембраната в близката зона, Акустика 2017, ISSN 1312-4897, стр. 53÷56
34. Марков Г. С., Теоретичен анализ на звуковото поле, създадено от високоговорители с кръгла конусообразна форма на мембраната и неговата зависимост от височината на конуса, Акустика 2018, ISSN 1312-4897, стр. 18÷24
35. Markov G., Examination of the polar response of a circular piston acoustic transducer with a cone form of the membrane, Proc. of ICEST 2018, Sozopol, Bulgaria, pp. 111÷114
36. Markov G., Frequency Response Examination of Cone Circular Acoustic Transducer, - International Scientific Conference UNITECH 2018, Gabrovo, Bulgaria, pp. 184÷187
37. Markov G., Ек. Sirakov, Near Region Acoustic Driver Circular Cone, XVIth International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2019, 6-8 June 2019, Varna, Bulgaria, DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771516, pp. 416÷419

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г.</p> <p>София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	Декември 2019 г.

## Smartphone Applications for Generating Sound Signals

Ekaterinoslav S. SIRAKOV<sup>1</sup>, Georgi S. MARKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Varna, Bulgaria, e-mail: [katiosirakov@avb.bg](mailto:katiosirakov@avb.bg),

<sup>2</sup> Bulgarian Navy, Varna, Bulgaria, e-mail: [georgi.s.markov@mail.bg](mailto:georgi.s.markov@mail.bg)

### Abstract

The sinusoidal signal generator is one of the main instruments in acoustic research and engineering. Examples of using a PC with MatLab and theoretical analysis of time and spectral characteristics with MathCad are presented. This paper examines the possibility of using a mobile phone to generate harmonic signals. The Android mobile operating system can also programmatically use the headphone output and determine the audio format. The design and blocks of the Tone Generator with the MIT App Inventor 2 Designer are presented. Time and spectral characteristics were tested with two applications: BKVtools, Brüel & Kjør Vibro for iOS and Akustika2019 for Android on several mobile phones, tablets and laptops.

**Keywords:** Smartphone, Sinusoidal Sound Generator, Android, iOS, Android Studio, MIT App Inventor.

## Приложения за телефони за генериране на звукови сигнали

Екатеринослав С. СИРАКОВ, Георги С. МАРКОВ

### 1. Увод

Генераторът на синусоидални измервателни сигнали в звуковата честотна област е един от основните прибори при акустични изследвания и инженерни дейности. Използването на мобилния телефон за генериране на измервателни сигнали като преносима алтернатива на скъпо струващите и обемисти измервателни устройства може да реши редица потребности [1].

Безплатният софтуер за мобилните телефони предоставен от Google и MIT (Масачузетският технологичен институт) също значително увеличи шансовете за комбиниране на хардуера на телекомуникационните устройства (за генератор на звукови сигнали) и софтуера (програмиране на Android Studio и MIT App Inventor).

За възможностите на съвременните мобилни телефони, таблети и преносими компютри да генерират синусоидални измервателни сигнали са реализирани множество изследвания, част от тях са представени в настоящата статия.

### 2. Предпоставки и начини за разрешаване на проблема

#### 2.1. Генериране на измервателни звукови синусоидални сигнали с персонален компютър и MATLAB

При учебни [2] и научни изследвания, студентите [3] и докторантите [4, 5, 7] за генериране на измервателни звукови синусоидални сигнали използват персонален

компютър и MatLab (Табл. 1). MatLab поддържа всички звукови устройства, съвместими с Microsoft Windows и UNIX (Linux и Apple mac OS X) платформи.

Таблица 1. Примери за генериране на звук с MatLab

Програмен инструмент	Пример за генериране на звук с MatLab
<p><b>sound(y,Fs,nBits) 32 and 64 bit</b>  <a href="https://uk.mathworks.com/help/matlab/ref/sound.html">https://uk.mathworks.com/help/matlab/ref/sound.html</a></p> <p>Convert matrix of signal data to sound  y – Audio data, column vector,  m-by-2 matrix for stereo playback;</p>	<pre>f=1000;A=1;phi=0;d=1; bits=16; % 16 (default), 8, 16, 24 bit Fs=44100;% Sample rate, 8192 Hz (default) до 384000 Hz; t=[0:Fs/d]/Fs; y = A*sin(f*2*pi*t+phi);% Audio data <b>sound(y,Fs,bits);</b> [2, стр.38]</pre>
<p><b>analogoutput('winsound')</b></p> <p>Create analog output object</p> <p>32-bit Windows only  (not working in MATLAB 64 bit version)</p>	<pre>clc; clear all; close all AO = analogoutput('winsound'); addchannel(AO,1); AO.SampleRate=44100; f0=2000; endtime = 0.1; t = (0:1/AO.SampleRate:endtime-1/AO.SampleRate); y = 1*sin(2*pi*f0*t); r = 10; p = .2; for counter = 1:1:r     putdata(AO,[y]); start(AO); pause(p) end% [6], [2, стр.38, 87]</pre>
<p><b>Audio Session</b>  Directsound  <a href="https://uk.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/61177-audiotestsignalgenerationssessionbased?s_tid=prof_contriblnk">https://uk.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/61177-audiotestsignalgenerationssessionbased?s_tid=prof_contriblnk</a></p> <p>Audio Test Signal Generation Session Based  by Georgi Markov [7]  Square Waveform Audio Test Signal  Generation  MATLAB 2014a, 32 and 64 bit  MATLAB 2019a, 64 bit</p>	<pre>d = daq.getDevices s = daq.createSession('directsound'); noutchan = 1; addAudioOutputChannel(s, 'Audio2', 1:noutchan); Fs=48000; s.Rate = Fs; f0=input('Enter fill frequency for envelope shape='); endtimesq=0.2; tsq=(0:1/Fs:endtimesq-1/Fs); ysq=sin(2*pi*f0*tsq); r=input('Enter number or repetitions='); p=input('Enter duration of pause='); for counter = 1:1:r     queueOutputData(s,[ysq]); startBackground(s);     pause(p) end % 17 Jan 2017 Georgi Markov [7]</pre>

Програмата MATLAB може да се ползва и на устройства с ОС Android и iOS [8], MATLAB Mobile app Android 5.1 or later и iOS 11 or later.

За съжаление, MATLAB mobile не поддържа аудиото на устройството. Причината за това е, че приложението MATLAB Mobile изпраща всички команди до облака или до вашия компютър. Така че командите ще се изпълняват на вашия компютър или на MATLAB облака и резултатът ще бъде изпратен обратно към MATLAB mobile. Ако сте свързали мобилния си MATLAB към компютъра си, звукът ще се възпроизвежда на вашия компютър, а ако го свържете към Cloud, ще получите съобщение за грешка, тъй като облакът MATLAB няма аудио изходи [9].

## 2.2. Софтуерни особености за генериране на измервателни звукови синусоидални сигнали с мобилни устройства

Приложенията (Mobile apps) разширяват функционалността на устройствата. Те се пишат с помощта на комплекта за разработка на софтуер (SDK – software development kit) за Android, за iPhone или за Windows.

SDK включва пълен набор от инструменти за разработка, включително софтуерни библиотеки, средство за трасиране, емулатор, документация, примерни кодове и ръководства.

### 2.3. Интегрирани среди за разработка на приложения за Android

Първоначално интегрираната среда за разработка, поддържана от Google, беше Eclipse, използвайки приставка Eclipse Android Development Tools. През декември 2014 г. Google пусна Android Studio, базиран на IntelliJ IDEA, като основна интегрираната среда за разработка на приложения за Android на езика за програмиране Kotlin и Java. Има и други инструменти за разработка на приложения: NDK native development kit на C, C++ и C#, Google App Inventor и други.

### 2.4. Дефиниране на аудио формата (*android.media.AudioFormat*)

Посредством class `AudioFormat` (Kotlin или Java) се дефинира аудио форматът [10]:

- Честота на дискретизация (sampling rate) препоръка до 48kHz,
- Кодирание (encoding), линейна Pulse-code modulation LPCM (8, 16 или 32 bit без компресиране на данните) или AC-3, DTS (при компресиране на данните).
- Конфигуриране на каналите (channel masks): MONO, STEREO, 5POINT1, и др.

### 2.5. Приложения за генериране на синусоидални звукови сигнали разработени с интегрираната среда Android Studio

Кодът на приложения за генериране синусоидални звукови сигнали, разработени с интегрираната среда Android Studio, е даден в редица книги [11, 12] и в интернет [13]:

#### – **Playing a Synthesized Sound** [12, Ch 8, 179÷195]

```
float synth_frequency = 440; // 440 Hz, Middle A, ред 22;
SAMPLE_RATE = 11025 Hz // 44100, 48000, AudioSynthesis.java, ред 65;
AudioFormat.CHANNEL_CONFIGURATION_MONO // AudioSynthesis.java, ред 70;
AudioFormat.ENCODING_PCM_16BIT // AudioSynthesis.java, ред 71;
```

Генерира непрекъснат синусоидален сигнал посредством class `AudioSynthesis` (бутони `startSound` и `endSound`) с параметри:  $f_0=440$  Hz, 16 bit, моно,  $f_s=11025$ Hz.

Недостатък: може да генерира само непрекъснат сигнал;  $y(t) = [\sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)]$ .

#### – **Nishant Srivastava, Zentone, Berlin, 2019** [13]

```
sample[i] = Math.sin(freqOfTone * 2 * Math.PI * i / (sampleRate)); // PlayToneThread.java, ред 56
sampleRate = 44100; // 44.1 KHz // PlayToneThread.java, ред 47
// convert to 16 bit pcm sound array // PlayToneThread.java, ред 59
...
// in 16 bit wav PCM, first byte is the low order byte // PlayToneThread.java, ред 88
AudioFormat.CHANNEL_OUT_MONO, // PlayToneThread.java, ред 94
AudioFormat.ENCODING_PCM_16BIT // PlayToneThread.java, ред 95
import github.nisrulz.zentone.ToneStoppedListener; // MainActivity.java, ред 10
import github.nisrulz.zentone.ZenTone; // MainActivity.java, ред 10
```

Недостатък: може да генерира пакет хармоничен сигнал от вида описан с математическата зависимост (1), но минималната му продължителност е  $\sigma = 1$  секунда [13].

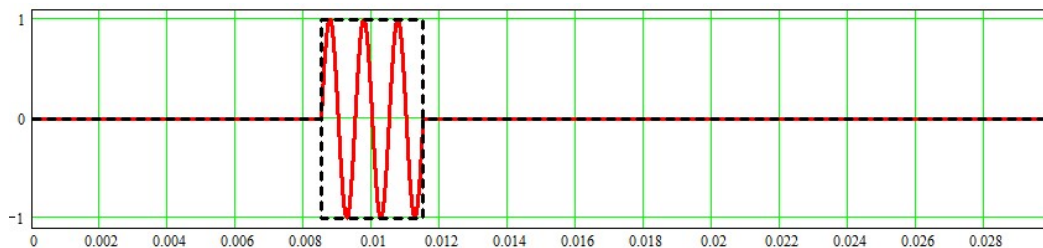
### 3. Решение на проучения проблем

#### 3.1. Теоретичен анализ на времевата и спектралната характеристика

Стандартният звуков измервателен сигнал  $y(t)$  във времевата област, може да бъде описан с математическата зависимост (1):

$$y(t) = (-1)^n \cdot [\sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)] \cdot \sum_{k=1}^r [\Phi(t + \sigma - p \cdot k) - \Phi(t - \sigma - p \cdot k)] \quad (1)$$

където:  $t$  – текущото време,  $s$ ;  $f_0$  е звукова честота,  $Hz$ ;  $n$  - брой синусоиди в един пакет;  $k$  - пореден номер на пакета от  $k=1$  до  $r$ ;  $r$  - брой последователни повторения на пакета;  $\Phi$  – функция на Хевисайд;  $\sigma = n/f_0$  – продължителност на пакета,  $s$ ;  $p$  - период на повторение на пакета,  $s$ .



Фиг. 1. Времева характеристика на стандартен измервателен сигнал

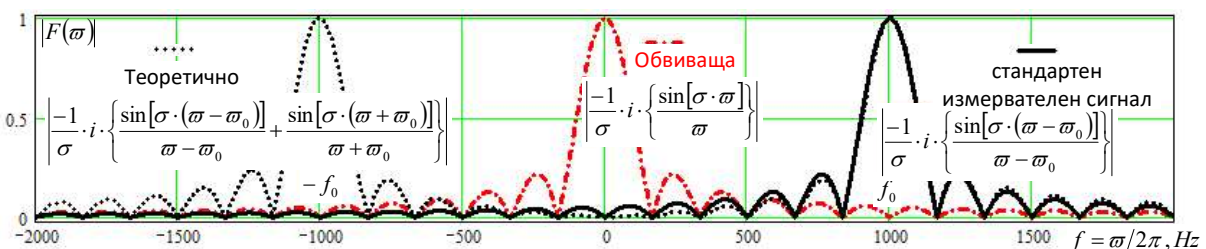
Характеристиката на стандартен измервателен сигнал във времевата област ( $t$  от 0 до  $30\text{ ms}$ ;) е представена на фиг.1, при:  $f_0 = 1\text{ kHz}$ ;  $k = 1$ ;  $\sigma = 3$ ;  $f = \omega/2\pi$ ;  $k = 1$ .

Математически израз за спектъра (в честотната област) на сигнала [14] може да се получи от математическата зависимост дефинираща сигнала във времевата област чрез: Integral Transforms, Fourier Transforms на Maple; инструментите (toolbars): Symbolic, Fourier на Mathcad; Wolfram Mathematica или друг софтуер.

В честотната област стандартният звуков измервателен сигнал  $F(\omega)$  при  $k = 1$ , може да бъде описан с математическата зависимост (2):

$$F(\omega) = \frac{-1}{\sigma} \cdot i \cdot \left\{ \frac{\sin[\sigma \cdot (\omega - \omega_0)]}{\omega - \omega_0} + \frac{\sin[\sigma \cdot (\omega + \omega_0)]}{\omega + \omega_0} \right\}, \quad Fr(\omega) = \frac{-1}{\sigma} \cdot i \cdot \left\{ \frac{\sin[\sigma \cdot (\omega - \omega_0)]}{\omega - \omega_0} \right\} \quad (2)$$

където:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  – текущата ъглова честота,  $rad/s$ ;  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$  е звукова ъглова честота,  $rad/s$ ;  $\sigma = n \cdot 2 \cdot \pi / \omega_0$  – продължителност на пакета,  $s$ .



Фиг. 2. Модула на спектралната плътност на стандартен измервателен сигнал

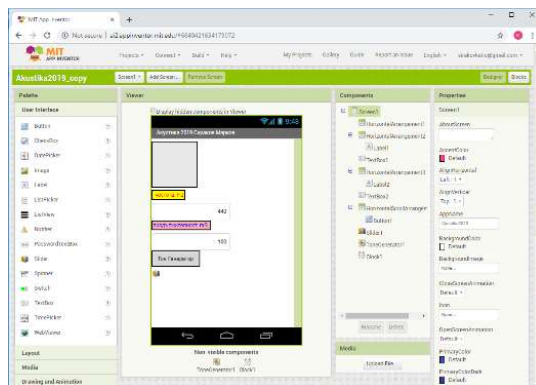
Характеристиката на стандартен измервателен сигнал в честотната област е представен на фиг.2 ( $f = \omega/2\pi$  от  $-2\text{ kHz}$  до  $2\text{ kHz}$ ), при:  $f_0 = \omega_0/2\pi = 1\text{ kHz}$ ;  $\sigma = 3\text{ mS}$ ;  $k = 1$ .

### 3.2. MIT App Inventor – среда за разработка на приложения за Android и iOS

MIT App Inventor е интегрирана в уеб приложение среда за разработка. App Inventor първоначално се предоставя от [Google](https://www.google.com), а сега се поддържа от Масачузетския технологичен институт. Тя позволява лесно и бързо, без солидна подготовка в компютърното програмиране да се създава приложен софтуер за две операционни системи: [Android](https://www.android.com) и [iOS](https://www.apple.com/ios). MIT App Inventor е безплатен и с отворен код софтуер, пуснат при двойно лицензиране: [Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/) недепортиран лиценз и [Apache License 2.0](https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0) за изходния код.

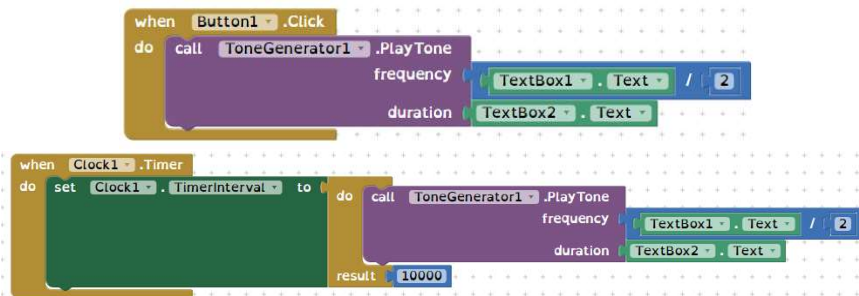
Дизайн на приложение за генериране синусоидален звуков сигнал е представен на фиг. 3.

Използваният графичен интерфейс позволява на потребителите да влачат и пускат графични блокове, визуални обекти, за да създадат приложение за мобилни телефони.



Фиг. 3. Дизайн на Тон генератор с конструктора на приложения MIT App Inventor 2

При конструирането на приложението на екрана Screen1 се разполагат видимите компоненти: AppName (Име на приложението – Akustika2019); Title (заглавие – Акустика 2019 Сираков Марков); Label1, Text (честота, Hz); TextBox1 (Текстово поле за дефиниране честотата в Hz, стойност по подразбиране 1000Hz); Label2, Text (продължителност в mS, стойност по подразбиране 100 mS) и Non-visible components (не видимите компоненти): Clock1 (таймер) с дефиниция TimerInterval (период на повторение – стойност по подразбиране 10000, mS) и ToneGenerator1 [15].



Фиг. 4. Програмата за Тон генератор без и със период на повторение



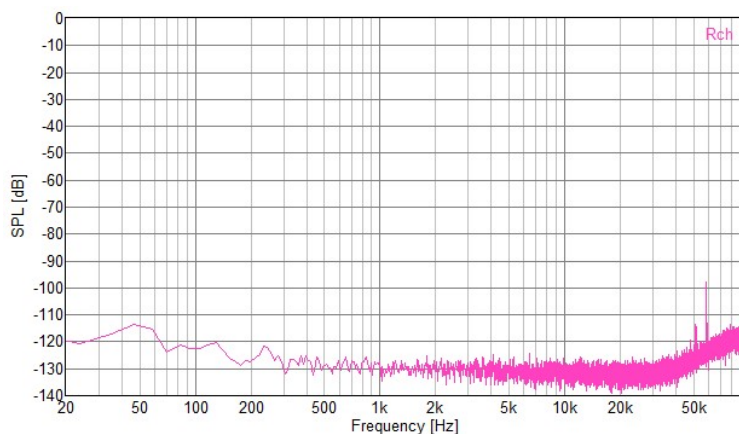
Програмата за генериране синусоидален звуков с App Inventor 2 (език за графично програмиране Visual programming language) е представен на фиг. 4. Периодът на повторение е реализиран с блока **Clock1, Timer** със стойност **result: 10000 ms**.

MIT AI2 Companion позволява отстраняване на грешки в реално време на свързани устройства чрез Wi-Fi или Universal Serial Bus (USB).

## 4. Резултати и дискусия

### 4.1. Тест на използваните компютри

Редица изследвания са реализирани за тестване възможностите на преносими и стационарни компютри и по-точно на техните звукови карти (собствен шум – фиг. 5, времева и спектрална характеристика – фиг. 7) да представят спектралната характеристика на синусоидалния звуков сигнал генериран от смартфон с приложения за Android – фиг. 9 и 10 и iOS – фиг. 6 (в зависимост от операционната система на телефона).



Лаптоп: HP6730b [16],  
Audio codec AD1984A[17],  
soundMAX, Analog Device,

предусилвател AD8694 [16, 18]:  
Low noise: 8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ,  
f1=1 kHz, f2=30 kHz

Фиг. 5. Собствения шум на HP6730b за вход външен микрофон

Изследван е програмно генериран аналогов сигнал от различни модели мобилни телефони (от изхода за слушалки) с честота 1 kHz при ниво -10 dB, свързан с входа за външен микрофон на компютъра (фиг.10).

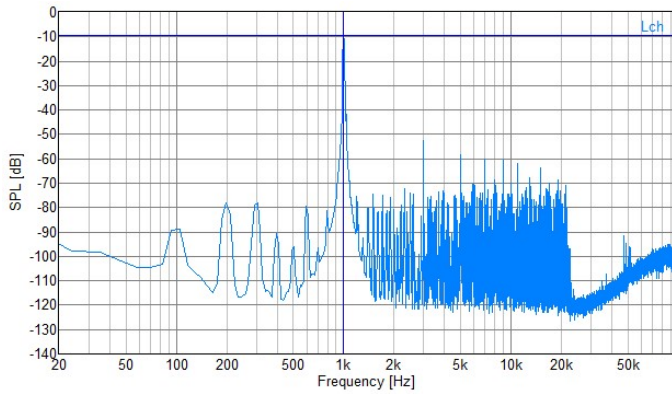
Изследванията са реализирани с програмата Realtime Analyzer [19], FFT Analyzer, Power Spectrum инсталирана на компютри с операционна система Microsoft Windows.

За да могат да отговорят на тези изисквания компютрите са тествани за честотната лента от 20Hz до 100kHz и динамичен диапазон от -140dB до 0dB, фиг.5÷7,9 и 10.

Интегралната схема Audio codec (с Analog-to-digital converter са 24 bit, честота на дискретизация Sample rate 96 (192) kHz) на тестваните компютри е: Lenovo R61i – Conexant CX20549; HP530, Conexant CX20549; HP6730b(фиг.5÷7,9), soundMAX, Analog Device, AD1984A; Asus Eee 1000HE, Realtek ALC269; Asus TUF H370-Pro, Realtek ALC887(фиг.10).

### 4.2. Тест на приложението BKVtools, Brüel & Kjær Vibro за Apple iOS

Спектралната характеристика на генерирания непрекъснат синусоидален звуков сигнал с честота 1 kHz и ниво -10 dB, на фона на собствения шум с мобилния телефон на Apple iPhone 6 и iPhone 5 с BKVtools, Brüel & Kjær Vibro е представена на фиг. 6.



Apple iPhone 6 [20]  
 Chipset: Apple A8 (20 nm)  
 16-bit/44.1kHz audio [20]  
 Voice 66dB, Noise 65dB

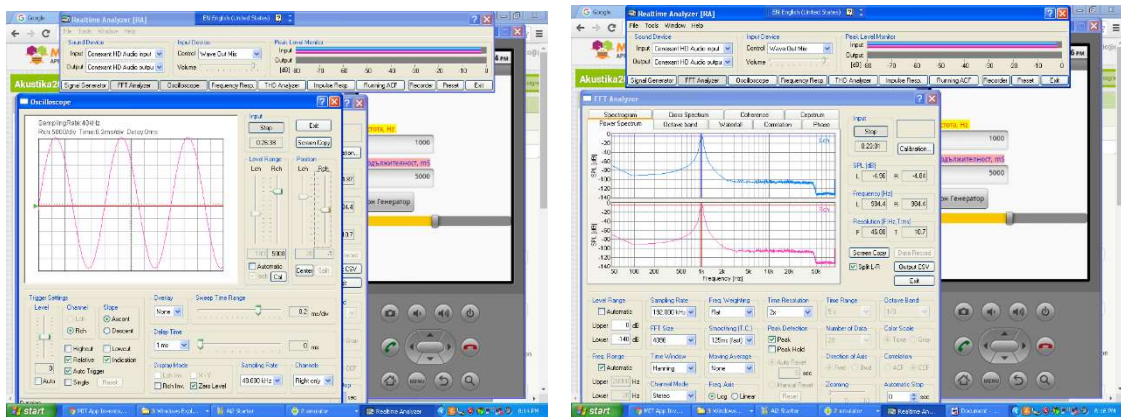
BKVtools, Brüel & Kjør Vibro[21]

Лаптоп: HP6730b, фиг. 5  
 Low noise: 8 nV/√Hz, 0.0006%.

Фиг. 6. Power Spectrum на генерирания сигнал с iPhone и BKVtools, Brüel & Kjør Vibro

### 4.3. Тест на приложението Akustika2019 Tone с емулятора на MIT AI2

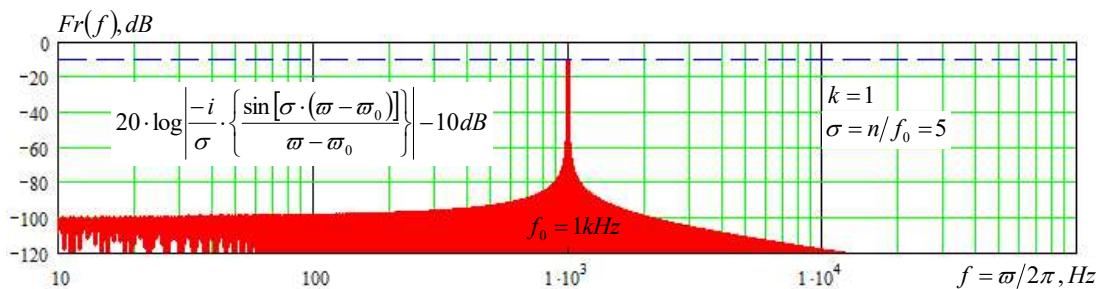
С програмата Realtime Analyzer [16] може да тестваме времевата и спектралната характеристики на сигнала (фиг. 7).



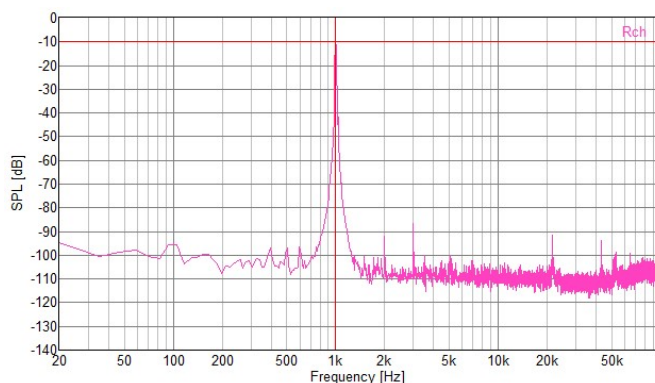
Фиг. 7. Времева Oscilloscope и спектрална FFT Analyzer, Power Spectrum характеристики на генерирания сигнал с приложението Akustika2019 от емулятора на MIT AI 2

### 4.4. Тест на приложението Akustika2019 за Android на мобилно устройство

Теоретична характеристиката на стандартен измервателен сигнал в честотната област ( $f = \omega/2\pi$  от 10 Hz до 100 kHz и динамичен диапазон от -120 dB до 0 dB) е представен на фиг.6, при:  $f_0 = \omega_0/2\pi = 1 \text{ kHz}$  (-10 dB);  $\sigma = 5 \text{ S}$ ;  $k = 1$ .

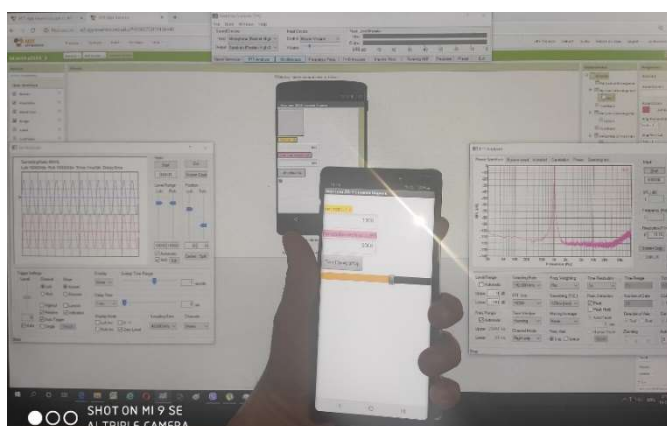


Фиг. 8. Теоретична спектрална характеристика на стандартен измервателен сигнал



Телефон: Lenovo328 [22],  
 Chipset: MT6582M [23],  
 PMIC MT6323,  
 Audio  
 8 bit/16 bit,  
 8 kHz to 48 kHz,  
 AW8155  
 Class AB/D audio ampl.,  
 Ultra low THD+N=0.06% [24]

Фиг. 9. Power Spectrum на генерирания сигнал с Lenovo328 и приложението Akustika2019



Samsung Galaxy Note 9  
 32-bit/384kHz,  
 Audio quality: Noise -93.7dB [25].  
 Audio codec  
 Qualcomm WCD9341:  
 THD+N, Playback: -109dB  
 Sampling, Playback: 44.1kHz, 48kHz

Компютър:  
 Asus TUF H370-Pro [27]  
 Audio codec: ALC887  
 ADC: 24bit, 192kHz [28]

Фиг. 10. Тест на приложението Akustika2019, телефон Samsung Galaxy Note 9

## 5. Заключение

Приложенията за генериране синусоидални звукови сигнали разработени с интегрираната среда Android Studio [11, 12 и 13] и разработеното с MIT App Inventor приложение Akustika2019, са инсталирани и тествани на следните телефони, таблети и лаптопи: Samsung Galaxy Note 9 (фиг.10), Xiaomi Mi 9 SE, Alcatel shine lite 5080x, Samsung Galaxy Note 5, HTC One 8, Samsung galaxy J5, Alcatel OneTouch Pop C1 4015X, Samsung Galaxy Mini S5570, Lenovo A328 (фиг. 9), HUAWEI Y360, Lenovo A319, Sony Xperia tipo – телефони, Prestigio MultiPad 7.0 Ultra Duo – таблет, Prestigio Multipad Wize 3147 3G – телефон и таблет, Asus Eee PC 1000 HE – Android 8.1 – лаптоп и други. За сравнение е инсталирано и тествано приложението BKVtools, Brüel & Kjaer Vibro на Apple телефоните: iPhone 5 и iPhone 6 (фиг.6).

В резултат от изследванията и анализите представени в настоящата статия могат да бъдат направени следните основни изводи:

1. Утвърдената практика за генериране на измервателни звукови сигнали с **компютър и MatLab** (Табл.1) може да послужи за база за верификация на разглежданите идеи за реализация с мобилните телефони.
2. Максималното съотношение сигнал / шум в реалния свят – **120÷140 dB**, поставя изисквания към: Chipset, Audio codec, аудио усилвателя за изход (нелинейни изкривявания – Low THD+N, фиг. 6, 7, 9 и10), предусилвателя за вход (приведен

собствен шум – Low noise, фиг. 5, 7) и към компютъра – за анализ и към телефона – генератор на измервателни звукови сигнали.

3. При натурни изследване аудио тракта на мобилни устройства (даже и ниско бюджетни дори и модели от преди 5÷6 години) не е подходящо да се извършват на компютър със **16 битови звукови модули**, включително и с **DAQ-устройство NI USB-6211 (16бита)** използвани за учебни и научни изследвания за генериране и измерване на звукови сигнали [4].

## Литература

1. Mathewa E., S. Karamchandani, T.D. Biradar, Mobile Function Generator Using Android, International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3'15), Elsevier, doi: 10.1016/j.procs.2015.04.248, стр. 229-234
2. Сираков Ек. Електроакустика, Варна, ТУ, Варна, 2009, стр 38-45
3. Георгиев М., Изследване на преходната характеристика на озвучително тяло с MatLab, СНС, ТУ-Варна, 2004
4. Илиев Ил., Ек. Сираков, Хр. Живомиров. Acoustic Examination of the Anechoic Chamber in TU-Varna, АКУСТИКА 2014, ISSN 1312-4897, стр. 131-138
5. Сираков Е., Г. Марков. Анализ на измервателни сигнали с различна форма на обвиващата в честотната област, Акустика 2016, стр. 75-78
6. Bemis R., Sonar demo <https://uk.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/1731-sonar-demo>
7. Markov G., Audio Test Signal Generation Session Based <https://www.mathworks.com>
8. MATLAB Mobile app, Android and iOS <https://uk.mathworks.com/products/matlab-mobile.html>
9. Is it possible to use sound(y,Fs) with MATLAB on iPad <https://uk.mathworks.com/matlabcentral/>
10. Аудио формат ([android.media.AudioFormat](https://developer.android.com/reference/android.media.AudioFormat)) <https://developer.android.com/reference/>
11. Every Shawn Van, Pro Android Media, New York, Apress, 2009, pp. 179-195
12. Mark Wickham, [Practical Android](#), Dallas, Texas, USA, Apress, 2018, Ch.7, p. 192
13. Srivastava N., Zentone, Berlin, 2019 + free code: <https://github.com/nisrulz/zentone>
14. Иванов М.Т., А.Б. Сергиенко, В.Н. Ушаков, Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для вузов. Питер, 2019, (1.15) стр. 10, (1.54) стр. 26
15. Antonio J., ToneGenerator Extension, <https://community.thunkable.com>
16. HP Compaq 6530B 6730B Free Laptop Schematic.pdf, AUDIO DAUGHTER, page 63-5
17. AD1984A, SoundMAX AudioCodes datasheet.pdf, page 1, 3
18. AD8691\_8692\_8694 datasheet.pdf, page 1, 2, 9
19. Realtime Analyzer <http://www.ymec.com/products/dssf3e/>
20. Apple iPhone 6 [https://www.gsmarena.com/apple\\_iphone\\_6-6378.php](https://www.gsmarena.com/apple_iphone_6-6378.php)
21. BKVtools, Brüel & Kjær Vibro, <https://apps.apple.com/us/app/bkvtools/id1286231547>
22. Lenovo A328 [https://www.gsmarena.com/lenovo\\_a328-6729.php](https://www.gsmarena.com/lenovo_a328-6729.php), Page 19, <https://www.mobilephone-manualsonline.com/lenovo/lenovo-pdf-schematics-and-service-manuals/>
23. MT6582 <https://datasheetpdf.com/pdf-file/785907/MediaTek/MT6582/1>, Page 8 of 51
24. AW8155, Class AB/D audio amplifiers, pp. 8÷12 <https://www.awinic.com/files/documents/a5b7f4f202794392ab83e5497705fdee.pdf>
25. Samsung Galaxy Note 9 [https://www.gsmarena.com/samsung\\_galaxy\\_note9-9163.php](https://www.gsmarena.com/samsung_galaxy_note9-9163.php)
26. Audio codec Qualcomm WCD9341 <https://www.qualcomm.com/products/wcd9341>
27. Asus TUF H370-Pro, E13803\_TUF\_H370-PRO\_GAMING\_UM\_WEB.pdf, Page 7
28. Audio codec: ALC887, Reference, Page 10, 76

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г.</p> <p>София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	Декември 2019 г.

## Modeling, Simulation and Experimental Results of Piezo Ceramic Ultrasound Transducer

Emilian BEKOV, Plamen ANDREEV

Technical University Varna  
Studentska Str. 1, Varna, 9010, Bulgaria  
E-mail: [emilian.bekov@tu-varna.bg](mailto:emilian.bekov@tu-varna.bg)

### Abstract

In this paper a modeling of piezo ceramic ultrasound transducer is made. Calculations of modeling parameters are presented. The simulation results obtained by the model are given. The real experiments with ceramic ultrasound transducer are shown. The conclusion notices for modeling, simulation and real experiment with piezo transducers are derived.

**Keywords:** modeling, simulation, ultrasound transducer

## Моделиране, симулация и експериментални резултати на пиезо керамичен ултразвуков трансдюсер

Емилиян БЕКОВ, Пламен АНДРЕЕВ

### 1. Увод

В последните години се увеличи многократно приложението на образната диагностика в медицината [1]. Безвредността на медицинските изследвания се явява едно от основните изисквания при образната диагностика. Именно затова ултразвуковата медицинска диагностика заема челно място при тези изследвания, основно поради своята пълна безвредност. Развитието на образната диагностика постави на преден план и въпросът за получаване на качествени и информативни 3D изображения. Само ултразвуковата медицинска диагностика може да даде безвреден образ на плода в утробата на майката. Основна роля за формиране на качествено изображение има ултразвуковият диагностичен трансдюсер [2]. Неговата конструкция и функционални възможности са много важни за развитието на ултразвуковата медицинска диагностика. С цел получаването на по-добри характеристики и функционални възможности още в периода на разработката се налага предварителното моделиране и симулиране на възможностите на ултразвуковия трансдюсер [3].

Тази публикация цели да даде нов подход в моделирането и симулирането на пиезо керамичен ултразвуков трансдюсер и чрез представяне на експериментални изследвания да докаже адекватността на представяния модел.

## 2. Изложение

Първият много съществен момент в настоящата публикация е съставянето на модел на пиезо керамичен (PZT) трансдюсерен елемент. Постановката на задачата се решава като първо се представи разпространението на ултразвуковата (УЗ) вълна в предавателна линия със загуби. От гледна точка на акустиката описанието става с акустични параметри като: акустично налягане, акустична скорост на движение на частиците на средата, плътност, скорост на звука и акустичен импеданс. От друга страна електрическите параметри, съответстващи на акустичните, са: напрежение, ток и електрически импеданс. Може да се направи акустично-електрическа аналогия между процесите. Описанието на процесите се извършва с телеграфните уравнения. Тези уравнения могат да бъдат представени, както за акустичната, така и за електрическата част. Нас основно ни интересува изразяване на електрическите параметри чрез акустичните. Телеграфните уравнения, описващи предавателната линия, могат да се представят от гледна точка на електрическата част, както следва:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} &= Ri(x,t) + L\frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} &= Gu(x,t) + C\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

където  $\partial u$  и  $\partial i$  са минималните изменения на напрежението и тока в предавателна линия с дължина  $\partial x$ , клоняща към нула; величините  $R$ ,  $L$ ,  $C$  и  $G$  са съответно съпротивление, индуктивност, капацитет и проводимост на електрическата линия.

