

ISSN 1312-4897

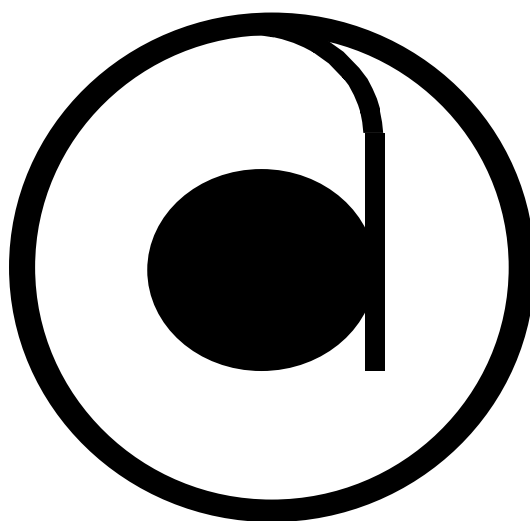
# АКУСТИКА

*Съюз по електроника, електротехника и съобщения  
Национална секция по акустика,  
БАОКУШ, ИМех – БАН, ТУ – София, ТУ – Варна*

Година XVIII

□ Брой 18

Декември 2016 год.



## НАЦИОНАЛНА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКА КОНФЕРЕНЦИЯ

*АКУСТИКА 2016*

*14-15.10.2016 г.  
Варна*

*02-03.12.2016 г.  
София*

**НАЦИОНАЛНА СЕКЦИЯ ПО АКУСТИКА**  
**ТУ-СОФИЯ - Лаб. „Вибрации и акустичен шум“**  
**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ВАРНА**  
**БЪЛГАРСКА АСОЦИАЦИЯ ЗА ОБЩЕСТВЕН КОНТРОЛ И**  
**УПРАВЛЕНИЕ НА ШУМА**  
**СЪЮЗ ПО ЕЛЕКТРОНИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И СЪОБЩЕНИЯ,**  
**ИНСТИТУТ ПО МЕХАНИКА-БАН**  
**СПОНСОР фирма СПЕКТРИ ЕООД**

**Организационен комитет:**

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

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

**Научни секретари:** доц. д-р Й. Иванова, ас. маг. инж. Х. Живомиров

**Членове:** проф. д-тн В. Иванов, доц. д-р Г. Евстатиев, н.с. В. Топалова,  
доц. д-р Хр. Драганчев, н.с. инж. П. Янев

**Секретари:** инж. Г. Кулишев, инж. Й. Мирчев, инж. А. Пискова

**ТЕМАТИКА:**

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

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

**Електро-акустика; строителна акустика; акустика на зали,**

**обработка на звукови сигнали; Музикална акустика; Хидроакустика;**

**Акустични и ултразвукови методи за изследване на материали и изделия**  
**(безразрушителен контрол); Стратгически шумови карти, мерки и планов;**

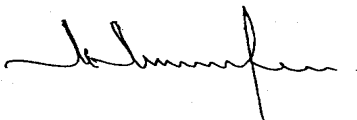
**Непрекъснат вибрационен мониторинг на въртящи се машини и съоръжения;**

**Вибрации, анализ и/или диагностика на машини и сгради;**

**Въздействието на шум и вибрации върху човека.**

-----  
**В сп. Акустика, год. XVIII, бр.18, 2016 г. са отпечатани**  
**доклади, включени в научната програма на**  
**Националната конференция “Акустика 2016”,**  
**проведена във Варна на 14-15.10.2016 г. и**  
**в София на 02-03.12.2016 г.**

Председател на Програмния комитет:



(проф. д-тн М. Миховски)

-----

**ISSN 1312-4897**

**Редакционна колегия:** проф. д-тн М. Миховски, проф. д-р И. Кралов, инж. Б. Михайлов, доц. д-р М. Георгиев, инж. Г. Кулишев, доц. д-р Хр. Драганчев, доц. д-р Ек. Сираков, доц. д-р Й. Иванова

**Издателство:** Съюз по електроника, електротехника и съобщения, Национална секция по акустика, София, 2016 г.

## СЪДЪРЖАНИЕ

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |        |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1  | Михайлов Б., Н. Михайлова<br><b>НОВОСТИ В ОБЛАСТТА НА ШУМА И ВИБРАЦИИТЕ ОТ СПЕКТРИ ЕООД</b>                                                                                                                                                                                                   | 7 – 11 |
| 2  | Михайлов Б.<br><b>ЕВОЛЮЦИЯ И РАЗШИРЯВАНЕ НА СОБСТВЕНОТО РЕШЕНИЕ НА СПЕКТРИ ЕООД ЗА ИЗМЕРВАНЕ, МОНИТОРИНГ И ИЗОБРАЖАВАНЕ В РЕАЛНО ВРЕМЕ НА ПАРАМЕТРИ НА ОКОЛНАТА СРЕДА (ШУМ, ВИБРАЦИИ, ПРАХ, МЕТЕО ДАННИ, ДРУГИ) - WEBNOISE.EU.</b>                                                            | 12-15  |
| 3  | Михайлов Б.<br><b>ПРЕДСТАВЯН НА РЕЗУЛТАТИТЕ И ИЗВОДИТЕ ОТ РЕГУЛЯРНИЯ ВТОРИ АКУСТИЧЕН ПРОЕКТ ЗА НУЖДИТЕ НА „ЛЕТИЩЕ СОФИЯ“, РЕАЛИЗИРАН ОТ СПЕКТРИ ЕООД - ЧАСТ ОТ ПРОВЕЖДАННИЯ ПОСТОЯНЕН МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ НА ШУМА В ОКОЛНАТА СРЕДА, ОТ “ЛЕТИЩЕ СОФИЯ” ЕАД</b>                             | 16-19  |
| 4  | Михайлов Б., Н. Михайлова<br><b>МЕТРОЛОГИЧНО ОСИГУРЯВАНЕ, КОНФИГУРАЦИЯ И СТАРТИРАНЕ НА НОВО СПЕКТРИ ТЕХНИЧЕСКО НАПРАВЛЕНИЕ – ЛАБОРАТОРИЯ ЗА КАЛИБРИРАНЕ НА ШУМОМЕРИ И ШУМОВИ ДОЗИМЕТРИ „СПЕКТРИ-ЛАБ“. СЪЗДАВАНЕ НА СОБСТВЕНИ МЕТОДИКИ И ПРИЛАГАНЕ НА РЕСПЕКТИВНИТЕ МЕЖДУНАРОДНИ СТАНДАРТИ</b> | 20-24  |
| 5  | Михайлов Б., М. Джамбазов<br><b>ИЗПЪЛНЕНИЕ НА ИЗИСКВАНИЯТА ЗА АКРЕДИТАЦИЯ НА ИА „БСА“ И ИЗИСКВАНИЯТА НА СТАНДАРТА ISO/IEC 17020:2012 НА ОРГАН ЗА КОНТРОЛ ОТ ВИД С „СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ“ ПРИ СПЕКТРИ ЕООД</b>                                                                                   | 25-29  |
| 6  | Кралов И.<br><b>ПАТЕНТНИ РЕШЕНИЯ ЗА СНИЖАВАНЕ НА АКУСТИЧНИЯ ШУМ ЧРЕЗ ОТРАЗЯВАЩИ ПРОФИЛНИ ПРЕГРАДИ</b>                                                                                                                                                                                         | 30-33  |
| 7  | Чукачев П., Й. Мирчев, М. Миховски<br><b>ОЦЕНКА НА МЕХАНИЧНОТО НАПРЕГНАТО СЪСТОЯНИЕ В ГАЗОПРОВОДИ</b>                                                                                                                                                                                         | 34-39  |
| 8  | Стайков К.<br><b>ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ НА НЕСЪВЪРШЕНСТВАТА ПРИ ИЗПИТВАНЕ НА ТРЪБИ С НОРМАЛНИ ВЪЛНИ, ВЪЗБУДЕНИ С ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ АКУСТИЧНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ</b>                                                                                                                                        | 40-44  |
| 9  | Стайков К.<br><b>БЕЗКОНТАКТЕН УЛТРАЗВУКОВ КОНТРОЛ НА ЖЕЛЕЗОПЪТНИ РЕЛСИ С ВЪЛНИ НА РЕЛЕЙ</b>                                                                                                                                                                                                   | 45-48  |
| 10 | Ганчев Д., К. Стайков<br><b>УЛТРАЗВУКОВО ИЗПИТВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ВРЪЗКАТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ КОНТАКТИ, ЗАПОЕНИ С ТВЪРД ПРИПОЙ</b>                                                                                                                                                             | 49-52  |
| 11 | Мирчев Й., П. Чукачев, М. Миховски<br><b>ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДА НА МОДЕЛИРАНЕТО В ТЕЧНИ СРЕДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ РАБОТАТА НА ЛИНЕЕН ФАЗИРАЩ ОСЕЗАТЕЛ</b>                                                                                                                                             | 53-59  |
| 12 | Червенков Г.Ц.<br><b>ЕНЕРГЕТИЧНИ ПАРАМЕТРИ НА МИКРОЛЕНТОВИ КЪСИ АНТЕНИ С ОБРАТНО ИЗЛЪЧВАНЕ С ДИЕЛЕКТРИЧНО ЗАПЪЛНЕН РЕЗОНАТОРЕН ОБЕМ И ПРОЦЕПНО ВЪЗБУЖДАН МИКРОЛЕНТОВ ИЗЛЪЧВАТЕЛ - ВЪЗБУДИТЕЛ</b>                                                                                              | 60-62  |
| 13 | Георгиев Л.                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 63-66  |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                  |         |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|    | <b>ВИБРОАКУСТИЧНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПРЕДАВАТЕЛНИТЕ ЧИСЛА НА РЕДУКТОРИ</b>                                                                                                                                                                                                            |         |
| 14 | Стоянов М., Е. Сираков<br><b>МУЛТИМЕДИЕН ПЛЕЙЪР ЗА АНДРОИД ВЪЗПРОИЗВЕЖДАЩ АУДИО И ВИДЕО</b>                                                                                                                                                                                      | 67-70   |
| 15 | Марков Г., Е. Сираков<br><b>ГЕНЕРИРАНЕ НА ИЗМЕРВАТЕЛНИ СИГНАЛИ С РАЗЛИЧНА ФОРМА НА ОБВИВАЩА ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА MATLAB</b>                                                                                                                                                        | 71-74   |
| 16 | Сираков Е., Г. Марков<br><b>АНАЛИЗ НА ИЗМЕРВАТЕЛНИ СИГНАЛИ С РАЗЛИЧНА ФОРМА НА ОБВИВАЩАТА В ЧЕСТОТНАТА ОБЛАСТ</b>                                                                                                                                                                | 75-78   |
| 17 | Илиев И.<br><b>ПОТЕНЦИАЛНА РАЗДЕЛИТЕЛНА СПОСОБНОСТ ПРИ СИГНАЛ ВЪВ ВИД НА ПАКЕТ КОХЕРЕНТНИ ИМПУЛСИ</b>                                                                                                                                                                            | 79-82   |
| 18 | Шотова М.<br><b>КЛАСИФИКАЦИЯ И СРАВНЕНИЕ НА МЕТОДИТЕ ЗА ДИРЕКТЕН ЦИФРОВ СИНТЕЗ</b>                                                                                                                                                                                               | 83-86   |
| 19 | Дуков Н., П. Денева, Т. Ганчев, П. Парушев<br><b>ИНТЕЛИГЕНТЕН АУДИО ЛОГЕР ЗА ЗВУЦИ ОТ ПТИЦИ</b>                                                                                                                                                                                  | 87-90   |
| 20 | Петров П.П., Р.С. Димова, Б.Г. Найденов<br><b>МНОГОКАНАЛЕН ХИБРИДЕН M&amp;Q MC-CDMA/TDMA-ПРЕДАВАТЕЛ С ЕДИНЕН НАБОР ОРТОГОНАЛНИ ПОДНОСЕЩИ ЧЕСТОТИ И РАЗЛИЧНИ ОРТОГОНАЛНИ КОДОВИ ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТИ</b>                                                                             | 91-95   |
| 21 | Петров П.П., Р.С. Димова, Б.Г. Найденов<br><b>ПРИЛОЖЕНИЕ НА ОРТОГОНАЛНИТЕ СИ – КОДОВЕ В МНОГОКАНАЛЕН ХИБРИДЕН M&amp;Q MC-CDMA/TDMA-ПРЕДАВАТЕЛ С ЕДИНЕН НАБОР ОРТОГОНАЛНИ ПОДНОСЕЩИ ЧЕСТОТИ И РАЗЛИЧНИ ОРТОГОНАЛНИ КОДОВИ ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТИ – ЧАСТ 1</b>                          | 96-100  |
| 22 | Петров П.П., Р.С. Димова, Б.Г. Найденов<br><b>ПРИЛОЖЕНИЕ НА ОРТОГОНАЛНИТЕ СИ – КОДОВЕ В МНОГОКАНАЛЕН ХИБРИДЕН M&amp;Q MC-CDMA/TDMA-ПРЕДАВАТЕЛ С ЕДИНЕН НАБОР ОРТОГОНАЛНИ ПОДНОСЕЩИ ЧЕСТОТИ И РАЗЛИЧНИ ОРТОГОНАЛНИ КОДОВИ ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТИ – ЧАСТ 2</b>                          | 101-105 |
| 23 | Иванова Й., Л. Лаков, Т. Парталин, Ст. Рафаилов, Б. Живов<br><b>ЗВУКОПОГЛЪЩАНЕ НА КОМПОЗИТНИ МАТЕРИАЛИ, ПРЕДНАЗНАЧЕНИ ЗА НЕНОСЕЩИ ПРЕГРАДНИ СТЕНИ И ЗВУКОИЗОЛАЦИЯ С ТЯХ</b>                                                                                                      | 106-109 |
| 24 | Разыграев А.Н., Н.П. Разыграев, М.В. Цуканов, Б. Т. Абуталипов, М. Миховски, Й. Мирчев, П. Цоков, А. Атанасов<br><b>РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ОКАЗАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОМОЩИ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ РОТОРА ЦИЛИНДРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ К 1000 БЛОКОВ 5 И 6 АЭЦ „КОЗЛОДУЙ“</b> | 110-118 |
| 25 | Коларов И.<br><b>ВИБРО-АКУСТИЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА МОТОВИЛКА ОТ ДВГ. ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА КОНТРОЛ НА ТЕХНИЧЕСКОТО СЪСТОЯНИЕ</b>                                                                                                                                                            | 119-124 |
| 26 | Иванов И.К.<br><b>ПРЕДИМСТВА НА ПРОСТРАНСТВЕНО ВРЕМЕННАТА ОБРАБОТКА ПРИ ОТКРИВАНЕ НА КОРАБНИ ХИДРОАКУСТИЧНИ ШУМОВЕ</b>                                                                                                                                                           | 125-128 |
| 27 | Колев Н., П. Иванов, П. Калоянчев, Н. Вапцаров                                                                                                                                                                                                                                   | 129-132 |