На базата на редица преобразувания, представени подробно в литературата, може да се получи краен израз за електрическият импеданс [4]:

$$Z_{el} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (2)$$

където  $\omega$  е ъгловата честота.

За предавателна линия със загуби, от гледна точка на акустичната част, за акустичния импеданс е валиден изразът:

$$Z_a = \rho c \sqrt{1 + j\omega\tau}, \quad (3)$$

където  $\rho$  е плътността на материала,  $c$  е скоростта на разпространение на звука в материала и  $\tau$  е времеконстантата за установяване на акустичната вълна.

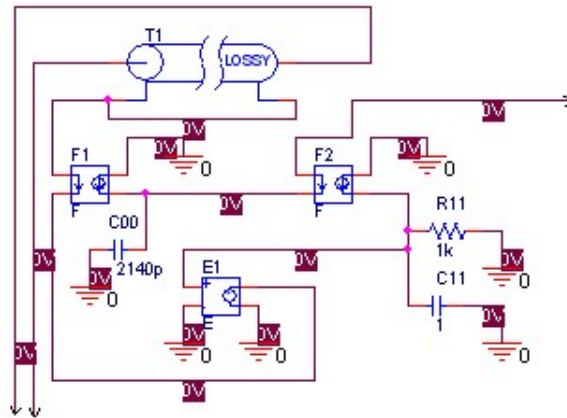
Аналогията между акустичната и електрическата част се дава с изрази:

$$Z_{el} = Z_a A \quad (4)$$

където  $A$  е фронталната излъчваща площ на трансдюсерния елемент.

Благодарение на това електрическите параметри, описващи линията, могат да се изразят чрез акустичните. Формулите за получаване на  $L$ ,  $R$  и  $C$  са подробно описани в техническите литературни източници [4]. По този начин могат да бъдат определени параметрите на предавателната линия, включени в модела на PZT трансдюсера.

На фигура 1 е представен схематично пълният модел на пиезо керамичен трансдюсер. Той е изграден на базата на постановките за създаване на модела от авторите Лиич [4], Пютмер [5] и Девентър [6]. В модела, освен предавателната линия, се използват и зависими източници (F1, F2 и E1), които характеризират отношението на трансформираната механична енергия в електрична и обратно. Съществен елемент в модела е и характеристикният капацитет на пиезо керамичния елемент.



Фиг. 1. Модел на пиезо керамичен трансдюсер

Необходимите формули за пълното описание на модела са разгледани по-долу. Дебелината на предавателната линия се дава с израза:

$$t_{el} = \frac{c}{2f}, \quad (5)$$

където  $t_{el}$  е дебелината на пиезо керамичния слой,  $f$  е работната честота и  $c$  е скоростта на разпространение на звука в пиезо керамичния материал.

Характеристичният капацитет на пиезо керамичния елемент се изчислява с израза:

$$C_0 = \frac{\varepsilon A}{t_{el}}, \quad (6)$$

където  $\varepsilon$  е диелектричната проницаемост,  $A$  е площта, а  $t_{el}$  е дебелината на пиезо керамичния елемент.

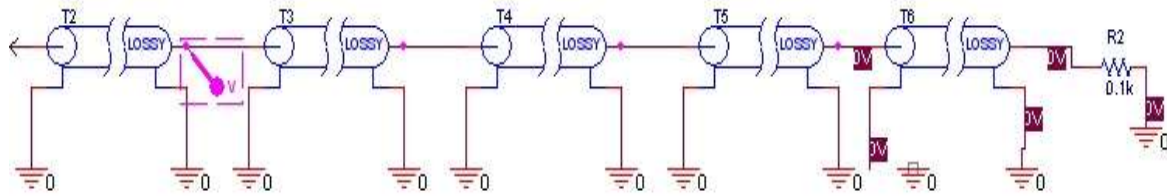
Коефициентът на предаване за зависимите източници се изчислява с израза:

$$h = \frac{e_{33}}{e^s} \quad (7)$$

където  $e_{33}$  е диелектрична константа на натиск, а  $e^s$  е диелектрична константа на огъване за пиезо керамичния материал.

Следващата стъпка е предлагане на пълен модел за симулация на ултразвуковия трансдюсерен елемент. Пълният модел включва представения по-горе модел и модел за симулация на средата, в която се извършва разпространението на ултразвуковата вълна. Моделът за симулация на средата е представен на фигура 2. Симулацията се извършва

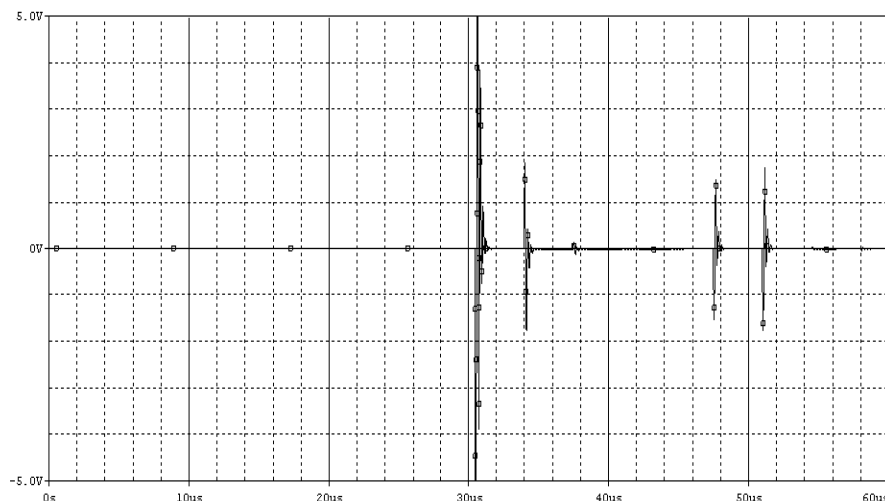
в Pspice среда (ползва се безплатна студентска версия на продукта). Предлага се за опитен образец да се използва цилиндрично тяло с външен размер – 20 mm, вътрешен отвор – 10 mm, и съответно дебелина на стената – 5 mm. Предлага се цилиндричното тяло да бъде поставено във вана с вода. Цилиндричното тяло е изработено от плексиглас.



**Фиг. 2. Модел за симулация на средата**

Параметрите на водата се доближават до най-голяма степен до тези на меките тъкани. Ултразвуковият трансдюсер контактува непосредствено с водата и работи на честота 5 MHz. Той се управлява от източник на правоъгълен импулс. Разстоянието на PZT трансдюсера до образца се приема за 45 mm. Това разстояние се описва с предавателна линия T2. Предавателни линии T3 и T5 описват дебелината на стената на образца, който попада на пътя на разпространяващата се ултразвукова вълна. Те се задават с дължина на линията 5 mm. Предавателна линия T4 описва водата в средата на отвора и се задава с дължина 10 mm. Предавателната линия T6 описва водната среда до дъното на ваната и се задава с дебелина 20 mm. Изчисленията на всички елементи, включени в симулационния модел, са на базата на представените по-горе формули и са подробно описани в специализираната литература [6].

Резултатът от симулацията е представен на фигура 3. От представената симулация се виждат четири отразени ехо сигнала. Те са излъчени от преходите вода-плексиглас и плексиглас-вода за първата повърхност на образца. Втората двойка отразени ехо сигнали са за долната повърхност на образца и представят преходите вода-плексиглас и плексиглас-вода.



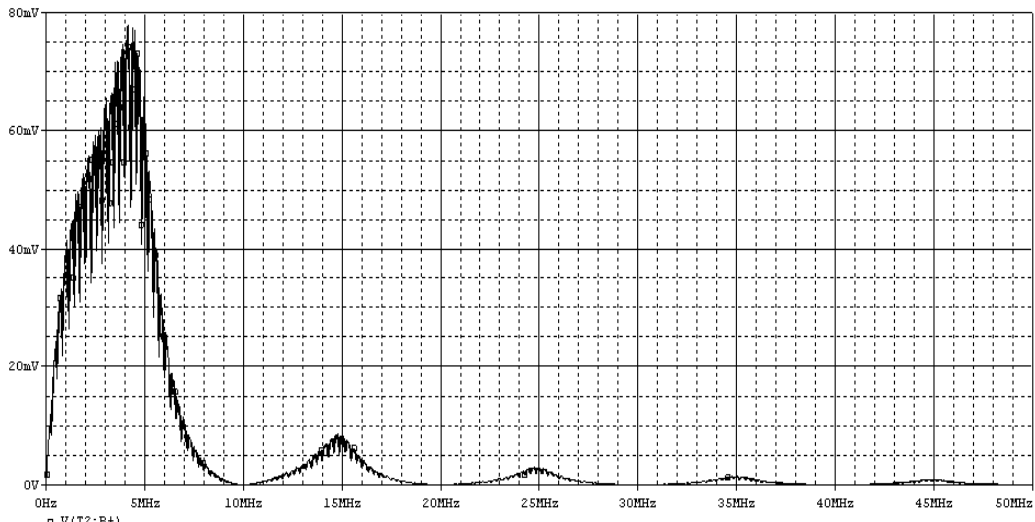
**Фиг. 3. Резултатът от симулацията на пиезо керамичен трансдюсер**

По измерените времеви интервала между двойките импулси и съответни изчисления, въз основа на скоростта на разпространение на УЗ в материалите, може да се определи дебелината на образца. Получената дебелина на цилиндричното тяло



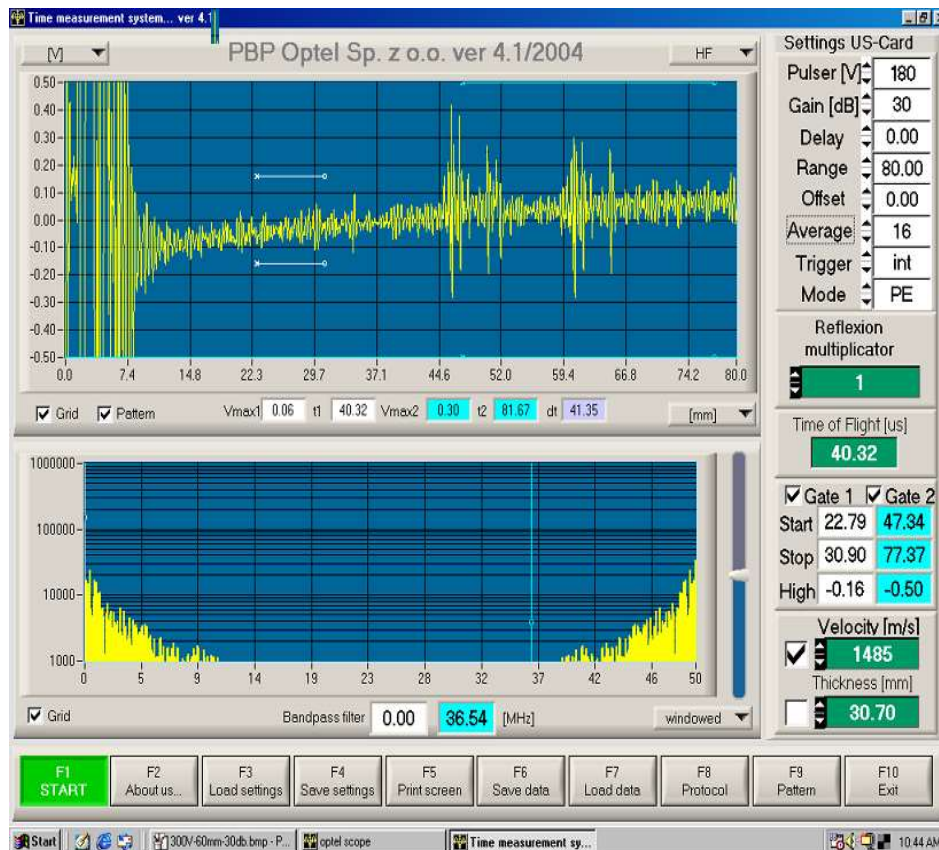
съответства на 5 mm. Тя съответства на предварително зададените размери в симулацията.

На фигура 4 са представени сигналите в честотния спектър. Вижда се, че централната работна честота на транзюсера е 5 MHz.



Фиг. 4. Сигналите от симулацията в честотния спектър

Експерименталните изследвания с PZT транзюсер и опитния образец са представени на фигура 5. Извършени са експериментални изследвания с PZT транзюсер и опитния образец, поставен във вана с вода, при същите условия, както зададените в симулацията.



Фиг. 5. Експерименталните изследвания с пиезо керамичен транзюсер

Експерименталните изследвания са извършени с ултразвукова платка на полската фирма Optel [7]. Използваният трансдюсер е на същата фирма, като специално е разработен за нужните изследвания с централна резонансна честота 5 MHz. За визуализация е използван специализиран софтуер на фирмата производител. Избрано е представянето на отразените ехо импулси да бъде в милиметри, а не по време. Тук също се виждат 4 отразени ехо сигнали, съответно от преходите вода-плексиглас и обратно. Можем да отчетем, че дебелината на стените на образеца съответства на 5 mm, което отговаря на действителните размери на реалния образец. Тези размери се препокриваха и с получените при симулацията, което гарантира адекватността на предложения симулационен модел.

### 3. Заключение

От представените по-горе резултати за предложения модел и извършените симулации и експериментални изследвания могат да се направят следните по-важни изводи и заключения:


1. Предложеният модел на PZT УЗ трансдюсерен елемент покрива всички изисквания за симулация.
2. Получените резултати от симулационните изследвания се доближават с много голяма степен до предварително зададените размери на образеца.
3. Получените експериментални резултати не се отличават съществено от размерите на образеца, което потвърждава адекватността на предложения модел на PZT елемент.

### Благодарности

Докладът е спонсориран от изследователска програма на проект ПД4 2019 г. при ФНИ на ТУ-Варна.

### Литература

1. Szabo T., Diagnostic ultrasound, Ed. by Elsevier, 2004, 250 p.
2. Goldberg R., Smith W., Ultrasound – transducer, CRC Press, New York, 2004, 220 p.
3. Daskalov I., Ultrasound diagnostic, Patras, Greece, 1996, 30 p.
4. Leach W., Controlled source analogues circuits and Spice model for piezoelectric transducer, IEEE Trans. UFFC, vol. 41, Jan., 1994, pp. 60-66.
5. Deventer. A., Lofqvist T., PSpice simulation of ultrasonic system, IEEE Trans. UFFC, vol. 47, July, 2000, pp. 1014-1024.
6. Puttmer A., Hauptmann P., Spice model for lossy piezoceramic transducer, IEEE Trans. UFFC, vol. 44, Jan., 1997, pp. 60-66.
7. Optel, Ultrasound transducers – Techniques manual, Poland, 2004, 10 p.

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г. София 29.11 – 30.11.2018 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	декември 2019 г.

## Design of Phantom for Testing of Ultrasound Medical Equipment

Emilian BEKOV, Plamen ANDREEV

Technical University Varna  
Studentska Str. 1, Varna, 9010, Bulgaria  
E-mail: [emilian.bekov@tu-varna.bg](mailto:emilian.bekov@tu-varna.bg)

### Abstract

In this paper a design of phantom for testing of ultrasound medical equipment is made. The basic parameters and requirements for phantom are presented. The real experiments with design phantom and ultrasound medical equipment are shown. The conclusion results for design and experiment of phantom are given.

**Keywords:** ultrasound, phantom, ultrasound equipment

## Проектиране на фантом за тестване на ултразвукова медицинска апаратура

Емилиян БЕКОВ, Пламен АНДРЕЕВ

### 1. Увод

В последните години ултразвуковата медицинска диагностика намира все по-широко приложение в образната диагностика. Този факт се дължи преди всичко на две основни причини. Първата причина е свързана с безвредността на апаратурата, което я прави незаменима при изследвания в акушерството. Втората причина е свързана с все по-доброто качество на ултразвуковото изображение, което се доближава до качеството на изображенията от други образни диагностични (Компютърен томограф или Ядрено-магнитен резонанс). Качеството на тази апаратура до голяма степен зависи от получения образ и допълнителните възможности за обработка на изображението. Много важно е и точността на различните видове измервания, които определят важни диагностични параметри за по-прецизна диагностика. Следователно, качеството на изображенията и точността при измерванията са едни от основните параметри определящи качествата на ултразвуковата (УЗ) медицинска диагностична апаратура. Един от начините да се проверяват качествата на апаратурата е да се разработят фантоми за проверка на точността на измерванията и за качеството на изображенията. Целта на настоящата публикация е да се предложат сравнително евтини и лесно достъпни варианти за създаване на ултразвукови фантоми.

## 2. Изложение

От направения увод може да се направи заключението, че разработването на фантоми за ултразвукова медицинска диагностична апаратура е важен момент за проверка на качеството на апарата. При разработването на фантома от първостепенно значение е материалът, от който се произвежда фантомът [1]. Материалът трябва да се доближава с максимална степен до акустичните параметри преди всичко на меките тъкани. Средната скорост на разпространението на звука трябва да е около 1540 m/s. Акустичният импеданс трябва да е в границите от около 1,5 до 2,4 Mrayl. Затихването трябва да е в граници от 0,5 до 1 MHz/cm<sup>2</sup>.

Следователно, изборът на материала е от голямо значение при разработката на фантома. От литературата са познати материали като Agar или Zerdine, които имат сходни параметри с тези на меките тъкани. С цел да се намали цената на фантома и да се създаде възможност за бърза и лесна реализация, се препоръчва използването на лесно достъпни материали. Такива материали могат да бъдат плексиглас (Acrylic Plexiglas ) или епоксидна смола (Epoxy Resin). Тези два материала имат сравнително сходни параметри, като те не се различават значително от тези в меките тъканни структури. Другото им съществено предимство е, че са широко достъпни и лесни за обработка.

При разработката на фантома е важно да могат да се проверят няколко важни и съществени параметри. Да се реализират поредица отвори в материала за да се провери надлъжната и напречната разделителна способност на апарата [2]. Вариант за проверка на напречната разделителна способност е показан на фигура 1 [3].



**Фиг. 1. Фантом за проверка на напречната разделителна способност**

Вариант за проверка на надлъжната разделителна способност е показан на фигура 2 [4]. Допълнително от предложените фантоми от фигура 1 и 2, могат да се измерят размерите на отворите с вградените функции за измерване в апарата, като: разстояние, обиколка, площ, обем и др. Така допълнително ще се провери точността на апаратурата при различните видове измервания.



**Фиг. 2. Фантом за проверка на надлъжната разделителна способност**

Другата функция, която може да бъде проверена, е различимостта на градациите на сивото при ултразвуковото изображение [5]. Вариант за проверка на градациите на сивото при ултразвуковото изображение е показан на фигура 3. Така се проверява другото важно качество на ултразвуковото изображение, а именно контрастът на изображението. Във фантома могат да се направят поредица от отвори с еднакъв диаметър, като в тях се поставят различни видове материали, които имат различен акустичен импеданс (например: желязо, стъкло, текстолит и др.). Така ще могат да се проверят градациите на сивото и също така различните настройки на апарата за промяна на гамата на сивото [6].



Фиг. 3. Фантом за проверка на градациите на сивото

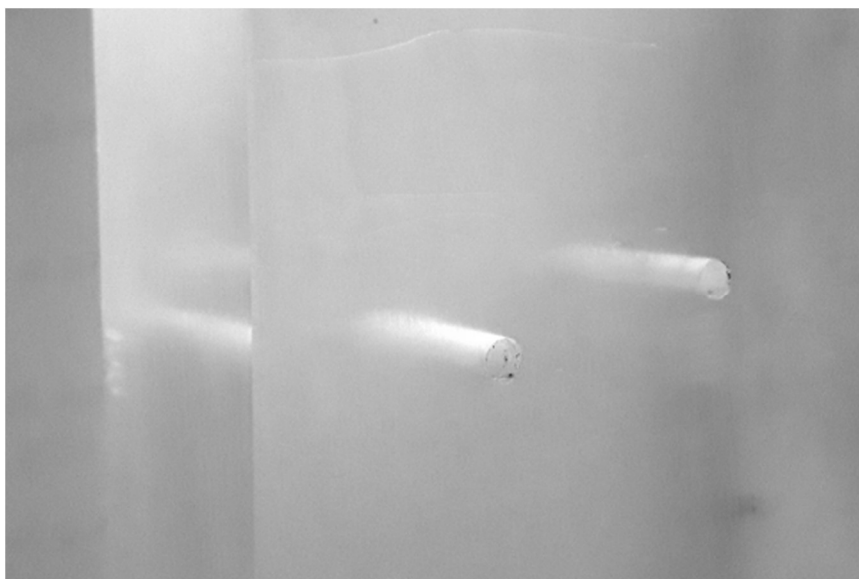
Предложените варианти за фантоми са основно за проверка на апарата предимно в В режим (B mode). Възможно е да се реализира и фантом с два отвора, предложен за експериментално изследване от авторите на фигура 4. Чрез подходяща помпена система може да се прекара течност със скорост, съизмерима с тази на скоростта на движение на кръвта [7]. Така може да се използва предложеният фантом за проверка на ехографа и в режим на доплер (Doppler) [8]. Ако системата прекарва течността в различна посока в двата отвора, може да се провери ехографа и в режим на цветен доплер (color Doppler). При посоченият вариант могат да се проверят и вградените функции за измерване в ехографа, като скорост на движение, дебит, посока и др.

При разработката на фантоми е удачно да се отчита и типът на ултразвуковия трансдюсер. При проверка на линейни трансдюсери е удачно отворите във фантома да бъдат в близката зона – от 1 до 4 см. При проверка на конвексни трансдюсери е удачно отворите да бъдат в далечната зона – от 6 до 10 см. Това ще даде възможност за изследване на трансдюсера в дълбочина. Като бъдеща работа в разработката на фантоми за ултразвукови трансдюсери е разработка на фантом за обемни трансдюсери. Във фантома може да се вгради триизмерен обект, който да бъде разпознат с 3D ултразвуково сканиране. Така от една страна ще се провери работата на обемния трансдюсер, а от друга страна ще се провери работата на софтуера за 3D реконструкцията на изображението.

### 3. Експериментални изследвания

За проверка на ултразвуков апарат с линейен трансдюсер се предлага реализацията на два ултразвукови фантома. Те са реализирани за сканиране в близката фокусна зона, а именно – от 1 до 4 см.

Първият фантом е от бял плексиглас, показан е на фигура 4. В него са направени два преходни отвора с диаметър 2 mm. Двата отвора са на разстояние 12 mm. Този фантом може да се използва за проверка на разделителната способност. Чрез него могат да се проверят и вградените функции за измерване в ехографа. Отворите дават възможност и за проверка в режим на доплер.



**Фиг. 4. Фантом с два отвора за проверка на УЗ апарат**

Вторият фантом е изработен от цветен плексиглас, показан е на фигура 5. Той представлява цилиндър с външен диаметър 20 mm, в който е направен отвор с размер 10 mm. Това означава, че стената на цилиндъра е с размер 5 mm. При него може да се провери възможността за визуализация на обекта в В режим на работа на ехографа. Също така могат да се проверят и възможностите на вградения в апарата софтуер за измервания. Тук преди всичко се измерват основно разстояния.



**Фиг. 5. Фантом с цилиндрична форма за проверка на УЗ апарат**

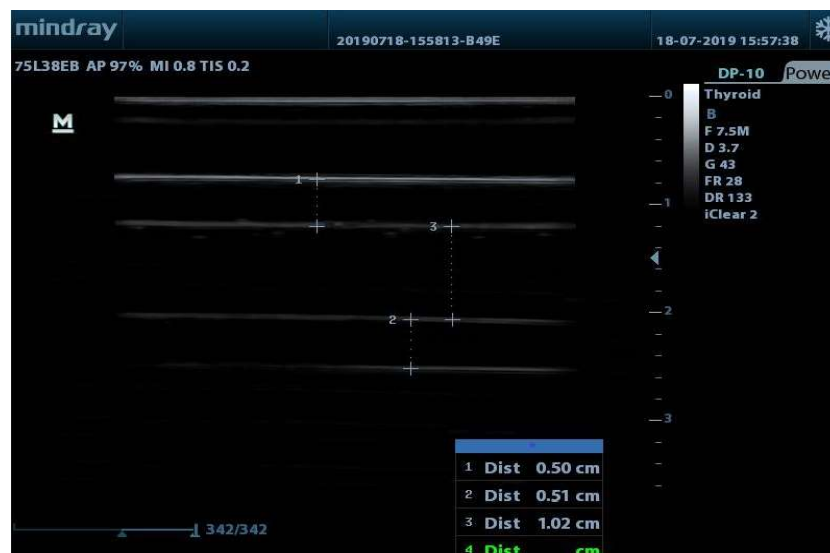
Експериментите са извършени чрез поставяне на фантомите във вана с вода. Това се прави с цел доближаване на изследванията до среда съизмерима на тази на меките тъканни структури. Водата по акустични параметри не се различава значително от тях. Ехографските изображения са получени от ултразвуков апарат на фирмата Mindray модел DP-10.

На фигура 6 е показано ехографското изображение на първият фантом. Направени са измервания на диаметрите на двата отвора и на разстоянието между тях. От направените измервания се вижда, че точността на измерванията до голяма степен се покрива с действителните размери.



Фиг. 6. Фантом с два отвора и измервания на разстоянието между тях

На фигура 7 е показано ехографското изображение на вторият фантом. На фигурата се вижда формата на цилиндрично тяло с отвор във вътрешността. Това доказва качеството на изображението в В режим. На фигурата също са показани извършените измервания на фантома с вградения софтуер на апарата. Вижда се голямо съвпадение на измерванията с действителните размери на обекта.



Фиг. 7. Фантом с цилиндрична форма с измервания на диаметъра на отвора

## 4. Заключение

От гореизложеното могат да се направят следните основни заключения и изводи:

1. Предложените фантоми са подходящи за изследване възможностите на ултразвуков апарат работещ в В режим. Получените образи съвпадат с формата на предложените фантоми.
2. Предложените фантоми могат да се използват за проверка на заложените в ехографските апарати софтуерни възможности за различните типове измервания. Таблиците с измерените разстояния чрез софтуера на апарата се доближават с много голяма точност до действителните размери на фантомите.

## Благодарности

Докладът е спонсориран от изследователска програма на проект ПД4 2019 г. при ФНИ на ТУ-Варна.

## Литература

1. Pierce H., B. Norfolk, Ultrasound Phantoms: B-Mode, Doppler and Others, AARM, 2010, pp. 1-8.
2. Near field ultrasound phantom, [www.cirsinc.com](http://www.cirsinc.com), 2013, pp. 1-6.
3. Multipurpose Tissue/Cyst Ultrasound Phantom, Cardinal Health, Radiation Management Services, 2003, pp. 1-8.
4. Multi-Purpose Phantom – N-365, [www.kyotokagaku.com](http://www.kyotokagaku.com), 2014, pp. 1-10.
5. General Purpose Multi-Tissue Ultrasound Phantom, [www.cirsinc.com](http://www.cirsinc.com), 2002, pp. 1-8.
6. Multi-Purpose Multi-Tissue Ultrasound Phantom, Model 040 GSE, [www.cirsinc.com](http://www.cirsinc.com), 2014, pp. 1-10.
7. Kenwright D., N. Lavarack, et al., Wall-less Flow Phantom for High-Frequency Ultrasound Applications, Ultrasound in Medicine & Biologic, 2014, pp. 1-6.
8. Zhou W., D. Glenn; A durable ultrasound phantom for trainees using common Materials, The Royal Australian and New Zealand College of Radiologists, 2014, pp. 1-8.



	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г. София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	декември 2019 г.

## Study of Microprocessor System for Detection of Self Noise of an Underwater Object in Real-Time

Iliyan ILIEV<sup>1</sup>, Alexander KOLAROV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Naval Academy “N. Vaptsarov”, Varna, Bulgaria  
e-mails: [i.iliev@nvna.eu](mailto:i.iliev@nvna.eu), [i.iliev@naval-acad.bg](mailto:i.iliev@naval-acad.bg)

<sup>2</sup> Institute of Metal Science, Equipment, and Technologies with Hydro- and Aerodynamics Centre “Acad. A. Balevski” at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria  
e-mail: [aleksandar\\_kolarov@abv.bg](mailto:aleksandar_kolarov@abv.bg)

### Abstract

The report shows a variant of a microprocessor device for detecting a passive signal in real time based on a microcontroller. The system is designed to process signal from a noisy object in real time using both broadband and narrowband detection methods. The potential ability of such systems to detect a signal at the required distance depends largely on the level of their own noise. The report describes two assessment decisions at this level.

**Keywords:** signal/noise, noise factor, self noise, likelihood ratio, microcontroller, SINAD, THD.

## Изследване на микропроцесорна система за откриване на собствен шум на подводен обект в реално време

Илиян ИЛИЕВ, Александър КОЛАРОВ

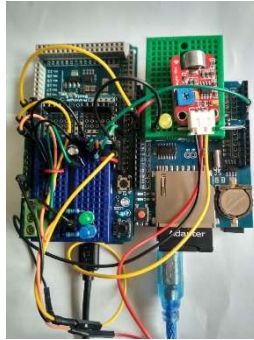
### Увод

Разработването на електронно устройство за откриване на обект по неговите собствени полета изисква да се оцени шумовият му фактор  $F$ , който се дефинира чрез отношението:

$$F = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} \quad (1)$$

където  $(S/N)_{in}$  е отношението сигнал/шум на входа, а  $(S/N)_{out}$  е отношението сигнал/шум на изхода.

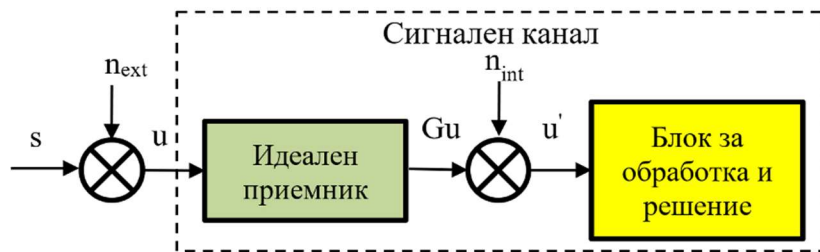
Този параметър определя най-ниското ниво на полезния сигнал, което може да бъде открито в слаб входен сигнал на фона на шума. В доклада се изследва нивото на собствен шум в цифров сигнален канал състоящ се от микрофон (или хидрофон), фронт-енд усилвател и микроконтролер "Arduino" от серията DUE, фигура 1.



фиг. 1. Сигнален канал на базата на микроконтролер "Arduino DUE".

## 1. Оценка на шумовото ниво в цифров акустичен канал.

В общия случай цифровият сигнален канал, се представя с блокова схема показана на фигура 2.



фиг. 2. Блокова схема на устройство за откриване.

На входа на сигналия канал източникът на сигнално поле създава полезен сигнал с ниво  $s$ . Сигналят на входа на идеалния приемник  $u$  представлява адитивна смес на  $s$  с шумовия сигнал на средата  $n_{ext}$  и се представя с израза:

$$u = s + n_{ext} \quad (2)$$

В реалния приемник към усиленият входен сигнал се наслабва и собственият шум на приемника  $n_{int}$ , и сигналят на входа на блока за обработка  $u'$  се разглежда като сума от:

$$u' = Gu + n_{int} = Gs + (Gn_{ext} + n_{int}) \quad (3)$$

където,  $G$  е коефициент на усилване на приемния канал.

Поради факта, че присъствието на полезен сигнал на входа на приемника се разглежда като нестационарен по време и пространство процес, а наличието на шумов сигнал като стационарен по време и пространство процес за вземане на решението с определени вероятности за пропуск или лъжлива тревога в тези системи се използва диференциалният подход. При него блокът за обработка изчислява на изхода си отношението на правдоподобие на входния сигнала и го сравнява с прагово ниво  $L$ : [1],[2]

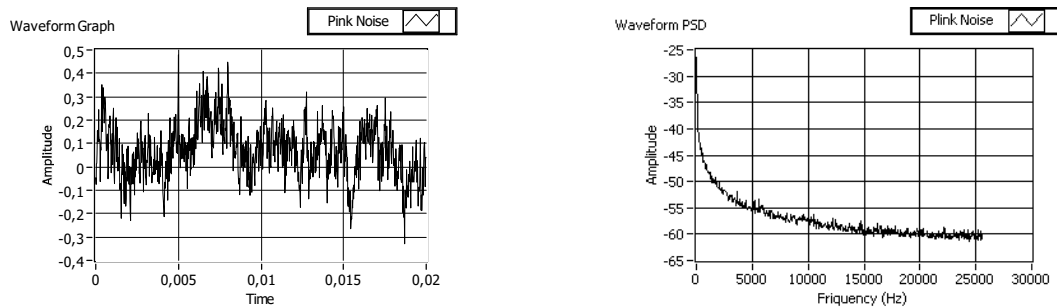
$$\frac{w(u'/s)}{w(u'/n)} = L \quad (4)$$

където,  $w(u'/s)$  е функция на правдоподобие на входния сигнал при наличие на полезен сигнал,  $w(u', n)$  е функция на правдоподобие на входния шумов сигнал.

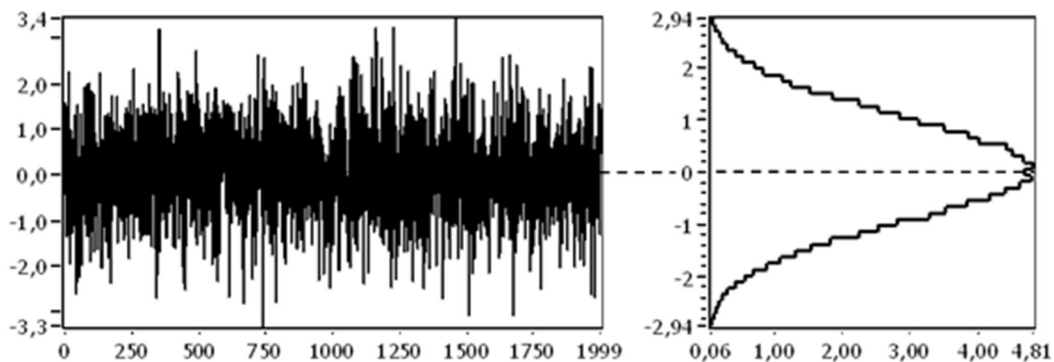
Доколкото прагавото ниво зависи от нивото на шума, то за оценка на потенциалната сигнална чувствителност на канала ( $n_{ext} = 0$ ) е необходимо да се

определи нивото на собствения шум на сигналния канал. Той се характеризира във времевата област чрез моментната амплитуда, а в честотната чрез спектралната плътност на амплитудата на шума.

Собственият шум на активните и пасивни елементи изграждащи канала е съставен от два вида шум: розов и Гаусов. Видът на гаусов шум с  $u_{\text{rms}} = 1$  (V) и розов шум с амплитуда  $u = 1$  (V) в честотна лента 25.5 kHz, във времевата и честотна области са показани на фигури 3 и 4.



фиг. 3. Розов шум представен: а) във времевата област, б) в честотната област.

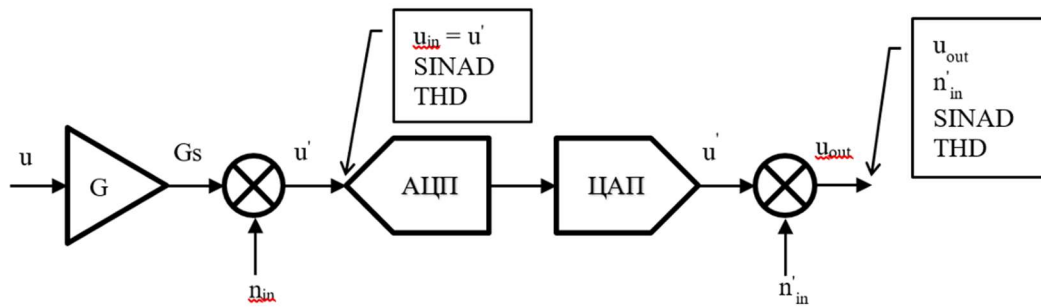


фиг. 4. Гаусов шум представен във времевата област и с хистограма на амплитудата.

В цифровите системи към този шум се наслагва и шумът на блоковете АЦП и ЦАП  $p_{in}$ , който е сума от шума от квантоване, "Sample jitter" шум, шум от висшите хармоници и аналогов шум. Шумът от АЦП е основен фактор за намаляване на точността на преобразуването на сигнала. В доклада са показани резултати от оценка на собствения шум на изследваната система чрез имитационно моделиране и реално измерване.

За изследване на шумовият фактор на сигнален канал по метода на имитационното моделиране е разработен софтуерен модел на сигналния канал в среда на LabView, чиято блокова схема е показана на фигура 5.

Входни процеси за имитационния сигнален канал се явяват изследвания сигнал -  $u$ , гаусовия и розов шум на системата -  $p_{in}$ , които се симулират със стандартните виртуални инструменти на програмната среда. Средата предоставя и стандартни виртуални инструменти на АЦП с максимално ниво на квантоване 32 bit и ЦАП. Изходните величини, които се изчисляват са ефективната стойност на сигнала на входа на АЦП с неговите параметри SINAD (Signal in Noise and Distortion) и THD (THD Plus Noise), и ефективната стойност на изходния сигнал от ЦАП с неговите параметри SINAD и THD. [3],[4]



фиг. 5. Блокова схема на софтуерен модел на сигнален канал.

Моделът позволява да се симулира работата на сигнален канал при различни величини на вътрешен шум и нива на квантоване в АЦП. Чрез него шумът от АЦП и ЦАП може да се изчисли чрез формулата:

$$n'_{in} = u_{out} - u'_{eff} \quad (5)$$

Измерването на собствения шум на цифров сигнален канал чрез реално измерване е реализирано чрез въвеждане на данните от АЦП на канала за еталонен сигнал по сериен порт в компютър, където в средата на Excel се представят на графика изчисляват  $\min()$ ,  $\max()$ ,  $\text{stdev}()$  и  $\text{average}()$  на данните. [5] Това позволява да се изчисли максималната амплитудата на шума от пик до пик:

$$n_{pp} = \max () - \min () \quad (6)$$

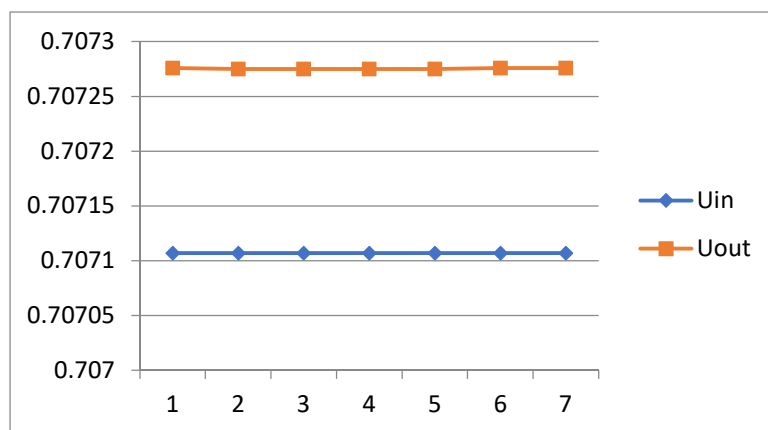
RMS на шума на канала е равен на изчисленото стандартното отклонение при условие, че на входа е подаден еталонен сигнал и външния шум има приблизително гаусово разпределение.

## 2. Резултати за нивото на собствен шум получени по метода на имитационното моделиране.

Представени са резултатите получени при два варианта на използване на цифров сигнален канал, първият с ниво на квантоване 8 bit, а вторият с ниво на квантоване 12 bit. Резултати, получени при тестване на сигнален канал със синусоидален сигнал с честота 1 (kHz) и амплитуда 1 (V) при работа с идеален приемник и квантоване на сигнала с 8 bit, са показани в таблица 1 и на фигура 6. В таблицата  $u_{in}$  е ефективната стойност на сигнала преди АЦП,  $u_{out}$  е ефективната стойност на сигнала след ЦАП и  $\sigma(u_{out})$  е грешката, която се получава в резултат на двойното преобразуване.

Таблица 1. Параметри на входния и изходен сигнал на 8 bit идеален цифров сигнален канал

$u_{in}$ (V)	SINAD (dB)	THD (dB)	$u_{out}$ (V)	SINAD (dB)	THD (dB)	$\sigma(u_{out})$ (mV)
0.707107	116.8650	1.43E-06	0.707276	39.82691	0.010201	0.169
0.707107	116.8743	1.43E-06	0.707275	39.82647	0.010202	0.168
0.707107	116.9558	1.42E-06	0.707275	39.82853	0.010199	0.168
0.707107	117.1046	1.40E-06	0.707275	39.82527	0.010203	0.168
0.707107	116.7244	1.46E-06	0.707275	39.82751	0.010201	0.168
0.707107	116.9560	1.42E-06	0.707276	39.82909	0.010199	0.169
0.707107	116.7787	1.45E-06	0.707276	39.82779	0.010200	0.169

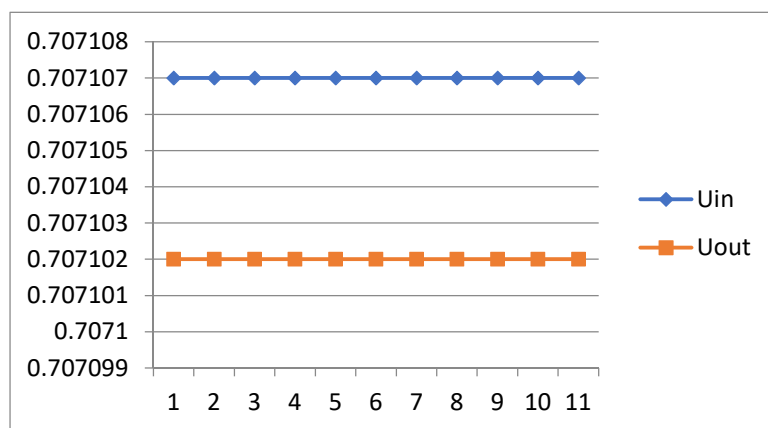


фиг.6. Графика на ефективните стойности на амплитудата (V) на входния и изходен сигнал на идеален 8 bit цифров сигнален канал.

Резултати, получени при тестване на сигнален канал със синусоидален сигнал с честота 1 (kHz) и амплитуда 1 (V) при работа с идеален приемник и квантоване на сигнала с 12 bit са показани в таблица 2 и на фигура 7.

Таблица 2. Параметри на входния и изходен сигнал на 12 bit идеален цифров сигнален канал.

$u_{in}$ (V)	SINAD (dB)	THD (dB)	$u_{out}$ (V)	SINAD (dB)	THD (dB)	$\sigma(u_{out})$ ( $\mu$ V)
0.707107	116.862	1.44E-06	0.707102	63.05995	0.000703	5
0.707107	116.9536	1.42E-06	0.707102	63.06	0.000703	5
0.707107	116.7687	1.45E-06	0.707102	63.05922	0.000703	5
0.707107	116.828	1.44E-06	0.707102	63.0603	0.000703	5
0.707107	116.8134	1.44E-06	0.707102	63.06043	0.000703	5
0.707107	116.7886	1.45E-06	0.707102	63.06006	0.000703	5
0.707107	117.0562	1.40E-06	0.707102	63.05978	0.000703	5

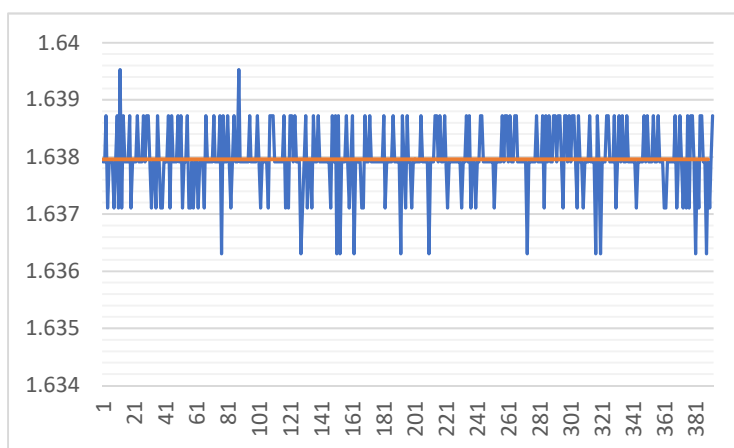


фиг.7. Графика на ефективните стойности на амплитудата (V) на входния и изходен сигнал на идеален 12 bit цифров сигнален канал.

От сравнението на резултатите по параметър SINAD моделът показва, че увеличаването на нивото на квантоване с 4 bit подобрява отношението с 24 (dB).

### 3. Резултати за нивото на собствен шум получени при реално измерване.

На фиг. 8 е показана графика на шумов сигнал получен от аналоговия вход A0 на микроконтролер "Arduino" Due при конфигурация на АЦП за квантоване с 12 bit (4096 нива). За целта микроконтролерът е включен да работи с отворен вход A0. Резултатите за изчислените статистически характеристики на собствения шум са показани в таблици 3 и 4.



фиг.8. Графика на шумов сигнал от аналоговия вход A0 на Arduino Due при 12 bit квантоване.

Таблица 3. Изчислени стойности на статистическите параметри на входния шум.

u (V)	M(u) (V)	D(u) ( $\mu$ V)	$\sigma(u)$ (mV)
1.6379150	1.63796	0.33	0.572
1.6379150			
1.6387208			
1.6371094			
1.6379150			
1.6379150			
1.6379150			
1.6371094			
1.6379150			

В таблица 3 са показани десет последователни стойности от въведения шумов сигнал, неговата средна стойност  $M(u)$ , дисперсия  $D(u)$  и средно квадратично отклонение  $\sigma(u)$ . Средната стойност на сигнала се дължи на това, че входът има високо ниво, когато е отворен.

**Таблица 4. Изчислени стойности за най-ниската, най-високата и  $u_{pp}$  стойности на шумовото напрежение**

$\min(u)$ ( $\mu V$ )	$\max(u)$ ( $\mu V$ )	$u_{pp}$ ( $\mu V$ )
0.002	2.74	2.74

#### **4. Заключение.**

Оценката на нивото на собствен шум на цифрова система за обработка на активен или пасивен сигнал е ключов фактор при избор на микропроцесорна платформа за решаване на определена задача. В доклада са показани два варианта за решаване на този проблем, които взаимно се допълват. Чрез методът на имитационното моделиране лесно може да се оценят параметрите на изходния сигнал при зададени параметри на входния сигнал, собствен шум и нива на квантоване на сигналния канал, което позволява да се направи обоснован избор на микроконтролер. Реалното измерване би потвърдило или отхвърлило взетото решение и ще се използва за усъвършенстване на имитационния модел.

#### **Литература**

1. Oppenheim, A.V. and R.W. Schaffer, Digital Signal Processing. Pearson, 2015.
2. G. Richard Curry, Radar System Performing Modeling, Artech House, London, 2005.
3. Walt Kester, ADC Input Noise: The Good, The Bad, and The Ugly. Is No Noise Good Noise?, Analog Dialogue 40-02, February 2006.
4. Nasser Kehtarnavaz and Namjin Kim, Digital Signal Processing System-Level Design Using LabVIEW, Elsevier Inc., ISBN 978-0-7506-7914-5, 2005.
5. Dave Erickson's, Analog performance, particularly of Due's 12 bit ADC, [http://www.djerrickson.com/arduino/duo\\_adc.html](http://www.djerrickson.com/arduino/duo_adc.html), 2013.

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г. София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	декември 2019 г.

## Underwater Sound Source Position Estimation with Four Hydrophones Time Difference of Arrival Estimation

Nikolai KOLEV, Peycho KALOYANCHEV

Naval Academy “Nikola Vaptsarov”, Varna, Bulgaria  
e-mails: [nz.kolev@nvna.eu](mailto:nz.kolev@nvna.eu), [p.kaloyanchev@nvna.eu](mailto:p.kaloyanchev@nvna.eu)

### Abstract

In the paper an underwater source position estimation algorithm is presented. The algorithm is based on the measured time difference of arrival (TDOA) of the unknown source acoustic signal to four hydrophones with known positions. A set of points is found, corresponding to the measured TDOA's from all possible points in the volume to the positions of the known hydrophones. Later minimum set distance constraints are applied to the hyperbolic sets of points and set intersection is carried out to define common set points corresponding to source location. Simulated and real test tank results are presented. Accuracy of the algorithm is estimated with standard deviation (STD) of the computed position.

**Keywords:** underwater sound, hydrophones, source position estimation, TDOA, topology, algorithm, Matlab

## Определяне на местоположението на подводен източник на звук чрез измервания на времезакъснението на сигнала в четири хидрофона

Николай КОЛЕВ, Пейчо КАЛОЯНЧЕВ

### 1. Въведение

Определянето на местоположението на земни обекти е предмет на геолокацията, а чрез радиосигнали – на радиолокацията и радионавигацията. Подводните позициониращи системи използват звукови сигнали, като принципите на системите са подобни на тези на радионавигационните системи. Определянето на местоположението чрез измерване на разлики във времезакъснението или фазата на радиосигнали е в основата на принципа на работа на редица широко използвани радионавигационни системи като Loran-C, Decca Navigator и др. В момента принципът на измерване на разлики в разстоянията се използва в глобалните сателитни позициониращи системи като GPS. В последните години нараства използването на мобилни и роботизирани системи, работещи в мрежа, като при тях определянето на местоположението много често се извършва чрез собствени локални позициониращи системи за повишаване на точността. В частност това са и разликови хиперболични системи подобни на системата Loran-C. При наличие на източник на звукови сигнали този принцип се използва за локализация на източника в подводната акустика, биоакустика и др. Една от задачите по проекта „Адаптивна сензорна мрежа за подводно наблюдение“ е определянето на местоположението на подводен източник на звук, както и на самите сензори в сензорната мрежа [1]. Определянето на местоположението се извършва по



метода на трилатерацията чрез измерване на интензивността на подводен звуков сигнал, пропорционална на разстоянието. Методологията е експериментирана в хидроакустичния басейн на ВВМУ [2]. В изследвания по проекта чрез моделиране е определено местоположението на източник на звук в микрофонна сензорна мрежа [3]. Определянето на параметъра времезакъснение на подводни звукови сигнали се разглежда в [4]. Извършен е натурен експеримент като чрез крос-корелация е определено както времезакъснението, така и разстоянието между сензорите. Излъчването на подводен звуков сигнал позволява определянето на местоположението на източника чрез сравняване на приети сигнали във вертикална подводна антенна решетка със сигнали, получени в хидрофоните чрез моделиране на разпространението на подводен звук с преотражения на сигнала в подводния канал [5]. При този метод се изчислява максималната двумерна крос-корелация между измереното и моделираното звуково поле в равнината на вертикалната хидрофонна решетка за всички възможни местоположения на източника по дълбочина и разстояние. Максималната стойност на крос-корелацията съответства на местоположението на източника по дълбочина и разстояние. Експлозивната техника осигурява подводното наблюдение и локализацията на военноморски сили в началото, когато технологията на електроакустиката и обработка на сигналите не е позволявала използването на друг вид звукови сигнали. В оперативен режим на работа на тези системи се използват подводни заряди, взривявани в близост до хидроакустичен буй – сензор, като по такъв начин се създава широкополосен звуков сигнал, който се отразява от подводни цели (подводница). Тази техника за определяне на местоположението на подводница под вода, е въведена в практиката на военноморските сили през 1956 г [6].

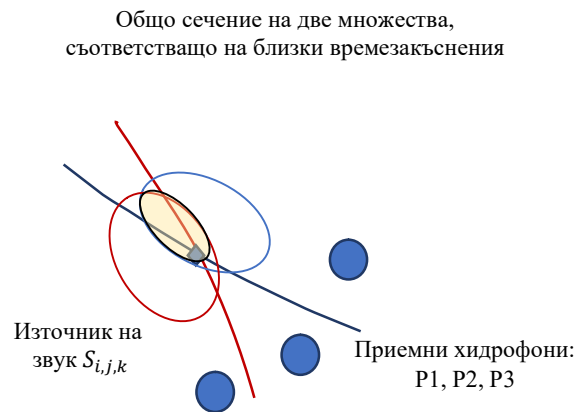
При наличие на експлозивен източник на звук измерването на времезакъсненията на импулсния сигнал до подводни приемни хидрофони може да се използва за определяне на местоположението на подводната експлозия [7]. В настоящото изследване се разработва методология за определяне на тримерното местоположение на подводен източник на звук чрез измерване на времезакъсненията на импулсни звукови сигнали. На този етап е извършен експеримент в хидроакустичен басейн на ВВМУ. Съществуващите алгоритми за определяне на местоположението на източник на звук се базират на измерване или на времезакъснението, или на разстоянието. Изследвани са възможностите на известен алгоритъм и софтуер, наличен в интернет, основаващ се на решение на задачата за локализация с четири приемни сензора [8]. Използва се решение с разлагане в ред на Тейлър на функция, свързана с предполагаемото местоположение на източника и решаване на матрично уравнение за намиране на точното местоположение. Недостатък на този метод е въвеждане на предположение за местоположението на източника. При близост на предположението до истинското местоположение на източника се наблюдава точно решение, но ако е налична разлика (неизвестно местоположение на източника) алгоритъмът определя местоположението с много голяма грешка. При изследването дисперсията на решението за местоположението на източника на звук при различни последователни опити достигна метри. На практика се оказва, че алгоритъмът е неприложим за реални условия на подводни измервания. Това наложи разработване на собствен алгоритъм за тримерна локализация на източник в сензорна мрежа, приложим в подводната акустика.

## **2. Разработване на алгоритъм за определяне на тримерното местоположение на подводен източник на звук**

Известно е, че местоположението на източник на звук в тримерното пространство може да бъде точно определено при наличие на най-малко четири приемни хидрофона, разпределени в пространството по определен начин. Това позволява формиране на три

повърхности на мястото (хиперблоиди), като мястото на източника се определя при тяхното пресичане. При две линии на мястото, получени с три хидрофона, е възможно определяне на местоположението на източника в двумерното пространство – фиг. 1.

От фиг. 1 следва, че ако се намерят множества от точки, свързани с хиперболичните повърхности в областта на вероятното местоположение на източника на звук, е възможно да се намери общо за различните множества сечение, съответстващо на местоположението на източника. За определяне на тримерното местоположение на източник на звук е избран топологичен (геометричен) метод, при който се изчисляват възможните времезакъснения на сигнала в четири приемни хидрофона в тримерна дискретна пространствена мрежа, съответстваща на всички вероятни местоположения на източника. Тези времезакъснения се сравняват с измерените при експеримента, като вероятното местоположение съответства на минималната грешка при сравнението.



**Фиг.1. Пресечна точка на две линии на мястото – хиперболи в двумерното пространство, получени чрез измерване на времезакъсненията в три хидрофона.**

Формират се следните четири множества, съответстващи на всички вероятни времезакъснения на сигнала от неизвестен източник, разположен в дискретна точка  $i, j, k$ , до четирите приемни хидрофона, разположени в точки  $P_1, P_2, P_3, P_4$  с известни координати.

$$\begin{aligned}
 \tau_{i,j,k}^1 &= \left\{ \frac{\|R_{i,j,k}-P_1\|}{c} \right\}; \\
 \tau_{i,j,k}^2 &= \left\{ \frac{\|R_{i,j,k}-P_2\|}{c} \right\}; \\
 \tau_{i,j,k}^3 &= \left\{ \frac{\|R_{i,j,k}-P_3\|}{c} \right\}; \\
 \tau_{i,j,k}^4 &= \left\{ \frac{\|R_{i,j,k}-P_4\|}{c} \right\};
 \end{aligned} \tag{1}$$

където  $0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n, 0 \leq k \leq p$ , съответно  $m, n, p$  – дискретен размер на тримерното пространство от вероятни местоположения на източника.

Формират се три хиперболични множества от точки, съответстващи на разликите във времезакъсненията TDOA между съответно втори, трети и четвърти и първи хидрофон.

$$\begin{aligned}
 TDOA_{i,j,k}^1 &= \{ \tau_{i,j,k}^2 - \tau_{i,j,k}^1 \}; \\
 TDOA_{i,j,k}^2 &= \{ \tau_{i,j,k}^3 - \tau_{i,j,k}^1 \}; \\
 TDOA_{i,j,k}^3 &= \{ \tau_{i,j,k}^4 - \tau_{i,j,k}^1 \}
 \end{aligned} \tag{2}$$

От множествата точки (2), съответстващи на всички възможни времезакъснения до приемните хидрофони се формират нови множества от точки, съответстващи на измерените времезакъснения  $TDOA_m^1$   $TDOA_m^2$   $TDOA_m^3$  с определен толеранс по време:

$$\begin{aligned} Q_{i,j,k}^1 &= \{TDOA_{i,j,k}^1 - [TDOA_m^1 \pm \varepsilon_1]\}; \\ Q_{i,j,k}^2 &= \{TDOA_{i,j,k}^2 - [TDOA_m^2 \pm \varepsilon_1]\}; \\ Q_{i,j,k}^3 &= \{TDOA_{i,j,k}^3 - [TDOA_m^3 \pm \varepsilon_1]\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Формират се нови множества от точки, съответстващи на минимални допустими разстояния между множествата  $Q_{i,j,k}^1$ ;  $Q_{i,j,k}^2$ ;  $Q_{i,j,k}^3$ :

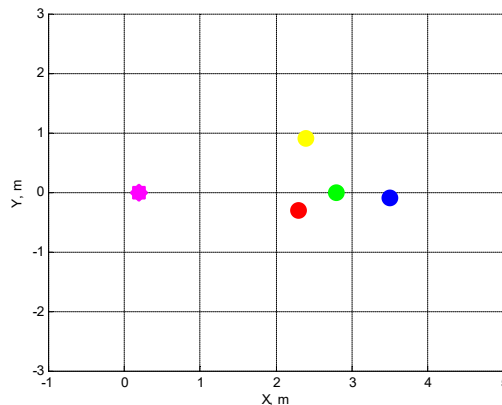
$$\begin{aligned} R_{i,j,k}^1 &= \|Q_{i,j,k}^1 - Q_{i,j,k}^2\| < \varepsilon_2; \\ R_{i,j,k}^2 &= \|Q_{i,j,k}^1 - Q_{i,j,k}^3\| < \varepsilon_2. \end{aligned} \quad (4)$$

$$S_{i,j,k} = R_{i,j,k}^1 \cap R_{i,j,k}^2. \quad (5)$$

Крайното получено множество (5) съответства на дискретни точки в пресечната област на хиперболоидите и е най-близко до вероятното местоположение на източника на сигнала. При това за тези точки е минимизирана разликата между вероятното времезакъснение и измереното такова. Параметърът  $\varepsilon_1$  съответства на допустима стойност на изменение на времезакъснението,  $\varepsilon_2$  съответства на допустима стойност на разлика в разстоянието (грешки при измерването на времезакъснението или грешки в местоположението на приемните хидрофони). По така предложения алгоритъм е съставена програма на Matlab.

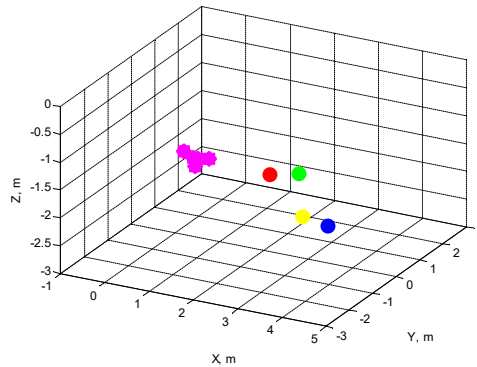
### 3. Експериментални резултати

Разработен е модел за симулация, при който се изчисляват времезакъсненията от виртуален източник до местоположенията на реално разположените хидрофони в басейна. Дискретното множество при симулацията в измервателния обем включва 75000 точки. На фиг. 2 е представено решение на задачата с алгоритъма, представен в част 2. При тази симулация се наблюдава решение с една единствена точка, съответстваща на удовлетворяване на изискването (5).



Фиг. 2. Точка с координати (0.2, 0.0, -1.5), решение съответстващо на истинското местоположение на източника при параметри на симулацията  $\varepsilon_1= 1\mu\text{S}$ ;  $\varepsilon_2= 0.1\text{m}$ .

При следващата симулация на фиг. 3 при същите входни параметри се променя допустимата разлика във времезакъснението  $\epsilon_1$  от 1 на  $10 \mu\text{S}$ , което увеличава броя на точки от вероятни местоположения в областта на изискването (5) чрез увеличаване на толеранса  $\epsilon_1$  в (3). Координатите на точките са представени в таблица 1.

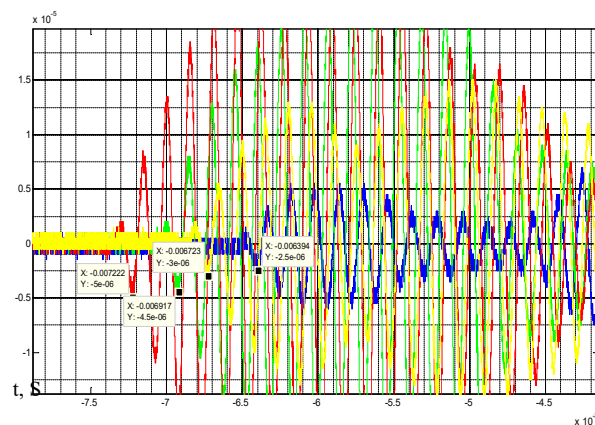


Фиг. 3. Множество точки в обща област при параметри на симулацията  $\epsilon_1 = 10 \mu\text{S}$ ,  $\epsilon_2 = 0.1\text{m}$ .

Таблица 1. Координати на множество от точки в областта на източника от фиг. 3

X, m	Y, m	Z, m
0.2	0	-1.5
0.7	0.1	-1.6
0.7	0.1	-1.6
0.5	0	-1.6
0.5	0	-1.6
0.4	0	-1.6
0.4	0	-1.6
0.5	-0.1	-1.7

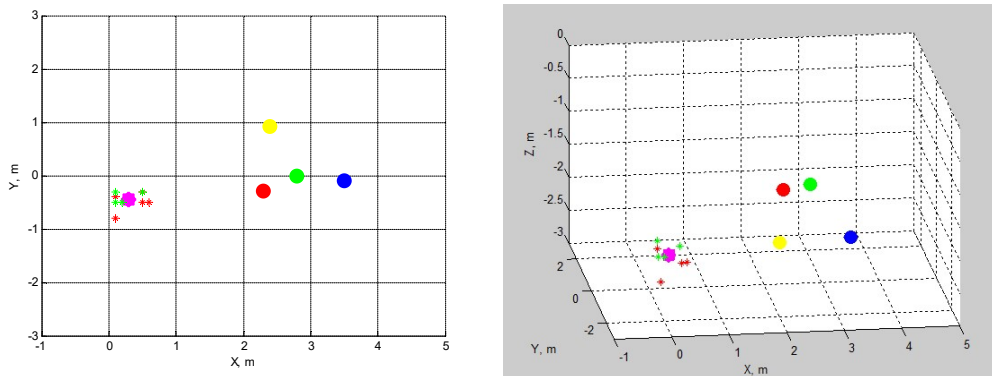
На следващия етап се пристъпи към определяне на местоположението на реален източник на звуков сигнал. В ХА басейн на ВВМУ се излъчи синусоидален импулс с продължителност 2 mS. Импулсът е приет в мрежа от четири хидрофона с известно местоположение. Записаните четири сигнала в системата са представени на фиг. 4.



Фиг. 4. „Червен“, „зелен“, „жълт“ и „син“ приети сигнали, записани с четири канална хидрофонна система

Изчислени са времезакъсненията  $TDOA_m^1 = 0.000195S$ ;  $TDOA_m^2 = 0.000499S$ ;  $TDOA_m^3 = 0.000329S$ .

На фиг. 5 е представено решение на задачата за локализация на реален източник на звук с измерените времезакъснения и параметри  $\epsilon_1 = 100\mu S$ ,  $\epsilon_2 = 0.02m$ . Трябва да се отбележи, че толерансът на времезакъснението  $\epsilon_1$  е съизмерим със самото измерено времезакъснение, например  $TDOA_m^1$ .



Фиг. 5. Множество точки в общата област при параметри  $\epsilon_1 = 100\mu S$ ,  $\epsilon_2 = 0.02m$ , поглед отгоре и в изометрия на измервателния обем.

Крайното решение „пурпур“ (magenta), получено с усредняване, е с координати по  $x, y, z$  – (0.2925, -0.4500, -2.3925), при което дисперсиите на „червената“ и „зелената“ области са съответно (0.2408, 0.1871, 0.1673) m и (0.1893, 0.1155, 0.0957) m, по трите координати.

Анализът на експерименталните резултати и симулациите показва важността от точно измерване на скоростта на звука под вода и местоположението на хидрофоните. В някои случаи на хидрофонна мрежа със свободно плаващи хидрофони (нефиксираны) е необходима отделна калибрация (акустична) за определяне на местоположението на самите измервателни хидрофони под вода. Целесъобразно е също при бъдещи натурни измервания под вода в алгоритъма да се въведат допълнителни ограничения, наложени от отразения от морската повърхност сигнал. При настоящите изследвания записите се извършват в четири паралелни канала на една система. В предишни изследвания по проекта [1] е налична реализация на синхронизируеми по радиоканал самостоятелни (отделни) сензори (нодове) на основата на стандартен мрежов радио протокол като например SimpliсTI (постигната е точност на мрежова радиосинхронизация на таймерите на модулите няколко  $\mu S$ ). Чрез тях се записва акустичен сигнал по микрофонен канал, измерват се времезакъснения в мрежа и се извършва акустична локализация на източник в микрофонна мрежа изградена от сензорите [9].

#### 4. Изводи

Предложен е нов топологичен алгоритъм за решаване на задачата за тримерна локализация на подводен източник на звук с неизвестно местоположение по измерените времезакъснения на сигнала до четири приемни хидрофона с известни координати в условията на ХА басейн на ВВМУ.

Предстои проверка на възможностите на алгоритъма за локализация на подводен източник (включително взривен) в натурни условия на море.

Необходими са бъдещи изследвания за уточняване на възможностите, точността и еднозначността на алгоритъма като функция на големината на изследвания обем и размера на мрежата, дистанцията от източника на звук до хидрофонната мрежа, мястото на разположение на хидрофоните в мрежата, точността на измерване на скоростта на звука, местоположението на хидрофоните и времезакъснението.

## Литература

1. Адаптивна сензорна мрежа за подводно наблюдение. ВВМУ. Отчет на научните изследвания. 2012.
2. Иванов П., Колев Н., Определяне местоположението на подводен обект с помощта на многопозиционна хидроакустична система, Акустика бр.13, 2011, стр. 35-47.
3. Иванов С., Синхронизиране на сензори посредством протокола IEEE 1588. София. Сборник доклади ВХТИ. 2011.
4. Kolev, N. Zh., Ivanov, P. Vl., St. Kaloyanchev, P., Multistatic sonar pulse signals time delay estimation. Journal of Marine Technology & Environment. 2010, Vol. 1, p169-180.
5. Kolev N., Georgiev G., Reduced Rank Shallow Water Matched Field Processing for Vertical Sonar Array Source Localization. 15th International Conference on Digital Signal Processing, Cardiff, UK, pp. 87–90, 2007, DOI: 10.1109/ICDSP. 2007. 4288525. ISBN: 1-4244-0881-4.
6. Holler R., The evolution of the sonobuoy from world war II to the cold war. U.S. Navy Journal of Underwater Acoustics. Jan 2014.
7. Калоянчев П., Колев Н., Димитров Г., Изследване и анализ на параметри на подводния взрив на противотерористични гранати. Сборник с доклади на Международна конференция Хемус 2016. стр. II-127-II-135. ISSN 1312- 2916.
8. Ufuk Tamer. TDOA simulation MATLAB Central File Exchange. Retrieved January 7, 2020. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/70146-tdoa-simulation>.
9. Kolev N. Z., SimpliciTl Acoustic Event Sensor. <https://processors.wiki.ti.com/images/tmp/f1273004808-750868657.html>



## Complex Electromagnetic Research of Composite Materials on the Base of Iron Powder

Yordan MIRCHEV<sup>1</sup>, Mitko MICHOVSKI<sup>1</sup>, Valeriy VENGRINOVICH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

e-mails: [mirchev@imbm.bas.bg](mailto:mirchev@imbm.bas.bg), [nntdd@abv.bg](mailto:nntdd@abv.bg)

<sup>2</sup> Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus

e-mail: [veng@iaph-bas.net.by](mailto:veng@iaph-bas.net.by)

### Abstract

Powder metallurgical material on the base of iron powder is investigated with electromagnetic method in this work. In the work is shown results for changes in voltage and current depend of porosity in samples, duration and temperature of sintering and the content of alloy elements as Cu and Ni. Results are obtaining with equipment developed in Institute of mechanics – Bulgarian academy of sciences.

**Keywords:** powder metallurgical material, thermoelectric driving force method, electromagnetic method

## Комплексно електромагнитно изследване на композитни материали на основата на железен прах

Йордан МИРЧЕВ, Митко МИХОВСКИ, Валерий ВЕНГРИНОВИЧ

### Увод.

Праховометалургичните материали на основата на железен прах намират широко приложение в машиностроенето. Широки са възможностите за промяна на техните експлоатационни характеристики посредством промяна на порестостта, степента на легиране и термичната им обработка, след спичане.

За гарантиране на характеристиките на феромагнитните материали успешно се прилагат ултразвукови, акустични, електромагнитни и други методи [1÷4].

В настоящата работа са отразени изследвания на праховометалургични материали на основата на железен прах с използване на електромагнитни, електросъпротивителни методи и метода на термоелектродвижещата сила.

## 1. Представяне на използваните методи.

### 1.1. Електромагнитни методи

#### 1.1.1. Метод на шумовото напрежение на Баркхаузен

Баркхаузен през 1919 г. описва ново явление, свързано с внезапното, необратимо скокообразно пренамагнитване на отделни домени във феромагнитни материали при въздействие на външното магнитно поле. Чрез измервателна бобина се регистрират

импулсни сигнали с продължителност от порядъка на  $10^{-4} - 10^{-6}$  s, които силно зависят от състава, структурата, термичното и деформационно състояние на феромагнитните материали. Скокообразното пренамагнитване на домените зависи от ограниченото движение на стените на домените в кристалната решетка, възникване и развитието на зародиши на пренамагнитване, промяна на намагнитването в еднодоменни материали, възникване и движение на междудоменните граници на Блох или на Неел в съседните  $180^\circ$  домени с преодоляване на бариери, свързани с критичната анизотропия и др.

#### *1.1.2. Електромагнитоакустико емисионен метод*

Явлението магнитоакустична емисия е свързано с възникване на аустични вълни във феромагнитни материали при пренамагнитване. Открито е от Неарс през 1924 г. А Лорд детайлно изследва явлението през 1974 г. По-късно редица учени от Япония и Русия подробно изучават явлението и намират приложението му при определяне на структурното и механичното напрегнато състояние на феромагнитни материали, предимно стомани.

В България са проведени задълбочени изследвания на праховометалургични материали на основата на железен прах [4]. В отличие от електромагнитния ефект на Баркхаузен, при който се изследва само повърхностния слой на материала, магнитоакустичната емисия (МАЕ) дава възможност да се изучават промените в структурата в целия обем в който протича пренамагнитването и в обема, в който се разпространяват генерираните акустикоемисионни сигнали. Физическата основа за възникване на акустикоемисионни сигнали е промяната на размерите на домена, вследствие на магнитостриционен ефект и пренамагнитването стени на домена на  $180^\circ$ .

#### *1.1.3. Метод на електромагнитната индукция*

Методът е открит от М. Фарадей и позволява да се определи възбуденото електромагнитно поле в приемаща бобина при въздействие на променливо електромагнитно поле на феромагнитни материали. Методът е чувствителен към промени на магнитните характеристики и материала, които от своя страна зависят от състава, структурата и термична обработка.

### **1.2. Термоелектричен метод**

Основава се измерване на термоелектродвижещата сила (ТЕДС) в електрична верига, която се образува от изследвания проводящ материал и материал с известната ТЕДС. При измерванията се поддържа постоянна температурна разлика между контактите на еталона и изследвания материал. Методът е особено чувствителен към химическия състав и структурата на материала.

### **1.3. Електросъпротивителен метод**

Основават се на използване мостови схеми за високоточно измерване на специфично електрическо съпротивление (проводимост) върху хомогенни образци с правилна геометрична форма.

Електрическата проводимост (съпротивление) е силно чувствителна величина към структурни промени и към състава на изследваните материали. Данните от измерванията могат да се използват и за интерпретиране на получените резултати от електромагнитни и термоелектрически измервания.