|    |                                                                                                                                                                                                                      |         |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|    | <b>ИЗМЕРВАНЕ НА АКУСТИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПОДВОДНИ ПАНЕЛИ В ХА БАСЕЙН</b>                                                                                                                                        |         |
| 28 | Ковтун В., М. Миховски, Ю. Плескачевский, В. Банний<br><b>ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ</b> | 133-138 |
| 29 | Генов Б., Н. Вълков, В. Грозев<br><b>ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАВИСИМОСТТА МЕЖДУ АКУСТИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СРОКА НА СЪХРАНЕНИЕ НА НИТРОЦЕЛУОЗНИ БАРУТИ</b>                                                                   | 139-141 |
| 30 | Попов Ал.<br><b>ЕДНА ГЕОМЕТРИЧНА ОБРАТНА ЗАДАЧА В МЕХАНИКАТА НА ДЕФОРМИРУЕМОТО ТВЪРДО ТЯЛО И УЛТРАЗВУК</b>                                                                                                           | 142-143 |
| 31 | Бондаренко А.И., А.Л. Шекеро, Ал. Алксиев, М. Миховски<br><b>АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ И КОРРОЗИОННЫХ ПОРАЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ</b>                         | 144-149 |
| 32 | Трифонов Т., Г. Димков, И. Симеонов, Ал. Алексиев, Г. Нехризов<br><b>АРХЕОЛОГИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА САКРАЛНИ ТРАКИЙСКИ ОБЕКТИ ОТ БЪЛГАРИЯ</b>                                                                           | 150-153 |
| 33 | Генов Б., Н. Вълков, В. Грозев<br><b>ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ОЦЕНКА НА ТЕХНИЧЕСКОТО СЪСТОЯНИЕ С УЛТРАЗВУКОВИ МЕТОДИ ЗА КОНТРОЛ БЕЗ РАЗРУШАВАНЕ</b>                                                            | 154-157 |
| 34 | Пировски Х.А., Х.С. Драганчев<br><b>АНАЛИЗ НА АКУСТИЧНАТА ОБСТАНОВКА В КОМПРЕСОРНА СТАНЦИЯ С ВИНТОВИ КОМПРЕСОРИ</b>                                                                                                  | 158-162 |
| 35 | Драганчев Х.С., Х.А. Пировски<br><b>ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИНФРАЗВУКОВАТА И НИСКОЧЕСТОТНА ШУМОВА ЕКСПОЗИЦИЯ НА ЕКИПАЖИТЕ НА ТЪРГОВСКИТЕ КОРАБИ</b>                                                                            | 163-168 |
| 36 | Илиев И.<br><b>СИСТЕМЕН ДИЗАЙН НА СОФТУЕРНО ДЕФИНИРАН 16QAM МОДЕМ</b>                                                                                                                                                | 169-171 |
| 37 | Georgiev M.<br><b>MODELING THE SPREAD OF NOISE TO FASADE OF A BUILDING NEAR A ROAD WITH CAR TRAFIC</b>                                                                                                               | 172-174 |

## ПРОДУКТИ И УСЛУГИ В ОБЛАСТТА НА ШУМА И ВИБРАЦИИТЕ

Фирма СПЕКТРИ Ви предлага доставки, консултантски услуги и експертизи за мониторинг, измервания и анализ на вибрации, шум, процес - параметри

# spectri!

Специалистите по шум и Вибрации

## ОСНОВНИ ПАРТНЬОРИ



Българска Асоциация  
за Обществен Контрол  
и Управление на Шума  
[www.nonoise-bg.com](http://www.nonoise-bg.com)



Eesiflo • [www.eesiflo.com](http://www.eesiflo.com)



PCH Engineering A/S  
[www.pch-engineering.dk](http://www.pch-engineering.dk)



Odeon • [www.odeon.dk](http://www.odeon.dk)

Brüel & Kjær

BEYOND MEASURE

Brüel & Kjær S&V A/S  
[www.bksv.com](http://www.bksv.com)



Instantel • [www.instantel.com](http://www.instantel.com)

## СЕРТИФИКАЦИОННА И КВАЛИФИКАЦИОННА ОБЕЗПЕЧЕНОСТ



СПЕКТРИ ЕООД предлага сертифицирани услуги по проектиране, производство, инженеринг, поддръжка, сервиз, търговия и доставка на решения, експертизи, измервателна апаратура, софтуер за шум и вибрации и процес-параметри. Инсталации и настройки, обучение и консултации. Измерване, анализ, диагностика, контрол и оценка на съответствието с високо качествено метрологично проследимо оборудване. Акредитирани измервания съгласно БДС EN ISO / IEC 17020:2012 от ИА „БСА“



СПЕКТРИ ОФИС: 1421 – СОФИЯ П. К. 39; ТЕЛ.: 02 963-0464; ФАКС: 02 963-1074; E-MAIL: [SPECTRI@SPECTRI.NET](mailto:SPECTRI@SPECTRI.NET)  
[www.spectri.bg](http://www.spectri.bg) • [www.шумомер.eu](http://www.шумомер.eu) • [www.шум.eu](http://www.шум.eu) • [www.вибромер.eu](http://www.вибромер.eu) • [www.вибрации.eu](http://www.вибрации.eu) • [www.webnoise.eu](http://www.webnoise.eu)



[www.spectri.net](http://www.spectri.net)

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                      |

## НОВОСТИ В ОБЛАСТТА НА ШУМА И ВИБРАЦИИТЕ ОТ СПЕКТРИ ЕООД

Борис Михайлов <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421, [spectri@spectri.net](mailto:spectri@spectri.net), [www.spectri.net](http://www.spectri.net) (URL)

**Резюме:** В този документ се разглежда дейността и новостите от СПЕКТРИ ЕООД, с времеви хоризонт Януари - Ноември 2015 г. Представят се във вид на акценти новите направления в цялостното развитие на СПЕКТРИ ЕООД – като дейност, пазарно присъствие, нови произведени и дистрибутирани продукти и решения, както и систематично поддържане на цялостната експертна фирмена обезпеченост. Реализирани проекти.

СПЕКТРИ ЕООД постоянно и организирано продължава да се развива като национален център на компетентност в областта на шума и вибрациите.

**Ключови думи:** - Шум, вибрации, СПЕКТРИ ЕООД, WEBNOISE, Brüel & Kjær, PCN Engineering, Instantel, Adash.

### 1. Обзор:

През 2015 г., СПЕКТРИ ЕООД продължи развитието си и професионалното си експертно присъствие на пазара – в областта на шума и вибрациите.

Представяме във вид на акценти новите направления в цялостното развитие на СПЕКТРИ ЕООД – като дейност, пазарно присъствие, нови произведени и дистрибутирани продукти и решения, както и систематично поддържане на цялостната експертна фирмена обезпеченост. Реализирани проекти.

СПЕКТРИ ЕООД постоянно и организирано продължава да се развива като национален център на компетентност в областта на шума и вибрациите.

- 1.1. Развитие и усъвършенстване на собствената разработка на портално решение, маркирано под наименованието “Spectri WEBNOISE.eu” – “облачна” услуга, комбинираща собствено решение за непрекъснат интернет базиран достъп до параметри за мониторинг на шум, вибрации, както и възможност за допълнителни параметри в околната и производствена среда.

Реализация на проекти със стратегическо значение:

- 1.2. Актуализиране на План за действие към Стратегически Карти за Шум за гр. София;
- 1.3. Изпълнение на проект за акустичен мониторинг и специфично локално трафико-преброяване в позиции, ползвани при разработване на „Стратегическа карта за шум на агломерация Пловдив”.
- 1.4. Поддръжка и осигуряване на изправно работещ интернет за публична визуализация на измервателни резултати от автоматизираната система за постоянен мониторинг на шума в околната среда на територията на Общини Пловдив, Бургас, Дънди Прешъс Металс, Мини “Марица Изток”.
- 1.5. Цялостно обновяване на системата за мониторинг на летищен шум – “Летище София” ЕАД.
- 1.6. Цялостно обновяване на хардуерна и софтуерна база на мултианализираща система PULSE – АЕЦ “Козлодуй”.
- 1.7. Доставка на преносим акустичен и вибрационен анализатор – 2250 за (1) строителна акустика; (2) изпитване на акустични и вибрационни параметри на моторни превозни средства.

- 1.8. Доставка на 12 канална система за измерване акустични параметри и определяне на обща звукова мощност в свободно полеви условия и в акустична камера на произведените от – Леми Трафо ЕООД трансформатори.
- 1.9. Доставка на система за строителна акустика за “Научно-изследователският строителен институт – НИСИ” ЕООД
- 1.10. Потвърждение на сертифициране на ОКС “СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ” по БДС EN ISO 17020:2012.
- 1.11. Потвърждение на сертифициране за производство, консултантски услуги, доставка и сервиз на измервателно оборудване за шум и вибрации – по ISO 9001:2008.
- 1.12. Участие в симпозиуми и изложения:
  - Дефектоскопия 2015
  - ММО 2015
  - Акустика 2015
- 1.13. Новини от партньора на СПЕКТРИ ЕООД в областта на шума и вибрациите, Brüel & Kjær - Дания.
- 1.14. Новини от партньора на СПЕКТРИ ЕООД в областта на вибрационния мониторинг, PCN Engineering - Дания.
- 1.15. Нови договорни отношения с лидера в областта на производството на сеизмични мониторингови модули и системи – Instantel - Канада.
- 1.16. Нови договорни отношения с лидера в областта на производството на преносими вибрационни диагностициращи уреди Adash - Чехия.

### 2. Портално решение, “Spectri WEBNOISE.eu” и начало на собствено производство:

*Разработката е представена в отделен доклад.*

- потребителски адаптируемо решение за дистанционен облачен мониторинг и визуализация на параметри на околната среда (като шум, вибрации, сеизмична активност, метеорологични данни, съдържание на прахови частици, киселинност).
- Производител на хардуерните изчислителни и комуникационни компоненти и на цялостната софтуерна база е фирма СПЕКТРИ - България.
- Платформата “Spectri Webnoise”, от “облачен тип” - съвременна надеждна не-Windows базирана система (Linux ОС в терминалните логери на данни и в дистанционния

сървер) – проектирана да осигурява непрекъснат мониторинг и измервания, както и да предотвратява загуба на измервателни данни.

- Измерванията са базирани на непрекъснати периодични отчети на реални измервани параметри на околната среда. В сървера се надгражда и актуализира историческа база от данни, като всички стойности са налични за динамично адресиране.



Фиг. 1 СПЕКТРИ портал WEBNOISE.EU

**СПЕКТРИ нови продукти:** Мониторингов Терминал; Мониторинг на рН, PM10, PM2.5, мониторинг на метеорологични данни и на сеизмични параметри.

Решението е базирано на най-висок клас измервателно оборудване за измерване на шум – акустичен анализатор тип Brüel & Kjær 2250/2250-L. Терминалът се използва за непрекъснат мониторинг на шум, а също и опционално на вибрации и допълнителни параметри на околната среда (при дейности по време на строителство, градска и/или промишлена активност).

Системата за непрекъснат мониторинг е реализирана на основата на входни мониторингови терминали на параметри на околната среда, последващото им интерфейсиране със специализираните собствени хардуерни (Spectri data logger) и софтуерни разработки, обединени в портала **WEBNOISE.eu**.

Резултатът е една непрекъснато актуализираща се, публично достъпна база данни, източник за професионално управление на околната среда



Фиг. 2 Продукт на СПЕКТРИ ЕООД –Data Logger-SP1



Фиг. 3 Платформа Webnoise.EU за мониторинг на шум и с възможност за мониторинг на рН

### 3. Ключови проекти на СПЕКТРИ през 2013 г.:

3.1. Актуализиране на План за действие към Стратегически Карти за Шум за гр. София;

*Преглед и Актуализация на Приетия План за Действие с Решение на Столичен Общински Съвет № 710 / 20.12.2010г.\**



Целта на разработване на „ПЛАН ЗА ДЕЙСТВИЕ КЪМ СТРАТЕГИЧЕСКА КАРТА НА ШУМА В ОКОЛНАТА СРЕДА” на базата на Стратегическата шумова карта (СШК) е управление, ограничаване и намаляване на шумовото натоварване в околната среда чрез прилагане на мерки и акустично планиране в краткосрочен, средносрочен и дългосрочен период. Тези мерки трябва да се базират на случаите, при които превишаването на стойностите на даден показател за шум може да предизвика вредно въздействие върху здравето на хората, както и за запазване стойностите на показателите за шума в околната среда в районите, в които стойностите не са надвишени. Крайната цел е създаване на здравословни условия на живот на населението и опазване на околната среда от шум, чрез разработването и прилагането на интегриран подход и мерки за неговото избягване, предотвратяване или намаляване.

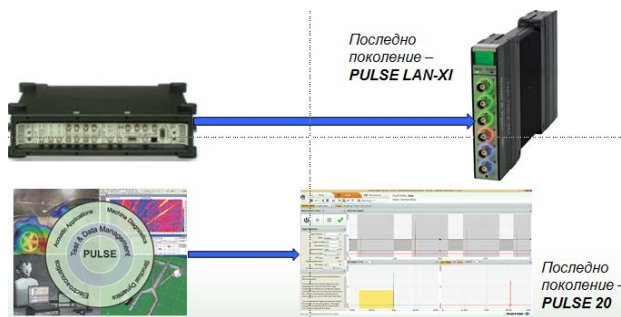
Шумът е един от факторите с неблагоприятно въздействие върху населението в големите градове. Породен от развитието на промишленото производство, на пътническите, товарните и водните транспортни средства и масовият градски транспорт. Дългогодишните изследвания показват, че нивото на шума в последните години нараства с 1 dB годишно и надминава граничните стойности за съответните населени територии. Промяната на транспортните средства с такива с подобрени шумови характеристики се компенсира с трайно нарастване на моторизацията. Независимо от вида и качеството на жилищния и обществения фонд и кога е построен, се забелязва тенденцията на непредприемане на мерки за шумозащита както на жилищните така и на обществените сгради със специално предназначение – болници, училища, детски заведения, научно-изследователски центрове и др. такива.