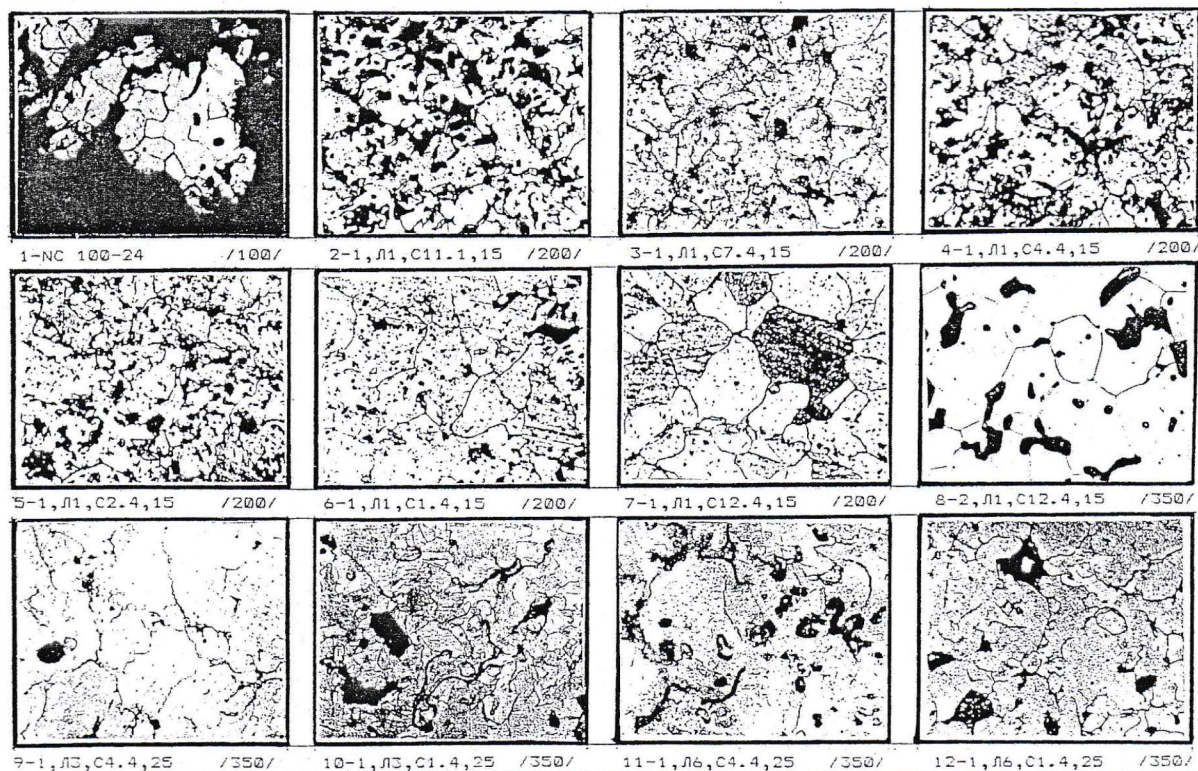


## 2. Обект на изследване

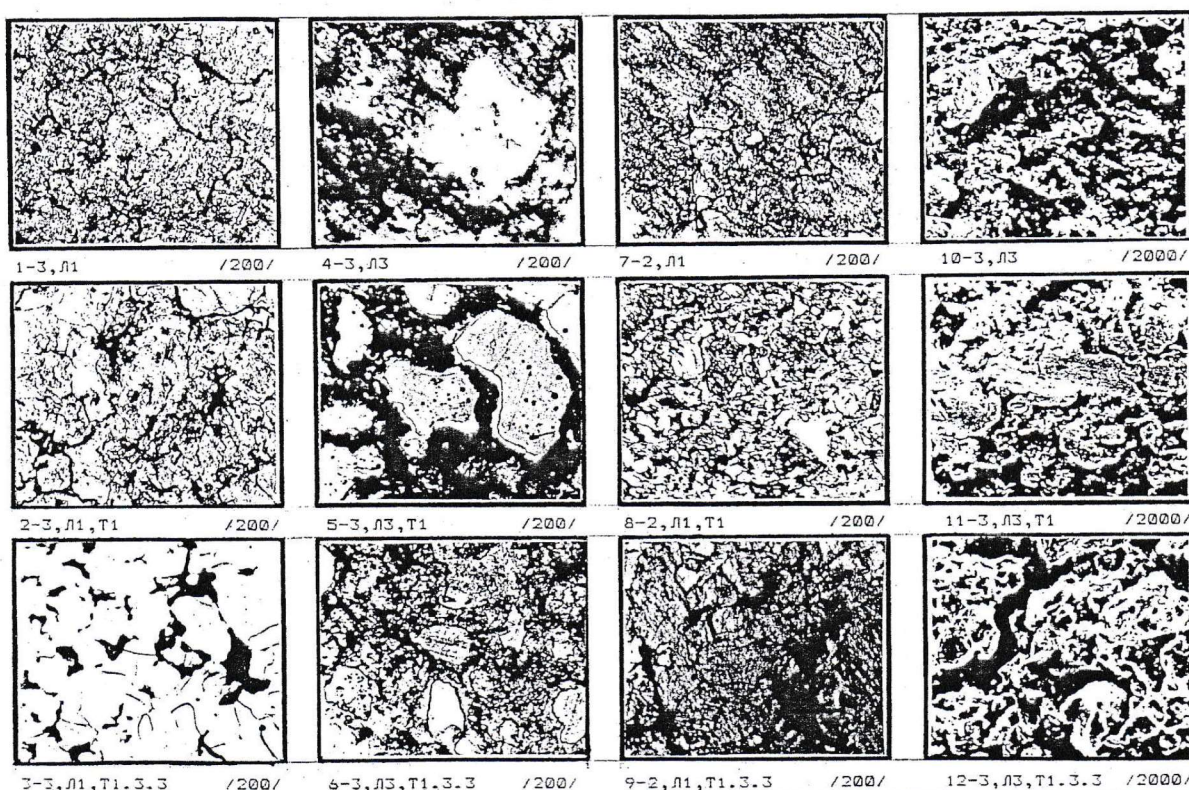
Обект на изследване са праховометалургични материали, получени по методите на праховата металургия чрез пресоване, спичане и легиране. За подготовка на образците се използват железни прахове от различни марки. Експерименталните образци са получени чрез двустранно еднократно пресоване, спичане в атмосфера на дисоцииран амоняк. Подготвени са образци с размери 100 x 10 x 5 mm. Порестостта в образците се променя от 15 до 30%. Температурата на спичане на отделните образци е в границите от 600 до 1250°C. Продължителността на спичане се променя от 0 до 60 min. Подготвени са и образци, легирани с меден или никелов прах, в границите от 0 до 15%.

Образците представляват неравновесни термодинамични системи с излишък от свободна енергия, която се определя от значителната свободна енергия на праха, наличието на дефекти в кристалическата структура и примеси. Спичането се характеризира с протичане на процеси на възстановяване на окисите на повърхността на частиците на обекта, на обемна и повърхностна дифузия и самодифузия, при което се формират метални мостове между частиците на изходния прах и се намалява количеството на порите, увеличаване на разтварянето на легиращите елементи в металната матрица на желязото. Наблюдава се нарастване на зърната на материала, което е силно ограничено от наличието на пори, окисни ципи, включвания и примеси. Легиращите елементи се добавят във вид на прах към изходната шихта. Използва се прах от мед (с ограничена разтворимост в желязо) и никел (с пълна разтворимост при високи температури на спичане).

Типични резултати от изследване на структурата на подготвените образци са дадени на фиг. 1 и фиг. 2.



Фиг. 1



Фиг. 2

На фотографиите са показани и увеличението, при които са изучавани подготвените структури. В текста под всяка фотография се оказват основните характеристики на материалите. По-подробно означенията са представени по-долу.

С Л1, Л3 и Л6 са представени структури на прахови метариали без легиране и легирани, съответно с 5% Cu прах и 5% Ni прах.

С С1, С2, С4, С11, С12 са представени структури след спичане, съответно при 1150°C, 1050°C, 850°C, 0°C и 1250°C при различни продължителности.

На фиг. 1 е представена формата на използвания прах NC 100-24 на фирма Хоганес.

С Т.1.3.3 са представени структури след оптимално спичане на материалите, както и след закаляване и след закаляване и отгряване. Последната цифра в текста под фигурите на фиг.1 е порестостта на материала.

На всяка фотография е указано в скобки и увеличението на микроструктурата, която е заснета.

### 3. Апаратура. Методика

За реализиране на изследванията са използвани уреди, разработени в ИМех–БАН:

- Измервателен модул УБК ИБШ за измерване на средната стойност  $U_{ш}$  на регистрираните импулсни сигнали на шумове на Баркхаузен в честотния диапазон от 10 до 100 kHz.
- Измервателен модул УБК МИ за регистриране на индуцираното електрическо напрежение  $U_{\mu}$  в приемна бобина на измерителния преобразувател.

- Измерителен модул УБК МАЕ който регистрира възбудените акустикоемисионни сигнали МАЕ в изследваните при намагнитване на праховия композитен материал.
- Измерителен модул УБК R<sub>0</sub> за измерване на специфично електрическо съпротивление ρ с използване на класическа мостова схема.
- Измервателен модул УБК-ТЕС за измерване на ТЕДС U<sub>T</sub> в който измервателните електроди са изработени от мед. Уредът дава възможност да се създадат различни температурни разлики между медните електроди и ПММ, който се контролира. Поддържа се постоянна температурна разлика между контактите от 60°C.

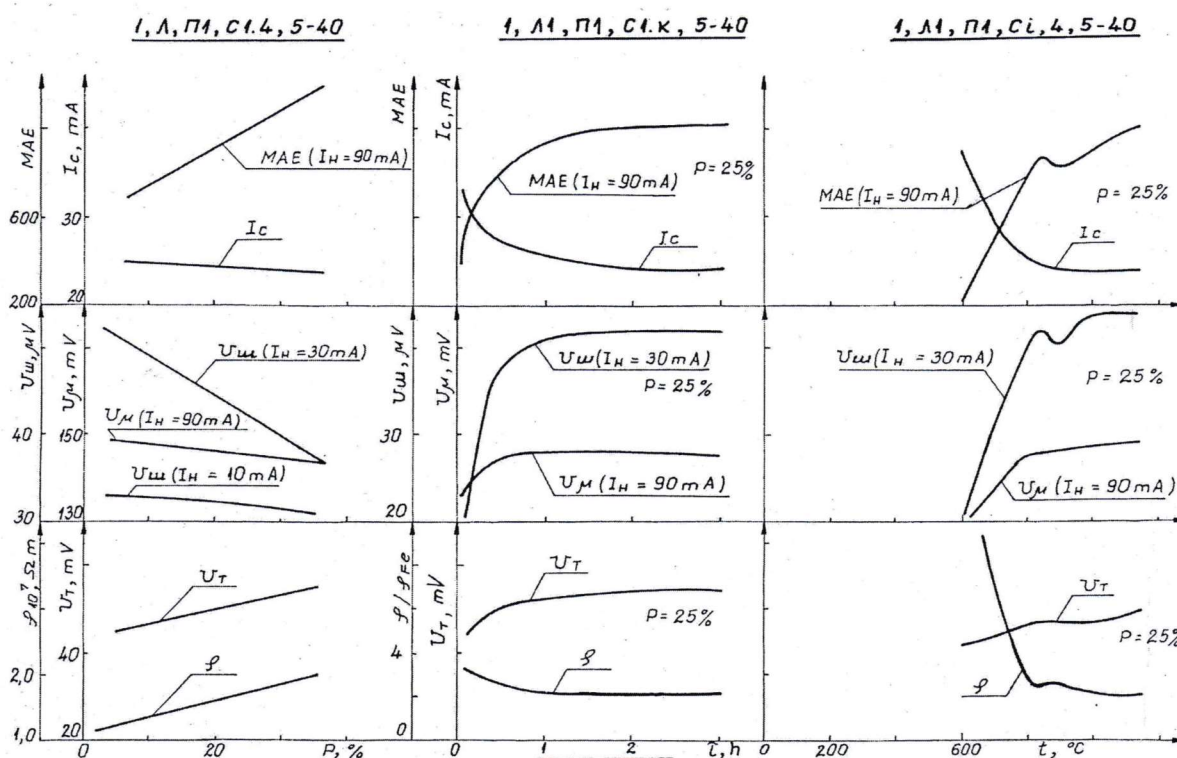
Различните режими на намагнитване на изпитваните образци се реализират посредством промяна на тока във възбудителната bobина като се създава в централната част хомогенно магнитно поле което се променя до 400 A/m.

При измерването разполагаме за всеки режим с по 3 образци, като резултатите се осредняват.

За всеки от образците са заснети зависимости на информационният параметър (U<sub>ш</sub>, МАЕ, U<sub>T</sub>, U<sub>μ</sub>, ρ) при промяна на тока на намагнитване от 0 до 100 mA.

#### 4. Резултати от измерванията

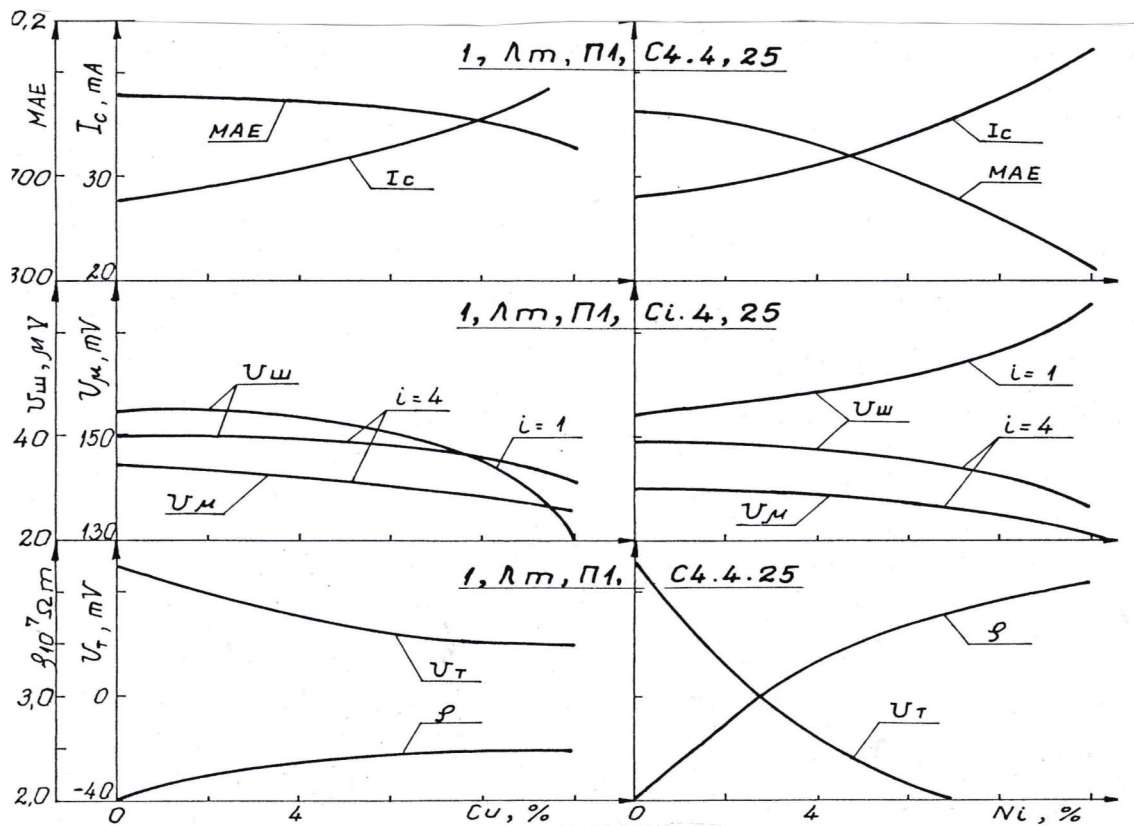
Резултатите от проведените изследвания са представени на фиг. 3 и фиг. 4.



Фиг. 3

На фиг. 3 са представени резултатите за МАЕ, U<sub>ш</sub>, U<sub>μ</sub>, ρ и U<sub>T</sub>, в зависимост от порестостта на образца, от продължителността на спичане τ и от температурата на спичане t. Тук е представена и още една измервана характеристика I<sub>c</sub> – токът на намагнитване при който се появяват и регистрират първите акустикоемисионни

сигнали в образца. Допълнителна информация за тока на намагнитване  $I_H$  във възбуждащата bobина и порестостта  $p$  на образците е представена на фигурата.



Фиг. 4

На фиг. 4 са представени зависимостите на MAE,  $I_c$ ,  $U_{ш}$ ,  $U_{м}$ ,  $\rho$  и  $U_{т}$  от степента на легиране с Cu или Ni (от 0 до 10%). Данните се отнасят за образци с порестост 25%.

## 5. Анализ на получените резултати

Наблюдаваните зависимости могат да бъдат обяснени с особеностите на структурообразуване на сплавите Fe, Fe-Cu, Fe-Ni.

Спечените материали при температури по високи от  $1100^{\circ}\text{C}$  от легиран с мед железен прах се характеризират с двуфазна структура от  $\alpha$  твърд разтвор на Cu в Fe и  $\epsilon$  твърд разтвор на Fe и Cu, като значителна част от Cu остава като отделни включения. Те са разположени по границите на кристалите, като запълват и част от порите. Вследствие на внедряването на атоми на Cu в кристалната решетка на желязото и наличието на неметални включения се създават допълнителни препятствия за движение на доменните стени.

При високи температури на спичане (по-високи от  $1050^{\circ}\text{C}$ ) никелът се разтваря напълно в металната желязна матрица. Образува се твърд разтвор желязо-никел. Докато при медта значителна част от нея влияе като допълнителна немагнитна фаза, то при легиране с Ni, практически пълната разтворимост на Ni, води до формиране на значителни обеми от твърд разтвор на Ni в Fe.

Зависимостите на информационните параметри от порестостта са практически линейни и могат да бъдат използвани за оценка на P на готови ПММ. При  $I_c$  и  $U_{м}$  е

сравнително по-слабо изразена зависимостта от промяна на порестостта. С повишаване на  $I_n$  зависимостта  $U_m = F(I_n)$  е по-силно изразена.

Практически всички зависимости от продължителността на спичане са с насищане от продължителността на спичане в неутрална атмосфера повече от 60 min. Тези данни дават основание да се твърди, че практически всички основни промени по формиране на магнитните, топлинни и електросъпротивителни свойства са приключили.

От особен интерес за формиране на характеристиките на материала са зависимостите от температурата на спичане. Данните които са приведени се отнасят до образци с порестост 25%, спечени повече от 60 min при съответната температура. Прави впечатление добре изразените промени в зависимостите на МАЕ,  $U_m$  и  $\rho$  при спичане при температури 850°C, 900°C и 1000°C. Тук върху формиране на свойствата оказва промяната на коефициента на дифузия при тези температури. Коефициентите на дифузия до 910 °C и при температури > 910°C са различни.

Информационните параметри МАЕ,  $U_m$  и  $U_t$  са слабо чувствителни към промените в свойствата. При температура > 910 °C взаимодействието се постига при повишена температура > 910°C и намален коефициент на взаимна дифузия.

С увеличаване на легирането с Cu и Ni, МАЕ намалява, като тока на намагнитване  $I_s$ , при който се получават началните сигнали на МАЕ, нараства.

$U_m$ , с увеличаването на легирането с Cu и Ni намалява незначително, което говори, че няма съществени промени в магнитни характеристики на материалите.

Интересна е зависимостта на  $U_t$  от степента на легиране. При легиране с Cu  $U_t$  се променя от 50 mV до 20 mV. При легиране с Ni практически  $U_t$  намалява, като при около 3% рязко се променят свойствата на материала, което води до промяна на материала с по-висока степен на легиране спрямо мястото в термоелектрическият ред спрямо медта.

Легираните с Ni материали са с по-голямо  $\rho$  спрямо легираните с Cu, което се дължи на формирането на нови структури в тези материали.

Шумовото напрежение  $U_{ш}$  в легираните с Cu образци намалява с увеличаване на съдържанието на Cu, като по значими са промените при образци, спечени при 1150°C ( $i = 4$ ), спрямо тези, спечени при 850°C ( $i = 1$ ). Очевидно е че съществено влияние оказва разпределението на Cu при 1150°C и образуването на стабилни неметални прегради между частиците на изходния прах.

Зависимостите на  $U_{ш}$  от степента на легиране с Ni прах, в зависимост от температурата на спичане, имат различен характер. При температура 150°C/( $i=1$ ) се формира магнитна структура с определени доменни свойства, която води до силно изразено генериране на магнитни шумове. При температури на спичане 850°C/( $i=4$ ) формираната структура е със съществено различни свойства с увеличаване на степента на легиране  $U_{ш}$  намалява.

## **Заключение**

Получените резултати дават възможност да се определят областите на ефективно използване на описаните методи при Безразрушителен контрол на структурата и свойствата и ПММ на основата на железен прах.

## Литература

1. Горкунов Э.С., А.И Улянов, Магнитные методы и приборы контроля качества изделий порошковой металлургии, Екатеринбург, 1996, УРОРАН.
2. Венгринович В.Л., Магнитошумовая структуроскопия, Минск, Наука, 1991.
3. Горкунов Э.С., Ю.Н Драгошанский, В.А.Хамитов, В.М. Шевнин, Магнитоупругоакустическая эмиссия в ферромагнитных материалах. Влияние кристаллографической анизотропии, Дефектоскопи 2001, 3, 3-23.
4. Миховски М., Дисертация за присъждане на научна степен доктор на техническите науки, ИМех – БАН, София, 1991.

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p><i>Варна</i> 25.10 – 26.10.2019 г.</p> <p><i>София</i> 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	декември 2019 г.

## Contactless Ultrasonic Monitoring of Railway Using Surface Acoustic Waves

Krasimir STAYKOV, Damyan GANCHEV

Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria;  
e-mail: [staikov@tu-sofia.bg](mailto:staikov@tu-sofia.bg)

### Abstract

The paper presents a new technique for automatic monitoring of running surface of rails, based on surface acoustic waves (Rayleigh waves). The inspection technique uses non-contact electromagnetic acoustic transducer (EMAT) to couple ultrasonic energy into rail. Dynamic tests are carried on using specially designed experimental stand. The results are analyzed and conclusions and recommendations for further work are made. The technique can be used for automatic detection of different defects in the head of the rail.

**Keywords:** Rayleigh waves, surface acoustic waves, rail, railway, rolling contact fatigue defects, EMAT, meander coil, non-contact ultrasonic techniques.

## Безконтактен ултразвуков мониторинг на железен път чрез повърхностни акустични вълни

Красимир СТАЙКОВ, Дамян ГАНЧЕВ

### 1. Увод

През последните години градската железница, позната още като „метро“, се наложи като най-удобния и бърз начин на придвижване в градска среда. По данни на Метрополитен ЕАД средната скорост на пътуване с метрото в София с включени чакане, качване и слизане на пътника достига 40 км/ч, а превозната способност надхвърля 30 хил. пътника/час, като минималният интервал на движение е 3 мин [1]. Поради това подвижния железопътен състав (ПЖС) и железопътната инфраструктура в градските железници са подложени на много по-интензивни натоварвания, което е предпоставка за бързо образуване на опасни дефекти и съответно до аварии, застрашаващи безопасността на пътиците. Това поставя завишени изисквания към контрола им спрямо междуградския железопътен транспорт и налага използването и разработването на нови техники и технологии, които да разширят обхвата от инструменти за превенция на аварии.

По данни на Национална компания „Железопътна инфраструктура“, най-голяма концентрация на неизправности в релсовите елементи се получава в главата на релсата (около 54%), като най-честата неизправност в релсите, с относителен дял над 20%, е „№17. Разслояване и откъртване на метал от закаления слой на работната контактна повърхност“, съгласно Каталога на неизправностите в релсовите елементи от 2006 г.

[2,3]. Неизправността се появява в закаления повърхностен слой на главата на релсата, когато е създадено рязко изменение на твърдостта на метала при преминаване от закаления към незакаления метал. Под въздействие на подвижния състав се образуват отслоявания или откъртвания на метал от повърхността на главата. Пукнатините от различен характер също се срещат често. Те са особено опасен дефект и представляват непосредствена заплаха за безотказното движение на влаковете, поради реалната възможност от разрушаването на релсата под подвижния състав, което може да доведе до тежки аварии. Предписанията обикновено са подмяна на елемента в срок от 24 часа. По тази причина регулярният мониторинг на състоянието на железния път и навременното откриване на неизправностите е от особено значение за безопасността на този вид транспорт.

Конвенционалният ултразвуков контрол се използва рутинно от няколко десетилетия за откриване и характеризация на несъвършенства в релсовите елементи, но използваните технически средства и параметри правят автоматизирането на този тип контрол трудно и ограничено до много ниски скорости на сканиране [4]. В [3] бяха проведени предварителни изследвания върху идея за разработване на технология за автоматизирано откриване на дефекти в работната контактна повърхност на релсите. Технологията е базирана на ниско-честотни повърхностни вълни на Релей, възбудени чрез електромагнитни акустични преобразуватели (EMAT) с намотка тип „меандър“ и постоянен магнит. Изложените предимства на технологията дават възможност за мониториране на оборудването върху специализирани дрезини или върху влаковите композиции, които ежедневно осъществяват превоз на пътници. Това ще даде възможност за осъществяване на регулярен мониторинг на състоянието на контактната повърхност на железния път, като по този начин ще могат да се откриват неизправности, пропуснати от екипите, които провеждат ръчен безразрушителен контрол, както и неизправности и несъвършенства, които са се развили бързо във времето. В изследването са проведени статични изследвания върху пригодността по предназначение на тази технология, включващи условията за достигане на гранична еквивалентна чувствителност и максимална зона за наблюдение в съответствие с предписаните гранични размери на дефектите, регламентирани в нормативните документи. Предпоставките при избор на намотка и стойностите на параметрите на системата за изпитване са съобразени с резултатите от теоретичните изследвания, изложени в [5]. Анализът на резултатите показва, че най-висока работна еквивалентна чувствителност ( $SNR=25.2$  dB) на техниката се наблюдава при прозвучаване на отражателя с намотка, осигуряваща дължина на вълната 7.6 mm. Бе установено също, че контролният отражател може да се открие достоверно на разстояние 1.5 m със съотношение сигнал-шум 12 dB при отстояние на преобразувателя от контактната повърхност 2 mm. което е предпоставка за надеждно функциониране на системата с относителни високи скорости на движение на ПЖС.

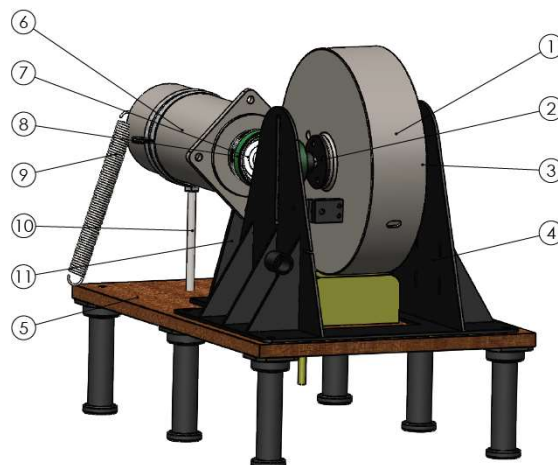
Целта на настоящата работа е да се проведат първоначални динамични експериментални изследвания в лабораторна среда върху пригодността по предназначение на технологията за мониторинг на състоянието контактната зона на ЖП релси.

## **2. Експериментално оборудване и методика**

За целите на експеримента е проектиран и изработен специализиран стенд, състоящ се от статичен ЕМА-преобразувател и въртящ се стоманен диск с борд, имитиращ контактната зона на железопътна релса. По този начин се симулира движението на дрезина по железен път с монтирано на нея оборудване. На борда на



стоманения диск е изработен контролният отражател, използван при предварителните изследвания, представени в [3]. Бордът на диска има дебелина 11 mm, която е достатъчна за ограничаване на възбудането на вълни на Ламб. За задвижване на стоманения диск е използвана триеща предавка, като за целта на оста на електродвигателя е монтирано малко полимерно колело с гумен борд. То контактува със стоманеното колело по неговата външна повърхност и по този начин го развърта. Приплъзването в тази триеща предавка спомага плавно достигане на номиналната честота на въртене на диска. Електродвигателят разполага с тахометър, чрез който могат да се отчитат оборотите и съответно да се изчисли периферната линейна скорост на движение на диска. Освен това към борда на колелото е монтиран механичен енкодер, който позволява автоматизирано записване на ултразвукови А-изображения през определено завъртане на стоманеното колело спрямо преобразувателя. Софтуерът на дефектоскопа конвертира записаните А-изображения в В-изображение. Снимка и схема на стенда са представени на фиг.1.



**Фиг. 1. Специализиран стенд, имитиращ движението на дрезина с монтирано на нея оборудване върху железопътна релса**  
**1 – стоманен диск; 2 – ос; 3 – лагерни опори; 4 – стойка; 5 – маса;**  
**6 – електродвигател; 7 – задвижващо колело; 8 – гумен пръстен; 9 – пружина;**  
**10 – опора на електродвигателя; 11 – енкодер**

При експерименталната работа за възбуждане на вълните на Релей е използвана апаратура на Innerspec Technologies, Inc., състояща се от мобилен дефектоскоп PowerBox H и електромагнитен акустичен преобразувател с постоянен магнит XXL и намотка тип „меандър“. Всички параметри на апаратурата имат стойности, при които се получава гранична работна еквивалентна чувствителност, съгласно проведените статични изследвания, представени в [3]. Стойностите на тези параметри са представени в табл.1.

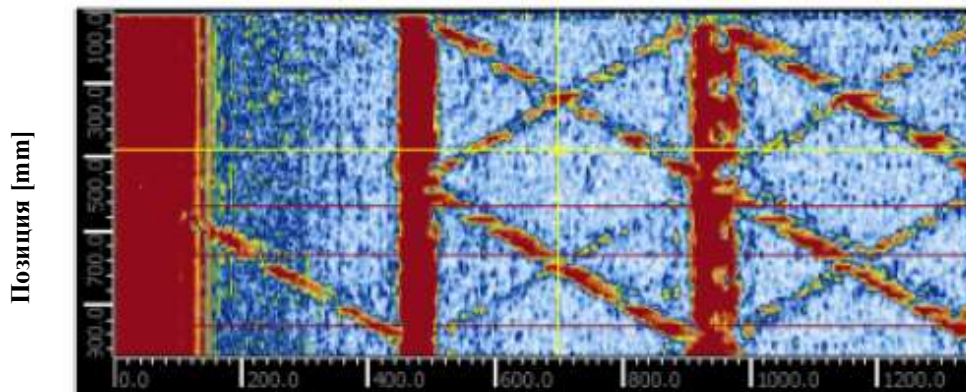
**Табл. 1 Стойности на параметрите на системата за изпитване**

Параметър	Обозначение	Стойност
Честота	f	380 kHz
Период на намотката	$\lambda$	7.62 mm
Скорост на вълните	$c_g$	3000 m/s
Честота на дискретизация	$f_s$	50 MHz
Напрежение	U	1200 V
Честотен филтър	-	180 – 580 kHz
Брой на периодите	N	5
“Coincidence” филтър		3
Отстояние на ЕМАТ от контактната зона	h	1 mm

### 3. Резултати и дискусия

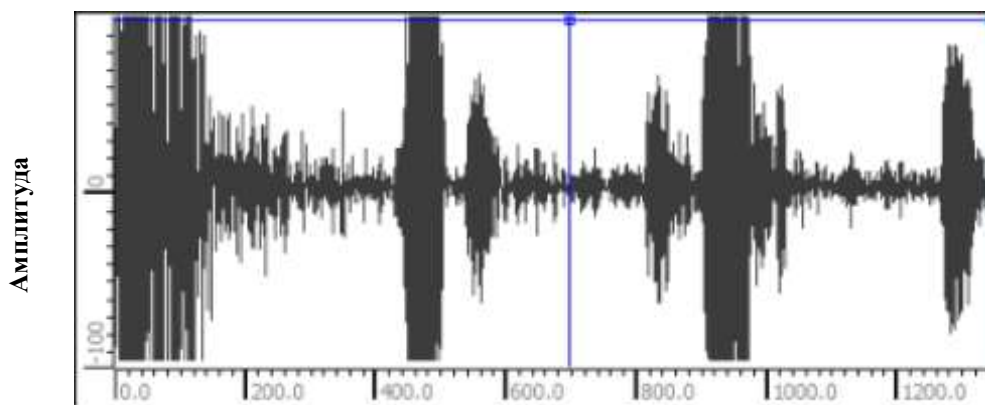
Първоначалните динамични тестове са реализирани при сравнително ниски скорости на въртене на диска поради съображения за сигурност, тъй като масата на стоманения диск е значителна. Проведени са изпитвания при две скорости на стенда (0.76 km/h и 3.14 km/h) с параметри на системата за изпитване, представени в табл. 1. За всяка скорост е записано В-изображение за един оборот на завъртане на диска. Ординатата на В-изображението представлява позицията на маховика спрямо преобразувателя, измерена с механичния енкодер, абсцисата е зоната на наблюдение на ултразвуковите сигнали при скорост на разпространение на повърхностните вълни 3000 m/s, а апликацията е амплитудата на ултразвуковия сигнал, кодирана в цветова гама. В-изображението е конструирано, като енкодерът на скенера е настроен да записва А-изображения през 4 mm. Амплитудата на ултразвуковия сигнал е цветово кодирана, като синия цвят отговаря на ниски стойности, а червения на високи. От В-изображенията са извлечени А-изображения в зоните, които представляват интерес.

На фиг. 2 е представено В-изображение за един оборот на маховика при линейна скорост на движение 0.76 km/h. Наблюдават се два сигнала, които не изменят местоположението си независимо от позицията на стоманеното колело. Единият (при 480 mm) представлява повърхностна вълна, която изминава една обиколка по повърхността на маховика и се приема обратно от преобразувателя. Тъй като този тип ЕМА-преобразувател възбужда вълните двупосочно, тази индикация е съставена от конструктивно интерфериралите сигнали на вълните, разпространяващи се в двете направления по борда на диска. Другият сигнал (при 942 mm) отговаря на повърхностна вълна, която изминава две обиколки около борда на колелото и се приема обратно от преобразувателя. От представеното В-изображение при позицията на курсора е извлечено А-изображение, в което тези два сигнала се виждат ясно (фиг. 3). В реалния случай при изпитване на контактната зона на железопътни релси, тези два сигнала няма да присъстват в В-изображенията, получени при изпитването.



Път на ултразвуковите вълни [mm]

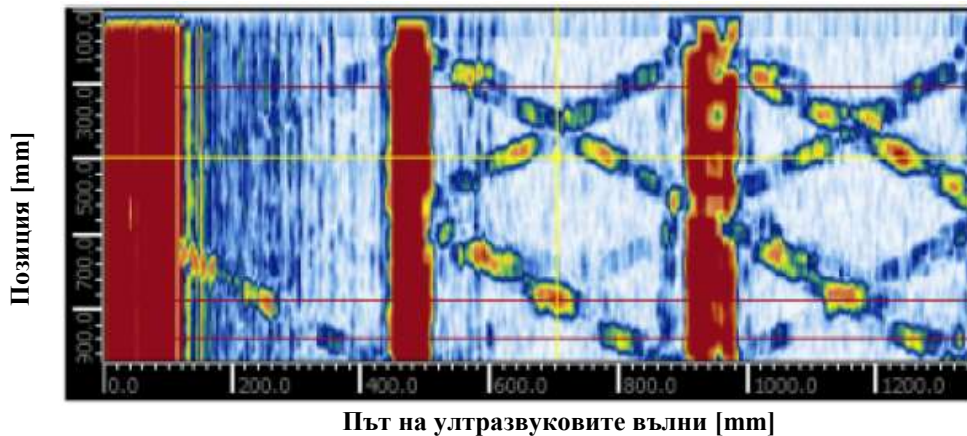
Фиг.2. В-изображение за един оборот на маховика при линейна скорост на движение 0.76 km/h



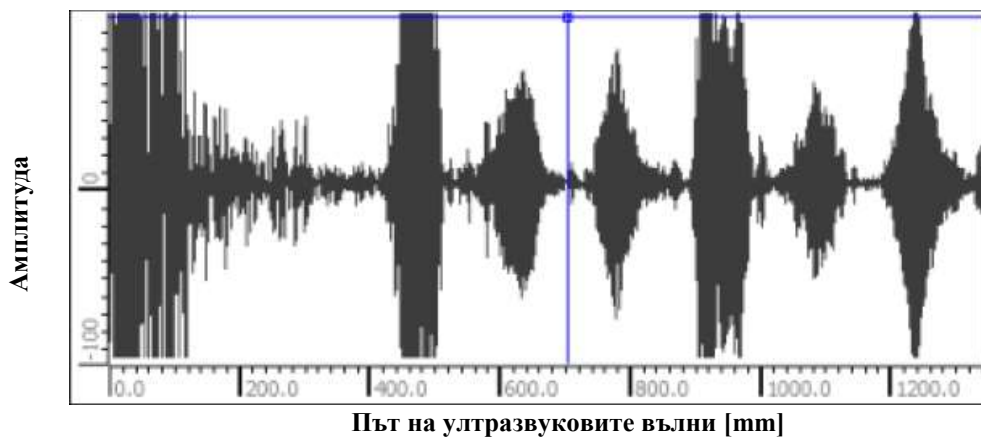
Път на ултразвуковите вълни [mm]

Фиг. 3 А-изображение, извлечено от Б-изображението от фиг. 2 при позицията на курсора

Другите индикации на В-изображението представляват отражения на повърхностните вълни от контролния отражател. Поради двупосочното разпространение на вълните за всяка позиция той се регистрира 2 пъти. Двете еха от контролния отражател се виждат ясно и на А-изображението, представено на фиг. 3 (при 580 mm и при 840 mm). Всички сигнали на изображенията след 942 mm представляват многократни отражения от дефекта. При въртенето на маховика ехата от дефекта образуват много ясни следи, разположени под ъгъл в В-изображенията. Тъй като позицията, измерена с енкодера и пътят на разпространение на ултразвуковите вълни са еквиливантни, наклонът на тези индикации следва да е точно  $45^\circ$ . В реалния случай този факт дава възможност за значително повишаване на достоверността при откриване на дефектите и за различаване на значими от фалшиви индикации. На първо място, поради относително голямото далекодействие на вълните на Релей, дори при големи скорости на движение на дрезината с апаратурата, един реален повърхностен дефект трябва да бъде регистриран няколко пъти от оборудването. Освен това, за всеки две индикации от отражателя е необходимо разликата в пътищата на прозвучаване да бъде равна на разликата в пътищата измерени с енкодера. Тоест, откритият дефект може да се сметне за значим, ако той е регистриран няколко пъти от апаратурата и правата, която свързва получените индикации на В-изображенията има наклон  $45^\circ$ .



Фиг.4. В-изображение за един оборот на маховика при линейна скорост на движение 3.14 km/h



Фиг. 5 А-изображение, извлечено от Б-изображението от фиг. 4 при позицията на курсора

Резултатите, получени при скорост 3.14 km/h са аналогични. На фиг. 4 е представено типично В-изображение от проведените тестове. В този случай се вижда, че следите, получени от ехото от дефекта са накъсани. Най-вероятната причина за това е, че хардуерът не притежава необходимата мощност за възбуждане на импулс при всяка стъпка на енкодера. От практическа гледна точка това не представлява съществен проблем, тъй като както вече бе дискутирано, достоверни резултати при реален мониторинг могат да се получат дори при наличие само на две ясни индикации от дефекта. Въпреки това използването на по-мощен хардуер за ЕМАТ ще подобри достоверността на получените резултати.