3.2. Цялостно обновяване на системата за мониторинг на летищен шум – “Летище София” ЕАД



Фиг. 4 Последно поколение – Noise Desk

3.3. Цялостно обновяване на хардуерна и софтуерна база на мултианализираща система PULSE – АЕЦ “Козлодуй”



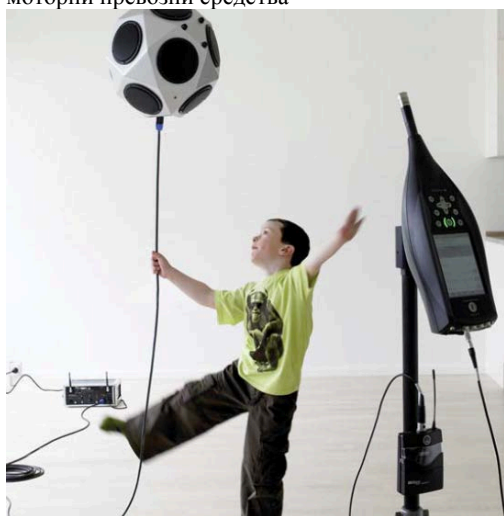
Фиг. 5 Последно поколение PULSE LAN-XI

3.4. Доставка и монтаж на вибрационни мониторингови компоненти



Фиг. 6 4-канален модул за следене на вибрации

3.5. Доставка на преносим акустичен и вибрационен анализатор – 2250 за (1) строителна акустика; (2) изпитване на акустични и вибрационни параметри на моторни превозни средства



Фиг. 7 Система за строителна акустика

3.6. Доставка на 12 канална система за измерване акустични параметри и определяне на обща звукова мощност в свободно полеви условия и в акустична камера на произвежданите от – Лемин Трафо ЕООД трансформатори



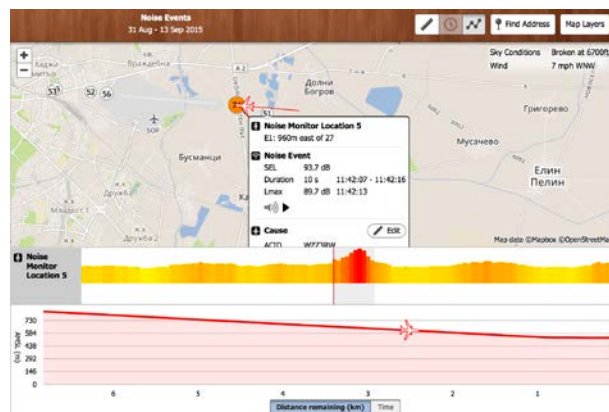
Фиг. 8 Система за измерване на акустични параметри

3.7. Доставка на система за строителна акустика за "Научно-изследователският строителен институт – НИСИ" ЕООД



Фиг. 9 Омнидирекционен източник

3.8. СПЕКТРИ ЕООД започна реализацията на проект за доставка на стоки и услуги ноу-хау и експертиза за целите на реализацията на постоянен мониторинг и управление на шума в околната среда от Летище София ЕАД



Фиг. 10 Екран от системата за мониторинг

4. Потвърждение на сертифициране на ОКС "СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ" по БДС EN ISO 17020:2012. Ресертификация по новата версия на БДС EN ISO17020.

#### ОБХВАТ НА АКРЕДИТАЦИЯ

- ❖ Контрол на шум в околна и/или битова среда;
- ❖ Контрол на шум в работна среда;
- ❖ Контрол на вибрации предавани на система „ръка-рамо“ и на „цяло тяло“;
- ❖ Контрол на вибрации на машини;
- ❖ Контрол на вибрации в жилищни помещения.

Потвърждение на компетентността на СПЕКТРИ ЕООД в областта на шума и вибрации.



Фиг. 11 Изглед сертификат на ОКС "СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ"

5. Успешно сертифициране по ISO 9001:2008



Фиг. 12 Изглед сертификат на Спектри ЕООД

Обхват на сертификация: **Проектиране, производство, инженеринг, поддръжка, сервиз, търговия и доставка на решения, експертизи, измервателна апаратура и софтуер – за шум и вибрации, процес-параметри. Инсталации и настройки, обучение и консултации. Измерване, анализ, диагностика, контрол и оценка на съответствието.**

Цел: Потвърждение на компетентността на Спектри ЕООД в областта на шума и вибрациите.

6. Участие в симпозиуми и, изложения и конференции:

2. Дефектоскопия 2015;
3. ММО 2015;
4. Акустика 2015;

Цел: поддържане на пазарното присъствие на Спектри ЕООД в областта на шума и вибрациите.



Фиг. 13 Спектри участие в Дефектоскопия 2015



Фиг. 14 Спектри участие в ММО 2015



Фиг. 15 Спектри участие в АКУСТИКА 2015

7. Новини от основните международни партньори на Спектри ЕООД:

7.1. Новини от партньора на Спектри ЕООД в областта на шума и вибрациите, **Brüel & Kjær** - Дания.

- Система за полеви запис на сурови измервателни данни за шум и вибрации, тип Sonoscout. Системата бе представена на ММО 2013 г. от специалист от производителя, Brüel & Kjær – Дания.



Фиг. 16 Brüel & Kjær Sonoscout конфигурация

- Обновяване на основната гама производствени платформи от Brüel & Kjær – PULSE, 2270, LimA, Predictor, др.;

7.2. Новини от партньора на Спектри ЕООД в областта на вибрационния мониторинг, **PCH Engineering** - Дания.

- Изцяло нови вибрационни мониторингови модули, вибрационни преобразуватели, измервателна технология, мониторингов софтуер;



Фиг. 17 PCH Engineering нови продукти

7.3. Новини от INSTANTEL – Canada.

InstanTEL е специализирана в производство на модули за вибрации и взривни дейности. Фирмата е част от Stanley Black & Decker, Inc.

Оборудването на InstanTEL за „регулирани“ вибрации и контрол на свръхналягания си извоюва през годините реномето на най-надеждната подобна техника (използвана в над 110 страни по света) – за различни приложения в минната дейност, строителство и геотехнически проучвания.

INSTANTEL акцент - лого



Фиг. 18 Изглед на уред Minimate Pro

7.4. Ново партньорство с Adash - Чехия - преносими вибрационни диагностиращи уреди.



Фиг. 19 Adash нови продукти

Данни за автора:

- (1) Борис Борисов Михайлов, Sound and vibration qualified expert (2001), инж.(1994), Електроника, Технически университет София, Brüel & Kjær University (2001). Съпредседател Българска Асоциация за Обществен Контрол и Управление на Шума, Управител СПЕКТРИ ЕООД.

#### ACTUAL NEWS IN THE DOMAIN OF NOISE AND VIBRATION - FROM SPECTRI LTD.

**Boris Mihaylov**<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> SPECTRI Ltd., 30, "St. T. Turnovski" Str., Sofia 1421, [spectri@spectri.net](mailto:spectri@spectri.net), [www.spectri.net](http://www.spectri.net) (URL)

**Abstract:** In the recent paper are presented as general overview the SPECTRI Ltd. activity and related news – in Jan. - Nov. 2014. The new areas of SPECTRI Ltd. development are briefly presented – as activity, market presence, new produced and distributed products and solutions, and as well related to the systematic maintained company's expert capacity. Realized projects.

SPECTRI Ltd. continues in an organized and systematic way its development as national center of competence in the field of noise and vibration.

**Key words:** - Noise, vibration, SPECTRI Ltd., WEBNOISE, Brüel & Kjær, PCH Engineering, Instantel.

#### 8. Изводи:

През 2015г., развойната, стратегическа и маркетингова политика на СПЕКТРИ ЕООД целенасочено се развива в следните основни направления:

- Развитие на собствена развойна и производствена дейност;
- Ресертифициране и нова сертификационна експертна обезпеченост;
- Акцент в доставки на иновативни решения за Р. България;
- Посрещане на очакването на експертната общност в Р. България за активно присъствие на СПЕКТРИ ЕООД на пазара и непрекъсната информираност относно новостите в шума и вибрациите;

СПЕКТРИ ЕООД планира и занапред постоянно и организирано да продължава със стремежа си да се развива като национален център на компетентност в областта на шума и вибрациите.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Интернет базирана информация: Вж. [www.SPECTRI.net](http://www.SPECTRI.net);
- [2] Интернет базирана информация: Вж. [www.WEBNOISE.eu](http://www.WEBNOISE.eu);
- [3] Интернет базирана информация: Вж. [www.BKSV.com](http://www.BKSV.com);
- [4] Интернет базирана информация: Вж. <http://www.pch-engineering.dk/>;
- [5] Интернет базирана информация: Вж. <http://www.instantel.com/>;
- [6] Интернет базирана информация: Вж. <http://www.adash.com/>.

|                                                                                   |                                                                                                                         |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="text-align: center;">АКУСТИКА</h1> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                               | Декември 2016 г.                                                                      |

## ЕВОЛЮЦИЯ И РАЗШИРЯВАНЕ НА СОБСТВЕНОТО РЕШЕНИЕ НА СПЕКТРИ ЕООД ЗА ИЗМЕРВАНЕ, МОНИТОРИНГ И ИЗОБРАЖАВАНЕ В РЕАЛНО ВРЕМЕ НА ПАРАМЕТРИ НА ОКОЛНАТА СРЕДА (ШУМ, ВИБРАЦИИ, ПРАХ, МЕТЕО ДАННИ, ДРУГИ) - WEBNOISE.EU.

Борис Михайлов <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421, [spectri@spectri.net](mailto:spectri@spectri.net), [www.spectri.net](http://www.spectri.net)

**Резюме:** В този документ се дава обща информация и се проследяват текущите резултати на стартирания през 2012 г. СПЕКТРИ ЕООД проект по създаване на интегрален системен портален подход за непрекъснат мониторинг и интернет достъп до измервателен инструментариум за мониторинг на параметри на околната среда, както и за общ цялостен облачен мониторинг на параметри на околната и производствена среда. Последни новини за продукта WEBNOISE.eu – към Септ. 2016г.

**Ключови думи:** параметри на околната среда, шум, вибрации, прах, метео данни, киселинност, мониторинг, облачна услуга, WEBNOISE, ESMU.

Системата за непрекъснат мониторинг е реализирана на основата на няколко мониторингови терминали на шум в околната среда, с микрофон за работа на открито на Brüel & Kjær, както и последващото им интерфейсиране със специализираните собствени хардуерни (Spectri data logger) и софтуерни разработки, обединени в портала **WEBNOISE.eu**. Резултатът е една непрекъснато актуализираща се, публично достъпна база данни, източник за професионално управление на шума. Реализирани проекти.

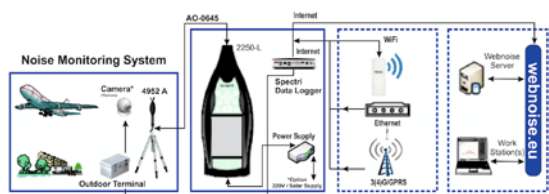


Фиг. 1 Концептуална схема WEBNOISE

**Хардуерното и софтуерно обезпечаване**

- СПЕКТРИ ЕООД, както и
- партньорите й, производители на измервателно оборудване на различни параметри на околната среда;
- Brüel & Kjær, Дания – шум,
- Instantel, Канада и MetOne, САЩ – съдържание на прахови частици,
- Lufft, Германия – метео данни, др.

Цялостна проектна реализация е осъществена от фирма СПЕКТРИ ЕООД.



Фиг. 2 Компоненти на СПЕКТРИ WEBNOISE

**Терминали и за мониторинг на шум**

- **Шумов анализатор**
  - Линеен честотен обхват: 5.6 Hz до 20 kHz;
  - Динамичен обхват (А-прегледен): 16.4 dB до 140 dB
- **Микрофон за измервания на открито** - основни технически параметри:
  - Лесно асемблиране на микрофона
  - Възможност за лесно и достоверно акустично калибриране / проверка
  - Функция за вградена автоматична калибрация (патент "CIC")



Фиг.3 Конфигурация на терминал за измерване на шум

**Мониторинг на сензични параметри в околна среда**

- **Професионална Серия IV Minimate Pro4™** - Монитори за наземни вибрации и свръхналягане
  - Четири канала – за един триаксиален геофон (ISEE или DIN), както и един линеен ISEE микрофон;
  - Наличие на функционални бутони и интуитивно меню за бърза и лесна настройка
  - Нива на семплиране от 512 до 65 S/s на канал (независимо от времената на запис)



**Фиг.4** Конфигурация на терминал за измерване на сеизмични параметри

**Мониторинг на прах (ФПЧ)** - Програмируеми авто-нулиране, авто-обхват, авто-скалиране (за от 1 до 65000µm/m3)

- Автоматизиран протокол за контрол на дебита
- Вградена батерия(за 30 часа работа без подгряване, както и 10 – с подгряване)
- Прецизен оптичен двигател с лазерно-диодна технология, вграден 47mm анализиращ филтър
- Налягане и температура на околната среда
- Вграден логер на измервания, мониторинг на PM10, PM2.5, PM1, TSP
- Без необходимост от подмяна на филтърни елементи



**Фиг. 5** Конфигурация на терминал за мониторинг на прах

#### Мониторинг на метео данни

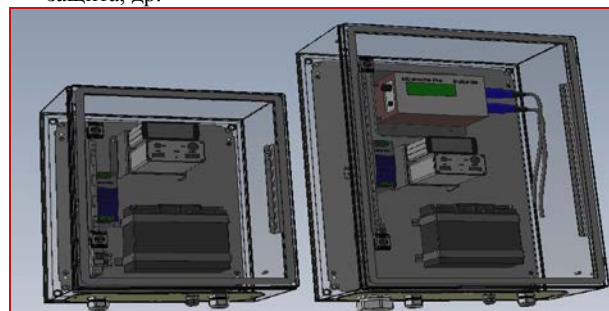
- **WS600-UMB** - смарт метео сензор за измерване на:
- Относителната влажност - посредством кондензивен сензорен елемент.
- Въздушна температура - прецизен NTC измервателен елемент
- Валежи - измерват се чрез 24 GHz доплеров радар, който определя скоростта на капене на индивидуална валежна/снежна капка.
- Количество и интензивност на валежите - изчисляват се от корелацията между размера на капката и скоростта ѝ. Разликата в скоростта на капката определя типа валеж (дъжд/сняг).
- Измервания на вятър се реализират от ултразвукова сензорна технология
- Въздушно налягане



**Фиг.6** Конфигурация на терминал за мониторинг метео данни

#### СПЕКТРИ комуникационни и управляващи хардуерни компоненти

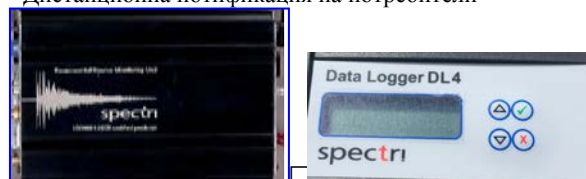
- Изчислителен и комуникационен СПЕКТРИ дейта логер с LED статус дисплей.
- AC/DC конверторно стъпало с поддържащ презаредим акумулатор.
- Альтернативни захранващи решения - соларно, вятърно захранване.
- Възможност за интегриране на допълнителни опционни компоненти:
- GPS приемник, видео рекордер, рутиращо стъпало, WiFi/GPRS/3G/LTE комуникационни опции, Ethernet бридж, инвертор, сеизмограф, pH метър, хардуерна защита, др.