#### 4. Заключение

В статията са представени първоначални изследвания върху пригодността по предназначение на техника, използваща нискочестотни вълни на Релей за мониторинг на контактната повърхност на главата на железопътни релси по време на движението на подвижен ЖП състав посредством монтирана на него апаратура за безконтактно възбуждане на вълните. На база на проведените изследвания могат да се формулират следните изводи:

- Техниката се отличава с висока работна еквивалентна чувствителност и ниско ниво на шумовете и има потенциал за автоматизиран мониторинг на състоянието на железния път чрез монтаж на оборудването върху конвенционален подвижен ЖП състав;
- Дори при относително високи скорости на движение на ПЖС с апаратурата, поради голямото далекодействие на вълните на Релей, реалните дефекти ще бъдат регистрирани няколко пъти, което повишава многократно достоверността при тяхното откриване;
- Отношението на пътя, изминат от ПЖС и пътя на ултразвуковите вълни между две или повече еха от дефекта, е предпоставка за разграничаване на значимите и фалшивите индикации;
- Разработения стенд и експерименталните резултати дават ясна картина на характера на получените сигнали и могат да бъдат основа за разработване на допълнителни софтуерни решения за автоматизирана идентификация и класификация на индикациите.

При бъдещата работа е необходимо провеждане на по-детайлни изследвания и валидиране на изложените идеи с по-голям набор от образци с различни контролни отражатели от изкуствен и естествен тип, както и провеждане на открити и слепи полеви тестове при по-високи скорости на движение посредством специализирана дрезина, върху която да бъде монтирано оборудването.

## Литература

1. Метрополитен ЕАД [онлайн], [прегледан на 1 декември 2019], достъпен на: <https://www.metropolitan.bg/nachalo/obshta-informacziya>
2. Каталог на неизправностите в релсовите елементи, Национална компания „Железопътна инфраструктура“, София, 2006
3. Стайков К., Безконтактен ултразвуков контрол на железопътни релси с вълни на Релей, Национална конференция, сп. Акустика, Брой 18, София, 2016
4. Марков А.А., Д.А, Шпагин, Ультразвуковая дефектоскопия рельсов, Культура, 1999
5. Викторов И.А., Звуковые поверхностные вольный в твердых телах, Наука, 1981

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 19 – 20.10.2019 г. София 30.11 – 01.12.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	Декември 2019 г.

## Analysis of the Features of Dry Acoustic Contact as Applied to Inspection Pipelines with Low-frequency Guided Waves

Aleksandr I. BONDARENKO<sup>1</sup>, Andrey L. SHEKERO<sup>1</sup>, Alexander ALEXIEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
11 K. Malevicha Str., 03150 Kiev, Ukraine,  
e-mail: [usndt@ukr.net](mailto:usndt@ukr.net)

<sup>2</sup> Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences,  
Block 4, Acad. G. Bonchev Str., 1113 Sofia, Bulgaria,  
e-mail: [alexiev@imbm.bas.bg](mailto:alexiev@imbm.bas.bg)

### Abstract

A system of pressing the piezoelectric transducer of the acoustic antenna to the surface of the tube has been developed, which ensures reliable dry acoustic contact. The efficiency of the excitation of directional acoustic waves from the antenna, as well as the reliability of detecting welds and defects in the pipeline, was investigated. The factors that influence the dry contact of the converter-pipe system in the process of pressing the transducer to the tube are considered: the compression force, surface irregularities, the coefficient of friction of the transducer face surface and the tube. The basic parameter for the quality of the dry acoustic contact – the area of contact between the transducer and the tube – is defined by the nominal, contour and actual contact area.

**Keywords:** pipelines, defects, ultrasonic testing, low-frequency guided waves.

## Анализ особенностей сухого акустического контакта применительно к контролю протяженных трубопроводов низкочастотными направленными волнами

Александр И. БОНДАРЕНКО, Андрей Л. ШЕКЕРО, Александър Р. АЛЕКСИЕВ

В современной акустической дефектоскопии используется большое количество методов неразрушающего контроля (НК), основанных на применении упругих колебаний и волн независимо от частоты (от низких частот до десятков МГц), возбуждаемых или возникающих в объектах контроля. Особое место среди этих методов занимают низкочастотные (НЧ) акустические методы НК, которые объединяет:

- использование упругих колебаний звуковых и низких ультразвуковых (УЗ) частот (до 100...150 кГц);
- сухой акустический контакт колеблющейся поверхности электроакустического преобразователя (ЭАП) с поверхностью объекта контроля без применения дополнительных смачивающих материалов в системе «преобразователь-изделие».

В настоящее время сухой акустический контакт получил широкое распространение в системах контроля технического состояния протяженных

трубопроводов с использованием технологии дальнедействующего ультразвукового контроля (УЗК) направленными волнами, т.е. в системе «преобразователь-труба».

Метод НЧ УЗК основан на возбуждении в контролируемом протяженном трубопроводе низкочастотных ультразвуковых колебаний из одной точки установки акустического блока на трубопроводе. Акустический блок может состоять из преобразователей, в основу работы которых положены различные способы возбуждения и приема ультразвуковых колебаний: пьезоэлектрический, магнитострикционный, электромагнитоакустический. Наиболее распространенными для диагностирования трубопроводных систем и для возбуждения и для приема УЗ колебаний в трубопроводе являются акустические антенны на основе пьезоэлектрических преобразователей.

Отличительной особенностью акустических блоков на основе пьезопреобразователей низкочастотных ультразвуковых волн при диагностике технического состояния трубопроводов является необходимость создания сухого акустического контакта в системе «преобразователь-труба». Основным условием, обеспечивающим качество соединения преобразователя с поверхностью трубы, является наличие усилия прижима рабочей поверхности преобразователя к поверхности трубы путем приложения постоянной статической силы, распределенной непрерывно по всей площади преобразователя.

Известно, что если постоянная сила прикладывается к какому-либо упругому или твердому телу посредством некоторого другого упругого или твердого тела, то подобная задача в большинстве случаев является контактной задачей теории упругости [1]. Впервые положения контактной задачи теории упругости были использованы в НК в связи с развитием методов низкочастотной дефектоскопии на основе сухого точечного контакта наконечника преобразователя со сферической контактной поверхностью при его прижатии к поверхности многослойной конструкции постоянной сосредоточенной силой  $F_0$  и связаны с исследованием явления контактной гибкости зоны контакта [2]. Способ сухого контакта в настоящее время получил также распространение в связи с развитием метода дальнедействующего ультразвукового контроля протяженных объектов низкочастотными направленными волнами, включая протяженные трубопроводы.

Для получения высокой чувствительности «преобразователь-труба» при сухом акустическом контакте необходимо обеспечить хорошее соприкосновение контактной поверхности преобразователя к поверхности трубы, а также плотное фиксирование акустического блока по образующей трубы. Однако, на поверхности трубы, как и большинства других объектов контроля, обычно имеются неровности, которые не позволяют обеспечить хорошее соприкосновение с преобразователем, в результате чего между ними возникает воздушный зазор.

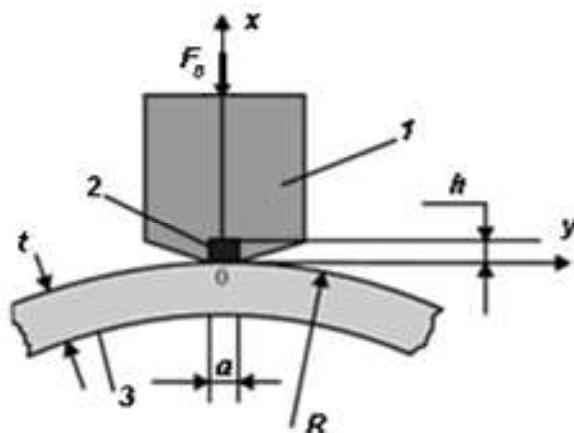
На рис. 1 приведен общий вид контакта поверхности преобразователя с поверхностью трубы.

Для большинства известных в мировой практике систем НЧ УЗК протяженных трубопроводов направленными волнами размеры пьезоэлементов выбираются в пределах: длина  $l = 12$  мм; ширина  $a = 3$  мм; толщина  $h = 3$  мм [3]. Однако, известны случаи применения пьезоэлементов с шириной  $a = 8$  мм и толщиной  $h = 4,5$  мм [4].

Сухой акустический контакт преобразователя с поверхностью трубы осуществляется непосредственно поверхностью пьезоэлемента, продольная ось которого в зависимости от моды направленной волны ориентируются вдоль оси (продольная мода) или поперек образующей (крутильная мода) трубы.

Пьезоэлемент преобразователя возбуждает импульсные упругие продольные или поперечные колебания, которые через сухой контакт в системе «преобразователь-

труба» формируют в стенке трубы направленные волны продольной или крутильной моды. Прием отраженных сигналов от несплошностей (отражателей) осуществляется тем же пьезоэлементом.

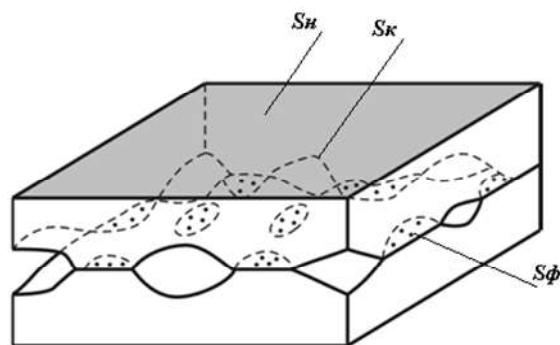


**Рис. 1. Общий вид сухого контакта в системе «преобразователь-труба»:**  
 1 – демпфер, 2 – пьезоэлемент, 3 – труба,  $R$  – внешний радиус трубы,  
 $F_0$  – постоянное усилие прижима поверхности преобразователя к поверхности трубы

Для обеспечения заданной чувствительности при сухом акустическом контакте необходимо, прежде всего, исключить воздушный зазор между контактирующими поверхностями преобразователя и трубы, на величину которого в значительной степени влияют различные виды неровностей поверхности трубы обусловленные, чаще всего, технологией их производства.

Поверхность труб никогда не бывает абсолютно гладкой. На ней всегда имеются неровности, величина которых определяется структурой металла и технологией изготовления. Поэтому, поверхности труб характеризуются сочетанием различных видов неровностей: макронеровностей, волнистости, микронеровностей (шероховатости), распределение которых на поверхности трубы можно отнести к произвольному и равномерному в различных направлениях, которые параллельны поверхности трубы.

Наличие поверхностных неровностей на трубе приводит к уменьшению площади фактического контакта между преобразователем и поверхностью трубы, что уменьшает чувствительность УЗК низкочастотными направленными волнами при сухом акустическом контакте.



**Рис. 2. Представление о площадях акустического контакта между поверхностями преобразователя и трубы**



В процессе прижима поверхности преобразователя к трубе можно выделить три площади контакта: номинальную  $S_n$ , контурную  $S_k$  и фактическую  $S_f$  (рис. 2).

Номинальная площадь  $S_n$  обусловлена геометрическими размерами соприкасающихся поверхностей преобразователя и трубы. Эта площадь в пределах преобразователя будет соответствовать площади пластины пьезоэлемента:  $S_n = a.l$ . В случае заданных выше параметров  $S_n = 36 \text{ мм}^2$ .

В общем случае номинальная площадь рабочей зоны сухого контакта зависит от диаметра трубы и может составлять от единиц до десятков квадратных миллиметров. Приведенную на рис. 1 схему сухого контакта преобразователя с поверхностью трубы следует рассматривать как контакт плоскости пьезоэлемента с цилиндрической поверхностью трубы радиуса  $R$ . В этом случае зона контакта будет представлять эллипс, вытянутый вдоль образующей трубы в виде полоски, ограниченной параллельными прямыми.

Контурная площадь  $S_k$  обусловлена размерами площадки контакта пьезоэлемента с поверхностью трубы под действием распределенной постоянной силы  $F_0$ , действующей в процессе прижима преобразователя к трубе. Контурная площадь контакта  $S_k$  равна площади сминания упруго-пластической волнистости поверхности трубы и представляет собой площадь, ограничивающую зону расположения участков фактического контакта. Расположение таких зон контакта на контурной площади в нашем случае будет зависеть от формы трубы и степени волнистости ее поверхности, которые и будут определять области и плотность расположения участков фактического контакта преобразователя с поверхностью трубы.

В общем случае характер волнистости может быть самым разнообразным и тогда контурную площадь следует определять экспериментально. В случае регулярной цилиндрической или сферической волнистости контурная площадь контакта определяется по формулам классической теории упругости, при предположении об идеально-упругом контакте двух абсолютно гладких, лишенных шероховатости поверхностей.

На рис. 3 приведено пространственное представление задачи о контакте пьезоэлемента с поверхностью трубы.

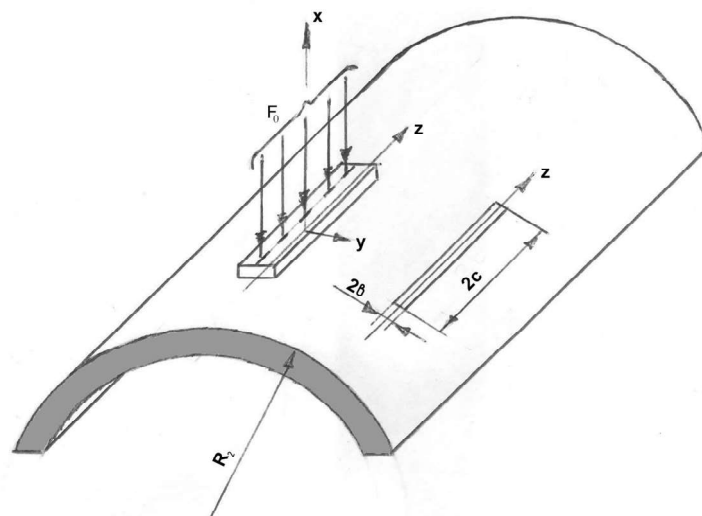


Рис. 3. Пространственное представление задачи о контакте пьезоэлемента преобразователя и трубы

В процессе первоначального касания пьезоэлемента с трубой под действием распределенной статической силы  $F_0$  ширина их линии касания будет составлять доли миллиметра. При дальнейшем увеличении силы  $F_0$ , направленной вдоль оси  $x$  и распределенной равномерно по длине пьезоэлемента, вследствие деформации волнистостей трубы пьезоэлемент и труба будут соприкасаться не по линии, а по некоторой прямоугольной полоске шириной  $2b$ . Эту полоску можно рассматривать как границу эллипса, одна из осей которого, при параметрах заданных выше  $2c = 12\text{мм}$ . Для расчета контурной площади контакта пьезоэлемента с трубой необходимо вычислить значение полуширины  $b$  прямоугольной полоски зоны контакта между ними.

Для определения полуширины полоски контакта поверхности пьезоэлемента преобразователя с поверхностью трубы воспользуемся результатами теории, полученными в процессе анализа контактной задачи при соприкосновении двух цилиндров [5]. Выражение для определения полуширины полоски при контакте двух цилиндров имеет вид:

$$b = \sqrt{\frac{4F_0(k_1 + k_2)R_1R_2}{R_1 + R_2}}, \quad (1)$$

где  $R_1, R_2$  – радиусы первого и второго соприкасающихся цилиндров;

$$k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1}; \quad k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2},$$

$k_1, k_2$  – коэффициенты Пуассона;  $E_1$  и  $E_2$  – модули Юнга первого и второго цилиндров соответственно.

Так как для случая контакта пьезоэлемента с поверхностью трубы уравнение плоской поверхности пьезоэлемента, радиус которого  $R_1$  равен бесконечности, а отношение  $\frac{1}{R_1}$  стремится к 0, то выражение (1) для определения полуширины  $b$  полоски контакта пьезоэлемента с трубой будет иметь вид:

$$b = \sqrt{4F_0R_2(k_1 + k_2)}. \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что с увеличением радиуса трубы полуширина  $b$  полоски контакта поверхности пьезоэлемента с трубой будет увеличиваться под действием распределенной силы  $F_0$ . В пределе соотношение ширины и длины полоски контакта при полном соприкосновении поверхностей пьезоэлемента и трубы будет равно  $2c/2b = 4$ .

Из выражения (2) видно, что значение полуширины полоски пятна контакта зависит от величины радиуса  $R$  трубы и постоянного усилия  $F_0$  прижима поверхности преобразователя к поверхности трубы.

При известной длине  $2c$  пьезоэлемента вдоль образующей трубы контурную площадь контакта преобразователя с трубой можно определить из выражения:

$$S_k = 2b \cdot 2c = 4c\sqrt{4F_0R(k_1 + k_2)}. \quad (3)$$

В окончательном виде формула (3) будет выглядеть:

$$S_k = c\sqrt{64F_0R(k_1 + k_2)}. \quad (4)$$

Под фактической площадью  $S_\phi$  контакта в машиностроении понимается сумма площадей малых участков (пятен), на которых осуществляется контакт микронеровностей деталей, образующих шероховатость, которая соответствует

данному классу чистоты обработки. Поэтому определение фактической площади соприкосновения, величина которой обусловлена деформациями микровыступов, представляет наибольшие трудности в различных отраслях промышленности.

При сухом акустическом контакте преобразователя с поверхностью трубы фактическая площадь контакта, на которой располагаются площадки фактического контакта (соответствуют микровыступов поверхности трубы), также будет значительно меньше контурной. В результате этого при передаче акустической энергии в трубе могут возникать колебания различных мод, представляющие собой сигналы рассеянного шума. Для уменьшения амплитуд этих сигналов необходимо увеличивать фактическую площадь контакта преобразователя с трубой. При контроле трубопроводов низкочастотными волнами увеличение площади фактического контакта в системе «преобразователь-труба» достигается путем приложения постоянной статической силы  $F_0$ , распределенной непрерывно по всей поверхности преобразователя (рис. 3).

На сухой контакт в системе «преобразователь-труба» в процессе прижима преобразователя к поверхности трубы будут влиять следующие причины: усилие прижима, неровности поверхностей преобразователя и трубы, коэффициент трения лицевой поверхности пьезоэлемента преобразователя и трубы. Для прижима преобразователя к трубе необходимо создать сильное давление, что может быть неэффективным в случае больших неровностей поверхности трубы, особенно при наличии коррозии в месте установки преобразователей. Поэтому фактическая площадь контакта между поверхностями преобразователя и трубы при каждой установке его на трубу будет значительно отличаться, что скажется на передаче акустической энергии.

От площади фактического контакта в системе «преобразователь-труба» будут зависеть амплитуды возбужденного в теле трубы сигнала и сигнала отраженного от несплошностей трубы. Это означает, что площадь фактического контакта между поверхностями преобразователя и трубы влияет на чувствительность при возбуждении направленной волны и приеме отраженных сигналов. Учитывая, что контакт между поверхностями преобразователя и трубы обеспечивается путем постоянного усилия прижима, то оно также влияет на чувствительность контроля. Поэтому, от свойств контактной зоны преобразователя с поверхностью трубы существенно зависят эксплуатационные характеристики метода низкочастотного УЗК протяженных трубопроводов направленными волнами.

Распределение участков фактического контакта преобразователя с поверхностью трубы на контурной площади при сухом акустическом контакте зависит от формы выступов неровностей, которые определяют области и плотность расположения участков реального контакта. Размеры выступов и их форма определяются характером волнистости и шероховатости поверхности в области контакта. Так как зоны соприкосновения поверхности преобразователя с трубой располагаются по вершинам отдельных выступов, то количество выступов при их соприкосновении под действием усилия прижима  $F_0$  будет зависеть как от распределения выступов по высоте, так и от формы (закругления) вершин отдельных выступов. Поэтому величина фактической площади  $S_{\phi}$  контакта преобразователя с поверхностью трубы под действием силы  $F_0$  является основным и практически наиболее важным фактором, определяющим процесс передачи акустической энергии в системе «преобразователь-труба» при сухом акустическом контакте. Знание характера распределения этих выступов является весьма существенным. Необходимо также знать, как проходят процессы деформирования отдельных микронеровностей, а также то, каким является суммарное влияние деформаций микровыступов шероховатости поверхности на процесс образования

площади фактического контакта между поверхностями преобразователя и трубы в низкочастотной дефектоскопии.

При проведении работ по диагностике технического состояния трубопроводных систем, находящихся в эксплуатации, эта задача еще более усложняется в связи с наличием на поверхности трубы в месте установки преобразователей акустической антенны возможного даже незначительного коррозионного поражения, остатков защитного покрытия трубы. Это может привести к возникновению в местах касания преобразователей с трубой таких неровностей поверхности трубы как волнистость и макроотклонения, учесть влияние которых на фактическую площадь контакта будет практически невозможно.

Поэтому, при установке преобразователей на поверхность трубы, невозможно гарантировать получение исчерпывающего ответа на вопрос о том, что же в каждом конкретном случае является основной геометрической характеристикой поверхности трубы, которая определяет величину фактической площади контакта с преобразователем при наличии, например, коррозии на поверхности трубы. Кроме того, невозможно точно установить каким образом будут прижиматься поверхности каждого отдельного пьезопреобразователя многоэлементной акустической антенны к поверхности трубы и как будут деформироваться под ними неровности поверхности трубы под действием статической распределенной силы  $F_0$  величиной до 20 кг.

На все эти вопросы практически отсутствуют ответы в научно-технических источниках, касающихся определения фактической площади контакта при сухом акустическом контакте между поверхностями преобразователя и трубы (или других протяженных объектов) в низкочастотной акустической дефектоскопии.

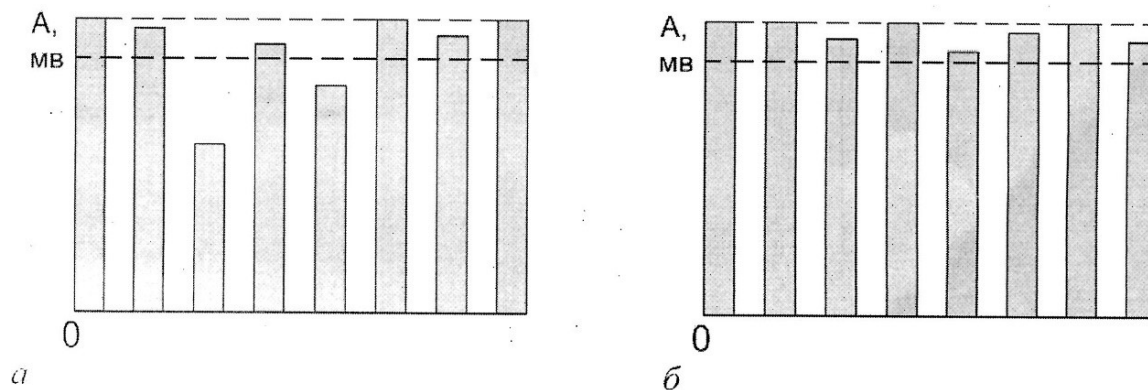
В современных системах контроля протяженных трубопроводов низкочастотными ультразвуковыми волнами (Teletest, Wavemaker) предусмотрен специальный режим нормализации колец акустической антенны путем балансирования пьезопреобразователей, которое осуществляется автоматически с помощью программного обеспечения системы. Процесс такой нормализации выполняется после установки антенны на трубу перед процедурой сбора данных о техническом состоянии трубопровода. В этом режиме проверяется качество сухого акустического контакта между пьезопреобразователями и поверхностью трубы, то есть работоспособность акустической антенны.

Если акустическая антенна после установки на трубу не будет сбалансирована и возникает проблема с нормальным контактированием пьезопреобразователей с поверхностью трубы, на экране дисплея появляется изображение амплитуд сигналов в виде восьми столбиков, которые показывают степень контакта между поверхностями 8-ми пьезопреобразователей и трубы. При наличии достаточного контакта столбики на экране дисплея превышают установленный уровень по высоте и имеют определенный цвет. Если же их высота менее этого уровня, цвет изменяется. Это означает, что фактической площади контакта соответствующих преобразователей с поверхностью трубы уменьшается, что приводит к уменьшению чувствительности системы по этим каналам.

На рис. 4 приведен принцип проверки балансировки пьезопреобразователей акустической антенны.

В случае возникновения проблемы с балансировкой преобразователей необходимо прежде всего проверить исправность пьезопреобразователей. Если все пьезопреобразователи исправны и остаются несбалансированными, то сначала поднимают давление в пневматическом кольце акустической антенны, увеличивая усилие  $F_0$  прижима пьезопреобразователей к поверхности трубы. Если при этом площадь контакта между ними не увеличивается, то проводят повторную балансировку

антенны для этого места, или переставляют ее на другой участок трубы. После проведения правильного балансирования всех пьезопреобразователей акустической антенны изображение столбиков на экране дисплея не появляется и система автоматически приступает к сбору данных.



**Рис. 4. Принцип контроля балансировки пьезопреобразователей акустической антенны:**  
**а) несбалансированная антенна; б) сбалансированная антенна**

В процессе проведения диагностирования технического состояния трубопроводов возможна ситуация, когда невозможно обеспечить балансировку антенны. В этом случае возможно выполнить сбор данных о техническом состоянии трубопровода, однако специалист должен сделать в отчете отметку, что результаты были получены при несбалансированной акустической антенне.

Необходимо также отметить, что в современных системах для диагностики протяженных трубопроводов направленными волнами сбор данных о техническом состоянии трубопровода осуществляется на нескольких частотах, которые до этого вычисляются автоматически исходя из кривых дисперсии и мощности сигналов возбуждения, которая зависит от заданной максимальной длины контролируемого участка трубопровода.

## **Выводы.**

1. Сухой акустический контакт получил широкое распространение в системах низкочастотного ультразвукового контроля протяженных трубопроводов направленными волнами путем создания усилия прижима преобразователя к поверхности трубы.
2. В процессе прижима можно выделить три площади контакта: номинальную, контурную и фактическую.
3. Фактическая площадь сухого акустического контакта в системе «пьезопреобразователь-труба» в низкочастотной дефектоскопии зависит от величины статической силы прижима поверхности пьезопреобразователя к поверхности трубы.
4. В современных системах низкочастотного ультразвукового контроля протяженных трубопроводов направленными волнами проверка качества сухого контакта пьезопреобразователя с трубой осуществляется путем балансировки акустической антенны с использованием специальных программ.

## Литература

1. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М.: Наука, 1980, 304 с.
2. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991, 272 с.
3. Kameyama S., Misu K., Wadaka S. Ultrasonic Test Instrument Using Guided Wave. Nihakai Kenza (j. JSNDI), 2003, V. 52, No. 12, pp. 672-678.
4. Zenghua L., Bin W., Cunfu H., Xiuyan W., Shiming Y. A New Type Transducer for Torsional Guided Wave Generation and its Application to Defect Detection in Pipes. Insight, 2007, V. 49, No. 1, pp. 41-43.
5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж., Теория упругости. М.: Наука, 1975, 576 с.

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г. София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	декември 2019 г.

## Non-contact Measurement of Low Frequency Longitudinal Mode Velocity in Steel Wires

Victor V. KOZHUSHKO<sup>1</sup>, Vladimir P. SERGIENKO<sup>1</sup>, Alexander R. ALEXIEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> V. A. Belyi Metal-polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus, e-mail: [info@laser-ultrasound.ru](mailto:info@laser-ultrasound.ru)

<sup>2</sup> Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria, e-mail: [alexiev@imbm.bas.bg](mailto:alexiev@imbm.bas.bg)

### Abstract

Non-contact laser excitation of low frequency longitudinal rod modes and two electromagnetic acoustic transducers were employed for modulus evaluation. The specimens of diameter from 0.22 mm up to 1.83 mm were preliminary magnetized by ring-shape NdFeB magnet with the field of 0.25 T. Laser radiation with the beam diameter of 5 mm illuminated wire. The time of flight between transducers separated on the distance 23 mm was measured. The low frequency approach states the Young's modulus is product of velocity square and density. The obtained values of modulus agree with the known values for bulk steel.

**Keywords:** laser-induced ultrasound, materials properties, Young's modulus, non-destructive testing, optoacoustics

## 1. Introduction

The production of steel wires is result of pressure cold work via single or multiple drawing through the die which diameter is smaller than initial diameter of rod. This process significantly changes not only geometry but also the microstructure of the steel by means changes of mechanical and magnetic properties. The influence of the deformation on the properties depend on the initial properties of steel wires, the strain and composition. The resulting changes lead to the increasing of strength, nonuniform decreasing of the plastic properties, increasing of the electrical conductivity, decreasing of corrosion resistance and variation of magnetic properties. The microstructure experiences significant changes, the grains are elongated in axial direction, the dislocations number increases as well as the interstitial and vacancies, that lead to the changes of the mechanical properties due to the cold working process. Thermal treatment of wires is required to satisfy demands of exploitation, strength and plasticity. Work hardening can be eliminated by thermal treatment in order to reduce the number of structural defects by re-crystallization, that decreases the strength and hardness increasing the plasticity that changes the elastic properties.

## 2. Materials and Research methods

The evaluation of the elastic properties of steel wires after thermal treatment is a topical task. The application of traditional ultrasonic methods raises the issue of acoustical contact between transducer and wire. The possible way-out relates to the non-contact methods both for excitation and detection of the probe ultrasonic pulses. Recently the breakthrough of laser

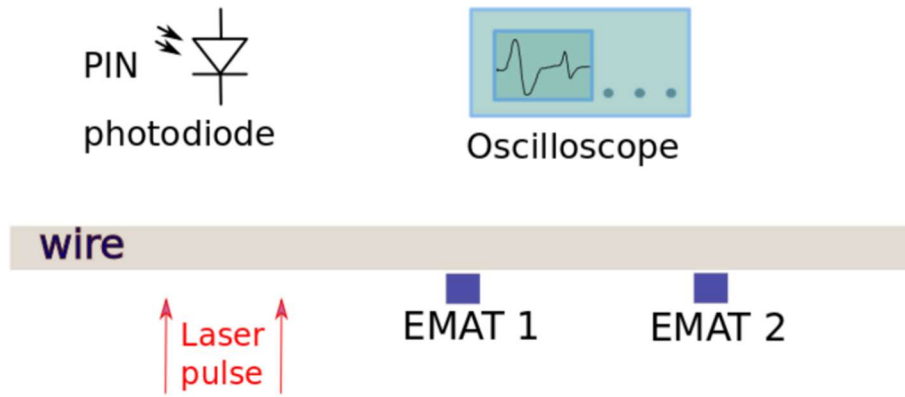
method demonstrated success in non-destructive testing and elastic properties of materials evaluation. The main advantages are non-contact excitation of essentially broadband ultrasonic pulse with pronounced compression phase without the surface preparation. The detection of the ultrasound can be carried out by Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) which are tolerant to the covering or oxide layers and can be applied to the curved surfaces [1]. In the case of steel wires the combination of laser excitation with EMAT detection is suggested.

The wires are wave-guides where the dispersion of different modes changes the temporal profile of the laser-induced pulses. On the other hand, the low frequencies longitudinal waves propagate with the group velocity which can be expressed as a square root from the ratio of Young's modulus and density [2]. Therefore, in the case of successful excitation and detection of longitudinal pulses the measured low frequency velocity yields the Young's modulus of the wire. The excitation of the ultrasound occurs due to the several steps such as absorption of the laser radiation, heat diffusion and thermal expansion that induces ultrasonic pulses. In general case the form of laser spot and time profile define the spectrum of ultrasound. In considered scheme unfocused laser radiation illuminates side surface of the wire. The diameter of the laser beam is about 5 mm, thus the length of laser spot on the wire surface is about 5 mm. As the absorption of the laser radiation occurs on the illuminated area of the wire this long distance heat source confines the frequency range of the pulses propagating along the wire that allows excitation of low frequency longitudinal mode.

In ferromagnetic materials EMAT is sensitive to the transient electromagnetic field induced by ultrasonic pulse due to the magnetostrictive effect. It is necessary to magnetize the wire before experiment that can be done by moderate field of about 0.25 T which is far below from the saturation of magnetization. In our experiments the ring shape magnet with the external radius of 25 mm and internal radius of 13 mm was used to magnetize the wire by moving through the magnet. The varnished copper wire is the sensitive element of the EMAT [3]. The pancake coil was used in previous study for detection of longitudinal and shear ultrasonic pulses propagating in metals. The disadvantage of handmade coils is their relatively large size of about 5 mm while industrial inductive coils with soft ferrite core can also be used for detection of transient electromagnetic field with significantly better lateral resolution.

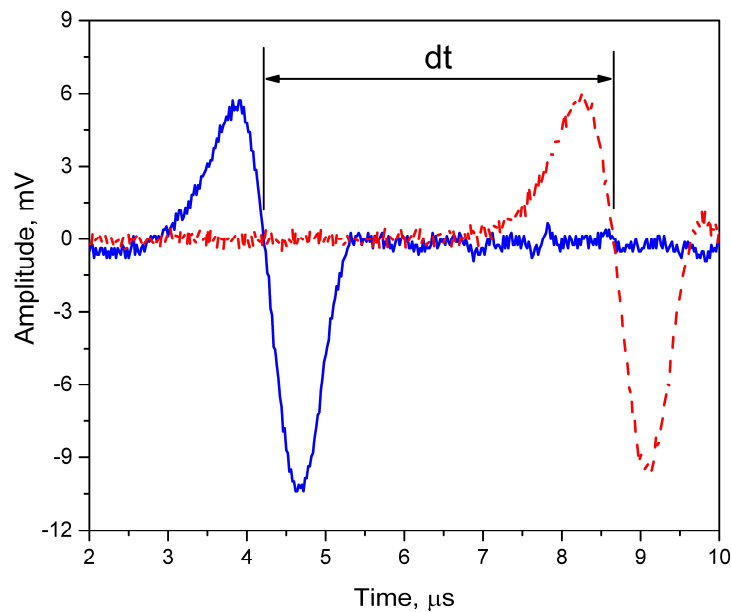
The presented paper accents the combination of laser-induced ultrasound and two separated EMATs for detection of ultrasound in steel wires. The sketch of experimental arrangement is presented in Fig. 1. The laser pulses on the wavelength of 532 nm of about 12 ns duration illuminated the wire. The specimens of the wires with diameter from 0.22 to 1.83 mm were cut to the pieces of about 100 mm. Obviously, the dominant excitation low frequency waves can be carried out because of the long laser spot on the wire surface. The first transducer was located on the distance of about 40 mm from the laser spot while the distance to the second transducer was about 23 mm. The nominal inductivity of the coil was 10  $\mu$ H with a resonance frequency of 26 MHz. The dimensions of the core are 2.5x2.5 mm and height 2.0 mm. The coil is connected into the circuit of preamplifier, which is based on the single chip operational amplifier. The printed circuit board has minimal length of conductive layer that is necessary for reduction of parasitic capacity and inductivity. The cost and simplicity of EMAT transducers make them attractive for applications in solution of tasks of the non-destructive testing and properties evaluation of metals and metallic composites. The steel wires were placed on the ferrite core of the inductivities. The signals were measured by two channel oscilloscope Rigol DS1052E with analog bandwidth of 50 MHz and the acquisition rate of 1 GSample/s.





**Fig. 1 Experimental arrangement of laser excitation and non-contact measurement of low frequency longitudinal ultrasonic pulse by means of two EMATs.**

The front of signal from PIN diode triggered oscilloscope. The examples of the measured signals are presented in Fig. 2. The sequence of pulses confirms the direction of propagation from left to right of the ultrasonic pulse while the reflection at the free end changes phase to opposite. The spectrum of the pulses is limited by high frequency border at about 1.5 MHz that proves the long-wave assumption of induced longitudinal modes which propagate with minimum of distortions. The propagation of the pulses in the wires was observed for the traveling distance more than 250 mm.



**Fig. 2 Signals measured by EMATs separated on distance of 23 mm. Solid line first, dash line second sensor.**

The time interval between pulses was defined as the difference from zero-crossing points of the signals. The obtained time delay was about 4.4  $\mu\text{s}$  for the distance of 23 mm. The traveling distance was measured by caliper. The calculated values of velocity were about  $5.23 \pm 0.04$  km/s. The density of the wires was obtained by means of hydro-static weighting of

40 mm long wire pieces that yields the value of  $7.81 \text{ g/cm}^3$  with the error of about 2%. The calculated value of Young's modulus was 210 GPa that is close to the modulus of bulk steel.

## Conclusions

The suggested approach can be employed for non-destructive testing and Young's modulus evaluation of the steel wires during production. The efficient laser excitation of low frequency ultrasonic pulses provides conditions for propagation without distortion on the long distance of hundred millimeters. The combination of non-contact laser excitation and EMAT-based registration allows testing of metal wires properties in industry.

## References

1. Hirao M., Ogi H. EMATs for science and industry: non-contacting ultrasonic measurements. Boston: Kluwer Academic Publisher, 2003. p. 372.
2. Rueter D. Induction coil as a non-contacting ultrasound transmitter and detector: Modeling of magnetic fields for improving the performance// Ultrasonics. 2016, V. 65, 200-210.
3. Kozhushko V. V. , Sergienko V. P., Mirchev Y. N., Alexiev A. N., Characterisation of elastic properties of metals and composites by laser-induced ultrasound//Non-destructive Testing and Repair of Pipelines, Editors: E.N. Barkanov, A. Dumitrescu, I. A. Parinov. Springer, 2018, 209-225.

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г. София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	декември 2019 г.