**Фиг. 7** Комуникационни и управляващи хардуерни компоненти

#### СПЕКТРИ логер на данни

- Поддръжка на криптирани протоколи за обмен на данни между клиента и сървъра.
- Поддръжка на протоколи за комуникация между измервателните терминали и логъра.
- Специализирана разработка на софтуер за следене на показателите на околната среда и съхраняването на данните. Последваща математическа обработка на получените данни.
- Алгоритъм за следене непрекъсваемостта на потока на данни. При прекъсване на връзката, данните се съхраняват и се изпращат към сървъра при възстановяването ѝ
- Система за самодиагностика и индикация при проблеми в работата на устройството и комуникацията между него и терминала или между него и сървъра.
- Дистанционна нотификация на потребители



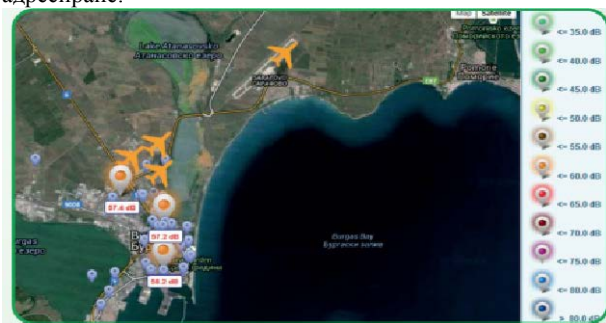
**Фиг. 8** Дейта логер

## Основни софтуерни възможности на WEBNOISE.eu, актуалност 2015г.

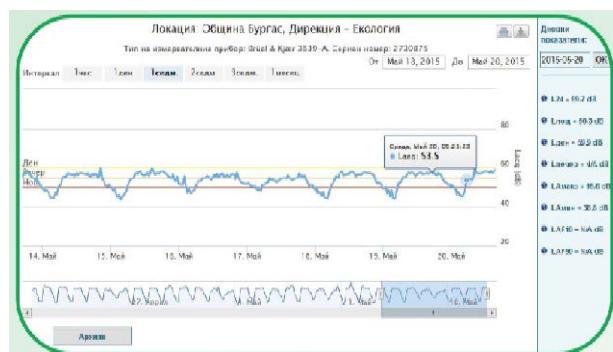
Потребителски адаптируемо решение за дистанционен облачен мониторинг и визуализация на параметри на околната среда (като шум, вибрации, сеизмична активност, метеорологични данни, съдържание на прахови частици, киселинност).

**СПЕКТРИ ЕООД** - производител на хардуерните изчислителни и комуникационни компоненти и на цялостната софтуерна база **“SPECTRI WEBNOISE”**

- Платформа от “облачен тип”
- съвременна надеждна не-Windows базирана система (Linux ОС в терминалните логери на данни и в дистанционния сървер)
- проектирана да осигурява непрекъснат мониторинг и измервания, както и да предотвратява загуба на измервателни данни.
- измерванията са базирани на непрекъснати периодични отчети на реални измервани параметри на околната среда.
- в сървъра се надгражда и актуализира историческа база от данни, като всички стойности са налични за динамично адресиране.



Фиг.9 Екрани webnoise.eu



Фиг.10 Екрани webnoise.eu



Фиг. 11 Екрани webnoise.eu

Порталът <http://webnoise.eu>

- публичен достъп и визуализация на измервателните данни.
  - непрекъснато обновяващата се база данни от измервателните терминали, като конкретно за шум – във вид на графика(и)/таблица(и) за LAeq – dB(A), както и таблица(и) за стандартизирани шумови индекси (LAmin, LAmax, LAден LAвечер, LАнощ, L24, dB(A)) за: последен час, текущ ден, дневно, седмично, месечно, друго (история).
  - Интерес от **големите градове** в страната за непрекъснат мониторинг на шума в градската среда
  - във връзка със задължението им за актуализация на всеки 5 години на **“Стратегическата Карта за шум”** и респективните им **“Планове за действие”**.
- Непрекъснатият мониторинг на параметри на околната среда е единствения **достоверен източник** за проследяване на дълговременното развитие на замърсяванията и на акустичната ситуация.

**Големите оператори и производствени обекти**, държащи на своя добър професионален имидж

- активност и готовност за инвестиция
- обществено признат подход на неманипулиран достъп до критична информация и данни от непрекъснат мониторинг на шум, вибрации и др. допълнителни параметри.

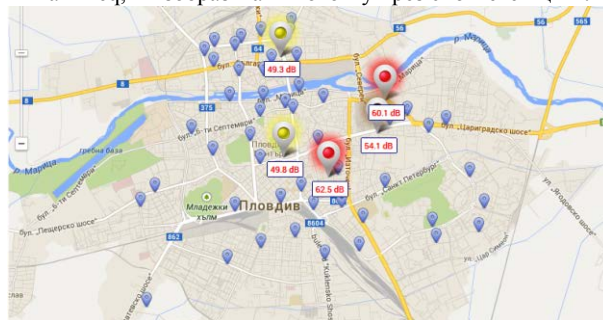


Фиг.12 Webnoise.eu

Потребителски адаптирано решение за всеки индивидуален клиент/проект

### Основен екран

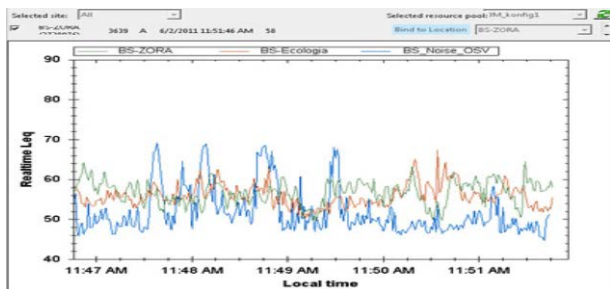
- с помощта на Google maps API v3.0 се показва разположението на точките на измерване, на реална карта.
- всяка точка носи информация за моментното състояние на LAeq, и изобразява нивото му чрез съответен цвят.



Фиг. 13 Вторични екрани Webnoise.eu

### Вторични екрани

- Графики със стойностите на шума (LAeq) за определен интервал от време (Часово, Дневно, Седмично, Месечно)
- възможност за по-кратък интервал върху самата графика, за по-детайлно представяне на стойностите.
- Допълнително скаларни шумови показатели LAmax, Lден, Lвечер, Lнощ, L10, L90



Фиг. 14 Вторични екрани Webnoise.eu

## 8. ИЗВОДИ:

Точна индикация за шумовото класифициране на всяка една локация и незабавна визуализация при предприемане на мерки за намаляване на шума;

Натрупване на необходимите за стратегическо планиране данни – 24 часа, 12 месеца;

### Данни за авторите:

- (1) Борис Михайлов, Sound and vibration qualified expert (2001), инж.(1994), Електроника, Технически университет София, Brüel & Kjær

Открита комуникация с обществеността и опосредствено изграждане и поддържане на доверие и съпричастност в гражданите;

Определяне и характеризиране на целодневния и целоседмичен профил на акустично замърсяване в локацията – за 24 часа и за седмица.