## Using COMSOL to Investigate the Effectiveness of Mufflers

Rosen RUSANOV, Krasimir NEDELICHEV, Petar IVANOV

Technical University of Sofia, Department of Mechanics, Bulgaria  
[rusanov@tu-sofia.bg](mailto:rusanov@tu-sofia.bg), [krasined@tu-sofia.bg](mailto:krasined@tu-sofia.bg), [ivanov.peter@abv.bg](mailto:ivanov.peter@abv.bg)

### Abstract

The paper studies the influence of some of the parameters of the open type acoustic barrier, which are used to reduce sound pressure levels, through passive noise reduction devices in ventilation systems and some types of acoustic barriers /Sonic Crystal Acoustic Barriers/. The study was realized with a model in the environment of COMSOL Multiphysics.

**Keywords:** Acoustic Barriers, Silencer, Muffler, Sonic Crystal, COMSOL Multiphysics®, Sound Pressure Level

## Използване на COMSOL за изследване на ефективността на конструкцията на шумозаглушителни устройства

Росен РУСАНОВ, Красимир НЕДЕЛЧЕВ, Петър ИВАНОВ

### 1. Увод

Естествената вентилация на жилищните и промишлени помещения не може да покрие съвременните хигиенни изисквания за качество на въздуха в помещенията, което налага използването на принудителна вентилация в тези пространства [6, 7, 8]. За изпълнението на съвременните хигиенни изисквания е необходимо поставянето на добра вентилационна система, която да осигурява достатъчно количество свеж въздух в тях и съответно отвеждане на отработения въздух. Осигуряването на необходимият дебит за добра вентилация в повечето случаи води до повишаване на нивото на шума предизвикано от движението на въздуха във вентилационната система. Това налага използването на шумозаглушители устройства, за да се намали нивото на шума до допустимите стойности за съответният вид помещение. За постигането на тези необходими нива на шум във вентилираните помещения е нужно поставянето на шумозаглушително устройство с подходящи характеристики [1÷5]. **Целта на настоящата работа е да се представи основен алгоритъм за работа при проектиране на шумозаглушителни устройства за вентилационни системи.**

### 2. Моделиране на изследвания обект

#### 2.1. Алгоритъм за моделиране и числено изследване на шумозаглушителни устройства

Численото изследване се реализира в COMSOL Multiphysics /Structural Mechanics

Module and Acoustics Module/[9]. Изследването на модела може да се реализира с различни видове модели отразяващи физическата същност на изследваният обект, както и да се приложат различни видове анализи върху използвания модел в зависимост от поставената задача.

Алгоритъмът за моделиране и числено изследване на шумозаглушителни устройства може да се опише със следните основни стъпки:

1. Дефиниране на целта и задачите на изследването;
  - 1.1. Определяне на необходимото ниво на редукция на шума;
  - 1.2. Определяне на спектъра на шума на източника (разпределението на шума по терцооктави);
  - 1.3. Задаване на максималните размери на шумозаглушителното устройство;
  - 1.4. Определяне на вида на източника на шум: механичен или аеродинамичен;
2. Избор на обект за изследване;
  - 2.1. В зависимост от принципа на действие на шумозаглушителя
    - 2.1.1. Резонаторен;
    - 2.1.2. Реактивен;
    - 2.1.3. Пасивен;
    - 2.1.4. Активен;
    - 2.1.5. Комбиниран;
  - 2.2. В зависимост от напречното сечение
    - 2.2.1. Кръгло;
    - 2.2.2. Правоъгълно;
    - 2.2.3. С друга форма;
3. Дефиниране на модела на обекта.
  - 3.1. Скициране на обекта за моделиране.
  - 3.2. Избор на размерност на модела: 3D, 2D axisymmetric или 2D;
  - 3.3. Избор на вида на основните елементи изграждащи модела: твърдотелни, твърдотелни с отвори, обемни или тип черупка /отчитане влиянието на характеристиките на структурата обекта върху характеристиките на шумозаглушителя: Pressure Acoustics или Acoustic-Structure Interaction/;
  - 3.4. Определяне на изследваните параметри и алгоритъма на параметризиране, които са съобразени с поставената задача;
  - 3.5. Изграждане на параметричен модел на шумозаглушителя;
  - 3.6. Дефиниране на променливи;
  - 3.7. Дефиниране на функции;
  - 3.8. Дефиниране на връзките между обектите;
  - 3.9. Дефиниране на групи от обекти с еднакви и/или специфични свойства;
  - 3.10. Дефиниране на материалните характеристики на обектите в модела;
    - 3.10.1. Материални характеристики на основната среда /въздух, газ, течност и др./;
    - 3.10.2. Материални характеристики на абсорбиращият материал, ако има такъв /минерална вата, каменна вата и др./;
    - 3.10.3. Материални характеристики на структурата на обекта /стени, корпус и др./;
  - 3.11. Дефиниране на източниците на акустично въздействие /Acoustics Source/;
  - 3.12. Дефиниране на зоните на измерване на изменение на акустичното въздействие /Acoustics Receiver's/: точка, линия, повърхност или обем;
  - 3.13. Дефиниране на предавателни функции /Sound Transmission Loss/;
  - 3.14. Дефиниране на мрежа
    - 3.14.1. User-controlled mesh;

- 3.14.2. Physics-controlled mesh;
- 3.15. Дефиниране на честотен обхват
- 4. Избор на вида на структурата на модела.
  - 4.1. Pressure Acoustics
  - 4.2. Acoustic-Structure Interaction
  - 4.3. Aeroacoustics
  - 4.4. Thermoviscous Acoustics
- 5. Избор на вида на анализа за изследване
  - 5.1. Eigenfrequency
  - 5.2. Frequency Domain
  - 5.3. Frequency Domain Modal
  - 5.4. Time Dependent
- 6. Обработка на резултатите от изследването.
  - 6.1. Звуково налягане;
  - 6.2. Ниво на звуково налягане;
  - 6.3. Напрежение при структурно-акустичните анализи
  - 6.4. Деформации при структурно-акустичните анализи
- 7. Изследване на влиянието на параметрите върху акустичните показатели на шумозаглушителя /оптимизация/
  - 7.1. Избор на оптимизационни параметри;
  - 7.2. Избор на оптимизирани параметри;
  - 7.3. Избор на алгоритъм за оптимизиране;
- 8. Верификация на резултатите от изследването
  - 8.1. С експериментално изследване;
  - 8.2. С данни от други предходни изследвания;
  - 8.3. Чрез сравняване с резултати от утвърдени аналитични зависимости.

## 2.2. Числено изследване на шумозаглушаващите характеристики на шумозаглушител

За численото изследване се използва пасивен шумозаглушител с правоъгълно напречно сечение с еднаква ширина на въздушната междина и дебелина на пластините. Моделирането е реализирано с 2D модел в среда на COMSOL Multiphysics®.

1. **Целта на** изследването е да се определят размерите на шумозаглушителя осигуряващи необходимото ниво на шумозаглушаване;
  - 1.1. Определяне на необходимото ниво на редукция на шума:  $\Delta L_{Trr} = 40 \text{ dB}$ ;
  - 1.2. Определяне на спектъра на шума на източника (разпределението на шума по терцооктави): *определя се от източника на шум*;
  - 1.3. Задаване на максималните размери на шумозаглушителното устройство: ;
  - 1.4. Определяне на вида на източника на шум: *механичен*;

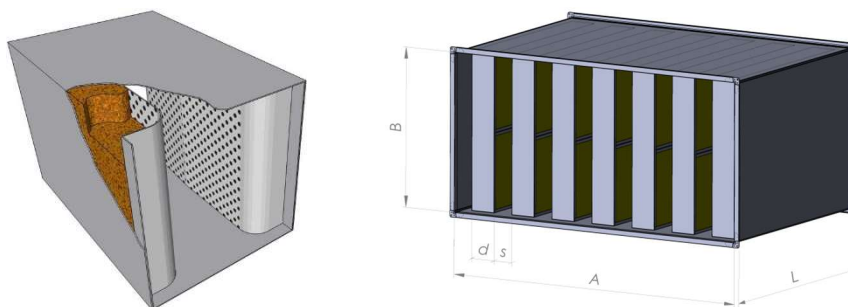


Fig. 1. Шумозаглушител с правоъгълно напречно сечение [6, 7]

- където  $A$  – ширина на шумозаглушителя, [m];  
 $B$  – височина на шумозаглушителя, [m];  
 $L$  – дължина на шумозаглушителя, [m];  
 $d$  – дебелина на пластините на шумозаглушителя, [m];  
 $s$  – ширина на въздушните отвори на шумозаглушителя, [m].

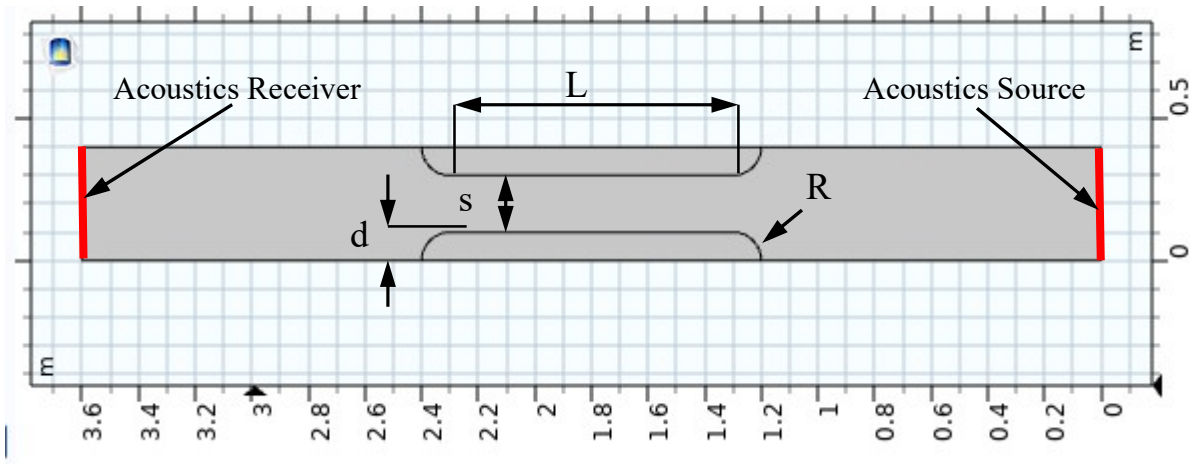


Fig. 2. Секция на модел на шумозаглушител с правоъгълно напречно сечение.

2. Избор на обект за изследване: пасивен шумозаглушител с правоъгълно напречно сечение с еднаква ширина на въздушната междина и дебелина на пластините;
3. Дефиниране на модела на обекта.
  - 3.1. Скициране на обекта за моделиране /фиг.2/.
  - 3.2. Избор на размерност на модела: 2D;
  - 3.3. Избор на вида на основните елементи изграждащи модела: твърдотелни /Pressure Acoustics/;
  - 3.4. Определяне на изследваните параметри /фиг.2/:  
 $B = 1 \text{ m}$  – височина на шумозаглушителя;  
 $L = L_{sil} = 0,4:0,4:2,4 \text{ m}$  – дължина на шумозаглушителя;  
 $d = 0,2 \text{ m}$  – дебелина на пластините на шумозаглушителя;  
 $d = 0,2:0,1:0,4 \text{ m}$  – дебелина на пластините на шумозаглушителя за  $L_{sil}=1,2 \text{ m}$ ;  
 $s = 0,2 \text{ m}$  – ширина на въздушните отвори на шумозаглушителя;  
 $R = 0,1 \text{ m}$  – радиус на пластините на шумозаглушителя.
  - 3.5. Изграждане на параметричен модел на шумозаглушителя/фиг.2/;
  - 3.6. Дефиниране на променливи;
  - 3.7. Дефиниране на функции;
  - 3.8. Дефиниране на групи от обекти с еднакви и/или специфични свойства;
  - 3.9. Дефиниране на материалните характеристики на обектите в модела;
    - i. Материални характеристики на основната среда: въздух;
    - ii. Материални характеристики на абсорбиращият материал: минерална вата;
  - 3.10. Дефиниране на източниците на акустично въздействие /Acoustics Source/: линия, Pressure,  $P = 1 \text{ Pa}$ ;
  - 3.11. Дефиниране на зоните на измерване на изменение на акустичното въздействие /Acoustics Receiver/: линия, Plane Wave Radiation;
  - 3.12. Дефиниране на предавателни функции /Sound Transmission Loss/;

3.13. Дефиниране на мрежа:

User-controlled mesh: вид на мрежата: Free Triangular;  
 Максимална стойност на елемента: 0.028583 [m];  
 Минимална стойност на елемента: 5.4E-4 [m];

3.14. Дефиниране на честотен обхват: 50:25:1500 Hz;

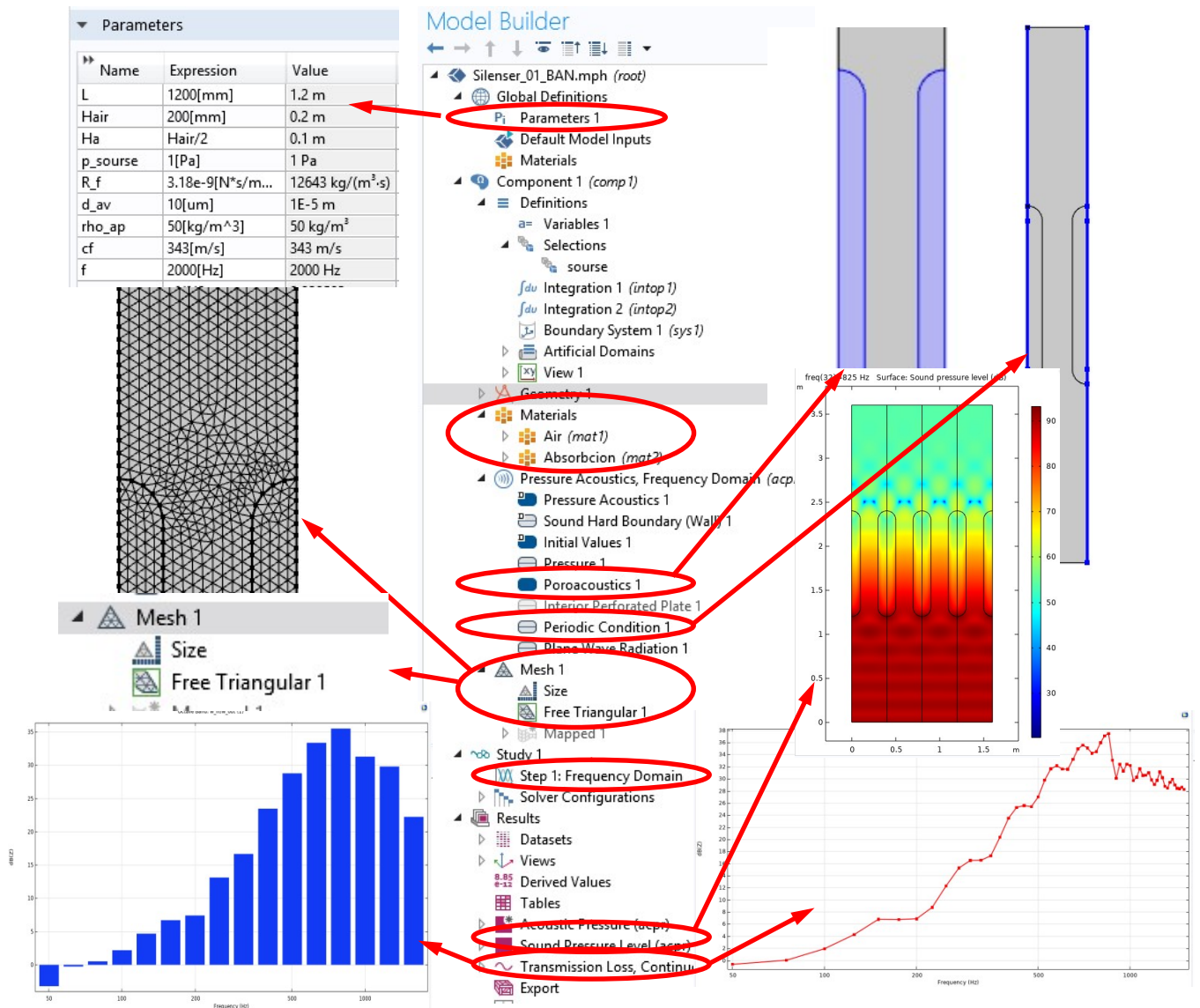


Fig. 3. Структура на дървото на модел на шумозаглушител

4. Избор на вида на структурата на модела: Pressure Acoustics
5. Избор на вида на анализа за изследване: Frequency Domain
6. Обработка на резултатите от изследването: Ниво на звуково налягане по терцооктави;
7. Изследване на влиянието на параметрите върху акустичните показатели на шумозаглушителя /оптимизация/
  - 7.1. Избор на един или повече критерии за оптималност:  $\Delta L_{Trr}$ ;
  - 7.2. Избор на управляващ параметър:  $s$ ;
  - 7.3. Избор на метод за оптимизация;

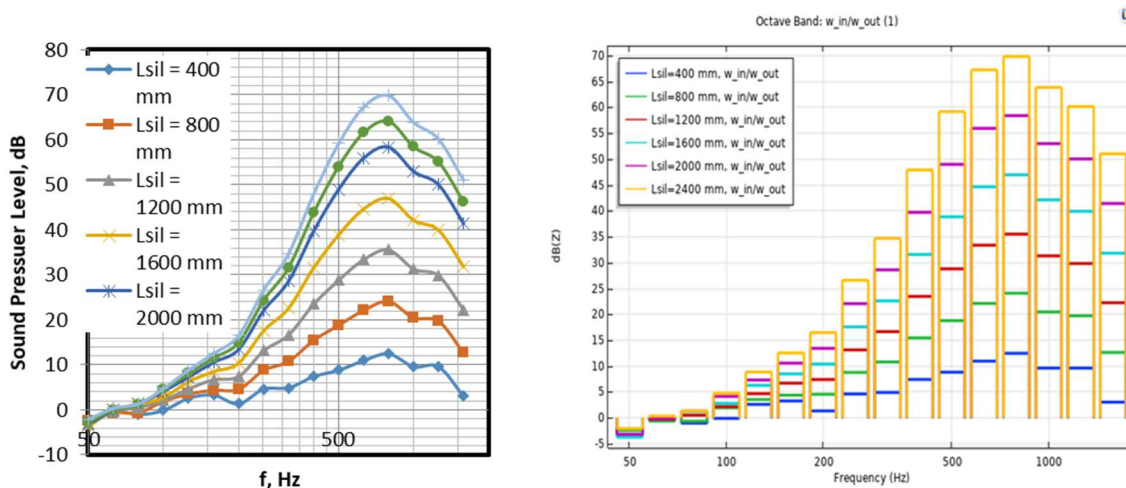
8. Верификация на резултатите от изследването: чрез сравняване с резултати от утвърдени аналитични зависимости.

### 3. Резултати от изследването

Резултатите от направените числени изследвания са представени в таблици 1 и 2, а на фиг.4 и 5 са показани графиките на изменение на нивото на звуково налягане при изменение на два характерни параметъра на устройството (дължина на шумозаглушителя и дебелина на пластините на шумозаглушителя).

**Table 1.** Ниво на звуково налягане при различни дължини на шумозаглушителя

№	f <sub>octave</sub> , Hz	Lsil , mm						
		400	800	1200	1600	2000	2200	2400
1	50.12	-2.13	-2.44	-3.22	-3.70	-3.18	-2.63	-2.06
2	63.10	-0.18	-0.62	-0.25	0.05	-0.12	-0.01	0.38
3	79.43	-1.01	-0.64	0.53	1.21	1.34	1.27	1.35
4	100.00	-0.10	1.95	2.19	2.81	4.15	4.55	4.75
5	125.89	2.61	3.55	4.69	6.29	7.33	8.08	8.88
6	158.49	3.29	4.40	6.71	8.51	10.57	11.56	12.53
7	199.53	1.35	4.56	7.42	10.41	13.44	14.96	16.50
8	251.19	4.64	8.79	13.13	17.58	22.07	24.34	26.61
9	316.23	4.91	10.80	16.67	22.60	28.61	31.64	34.69
10	398.11	7.43	15.46	23.48	31.56	39.70	43.80	47.90
11	501.19	8.82	18.80	28.80	38.87	48.99	54.07	59.16
12	630.96	10.96	22.12	33.38	44.66	55.95	61.60	67.25
13	794.33	12.48	24.10	35.53	46.97	58.40	64.12	69.84
14	1000.00	9.61	20.48	31.31	42.15	53.00	58.43	63.86
15	1258.93	9.62	19.73	29.81	39.91	50.02	55.08	60.15
16	1584.89	3.04	12.66	22.25	31.84	41.43	46.22	51.02



**Fig. 4.** Графика на изменение на ниво на звуково налягане при различни дължини на шумозаглушителя, по терцооктави



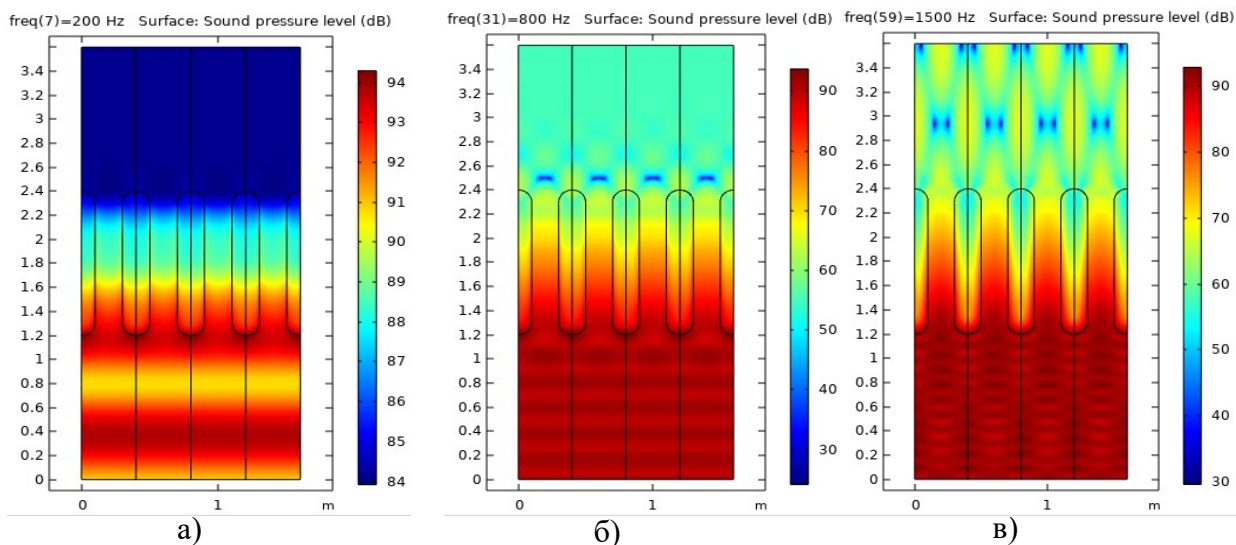


Fig. 5. Разпределение на ниво на звуково налягане в конструкцията на шумозаглушителя при няколко терцооктавни честоти: а) 200 Hz; б) 800 Hz; в) 1500 Hz.

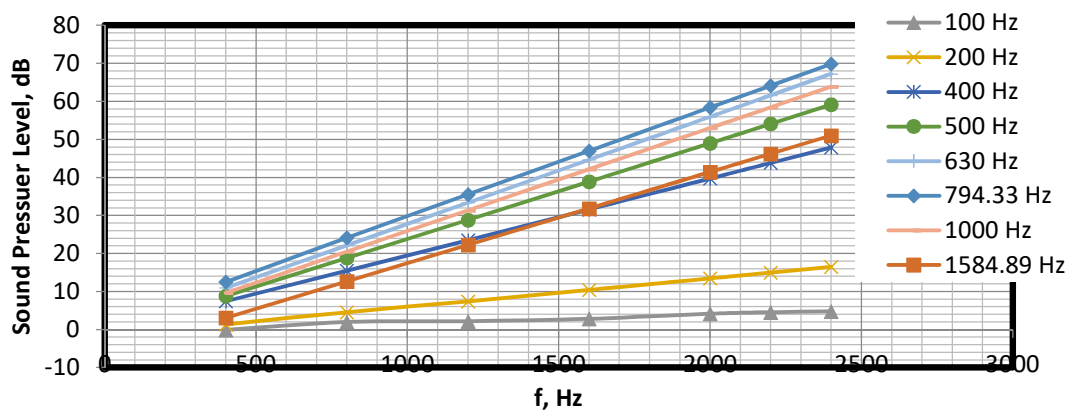
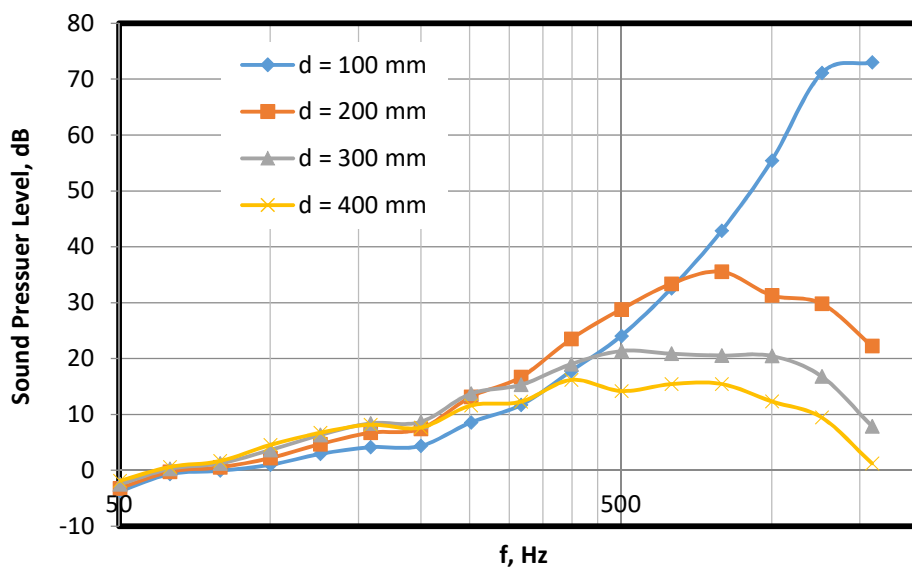


Fig. 6. Графика на изменение на ниво на звуково налягане при изменение на дължината на шумозаглушителя, за няколко терцооктави.

Table 2. Ниво на звуково налягане при различни ширина на въздушните отвори /дебелина на пластините/ на шумозаглушителя

№	f <sub>octave</sub> , Hz	L <sub>sil</sub> /d, mm			
		1200/100	1200/200	1200/300	1200/400
1	50.12	-3.76	-3.22	-2.52	-1.89
2	63.10	-0.69	-0.25	0.25	0.60
3	79.43	-0.06	0.53	1.21	1.66
4	100.00	0.98	2.19	3.62	4.53
5	125.89	2.93	4.69	6.31	6.72
6	158.49	4.13	6.71	8.41	8.16
7	199.53	4.35	7.42	8.66	7.63
8	251.19	8.58	13.13	13.70	11.59

9	316.23	11.68	16.67	15.30	12.27
10	398.11	17.75	23.48	18.99	16.18
11	501.19	24.05	28.80	21.34	14.19
12	630.96	32.57	33.38	20.86	15.42
13	794.33	42.85	35.53	20.50	15.45
14	1000.00	55.39	31.31	20.46	12.33
15	1258.93	71.10	29.81	16.79	9.46
16	1584.89	72.99	22.25	7.89	1.23



**Fig. 7. Графика на изменение на ниво на звуково налягане при различни ширина на въздушните отвори /дебелина на пластините/ на шумозаглушителя, при различните терцооктави.**

От фиг. 4 и таблица 1 се вижда, че при увеличаване на дължината на устройството се увеличава ефективността на шумозаглушаване, като най-голяма ефективност се получава при терцооктавна лента 794 Hz. При една и съща дължина на пластините и ширина на въздушните отвори на шумозаглушителя, най-висока ефективност се получава винаги при една и съща честота на терцооктавната лента.

На фиг. 6 се вижда че изменението на дължината на шумозаглушителя води до линейно изменение на нивото на шумо заглушаване по отделните терцооктави. При честоти от 400 Hz и повече скоростта на нарастване е по-висока от тази при ниските честоти и е приблизително една и съща.

Изменението на нивото на звуково налягане при изменение на дебелината на пластините и ширина на въздушните отвори на шумозаглушителя е показано на фиг.7 (таблица 2). От фигурата се вижда, че при увеличаване на разстоянието между въздушните отвори се намалява ефективността на шумозаглушаване. Едновременно с това се получава преместване на максимума на ефективността на шумозаглушаване към ниските честоти.

## 4. Заключение

- Въз основа на резултатите от изследванията можем да направим следните изводи:
- при увеличаване на дължината на устройството се увеличава ефективността на шумозаглушаване (таблица 1 и фиг.4);
  - при увеличаване на разстоянието между надлъжните пластини се намалява ефективността на шумозаглушаване (таблица 2 и фиг.7);
  - при увеличаване на разстоянието между надлъжните пластини се измества максимума на ефективността на шумозаглушаване, към ниските честоти (таблица 2 и фиг.7);
  - Чрез подходящ избор на конструктивен параметър, може да се променя изменението на еквивалентно ниво на звуково налягане след шумозаглушителното устройство /преграда/ за необходимият ни честотен интервал.
  - чрез модела може да се изследва влиянието на материалните и конструктивните характеристики на елементите, върху изменението на нивото на звуковото налягане след шумозаглушителното устройство /преграда/.

## Acknowledgments

This study was performed with the financial support of the project BG05M2OP001-1.001-0008 “National Center for Mechatronics and Clean Technologies”.

## Литература

1. Aaron Grey, Induct dissipative bar-silencer design, Thesis, Department of Mechanical Engineering University of Canterbury Christchurch, New Zealand, 2004
2. Sabry Allam, Mats A°bom, Fan Noise Control Using Microperforated Splitter Silencers, Journal of Vibration and Acoustics, DOI: 10.1115/1.4027245, 2014
3. Antonio Petosic, Sanja Grubesa, Mia Suhanek\*, Ivan Djurek, Acoustic Performance of Parallel Baffled Silencers Different Configurations in HVAC Channel, Engineering and Applied Sciences, doi: 10.11648/j.eas.20180303.14, 2018.
4. Kralov, I., Nedelchev, K., Lowering the noise level in the transport flows through reduction of the traffic barrier reflected noise, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 618(1),012051, 2019
5. Gieva, E., Ruskova, I., Nedelchev, K., Kralov, I., An investigation of the influence of the geometrical parameters of a passive traffic noise barrier upon the noise reduction response, AIP Conference Proceedings, 2048,020020, 2018.
6. <https://tlumiki.smay.pl/lang,EN>
7. <https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/kinetics-noise-control/noise-reduction-in-hvac-duct-systems/7/>
8. <https://noisecontrol.vibro-acoustics.com/wp-content/uploads/Silencer-Selection-Instructions.pdf>
9. Introduction to the Acoustics Module, Version: COMSOL 5.4, COMSOL, 2018.

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г. София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	декември 2019 г.

## Synthesis of New Acoustic Barriers for Automotive and Railway Transport

Ivan KRALOV, Krasimir NEDELICHEV, Tatyana GEORGIEVA, Petar IVANOV

Технически университет – София, Факултет по транспорта, Катедра „Механика“  
[kralov@tu-sofia.bg](mailto:kralov@tu-sofia.bg), [krasined@tu-sofia.bg](mailto:krasined@tu-sofia.bg), [tg@tu-sofia.bg](mailto:tg@tu-sofia.bg), [ivanov.peter@abv.bg](mailto:ivanov.peter@abv.bg)

### Abstract.

Based on the survey and main conclusions about the state of the art research, design and application acoustic transport screens, it is defined the main aim of this work: Synthesis of acoustic barriers for rail-wheel rolling noise in areas of rail stations, metro stations and tunnels for acoustic protection of the passengers. The main results of the research work are: a new stationary passive acoustic barrier of high-level acoustic efficiency is synthesized, this new barrier has low cost level of manufacturing, assembling and maintenance, as well as it has low level of reflected noise in the area of wagons.

**Keywords:** acoustic screens, noise protection

## Синтез на нови акустични екрани за автомобилен и релсов транспорт

Иван КРАЛОВ, Красимир НЕДЕЛЧЕВ, Татяна ГЕОРГИЕВА, Петър ИВАНОВ

### 1. Увод

При анализа и класификацията на патентните и конструктивните решения почти не се срещат такива за снижаване разпространението на шума в затворени обеми като тунели, метростанции, покрити спирки и гари. От особено значение е намирането на ефективно решение в тези случаи, тъй като поради ограничения обем и малко разстояние до околните стени и таван, вследствие на интерференцията на падащите и отразените вълни се получава значително усилване на звуковото налягане в областта на транспортните средства (Фиг. 2.1).

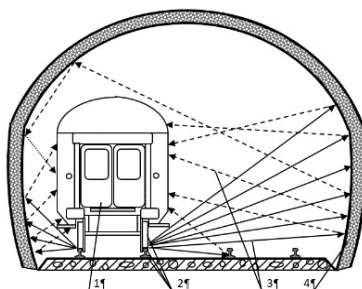
Вследствие на горния извод е дефинирана и задачата в тази глава – синтезирането на ново ефективно решение за снижаване на шума от контакта колело-релса в малки обеми около транспортното средство в закрити обеми (тунели, метростанции, покрити спирки и гари).

### 2. Синтез на нова акустична преграда за защита на шума от контакта колело-релса при релсов транспорт

Основните изисквания, на които трябва да отговаря конструкцията произтичат от спецификата на задачата. На първо място това е шум, който е доминиращ при ниски скорости, разпространява се основно странично и надлъжно на релсовия път чрез

трептенията на колелата и релсите, и въздействието му е основно в районите на гари, спирки, метростанции, както и в населени места (при трамваен или интересити влаков транспорт). Тези особености показват, че въздействието му е постоянно върху голям брой хора, което силно повишава значимостта от неговото заглушаване.

При отчитане на основните изводи на литературния обзор относно нивото на ефективност на пасивните шумозащитни екрани, то при синтеза на новата конструкция е прието тя да е от пасивен (основно отразяващ) тип.



**Фиг. 2.1. Разпределение на „шума при търкаляне“ в тунел: 1 – жп возило; 2 – източници на „шум при търкаляне“; 3 – посока на шумовото излъчване; 4 – вътрешна повърхност на тунела**

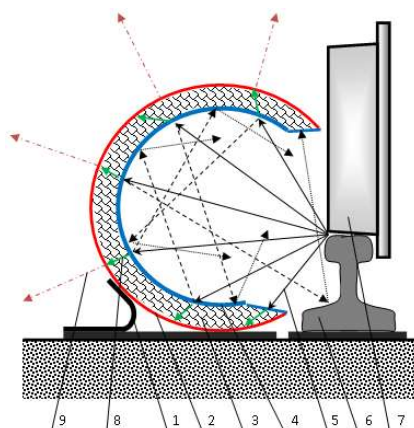
Вследствие на това приемане (екранът да е пасивен), следва да се синтезира такава форма на отразяващата повърхност, че постъпващите от източника и отразените от екрана звукови вълни да се наслагват и взаимно да „гасят“ основна част от енергията си в близост до екрана, при това с минимално директно отразяване на вълните отново към източника. Разбира се, в сила е и основното изискване за акустична ефективност на екрана за достатъчна степен на снижаване на звуковото налягане зад екрана.

Изискванията за ниска себестойност на производството, транспорта, монтажа и поддръжката налагат конструкцията на елементите на екрана да са технологични за производство, транспорт и монтаж, да са еднакви или сходни по форма и размери, и при възможност да са взаимозаменяеми.

Както и при останалите екрани, нормативните изисквания включват определена степен на механична якост на конструкцията, висока степен на пожароустойчивост, липса на отровни отпадъчни компоненти при горене, устойчивост на климатични въздействия и др.

При отчитането на изброените, а и други изисквания, авторите са синтезирали нова конструкция на акустичен екран за шума от контакта на колелото с релсата, реализиран като едностранен шумозащитен екран, показан на фиг. 2.2.

Шумоизолиращият екран се състои от един по същество хоризонтален неметален елемент с форма на цилиндричен канал, изрязан по надлъжно по хорда, така че да се оформи непрекъснат надлъжен отвор към източника на шум. В напречен разрез екранът представлява част от окръжност с отвор по хорда, насочен към източника. Така постъпващите от източника звукови вълни навлизат в обема на канала, отразяват се от вътрешната му повърхност и се връщат към новопостъпващите вълни или към друга част от вътрешната повърхност на екрана. След интерференция на постъпващите и отразените вълни, се получава взаимно „гасене“ на акустичната енергия, основно в обема на канала, като относително малки части от нея се връщат към източника през отвора или преминават зад преградата. В общия случай шумоизолиращият екран може да е изпълнен като монолитен детайл от полимерен материал. Дължината на отделните части на този канал се определя от технологичните изисквания за ефективност на производството, транспорта, монтажа и поддръжката им. По дължина елементи се свързват челно, така че да се получи един непрекъснат канал.



**Фиг. 2.2. Нова конструкция на акустичен екран за шума от контакта колело/релса, обект на изследването: 1 – опори на екрана; 2 – цилиндричен неметален канал; 3 – абсорбиционен материал (опция); 4 – перфориран екран (опция); 5 – разпространение на шума от източника; 6 – железен път; 7 – жп колело; 8 – абсорбирана звукова енергия; 9 – разпространение на остатъчната звукова енергия.**

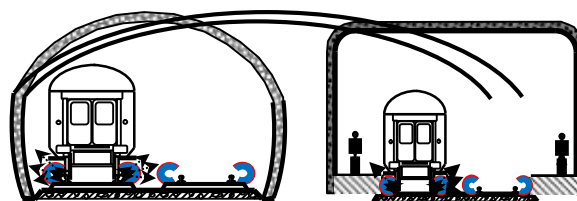
Шумоизолиращата бариера се захваща неподвижно към фундамент, успоредно на релсовия път посредством фамилия от типоразмерни крепежни планки, чиито размер се проектират за всяко конкретно трасе. Дебелината на шумоизолиращата бариера да е различна, като се проектира за всяка конкретна реализация, в зависимост от различни фактори като диаметър на канала и механична здравина на конструкцията, устойчивост на натоварвания (напр. напречен вятър, тежест от натрупан сняг и обледяване), техно-логичност при производството, транспортируемост, технологичност на монтажа и др.

Шумоизолиращата бариера, обект на това разглеждане, е проектирана така, че излъчваният от контакта колело-релса шум да навлиза и се разпространява в канала. Относително малка част от шума се поглъща от екрана, а друга част се отразява и наслагва с постъпващата звуковата енергия. В резултат се получава значително снижаване на нивото на шума от интерференцията на звуковите вълни вътре в обема на канала. Разпространението на звуковите вълни е неограничено по дължината на канала, което допълнително увеличава интерференцията им и снижава нивото на шума.

Шумоизолиращата бариера, съставена от множество съединени еднакви тръбни елементи, тип улеи, се изгражда като върху фундамент в редица, през равни разстояния, се фиксират за него закрепващите планки, а след това за тях се захващат елементите на бариерата чрез винтови или болтови съединения.

Като възможност с цел повишаване степента на абсорбирания в обема на преградата шум, е възможно поставянето в нея на абсорбиращ материал, който да заема целия или част от вътрешния обем на канала. Друга възможност е поставянето на перфорирана плоскост от страната на отвора /постъпващите звукови вълни от източника/ с цел повишаване на скоростта на преминаващите през перфорацията звукови вълни и повишаването на скоростта и честотата им и по-лесното „гасене“ на този шум.

На фиг. 2.3 са показани схематично някои от ефектите от прилагането на предлаганата нова бариера при защитата от шума от контакта колело-релса в районите на тунели, метроспирки /затворени гарови пространства/.



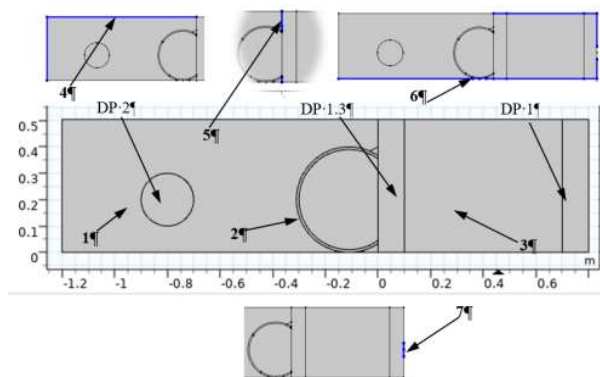
**Фиг. 2.3. Схема за ефекта от предлаганата акустична бариера в районите на тунели и метростанции**

За материал на улеите /целия профилен панел/ се предлага високоплътен поливинилхлорид /HDPV/, поради следните причини: технологичност за производство, относително висока обемна плътност, достатъчна механична якост, сравнително добра акустична „твърдост“, относително ниска себестойност за производство, включително възможност за използване на рециклирана отпадъчна суровина, относително ниски инвестиционни разходи при начално изграждане/реорганизиране на производство, липса на интерес за присвояване с цел рециклиране или използване за алтернативно предназначение и др. С цел подобряване устойчивостта на климатични влияния и пожароустойчивост, както и от естетична гледна точка, повърхностите на улеите ще бъдат третирани със защитни покрития, отговарящи на горните изисквания.

Първо е извършено числено моделиране и изследване на част от новия екран, а именно цилиндричен улей с надлъжен отвор по хорда от него, направен от високоплътен поливинилхлорид. Същевременно е изработен експериментален образец, съответстващ на числения модел и е извършено експериментално определяне на някои от акустичните параметри, получени по числен път. За оптимизиране на изчислителната процедура първоначално при верификацията е изследван 2D числен модел във вертикалната равнина, перпендикулярна на улея.

С цел да се извърши числено изследване на нова акустична бариера (абсорбер) е използван софтуер COMSOL Multiphysics® версия 5.1. Разработеният числен 2D модел (Фиг. 2.4) изследва влиянието на новия акустичен абсорбер върху степента на намаляване на акустичните вълни в звуков честотен диапазон от 125 Hz до 4000 Hz.

Разработеният числен модел на акустичен абсорбер се състои от звукова изолираща бариера, твърда звукова граница, източник на акустичен шум и микрофон, показани на Фиг. 2.4. Тук: 1 – Среда на разпространение на звуковите вълни след акустичната бариера; 2 – акустична бариера; 3 – Среда на разпространение на звуковите вълни в реверберационната камера; 4 – граница на акустична област (Plane Wave Radiation); 5 – вътрешна акустично твърда граница (Interior Sound Hard Boundary (Wall)); 6 – външна акустично твърда граница (Sound Hard Boundary (Wall)); 7 – източник на цилиндрична акустична вълна; DP2 – зона в която се измерва звуковото налягане и се определя средната стойност на нивото на звуково налягане (зона на микрофона); DP1 – зона в която се измерва звуковото налягане и се определя средната стойност на нивото на звуково налягане (зона на източника).



Фиг. 2.4. Числен модел на елемент от акустичен абсорбер за изследване в среда на COMSOL Multiphysics

Таблица 2.1. Геометрични параметри

Параметър	Стойност
Дебелина на бариерата	0.1 m
Диаметър на бариерата	0.41 m
Разстояние между акустичната бариера и звуковия източник	0.5 m
Височина на източника на звук	0.21 m
Разстояние между бариерата и микрофона	1 m
Височина на микрофона	0.21 m

Материалът на абсорбера е полиетилен с висока плътност (HDPE). Неговите параметри са представени в Таблица 2.2.

Таблица 2.2. Параметри на материала на абсорбера

Параметър	Стойност
Плътност	970 kg/m <sup>3</sup>
Скорост на звука	2310 m/s
Коефициент на Поасон	0.40-0.45
Модул на Юнг	1.035 N/mm <sup>2</sup>

Средата, в която се изследва абсорбера е въздух с параметри изброени в Табл. 2.3.

Таблица 2.3. Параметри на околната среда

Параметър	Стойност
Плътност	1.19 kg/m <sup>3</sup>
Скорост на звука	343 m/s
Отношение на специфични топлини	1.4

За да се извършат необходимите симулации в COMSOL е използван Акустичен модул за налягане в честотната област по октави от 125 Hz до 4000 Hz. Стойностите на параметрите са зададени по следния начин: Референтно налягане на въздуха = 20 μPa; Скорост на вълната = 343 m/s; Температура = 293,15 K; Абсолютно налягане = 1 atm.



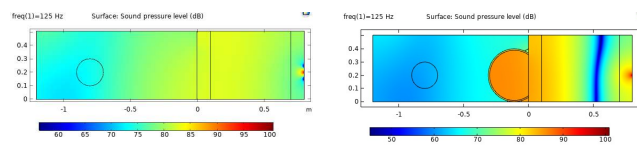
Изчисленията на разпространението на акустични вълни и тяхното взаимодействие с акустичната бариера са извършени с помощта на уравнения на Хелмхолц за пълното акустично налягане:

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m \quad p_t = p + p_b, \dots \quad k_{eq}^2 = \left( \frac{\omega}{c_c} \right)^2 - k_z^2 \quad (4.1)$$

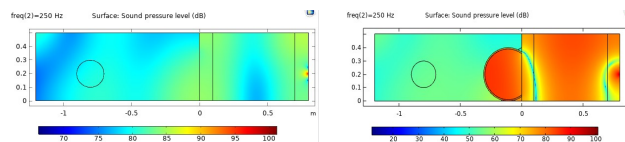
където:  $\rho_c$  – Константна плътност на флуида (плътност на средата, константа във времето),  $kg/m^3$ ;  $p_t$  – Общо акустично налягане (пълното налягане),  $Pa$ ;  $p_b$  – Поле за акустично налягане на фона,  $Pa$ ;  $p$  – Акустично налягане,  $Pa$ ;  $q_d$  – Източник на диполния домейн,  $N/m^3$ ;  $Q_m$  – Източник на монополен домейн,  $I/s^2$ ;  $k_{eq}$  – Брой вълни в 2D,  $I/m$ ;  $k_z$  – Брой вълни в 2D,  $I/m$ ;  $\omega$  – Ъглова честота,  $I/s$ ;  $c_c$  – Скорост на звуковата вълна,  $m/s$ ;

Изследването е направено при три стойности на звуковото налягане на източника на цилиндрични звукови вълни (0,5; 1 и 10 Pa) и при шест октавни честоти: 125, 250, 500, 1000, 2000 и 4000 Hz. На фигурите по-долу са представени резултатите при звуково налягане на източника на цилиндрични акустични вълни 1 Pa.

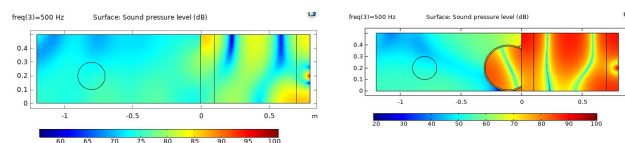
Симулационният модел изследва промяната на нивото на звуковото налягане по октави в дадена зона пред и след акустичната бариера. Изследването е направено без и с акустична бариера, за да се определи степента на затихване на нивото на звуково налягане по октави при поставяне на акустична бариера.



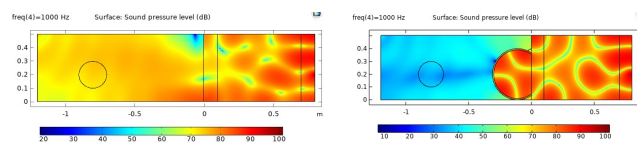
Фиг. 2.5. Ниво на звуковото налягане без и с акустична преграда при октава 125 Hz.



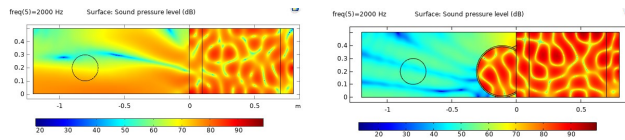
Фиг. 2.6. Ниво на звуковото налягане без и с акустична преграда при октава 250 Hz.



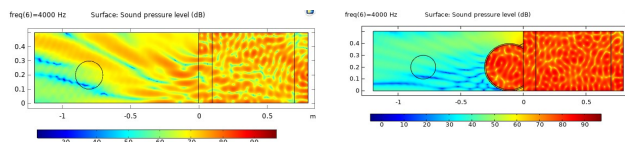
Фиг. 2.7. Ниво на звуковото налягане без и с акустична преграда при октава 500 Hz.



Фиг. 2.8. Ниво на звуковото налягане без и с акустична преграда при октава 1000 Hz.



Фиг. 2.9. Ниво на звуковото налягане без и с акустична преграда при октава 2000 Hz.



Фиг. 2.10. Ниво на звуковото налягане без и с акустична преграда при октава 4000 Hz.

Експерименталната постановка е представена на Фиг. 2.11. Използвана е акустична реверберационна камера с размери 50 x 55 x 100 cm. Тя има акустично твърди стени, за да се създаде дифузно звуково поле, а отвън е покрита с шумоизолиращи материали. В камерата има източник на звук.

Първоначално е извършвано измерване без наличието на бариерата, като са записани нивата на шум от източника. След това на входа на камерата е поставен тестваният образец на бариерата, като страничните отвори са запълнени с материали с висока степен на звукоизолация. Отново са записани нивата на шум след бариерата при същите нива на източника.



Фиг. 2.11. Схема на експерименталната постановка



Фиг. 2.12. Експериментално тестване на изследваните образци

Материалът на тествания образец на преграда е високоплътен поливинил, а външният диаметър на преградата е два вида: гладък и оребрен. (фиг. 2.12). В обема на абсорбера е поставен абсорбиращ материал /стъклена вата/ с обемна плътност 7,7 kg/m<sup>3</sup>. За експеримента не е използван вътрешен перфориран екран.

Спектралният анализ е извършен със следните параметри: експоненциално осредняване при терцоктавен филтър; експоненциално времево осредняване на 0,25

секунди със свободно тригериране; долна честотна граница 31,5 Hz; горна честотна граница 8 kHz. Обхватът на честотния диапазон е подбран така, че да има съпоставимост на резултатите с тези от литературни данни.

**Таблица 2.4. Ниво на шума при различни честоти, с и без бариера**

Честота, Hz	Без бариера, dB	С бариера, dB	Редукция, dB
125	6.85	4.71	2.14
250	28.31	5.83	22.48
500	22.53	6.88	15.65
1000	27.11	6.29	20.82
2000	30.89	4.55	26.31
4000	23.78	6.97	16.81

**Таблица 2.5. Числени и експериментални данни за нивото на редукция на шума при бариерата с гладък профил**

Честота, Hz	Числени резултати, dB	Експериментални резултати, dB
125	2.14	3.71
250	22.48	10.8
500	15.65	18.02
1000	20.82	15.91
2000	26.34	20.31
4000	16.81	29.01
8000	35.62	34.61

Симулационните резултати в COMSOL Multiphysics® са представени в таблица 2.4. Първоначално са представени тези без бариера и след това е представено редуцирането през бариерата с гладък профил.

В таблица 2.5 е представено сравнение на симулационните резултати в COMSOL и експерименталните резултати.

В симулационните резултати се наблюдава нелинейна зависимост на затихване във функция от честотата. При ниска честота (125 Hz) постигнатото затихване има най-ниска стойност, след това при 250 Hz затихването се увеличава. При 500 Hz има лек спад и отново след 500 Hz затихването започва да се увеличава до 1000 Hz и 2000 Hz. Има спад след 2000 Hz до 4000 Hz, и за интервала от 4000 Hz до 8000 Hz има линейно увеличаване. Средното затихване за изследваната гладка ПВЦ тръба е 18,81 dB, а това, постигнато със симулации в COMSOL Multiphysics® е 20,13 dB. Разликата е 6,6 %. Това показва, че численото изследване на акустичните прегради с този продукт дава достоверни резултати и може да се използва при решаването на следващите задачи.

В табл. 2.6 са представени резултатите от експеримента с профилирана от външната страна бариера. Тя е съставена от два слоя материал, вътрешният с дебелина 2 мм, а външният с дебелина 3 мм. Поради профилирането на външният слой, обемът между двата слоя е зает от флуид. Това прави като цяло преградата около два пъти по-тънка от другата. Извършвано е едновременно измерване на нивото на звуковото налягане преди (в акустичната камера) и след преградата по октавни честотни ленти. Нивата на шума и нивото на снижаването му са посочени в колоните на табл. 2.6 по терцоктави. Вижда се, че намаляването на нивото на шума е в диапазона между 2 dB и 16 dB за различните терцоктави, а за целия честотен диапазон средната редукция е 8,16 dB.

**Таблица 2.6. Експериментални резултати за нивото на шум без и с наличие на профилирана отвън преграда**

Централна честота на терцоктавата (Hz)	Ниво на шума (dB)		
	Без преграда	С преграда	Намаление на нивото на шума от преградата
31,5	37,76	32,66	5,11
63	50,80	44,41	6,39
125	56,14	54,76	1,38
250	61,23	51,45	9,78
500	71,02	62,94	8,08
1000	75,23	66,60	8,63
2000	73,37	63,76	9,61
4000	81,20	66,02	15,18
8000	71,07	61,80	9,28

Нивата на шума и нивото на снижаването му са посочени в колоните на табл. 2.6 по терцоктави. Вижда се, че намаляването на нивото на шума е в диапазона между 2 dB и 16 dB за различните терцоктави, а за целия честотен диапазон средната редукция е 8,16 dB. Всички резултати са получени в съответствие със стандартните изисквания за калибриране и измерване на шум.

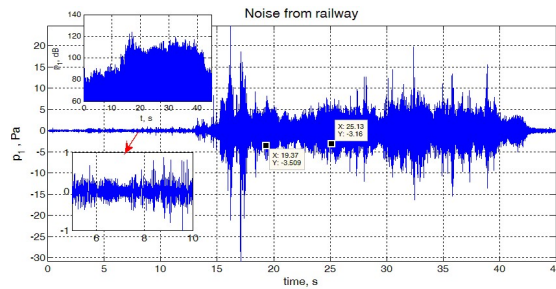
Въз основа на тези резултати, авторът прави извода, че предлаганият нов тип акустична бариера може ефективно да се използва за снижаване на шума, излъчван от контакта колело-релса, и е продължил изследванията чрез разширяване на конструкциите на новия тип абсорбери и използване на експериментални данни за нивото на шум.

Експерименталната постановка за изследване акустичните свойства на новия тип екран е представена на фиг. 2.11.

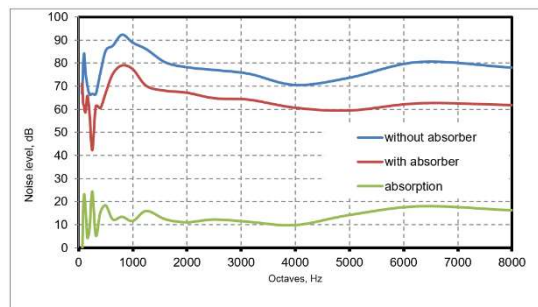
Лабораторните тестове се осъществяват с генериране на „бял“ шум и реален шум от движеща се влакова композиция. Целта на измерванията с бял шум е да се определи степента на снижаване нивото на шума зад бариерата в широк честотен диапазон, а с реален шум на влака – нивото на шумозащита при реални условия.

За провеждане на експеримента с реален източник от влакова композиция е използван такъв от преминаване на товарна влакова композиция. Той е записан при преминаване на товарна влакова композиция с дизелов локомотив и 12 товарни вагона за насипни товари със скорост 68 km/h преди навлизането в спирката на с. Нова Надежда (жп магистрала „Марица“).

На фиг. 2.14 са представени съвместно всички резултати. Най-горната линия представя нивото на шума без абсорбер, следващата линия – с абсорбер, а най-долната линия – нивото на снижение на шума. При ниските честоти нивото на снижение на шума е около 10 dB, а при високите честоти достига до 20 dB.

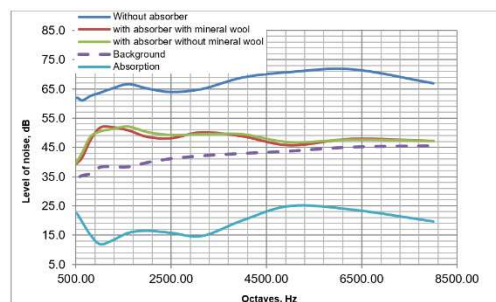


**Фиг. 2.13. Запис на реален шум от влакова композиция, прилаган при това експериментално изследване**



**Фиг.2.14. Нива на звуково налягане с и без тествания акустичен екран, и снижение на нивото на шума при наличие на екран**

Сравнението на резултатите за дата типа преграда – с и без минерална вата са представени на фиг. 2.15. Най-горната линия представя нивото на излъчвания „бял“ шум в камерата, без бариера. Следващите две линии по-долу са резултатите с тестваните бариери, като зелената е за образец без минерална вата, а червената – с минерална вата. Прекъсваната линия представя нивото на фоновия шум, а светло синята линия най-ниско – нивото на снижаване на шума след бариерата. При ниските честоти нивото на абсорбция е около 15 dB, докато при високите честоти достига до 25 dB. И в двете конструкции редуцирането на нивото на шума при 1 kHz терцоктава е около 13 dB.



**Фиг. 2.15. Измерено ниво на звуковото налягане с и без абсорбер и източник на бял шум.**

Разликите в нивата на звуковото налягане при използване на абсорбер с минерална вата и без минерална вата са много малки, поради което използването на минерална вата с аналогични характеристики за този тип преграда е необосновано.

Всички събрани данни се публикуват след направата на редица тествания, осъществени чрез функцията RMS на измервателното оборудване и софтуера.

### 3. Заключение

Представено експериментално проучване на конструкция на нов акустичен екран на шум при търкаляне. Конструкцията осигурява намаляване на нивото на шума с повече от 10 dB в честотен диапазон 20-2000 Hz. При изследването с реален шум от влака, общото редуциране е средно 13,6 dB.

Като цяло се вижда, че абсорбцията на шум в изследваните честотни диапазони, варира от 5 dB до 23 dB, което показва висока акустична ефективност на тестваните образци на бариери.

Разликата в абсорбцията при използване на абсорбер с минерална вата и без е много малка, поради което използването на минерална вата е необосновано от технологична и икономическа гледна точка. Тези резултати напълно съответстват на аналогични от литературата изводи относно влиянието на класически абсорбиращи материали с относително ниска обемна плътност.

Синтезирани са и са изследвани образци от нов вид акустична бариера, предназначена основно за защита от шума, генериран от контакта колело-релса при релсов транспорт. Направените числени и експериментални тестове на образци на новата бариера показват висока акустична ефективност, а самата конструкция се отличава с производствена, монтажна и експлоатационна технологичност, относително ниски разходи за производство, транспорт, монтаж и поддръжка. Барьерата е приложима както в затворени пространства на релсовите пътища – метростанции, спирки и гари, така и на открито – край трамвайни трасета, влакови трасета в населени места и др.

Основните приноси на предложената разработка са:

Синтезирана е конструкция на нов тип акустична бариера за намаляване нивото на шума, генериран от контакта колело-релса при движението на жп возила, която може да е ефективна както в затворени пространства, така и на открито;

Синтезираната конструкция се отличава с конструктивна простота, производствена технологичност, относително ниски разходи за транспорт, монтаж и поддръжка, като за основните елементи може да се използват и рециклирани материали от замърсяващи отпадни продукти;

Извършено е числено моделиране и изследване на образци от конструкцията на новата преграда с помощта на професионален софтуер за акустични изследвания;

Оборудвана е полу-безехова камера и е изградена малка реверберационна камера с необходимата екипировка за експериментални лабораторни изследвания на образци на акустични бариери;

Извършено е експериментално лабораторно изследване на образци от конструкцията на новата преграда с помощта на професионална апаратура и софтуер за акустични изследвания;

Получените числени и експериментални резултати за нивото на шумозащита на новата акустична бариера имат малка разлика (средно под 10%), което позволява по-нататъшно използване на процедурата по числено симулиране за изследвания на този тип бариери;

Получените числени и експериментални резултати за нивото на шумозащита на новата акустична бариера показват висока акустична ефективност.

## Литература

1. Kralov I., I. Ignatov, Experimental study and analysis of new wheel/rail contact noise absorber, Механика на машините, бр. 98, стр. 12-17, Варна, 2012, ISSN 0861-9727 (print).
2. Кралов, И., Анализ на патентни решения за намаляване на излъчвания шум от контакта колело-релса при движение на железопътни превозни средства, Механика на машините, бр. 98, стр. 90-94, Варна, 2012.
3. Кралов, И., К. Неделчев, И. Игнатов, Експериментално изследване на шума, генериран при движение на колоос по релсов път, Годишник на ТУ-София, бр. 62, кн. 3, стр. 133-140, 2012, ISSN 1311-0829 (print);

### Списък на патентно защитените разработки по дисертационния труд

1. Кралов, И., И. Игнатов, К. Неделчев, Шумоизолиращ панел и шумоизолираща бариера, Полезен модел Рег. № 3638, BG 2731 U1, 2017.
2. Кралов, И., И. Игнатов, К. Неделчев, Двустранно шумоизолиращ панел и шумоизолираща бариера, Полезен модел Рег. № 3639, BG 2732 U1, 2017.

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г. София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	декември 2019 г.

## Modeling of Noise Reduction Measures in a Residential-commercial Building. Acoustic Assessment of the Site and the Environment. Approach to Developed Acoustic Project

Milcho GEORGIEV

Technical University of Sofia, Faculty of Mechanical Engineering,  
Department of Fundamentals and Technical Means of Design, Sofia, Bulgaria  
e-mail: [mtge@tu-sofia.bg](mailto:mtge@tu-sofia.bg)

### Abstract.

An acoustic assessment of a mixed-use building was performed and environmental modeling was performed using CadnaA's specialized software environment. The study aims to establish the expected noise levels in the residential premises of the building from the environment and the operation of public parts, including air, rail and road traffic, indoor and outdoor parking, ventilation and air, air conditioning systems of the building, and change the noise levels in the environment during its operation. Defining the input data for noise sources and selection of calculation and measuring points. Preparation of the calculation model, verification, and verification of the calculation results. Reporting the expected degree of discomfort in some parts of the buildings and reporting the noise levels as a result of the operation. Analysis of the results of the calculations and verification. Determining and taking measures to reduce noise levels to regulatory values in different rooms depending on their purpose. Mapping of the noise in the considered area under the current regulations - Ordinance № 6 of June 26, 2006, on the environmental noise indicators, taking into account the degree of discomfort during the different parts of the day, the limit values of the environmental noise indicators, the methods on the assessment of the values of noise indicators and the harmful effects of noise on human health, Directive 2002/49 / EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 on the assessment and management of environmental noise.

**Keywords:** Noise, noise level, noise calculation, noise measurement, noise reduction, noise mapping, acoustic project

### Акустична оценка на сграда със смесено предназначение. Моделиране и мерки за намаляване на шума в сградата и в околната среда

Милчо ГЕОРГИЕВ

#### 1. Въведение. Общи разпоредби. Шум и гранични стойности

Шумовото замърсяване оказва съществено въздействие върху физическото и психическото здраве на хората. Чувствителността към шума е в широк диапазон и е различна в зависимост от индивидуалното усещане на човека. Степента на дискомфорт на обитателите, изложени на шум в зависимост от характера му, времето на денонощието, предназначението на помещенията за обитаване, характера на



териториите и зоните във и извън урбанизираните територии се определя чрез дневно Lден, вечерно Lвечер, нощно Lнощ и денонощно L24 ниво на шума съгласно Приложение № 1 на Наредба 6 от 26.06.2006 г.

Дневният период е с продължителност 12 часа и включва времето от 7 до 19 ч., вечерният период е с продължителност 4 часа и включва времето от 19 до 23 ч. и нощният период (с продължителност 8 часа) включва времето от 23 до 7 ч.

За разглежданата територия граничните стойности на дневните нива на шума в жилищни зони и територии 55 dB(A), вечер – 50 dB(A), респ. за нощ – 45 dB(A), а за територии, подложени на въздействието на интензивен автомобилен трафик 60 dB(A), вечер – 55 dB(A), респ. за нощ – 50 dB(A).

Съществено влияние върху акустичната среда оказва високата интензивност на автомобилния трафик, недостатъчно места за паркиране, остарелия автомобилен парк, презастрояване на кварталите породено от бързото разрастване на големите градове и увеличената мобилност на хората. Обследваната територия е жилищна зона разположена в близост до булевард осигуряващ достъп до главен околоръстен път, който е предпочитан маршрут за бърз достъп до Източните, Южните и Централните части на столицата. В резултат на бързото разрастване и на съседните квартали през последните години се наблюдава рязко увеличаване на трафика в квартала поради липсата на алтернативен бърз маршрут в резултат на което е налице предпоставка за наличие и на интензивен автомобилен трафик. Оценката на нивата на шума в околната среда са извършени съгласно граничните стойности за територии изложени на интензивен автомобилен трафик.

## **2. Описание и цел на изследването**

Методът на оценка на шумовите нива в околната среда и предприемането на мерки за намаляването им при изграждането на жилищни и търговски обекти е чрез моделиране в среда на CadnaA. За целта е разработен 3D изчислителен модел върху GIS подложка на терена и съответния проектиран или съществуващ жилищен/търговски обект.

CadnaA е водещ и лесен за използване софтуер за изчисляване и картографиране на шума, който е широко използван по целия свят. Софтуерът CadnaA дава възможност проектите да бъдат управлявани по възможно най-ефективния начин.

За целите на изследването се подготвя изчислителен 3D модел на обекта чрез използването на проектни данни за източниците на шум и тяхната звукова мощност. В случай че няма достатъчно данни, се извършват полеви измервания на шума в околната среда в избрани точки около обекта, които могат да бъдат използвани и за целите на верификация. При въвеждане на различни входни данни в изчислителния модел могат да бъдат изчислени варианти за очаквано шумово натоварване на изследвания обект и да бъдат предприети мерки за намаляването на шума, където е необходимо.

Шумът в градска среда от автомобилен трафик се изчислява съгласно препоръките в Директива на ЕС 2002/49/ЕК, Анекс II и Наредба № 6 от 26.06.2006 г. на МОСВ. Съгласно изискванията на стандарта се определя вида на трафика, наклона на пътя, вида на пътната повърхност и се дефинират съответните корекции. При дефинирането на промишлените източници параметрите от съществено значение са звукова мощност, режим на работа и местоположение на източника в пространството на обекта.

Изчисленията на шумовите нива на открито са на 4 м височина и грид с размер 1x1 м, а при закрити пространства напр. закрити паркинги – на височина 1,5 м. Други отчитани параметри могат да бъдат обобщени средногодишни стойности за скорост на

вятъра, температура и влажност на въздуха. За описания обект са извършени дневни и нощни изчисления на очакваното шумово натоварване.

Цел на изследването е обследване на сграда от смесен тип, ситуирана в жилищни зони и територии изложени на автомобилен трафик. Сградата е проектирана както следва: на кота +/-0.00 са разположени търговски обекти, на кота +2.50 офисни помещения, на кота +5.00 до кота +12.50 м – апартаменти.

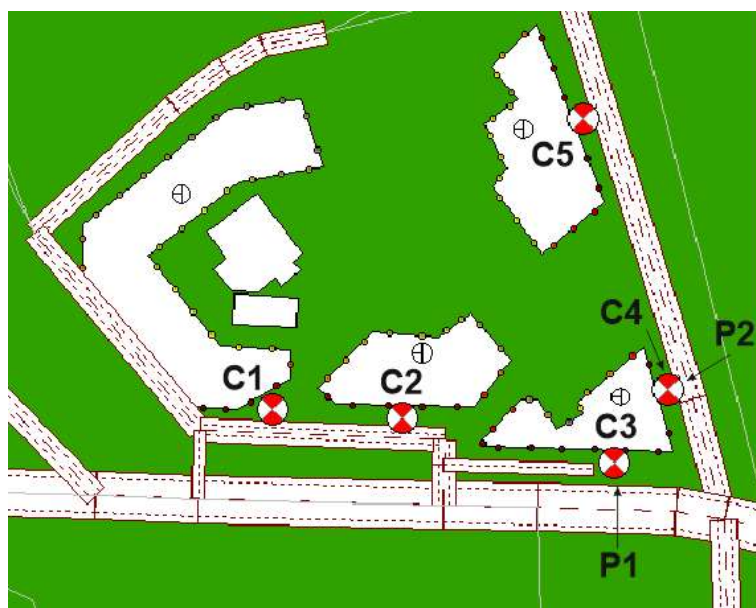
В разглежданата територия няма трасета за преминаване на самолети и железопътни връзки (трамваи). При изчислението не са въвеждани данни и коефициенти за източници на шум от самолетен и железопътен трафик.



Фигура 1 Общ изглед на терена

Основни източници на шум в изследваната територия са автомобилния трафик, шум от коли на градски транспорт, локален шум породен от обслужването на обекта – паркинг на сградата, шум от климатичната и вентилационна система на обекта.

Схемата на разположение на измервателните и изчислителни точки е представена на фигура 2.



Фигура 2 Схемата на разположение на измервателни и изчислителни точки

Измервателните точки са разположени пред сградата, а изчислителните са моделирани по фасадата на сградата с цел да бъде получени стойности за шумовите нива на различните етажи на сградата. Резултатите от изчисленията могат да бъдат използвани за предприемане на мерки за намаляване на шума по фасадата. При изработването на 3D модела са въведени и параметрите на съседните сгради с цел да бъде получена информация как проектирания обект ще промени акустичната среда за тях, а също така и как те се отразяват на обследвания обект.

Измерванията са проведени с калибрирана апаратура съгласно нормативните изисквания за измерване и оценка на шум в околна среда. Методите за изпитване на дневното еквивалентно ниво на шума са съгласно БДС ISO 1996-1/2005, БДС ISO 1996-1/2011, БДС 15471/1982, оценката на съответствието е съгласно Наредба № 6, ДВ бр. 58/2006 г. Резултатите от полевите измервания се използват за верифициране на резултатите от изчисленията.

Измерванията са извършени в пет последователни работни дни в часовия интервал от 10:00 ÷ 15:00 часа в продължение на 1 час и по време на измерванията са извършвани преброявания на трафика на преминаващите автомобили, които са категоризирани в изчислителния модел съгласно нормативните изисквания и методи.

### 3. Резултати от изследването

В табличен вид са представени осреднени резултати, получени от собствени полеви измервания, които са използвани като входни данни в изчислителния модел.

При извършените измервания се установи превишаване на еквивалентните шумови нива в точки P1 и P2 в диапазона 4.70 до 5.50 dB(A) през различните дни за дневен период. След обработване и осредняване на резултатите приемаме, че средното превишаване на шумовите нива за дневен период в т. P1 е в диапазона 5.05 dB(A) и т. P2 в диапазона 3.44 dB(A). За нощен период превишението на шумовите нива е в диапазона 4,10 dB(A) в т. P1 и 1,65 dB(A) в т. P2. Получените резултати са заложили в изчислителния модел. Оценката е извършена за територии, изложени на интензивен автомобилен трафик.

**Таблица 1 Обобщени осреднени данни заложили в модела използвани за числено 3D моделиране и верификация.**

№	L <sub>aeq</sub> , dB (A)	ΔL <sub>eq</sub> , dB (A)	LVV Σ, h	HVV Σ, h	LV speed (km/h)	HV speed (km/h)
P1 <sub>day</sub>	65.05	5.05	466	46	50	40
P2 <sub>day</sub>	63.44	3.44	211	21	40	30
P1 <sub>night</sub>	54.10	4.10	94	10	50	40
P2 <sub>night</sub>	51.65	1.65	40	4	40	30

LV speed (km/h) – Light Vehicle speed (km/h), HV speed (km/h) – Heavy Vehicle speed (km/h)

Моделиране на разпространението на шума в изчислителната територия за дневен период. Числено представяне на резултатите от изчисленията в табличен вид.

При проведеното изчисление на шумовите нива в 5-те контролни точки (вж. табл. 2) се потвърждава очакваното превишаване на еквивалентните шумови нива в диапазона 4,90 ÷ 6,20 dB(A) за дневен период и 2,9 ÷ 5,90 за нощен период.

Оценката е извършена за територии, изложени на интензивен автомобилен трафик. За локални източници на шум са въведени данни за стандартна вентилационна система от типа на Daikin, Carrier със прогнозна звукова мощност в диапазона – 69 ÷ 88 dB(A).

**Таблица 2 Превышаване на нивата на шум**

№	Еквивалентно ниво на шума dB(A)					
	L <sub>day</sub> , dB(A)	L <sub>night</sub> , dB(A)	ΔL <sub>day</sub> , dB(A)	ΔL <sub>night</sub> , dB(A)	Гранична стойност L <sub>day</sub> , dB(A)	Гранична стойност L <sub>night</sub> , dB(A)
C1	65.90	54.80	5.90	4.80	60.0	50.0
C2	66.10	55.40	6.10	5.40	60.0	50.0
C3	66.20	55.90	6.20	5.90	60.0	50.0
C4	65.30	53.10	5.30	3.10	60.0	50.0
C5	64.90	52.90	4.90	2.90	60.0	50.0

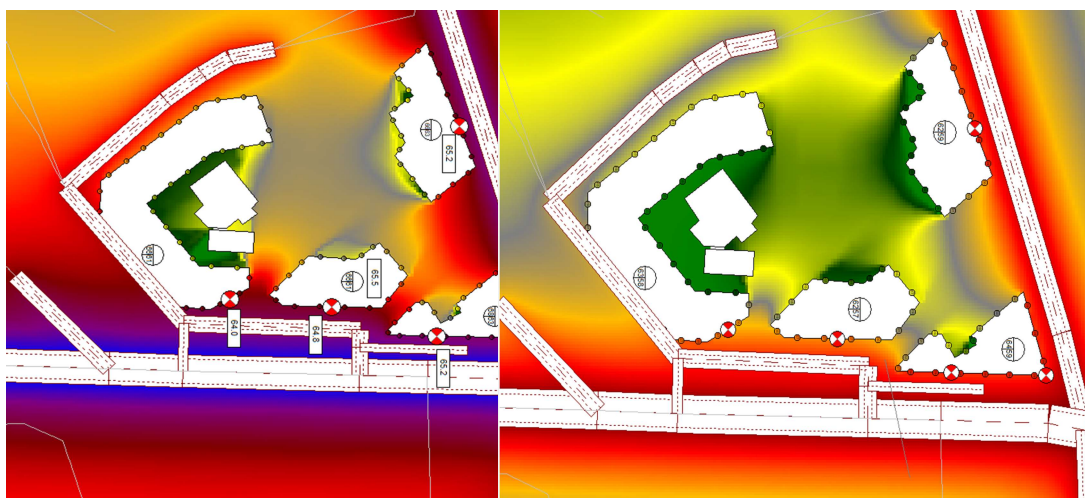
За целите на верифицирането т. С3 е избрана да съвпада с измервателна точка P1, а точка С4 съвпада с измервателна точка P2. При извършеното сравнение се виждат минимални отклонения на изчислените от измерените нива на шум в диапазона на 1,15 dB(A) до 1,86 dB(A), което е в рамките на допустимите 3 dB(A) разлика, следователно можем да заключим, че изчислените шумови нива са верифицирани и реално очаквани – табл. 3. При увеличаване на трафика, заселване на сградата и извършване на дейности по нейното обслужване може да се очаква промяна на акустичната среда и повишаване на нивата на шум. За целта на изследването са заложили базови коефициенти.

**Таблица 3 Верификация на резултатите**

Point ID	L <sub>aeq</sub> , dB(A)	L <sub>aeq-CadnaA</sub>	ΔL <sub>24H/CadnaA</sub>
P1day	65.05	66.20	1.15
P2day	63.44	65.30	1.86
P1night	54.10	55.90	1.80
P2night	51.65	53.10	1.45

С помощта на CadnaA резултатите от изчисленията на шума са представени и в графичен вид под формата на шумови карти за дневен и нощен период. На фиг. 3 е представено картографиране на шума в среда на CadnaA за обследваната територия за дневен и нощен период.

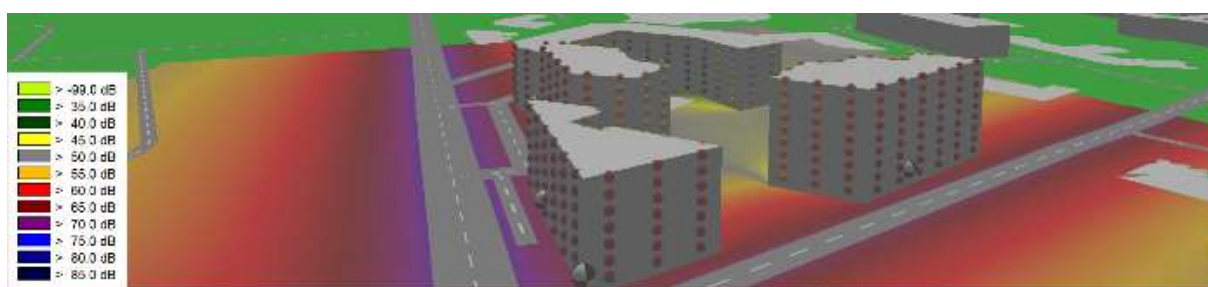
Представено е 3D разпределение на шума по фасадите на сградите за дневен и нощен период. От представените визуализации се вижда цветово представяне на нивата на шума на най-силно изложените фасади, респективно и визуализация на тихите фасади на сградите.



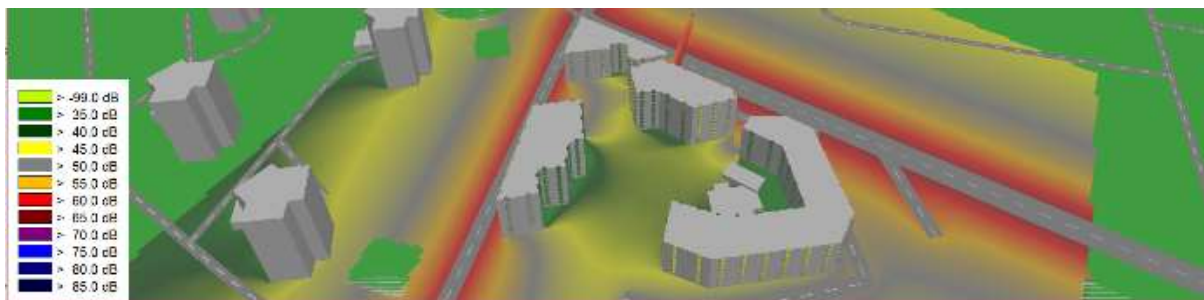
**Фигура 3** Разпространение на шума за дневен и нощен период на обследваната територия



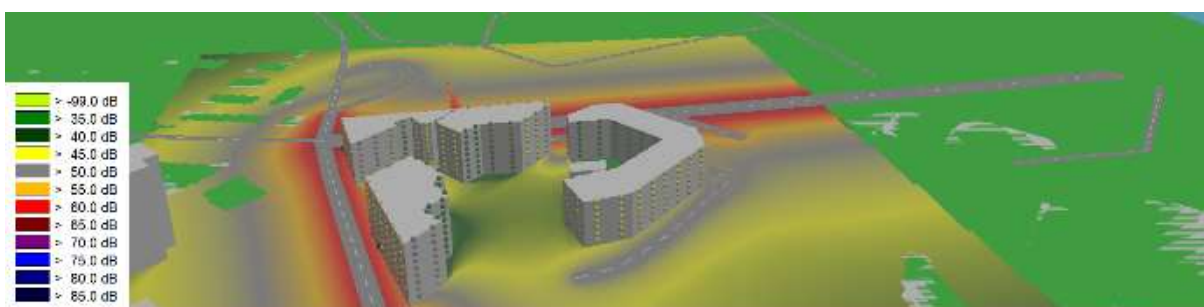
**Фигура 4** – Картографиране разпространението на шума за дневен период на изследваните сгради



**Фигура 5** – Картографиране разпространението на шума за дневен период на изследваните сгради



Фигура 6 Картографиране разпространението на шума за нощен период на изследваните сгради



Фигура 7 Картографиране разпространението на шума за нощен период на изследваните сгради

#### 4. Изводи

Описан е метод за изследване и акустична оценка на околната среда чрез специализиран софтуер за изчисляване на шумови нива CadnaA. Извършени са полеви измервания и различни симулации и сценарии на разпространение на шума в околната среда. Оценено е влиянието на автомобилния трафик, състоянието на настилката, както и допълнителните локални източници на шум. Изчислителните резултати показват пълно верифициране с резултатите от измерванията в рамките на допустимите  $\pm 3\text{ dB(A)}$ .

От получените резултати се наблюдава превишаване на шумовите нива в дневен и нощен период. За целта могат да бъдат използвани шумозащитни стъклени пана / бариери и дограма с високи шумови характеристики.

Изпълнените в настоящата работа дейности са добра основа и предпоставка за последващи подробни изследвания.

Предмет на допълнително обследване могат да бъдат симулации чрез изграждане на стъклено пано по дължина на фасадата на сградата и подходяща височина, което може да редуцира шума на  $5 \div 15\text{ dB(A)}$ . Допълнително комбиниране на мерките и отчитане на шумоизолационните характеристики и параметри на изолацията и дограма се очаква понижаване на еквивалентни нива на шума в диапазона  $15 \div 20\text{ dB(A)}$ .

Предвид, че интензивността на автомобилния трафик е променлива величина, то би могло да се извърши обследване с различни модели дограма, да се обособи зелен пояс пред обекта от високи дървета, които да имат ролята на допълнителна естествена бариера, да се изберат подходящи материали с високи шумови характеристики при изграждане на фасадата на сградата и други подходящи мерки за обезшумяване.

## **Благодарности**

Изследването е извършено с оборудване и софтуер от Лабораторията за вибрации и акустичен шум в Техническия университет – София.

## **Литература**

1. ISO 9614-2:2001 Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Part 2: Measurement by scanning (ISO 9614-2:1996)
2. БДС ISO 1996-1:2016 – Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures
3. БДС ISO 1996-2:2011 – Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels
4. БДС ISO 1999:2014 (БДС EN 9612) – Acoustics – Estimation of noise-induced hearing loss
5. БДС 15471:1982 – Шум. Методи за измерване и оценка в помещенията на жилищни, обществени сгради и населени места Noise. Methods of measurement and assessment in the premises of residential, public buildings and settlements
6. Наредба № 6 от 26 юни 2006 г. за показателите за шум в околната среда, отчитащи степента на дискомфорт през различните части на денонощието, граничните стойности на показателите за шум в околната среда, методите за оценка на стойностите на показателите за шум и на вредните ефекти от шума върху здравето на населението, (Обн.ДВ. бр.58 от 18.07.2006 г.)
7. CadnaA – софтуер за изчисляване на шумови нива
8. Директива 2002/49/ЕО на Европейския парламент и на Съвета от 25 юни 2002 година относно оценката и управлението на шума в околната среда

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г. София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	декември 2019 г.

## Investigation of Sound Insulation Properties of Most Common Partition Walls in Bulgaria

Aleksandar KIRECHEV, Zlatka MADZHAROVA

Technical University- Sofia, Bulgaria; University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy- Sofia,  
Bulgaria

[sakata6371@gmail.com](mailto:sakata6371@gmail.com), [z.mad.arch@gmail.com](mailto:z.mad.arch@gmail.com)

### Abstract.

The objective of this paper is to examine the most common existing partition walls in multiple occupancy apartment buildings and see if they meet the technical requirements for airborne sound insulation. Statistical data is collected on existing building types in Bulgaria. Discussion on national sound control regulations was made. Sound insulation index of frequently used types of partition walls was investigated and analyzed. The conclusion on sound insulation quality was made on account of collected data. Future work and discussion for next publication is also considered.

**Keywords:** airborne sound insulation, building requirements, building types, sound insulation index;

## 1. Introduction

The new standards in the developing countries in Europe raised the expectations of quality and comfort of living in residential buildings. Inhabitants not only look for efficient systems like term insulation, green design, parking spaces etc., but acquire acoustic comfort and privacy.

Residents in multistory buildings have encountered different aspects of sound propagation in their dwellings. There are two main aspects of this problem- airborne noise in horizontal direction and impact noise.

Transmission of impact noise occurs due to monolithic connection between the main building elements. Example given the concrete slabs and screed. Elastic connection between elements is the most effective solution in this case and should be considered early in the design process. Airborne noise propagation has a great impact on acoustic comfort in multiple dwellings. Architectural design of apartment buildings has a key role as to attaching different types of living spaces from multiple homes. Most common example is living room adjacent to another apartment's bedroom.

The focus of this article will be to investigate the sound insulation properties of most common wall structures between dwellings and to compare them with the existing regulation requirements.

## 2. Statistics of existing building types

Based on the data from the national institute of statistics we can divide the existing wall building types into two significant groups- heavy and light.



Heavy:

- Monolithic in-situ cast;
- Prefabricated construction;
- Clay bricks;
- Hollow clay bricks;
- Aerated Concrete.

Light:

- Gypsum bricks;
- Lightweight double gypsum walls.

According to the data from the national institutes of statistics collected until 2005 there are three most common types of constructions- prefabricated construction, masonry with concrete floors, masonry with wooden floors.

Prefabricated constructions consist of concrete elements and have significantly bigger amount of dwellings in comparison to the other two types.

Masonry with concrete floors is the most common type of construction- 28% of the total amount of existing buildings in Bulgaria until 2005. Nevertheless, the number of dwellings is significantly lower than the prefabricated constructions. Partition walls from masonry type can be built with clay bricks, clay hollow bricks, aerated concrete bricks and gypsum bricks.

Masonry with wooden floors is associated with heritage and low-rise buildings. Gypsum brick, aerated concrete bricks and light weight double gypsum walls are mostly used as partitions in this type of building construction.

**Table 1**

Type	Existing building types /2005/	%	№ of dwellings
H	Prefabricated construction	23	48
H	Monolithic concrete	14	7
H	Masonry with concrete floors	28	2
H/L	Masonry with wooden floors	26	3
L	Frame built	8	

According to the data from the national institute of statistics in Bulgaria from the second trimester of 2018, the number of new residential buildings with monolithic structure has prevailed.

**Table 2**

Type	New residential buildings /period of 4-6. 2018/	Total 573
H	Prefabricated construction	3
H	Monolithic concrete	425
H	Masonry with concrete floors	125
L	Others	20

In the case of monolithic concrete construction, partition walls are mostly made of hollow clay bricks and aerated concrete bricks.

The prefabricated concrete construction from the last 50 years have been surpassed in numbers by the newly build apartment buildings with monolithic frame and masonry walls. Another aspect is weather the new design details have better performance in providing comfort in the dwellings.

### 3. National standards

The current requirements in Bulgaria regarding to airborne sound insulation between dwellings, according to Ordinance №4 -27.12.2006 are at a level of 53 dB  $R'_w$ , significantly lower than 55 dB  $R'_w$ , which is accepted by many countries.

The Design standards are expressed as  $R'_w$  which applies to the composite overall building system and not to the individual element. Still the ‘deemed-to-comply’ specifications refer only to the main elements. The sound reduction index  $R'_w$  represents a measure of sound pressure difference between two adjacent spaces across a building element and considers the flanking transmission of the surrounding ceiling, floor and walls. The international standards that define the calculation method of  $R'_w$  are ISO12354-1 and ISO717.

The sound insulation index of the partition wall forms 70-80% of the total value of  $R'_w$ . This makes us focus on the performance of individual building elements and not on the overall integrity of the design. Furthermore, complication occurs by the fact that a good design can be undermined by bad construction quality while complying with the regulations.

### 4. Sound insulation index of different types of partition walls

According to [3], [4], [5], [6] the sound insulation index of different types of partition walls is given by Table 3. The results are based on laboratory measurements and classify the different types by their  $R_w$  index.

Table 3

Type of partition wall	Thickness (mm)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	$R_w(C,C_{tr})$ (dB)	Meets the requirements
Light clay hollow brick	250	650	44(-1,-3)	no
Clay hollow brick	250	750	48	no
Fired brick	250	1900	56	yes
Aircrete blocks	250	400	42	no
Concrete (monolithic, prefabricated, etc.)	150	2400	57(-2,-5)	yes
Gypsum wall	125	200	44	no
Double layer gypsum wall	150	300	52	no
Triple layer gypsum wall	175	377	55	yes
Triple layer, double stud gypsum wall	255	188	60	yes

The results shown above are taken from laboratory tests but in practice the sound insulation index decreases due to imperfections caused by low level of construction performance, smaller rooms and particular geometry of the space, flanking transmission and reverberation time.

In the masonry walls a lot of factors can easily compromise this perception- finishing details between walls and floors or ceilings, interceptions with services (ductwork, water supply pipes, downpipes and electrical outlets in addition to the soil and waste pipes).

A major flaw in the prefabricated building system is the finishing detail between the panel and the ceiling/floors. The connection is usually filled with light weight material causing the decrease of sound index from 5÷10 dB.

Interception with services in gypsum walls is a drawback in the integrity of the wall, creating openings for the sound transmission. Furthermore, using the light weight structure for partition walls can resolve in complication for installing furniture and heavier interior decorations.

## 5. Conclusions

According to the collected data on building types in existing homes in Bulgaria until 2005, most of the old residential homes are constructed with prefabricated concrete elements, whereas the newly build apartments are mainly made by monolithic structure.

With good implementation of the prefabricated elements, the sound insulation index meets the regulation requirements. However, from the emerging complains from this type of building and the questionable performance of the construction, there is a need for thorough investigation of the sound reduction index in this particular case.

The prevailing construction type of apartment building in Bulgaria for the past few years have been monolithic concrete structure with masonry partition walls. Hollow clay brick are the predominating type of partition walls. Their sound insulation performance, however, is poor and do not meet the national regulation requirements. On the other hand they have big advantages considering the services- pipes, electrical outlets, and furniture. This is making it more preferable by investors and home owners.

Light weight gypsum walls have a good sound performance and meet the national requirements. However, due to the effects caused by service interceptions are not desirable. This type of wall is also fragile and easy to break, which compromises the security and integrity of the property.

## 6. Future work

Driven by the emerging need of high quality acoustic comfort in the residential buildings, taking into account the cost, security, service and other factors, the future research will provide investigation of complex walls (combination of different materials and structures). The main purpose is to analyze and evaluate the best qualities of each structure for performance as a partition wall between dwellings.

## References

- 1 BDS ISO12354-1:2017, Building acoustics- Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms.
- 2 BDS ISO 717-1:2013, Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation.
- 3 Goretti M., F. Cotana, Sound Insulation of Identical Building Elements in Different Buildings. The 21st International Congress on Sound and Vibration, 13-17 July, 2014, Beijing, China.
- 4 Fitzell R.J., F.R. Fricke, 2004 Changes to the BCA– are they a step forward?, University of Sydney, Sydney, Australia.
- 5 Hongisto V., M. Soukas, Satisfaction with sound insulation in residential dwellings-heavy versus light wall construction, Turku, Finland.
- 6 Losso M., E. Viveiros, Sound insulation of gypsum board in practice, The 2005 Congress and Exposition on noise control engineering, Brazil.
- 7 Ordinance no 4 of 27 December 2006 on the restriction of harmful noise by constructing the buildings in their design and the rules and standards in the performance of the buildings in relation to the noise produced during the construction

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г.</p> <p>София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	декември 2019 г.

## Development, News and Products in the Field of Noise and Vibrations by Spectri Ltd

Boris MIHAYLOV, Ana PISKOVA

Spectri Ltd., Sofia, Bulgaria  
e-mails: [boris@spectri.bg](mailto:boris@spectri.bg), [ana\\_p@spectri.bg](mailto:ana_p@spectri.bg)

### Abstract

Since 1998 SPECTRI LTD focus has been sound and vibration till today. With the development of new technologies in that field, we are trying to adapt, learn, evolve so we can do our work better, accurate and correct to our customers. By becoming partners with world leading companies in the last year we are able to achieve that. In the recent paper a comparative information for the progress, development, news and products in the field of noise and vibrations by SPECTRI Ltd. is presented.

**Keywords:** noise, vibrations, Spectri, measurements, news, development

### 1. Who we are

The company SPECTRI was founded in 1998 with manager Eng. Boris Mihaylov. Specialists in the company are leading experts in the field of noise and vibration with a wide practical experience of successfully implemented projects.

In 2006, Dipl. Eng. Boris Mihaylov took leading role as founder and later on Member of the Management Body, and Co-President of BAPNCM ("Bulgarian Association for Public Noise Control and Management").

Since the founding, an exclusive agency contract has been in force (technical, engineering, service, commercial) of the company – leader in the field of noise and vibrations, Bruel & Kjaer – Denmark.

SPECTRI is partnering with world leading manufacturers of measurement equipment. SPECTRI carries out service activities, deliveries of spare parts and equipment for measurements, monitoring and analysis of vibrations, noise, pressure, power, offset and others., also and engineering and installation on the territory of the Republic of Bulgaria.

SPECTRI organizes different events (courses, symposium, seminars) for training and acquaintance with the latest developments in the field of noise and vibration.

### 2. Mission and vision

Our mission is to help our clients and partners to improve their working conditions, safety, competitiveness and efficiency. In this way, we strive to influence the environment, the quality and the joy of life.

Our vision is to be the preferred partner and provider for leading companies and institutions, which are thinking and carrying about their business and human comfort, development and prosperity and also to be the national centre for competence and knowledge in the field of vibrations and noise.

### 3. Certificates

#### A. SPECTRI with certification ISO 9001:2015

SPECTRI successfully implemented system for managing the quality with compliance with the requirements of international standard ISO 9001:2015 including: Designing, manufacturing, engineering, maintenance, service, trading and delivery of solution, expertise, measurement equipment and software for noise and vibrations, process-parameters. Installations and settings, training and consultations. Measurement, diagnostic analysis, control and assessment of the condition. Test of noise-vibration parameters, calibration of noise and vibrations measuring equipment. The certificate is valid until 25.11.2019.



Fig. 1: Certificate on ISO 9001:2015



Fig. 2: Certificate on BDS EN ISO / IEC 17020:2012



Fig. 3 Certificate BDS EN ISO / IEC 17025

#### B. SPECTRI with certification on BDS EN ISO / IEC 17020:2012 – ACS „SPECTRI – MEASUREMENTS”

Authority body control of type C at "Spectri" Ltd. Sofia is accredited in accordance with BS EN ISO / IEC 17020:2005 by EA "BAS" with a unique certificate number № 122 ACS. This certificate is valid until 11.30.2016

#### C. OKC SPECTRI SCOPE OF ACCREDITATION

CONTROL OF NOISE ENVIRONMENT AND / OR DOMESTIC ENVIRONMENT – range of the control parameter – equivalent noise level, day, night, evening noise:

- **Control of noise environment** – range of the control parameter – equivalent noise level, peak sound pressure level, noise level, daily level of exposure to noise, average weekly level of exposure to noise;
- **Vibration control conveying system hand-arm 'and' body** – range of the control parameter – the daily value of exposure;
- **Vibration control machinery** – range of the control parameter – Vibration acceleration, velocity;
- **Vibration control in residential areas** – range of the control parameter – Vibration acceleration.

*D. SPECTRI with certification on BDS EN ISO / IEC 17025 – ACS „SPECTRI – LAB”*

Laboratory for testing and calibration at SPECTRI LTD. is accredited according to BDS EN ISO / IEC 17025:2006 by EA “BAS” with unique number № 1. The certificate is valid until 30.04.2023.

*E. SPECTRI – LAB SCOPE OF ACCREDITATION*

MEASUREMENT:

- **ENVIRONMENTAL NOISE** – range of the control parameter – equivalent noise level, Maximum A – weighted noise level, noise level at the place of exposure, level of total sound power

CALIBRATION:

- **Acoustic (sound) calibrators** – sound level pressure, dB for nominal frequencies 250 Hz and 1 kHz. Measurement range – 94, 114, 124 dB (according to 20 µPa). CMC – 0,15 dB.
- **Acoustic (sound) multifunctional calibrators** – sound level pressure, dB for nominal frequencies 250 Hz and 1 kHz. Measurement range – 94, 114, 124 dB (according to 20 µPa) from 31,5 Hz to 4 kHz and from 8 kHz to 16 kHz. CMC – 0,2 and 0,4 dB.
- **Sound level meters** – sound level pressure measured in dB for nominal frequencies 31,5 Hz to 12,5 kHz (acoustic calibration). Measurement range – from 94 to 114 dB (according to 20 µPa) from 31,5 Hz to 2 kHz and from 4 kHz to 12,5 kHz. CMC – 0,3 and 0,6 dB.
- **Sound level meters** – sound level pressure measured in dB for nominal frequencies 20 Hz to 16 kHz (electrical calibration). Measurement range – from 20 to 140 dB (according to 20 µPa). CMC – 0,4 dB.
- **Personal sound dosimeters** – sound level pressure for nominal frequencies from 63 Hz to 8 kHz (acoustical calibration). From 60 dB to 120 dB (according to 20 µPa). From 63 Hz to 2kHz, for 4 kHz and for 8 kHz. CMC – 0,4; 0,8; 1,3 dB.

#### **4. Partners and short information about them**

*We are proud to present our new partners as it follows:*

##### **Brüel & Kjaer Vibro**

Internet: [www.bkvibro.com](http://www.bkvibro.com)

Ensuring high availability of rotating machinery with intelligent monitoring solutions, Brüel & Kjaer Vibro has been a global forerunner in this field for decades. Whether for wind or hydro power, the HPI or thermal power industries, numerous leading companies rely on our innovative solutions, high level of expertise and dedicated service.

Brüel & Kjaer Vibro is independent of machine manufacturers and suppliers of process control systems. This allows us to develop solutions that are tailored to the interests of our customers.

##### **Connection Technology Center**

Internet: <https://www.ctconline.com>

Connection Technology Center, Inc. – CTC – offers the widest variety of high quality accelerometers, vibration sensors cables and connectors for industrial use in condition monitoring and predictive maintenance applications. It's an industry leading product portfolio supported by an unconditional lifetime warranty on all CTC Industrial accelerometers and vibration analysis.

### **SoundEar A/S**

Internet: <https://soundear.com/>

SoundEar helps companies worldwide reduce noise at work. We do this through our 20 years of experience in the noise monitoring industry, and through our unique offer of not only measuring noise, but also visualizing noise.

Creating awareness about noise is the first step towards making a change, and we believe the best way to create awareness about noise, is to visualize it.

### **EMS Brüel & Kjaer**

Internet: <https://www.emsbk.com>

EMS Brüel & Kjaer is a global provider of continuous, unattended environmental monitoring solutions. Our managed services and products deliver environmental intelligence to help clients achieve business outcomes and growth.

*And our old ones which we are continuing our partnership with:*

### **Brüel & Kjaer Sound & Vibration A/S**

Internet: [www.bksv.com](http://www.bksv.com)

The company Bruel & Kjaer – Denmark was founded in 1942 by Per Bruel and Viggo Kjaer. From 1994 the company becomes a part from Spectris Group – United Kingdom (See <http://www.spectris.com>). Turnover for the past years is more than € 150 million a year.

The company is world leader in the field of noise and vibrations, with over 65% of world market share. The main ISO and EN standards in the field of noise and vibration have been created by and in collaboration with Bruel & Kjaer specialists.

### **Instantel**

Internet: [www.instantel.com](http://www.instantel.com)

Founded in 1982, Instantel specializes in the production of vibration and explosive modules. The company is part of Stanley Black & Decker, Inc.

Instantel's equipment for "regulated" vibrations and overpressure control over the years has earned the reputation of the most reliable similar equipment (used in over 110 countries around the world) – for various applications in the mining, construction and geotechnical research.

### **Bulgarian Association for Public Control and Management of (BAOKUSH)**

Internet: [www.nonoise-bg.com](http://www.nonoise-bg.com)

BAOKUSH is a non-agricultural public organization that has formed itself as an expert national center of competence in noise and vibration and whose main objective is to promote and defend the expertise in the preparation of opinions, consultations, national and international strategy papers in the field of acoustics.

## **5. Projects**

*A. In 2018-2019, successful updates of Strategic Noise Maps and action plans of:*

- Agglomeration Sofia
- Agglomeration Plovdiv
- Agglomeration Burgas
- Agglomeration Varna
- Agglomeration Ruse

- Agglomeration Pleven
- RIA

### *B. Realization of acoustic audits*

Realization of acoustic audits of large industrial sites as well as of large infrastructure projects:

- Monitoring and noise
- Sound level measurements
- Research
- Noise maps

### *C. System for noise monitoring. Sofia Airport.*

Annual maintenance contract, acoustic expertise, diagnostics and calibration.

### *D. Opening of a modern hydro-acoustic laboratory at the Technical University – Varna*

The main objective of the project is to build a sustainable national competence center where the three sides of the knowledge triangle – education, research and business are in effective and dynamic interaction based on shared strategies, strong and specific engagements and joint research projects and partnerships, explain the beneficiaries of the project.

The laboratory is built in the building of the Faculty of Electrical Engineering. The equipment so far is 3 pcs. hydrophones type 8104 manufactured by the Danish company Brüel & Kjær, 4-channel hydro-acoustic signal amplifier (from hydrophones) Bruel & Kjaer model 2692-A "NEXUS" and Testo 890-2 thermographic camera.

## **6. News**

### *A. New product from Brüel & Kjaer – Sound level meter 2245*

The new sound level meter from B&K is developed to be easy to use, intuitive developed collaboratively with applications for specific surveys (environmental noise measurement, work noise measurements). It has measurement range from 15,2 to 140 dB, A – weighted. The sound level meter provides effortless usability with a rubberized body for a more secure grip and seven buttons you can comfortably reach with your thumb. The clear, bright display shows the most important information you need for noise measurement surveys at a glance, and with a 14-hour battery life, you can be sure it won't let you down.



**Fig.4 Sound level meter 2245**

### *B. "SPECTRI – LAB" Test and Calibration Laboratory has received an accreditation certificate under BDS EN ISO / IEC 17025 by BAS*

The accredited Bulgarian company in the field of measurement and management of noise and vibrations Spectri Ltf. with manager Boris Mihaylov received an accreditation certificate for its new field – Laboratory for calibration of sound level meters, calibrators, multifunctional calibrators and noise dosimeters.

Our new business is a natural continuation of our 18 years of experience in this field. The accreditation certificate of the laboratory is in accordance with BDS EN ISO / IEC 17025 and gives us the right to perform environmental noise measurements and calibration of acoustic



calibrators, acoustic multifunctional calibrators, sound level meters and personal sound dosimeters.

With our accredited laboratory we aim to expand its portfolio of services in the field of measurement, evaluation and calibration of noise and vibrations and to increase its expertise potential. Last but not least, we strive to provide our customers with additional facilities and support in their metrological and quality control tasks on the equipment they use.

**spectri! Lab**  
Testing and calibration laboratory

**Fig. 5 – “SPECTRI – LAB” logo**

*C. New upgraded own products – by SPECTRI LTD*

Expanding the capabilities of hardware Spectri Data Logger and integration software at <http://webnoise.eu>

*D. Spectri Ltd. is representative of Brüel & Kjaer Vibro for Bulgaria*

B & K Vibro's products cover the whole range of vibration monitoring systems, ranging from vibrometers, modular fixed vibrocontrol systems with indication and protection functions to computer integrated video surveillance systems. With them, we can now offer our customers even more reliable and effective vibration analysis. The B & K Vibro equipment allows effective control over compliance with the set parameters, and the product portfolio of the company also includes proximeters.

**References**

1. [www.spectri.net](http://www.spectri.net)
2. [www.spectri.bg](http://www.spectri.bg)

	<h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция „Акустика 2019“</p>	<p>Варна 25.10 – 26.10.2019 г. София 29.11 – 30.11.2019 г.</p>
Година XXI	□ Брой 21	декември 2019 г.

**Spectri Ltd and the Leaders in the Field of Rotary and Reciprocating  
Industrial Machines Vibrations Brüel & Kjaer Vibro**  
**Innovative Project Delivery, Condition Monitoring Solutions, Machine Diagnosis and  
Services**

Boris MIHAYLOV, Alexandar MISHEVSKI

Spectri Ltd, Sofia, Bulgaria  
e-mails: [boris@spectri.bg](mailto:boris@spectri.bg), [alexm@spectri.bg](mailto:alexm@spectri.bg)

**Abstract**

In the recent paper a general information about the new partnership from Brüel & Kjaer Vibro with Spectri is presented. Brüel & Kjaer Vibro is the world's leading independent supplier of protective/safety monitoring, and knowledge-based condition and performance monitoring solutions for rotating machinery. Their solutions, incorporating a wide product range and global service organisation, are tailored to maximize safety, plant utilization and operational effectiveness, while minimizing unplanned outages and maintenance costs. By becoming partners with them, we can provide the Bulgarian industry with new online/offline solutions for machine protection, condition monitoring, diagnosis, vibration measuring equipment, sensors, accessories.

**Keywords:** Vibration, Sensors, Spectri, Monitoring, Solutions

## 1. Introduction

In the past, machines and machine components were over-designed and operated at constant loads. Life cycle times were easily predictable and a time based maintenance strategy was sufficient to remedy most faults. Additionally, a team of well-qualified operators and maintenance crew were always at hand. Today's situation is a far contrast to that of the past. Lean computerdesigned machines are operating ever closer to their limits, and the need for production flexibility leads to widely variable operating conditions and machine loads. The result is an increase in the number of potential failure modes and a very broad mean time to failure of the machine components. These elements combine to make a condition and performance monitoring strategy not only viable, but indispensable. Brüel & Kjaer Vibro is the world's leading independent supplier of protective/safety monitoring, and knowledge-based condition and performance monitoring solutions for rotating machinery.



Figure 1 – <https://www.bkvibro.com/en.html>

The solutions that Spectri Ltd. provides in collaboration with Brüel & Kjaer Vibro are a wide product range, innovative project delivery, condition monitoring solutions, machine diagnosis and services, all of them are tailored to maximize safety, plant utilization and operational effectiveness, while minimizing unplanned outages and maintenance costs.

Spectri Ltd. recently became a representative of Brüel & Kjaer Vibro – one of the world's largest independent suppliers of systems for monitoring and control of rotary and reversing industrial machines, including pumps, turbines, compressors, motors, generators and transmissions for Bulgaria.

## 2. Maintenance of rotary machines

Why do we need to do annual maintenance of rotary machines? This is the main question the customers ask. The answer lies in that everything is wearing out with time so is the machines. This is the reason vibration diagnostics experts exists or called “machine doctors” that through diagnosis they aim to resolve issue with the machine before even they’ve happened. “What kind of issues may occur through the life of the machine?”, the issues in this field correspond to louder machines than usual, downwards bicycle swing of a valve or other phenomens which lead to the effect of unbalance.

The term unbalance and balance comes mostly from the so called scales. The reason of its origin is because when the same weight exists on both sides of the scale beam the system is in equilibrium (balance). The same goes for rotary machines, when you distribute correctly the mass across a rotational axis of a rotor you are balancing it. If you don’t do an even distribution of the mass it leads to an unbalance of the rotor which increases the vibration, causes centrifugal force, noise during rotation. This can lead to safety risks, because the vibrations that are created by the unbalance of the machine reduce the frictional grip of screwed and clamped connections, until components loosen. Forces caused by unbalance, disruptive vibration and noise are removed by balancing. This involves improving the mass distribution of a rotor so that a smaller centrifugal force act in its bearings. In addition, the type of unbalance also has to be taken into account during balancing. There are different types of unbalance which divide depending of their effect:

- Static unbalance;
- Couple unbalance;
- Dynamic unbalance.

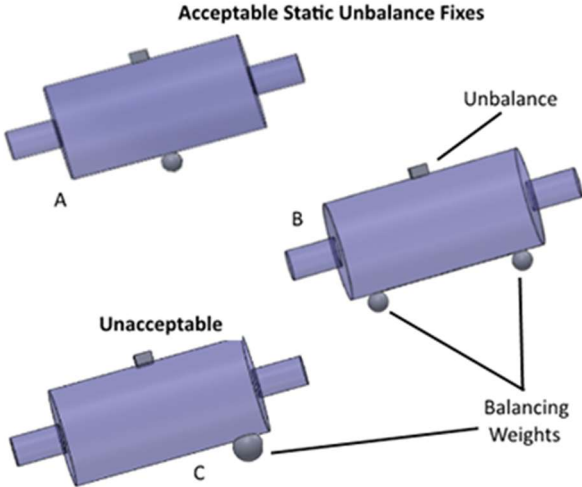


Figure 2 – Balance / unbalance schematic representation

To avoid the issues mentioned above big range of solutions are provided from Brüel & Kjaer Vibro designed specifically for every customer needs, and as well from Spectri Ltd as their representative for Republic of Bulgaria.

Types of Condition Monitoring:

- Online Condition Monitoring is the continuous monitoring of machines or production processes. The Online Condition Monitoring analysis system will generate data on the most critical moments of the machine. During startup and shutdown of the installation, data is collected on critical speeds and changing spindle positions.
- Periodic Condition Monitoring gives insight into changing vibration behavior of installations. A trend analysis is drawn by performing vibration measurements with a fixed interval. The trend analysis shows the cause of the changing vibrations, followed by specialist advice on predictive measures.
- Remote Condition Monitoring gives the opportunity to analyse data at a distance. The remote reading of measurement data enables measurements and analyses to be performed without bothering your organisation and without unnecessary travel time.

### 3. Solutions

#### *A. Brüel & Kjaer Vibro solutions:*

Brüel & Kjaer Vibro offers a full range of monitoring solutions ranging from sensors and accessories to plantwide monitoring systems. Their equipment is designed to the highest industrial standards of quality and integrity. With a name for reliability, many of our systems are still in service more than 20 years after initial commissioning.

- First to include profile type alarm limits on FFT and envelope spectrum measurements.
- World's first balancing machine.
- Design and development of the first commercially available piezoelectric accelerometers.
- Development of advanced techniques required for rolling element bearing and gearbox fault detection and analysis including: Constant Percentage Bandwidth (CPB), Selective Envelope Detection (SED) and cepstra measurements.
- Setpoint condition monitoring system using OSIsoft PI system.

One of the interesting products that Brüel & Kjaer Vibro can provide lately is the condition monitoring system Setpoint. With the acquisition of the US Setpoint® vibration monitoring platform in May 2017, the company expanded its product portfolio by adding state-of-the-art technology to machine monitoring with machine protection. The system fully complies with the API 670 standard. Its universally programmable hardware eliminates the cost and complexity of competing systems. In addition, no stand-alone status monitoring software is needed as the system uses the existing OSIsoft® PI system.

Full API 670 compliance. Integral touchscreen display. 56 channels in just 19" of rack space. Refreshingly competitive pricing. Ultra-reliable architecture. Dual- and even triple-redundant power. SIL-ready. Industry-first full (including waveforms) connectivity to your PI Server. Embedded ultra-high resolution flight recorder to capture up to one full year of condition monitoring data even without a CM server. And, of course, globally available service via our worldwide B&K Vibro network of partners and factory-direct personnel. Discover why customers all over the world are turning to the SETPOINT® machinery protection system.



Fig. 3 – Setpoint with OSISOFT System

***B. Spectri solutions:***

Spectri Ltd. offers new services as it follows:

- Balancing of turbines, pumps, compressors, engines, generators;
- One or two-plane field balancing (static/dynamic);
- Two-plane balancing with one vibration sensor;
- Diagnosis of rotary and reciprocating industrial machines (FFT analysis);
- Equipment and services for condition monitoring;
- Accelerometers, vibration meters, accessories;
- Offline condition monitoring.

All the services are done by using high end equipment provided by Brüel & Kjaer. All of this can be tailored to meet specific customer requirements or combined in a long-term service agreement.



Fig. 4 – Field balancing using Vibroport 80

## **4. Conclusion**

Being able to deliver good business value to our customers is based on several important blocks; our team, experience, long-term partnership with world leading companies, what we focused on, equipment and technology, quality and our own business. All of these qualities combined gives us the way to be successful.

Spectri Ltd. is maintaining a culture of customer focus. This requires intimate knowledge not only of our customers monitoring requirements, but also of their machines and operating processes.

## **References**

1. Brüel & Kjaer Vibro <https://www.bkvibro.com/en.html>
2. Spectri Ltd. <http://spectri.bg/>

Национална конференция „Акустика 2019“