Постоянно разширяване, надграждане и усъвършенстване на хардуерни и софтуерни компоненти от СПЕКТРИ ЕООД.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] [www.SPECTRI.net](http://www.SPECTRI.net)  
 [2] [www.WEBNOISE.eu](http://www.WEBNOISE.eu)  
 [3] Директива 2002/49/ЕС на Европейския Парламент и на Съвета от 25.06.2002 г. относно оценка и управление на екологичния шум (END).  
 [4] Закон за защита от шума в околната среда (Обн. ДВ, бр.74/2005);

University (2001). Съпредседател *Българска Асоциация за Обществен Контрол и Управление на Шума*, Управител СПЕКТРИ ЕООД.

## PRESENTATION OF SPECTRI OWN SOLUTION FOR MEASUREMENT, MONITORING, AND REAL TIME DISPLAY OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS (NOISE, VIBRATIONS, DUST, METEO DATA, ETC.) – WEBNOISE.EU APPLICATIONS IN BURGAS, PLOVDIV, OTHERS

Boris Mihaylov <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> SPECTRI Ltd., 30, “St. T. Turnovski” Str., Sofia 1421, [spectri@spectri.net](mailto:spectri@spectri.net), [www.spectri.net](http://www.spectri.net)

**Abstract:** In the recent paper is presented an overall information, and are highlighted current results re. the started in 2012 SPECTRI project for creation of integrated portal approach for on-line monitoring and internet access to measurement data for environmental parameters. Presented is the R&D SPECTRI activity, and used system integrated approach for cloud on line monitoring of environmental and industrial parameters. Latest new for product WEBNOISE.eu – actual as of Sept. 2016.

**Key words:** Environmental parameters, noise, vibrations, dust, meteo data, pH, monitoring, cloud service, WEBNOISE, ESMU.

## References

- [1] [www.SPECTRI.net](http://www.SPECTRI.net)  
 [2] [www.WEBNOISE.eu](http://www.WEBNOISE.eu)  
 [3] Директива 2002/49/ЕС на Европейския Парламент и на Съвета от 25.06.2002 г. относно оценка и управление на екологичния шум (END).  
 [4] Закон за защита от шума в околната среда (Обн. ДВ, бр.74/2005);

## ЭВОЛЮЦИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РЕШЕНИЯ СОБСТВЕННОГО СПЕКТРИ ЕООД ИЗМЕРЕНИИ, МОНИТОРИНГ И ОТОБРАЖЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ (ШУМА, ВИБРАЦИИ, ПЫЛИ, ПОДМЕТАНИЕ ДАННЫХ ДРУГИХ) - WEBNOISE.EU.

Борис Михайлов <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421, [spectri@spectri.net](mailto:spectri@spectri.net), [www.spectri.net](http://www.spectri.net)

**Аннотация:** Этот документ содержит общую информацию и отслеживать текущую производительность запущен в 2012 году SPECTRA Ltd. проект создания интегрированной системы портала подход для непрерывного мониторинга и средств измерения доступа в Интернет для мониторинга параметров окружающей среды, а также общие комплексный мониторинг облако параметров окружающей среды и производственной среды. Последние новости WEBNOISE.eu продукта - сентябрь 2016.

**Ключевые слова:** параметры окружающей среды, шум, вибрации, пыли, данные о погоде, кислотности, мониторинга, облачных сервисов, WEBNOISE, ESMU.

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                      |

## ПРЕДСТАВЯНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ И ИЗВОДИТЕ ОТ РЕГУЛЯРНИЯ ВТОРИ АКУСТИЧЕН ПРОЕКТ ЗА НУЖДИТЕ НА “ЛЕТИЩЕ СОФИЯ”, РЕАЛИЗИРАН ОТ ОТ СПЕКТРИ ЕООД - ЧАСТ ОТ ПРОВЕЖДАНИЯ ПОСТОЯНЕН МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ НА ШУМА В ОКОЛНАТА СРЕДА, ОТ “ЛЕТИЩЕ СОФИЯ” ЕАД

Борис Михайлов <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> СПЕКТРИ ЕООД, София, Т. Търновски 30, [spectri@spectri.net](mailto:spectri@spectri.net), [www.spectri.net](http://www.spectri.net) (URL)

**Резюме:** В този документ се дава съпоставителна информация за реализираните от СПЕКТРИ ЕООД акустични проекти през 2015 и 2016 г. Представя се цялостната концепция и пакет от дейности по реализацията на комплексния проект.

**Ключови думи:** шум, шумово въздействие, летище, самолетен шум, управление на шума, облачна услуга, акустична експертиза, Noise Desk, Brüel & Kjær, СПЕКТРИ.

### Обзор:

#### Международно летище София:

- в източния край на гр. София
- на около 10 км от центъра на града;
- надморска височина 531 м;
- годно за полети IFR/VFR;
- работно време от 24 часа; ПИК 09 и 27; метеорологично осигуряване 24 часа.
- В АИП на Република България са дадени подробни данни за летището и е разписана актуалната процедура за намаляване на шума от въздухоплавателни средства.
- „Летище София” ЕАД разполага с инсталирана в края на 2004г система за мониторинг на авиационния шум и наблюдение на траекториите на полетите (СМАШ)
- Необходимостта от системата:
- Решение по ОВОС № 20-5/2001 г., издадено от МОСВ,
- Закона за защита от шума в околната среда
- Наредба № 54/ 2010 г. за дейността на националната система за мониторинг на шума в околната среда и изискванията за провеждане на собствен мониторинг, както и от нуждата за управление и минимизиране на въздействието на шума върху близко разположените жилищни райони.

Реализиран е **комплексен подход** по съвременяване на системата, абонаментното ѝ поддържане, годишен преглед на резултатите и допълнителни измервания, както и годишно полево калибриране.

### 1. Основни етапи:

- **Осъвременяване и разширяване на функционалността** на системата за мониторинг на авиационния шум при максимално запазване на вложените до момента в системата инвестиции;
- **Абонаментно обслужване и поддръжка;**
- **Калибриране;**
- **Експертна ежегодна оценка** на шумовото въздействие върху град София в следствие дейността на Летище София.

### 3. Осъвременяване и разширяване на функционалността

**ANOMS NoiseDesk** - мониторинг на шум и самолетни операции. (новата платформа на Brüel & Kjær Sound & Vibration A/S - Дания, тип ANOMS NoiseDesk.) - удобен и лесен за употреба

Платформата и софтуерните пакети към нея - **облачен продукт**, с временни лицензи (с продължителност продължителността на действие на абонаментния Договор). ANOMS NoiseDesk **събира непрекъснато данни**:

- полетни трасета, полетни планове, ошумяване, метеорологични данни, оператори, оплаквания, контури, правила за съответствие, др.

- асемблират се в база данни и след това се корелират (посредством зададени правила и алгоритми).

Интерфейсът на **потребителския интернет браузер**

- достъпни и разбираеми списъци, карти и графични визуализации.

**Експорт на данните** - MS Excel spreadsheets, MS Word, INM експорт и Google Earth.

Непрекъснато **собствено мониториране** от системата на работоспособността и функционалността ѝ, като инициира корективни дейности при откриване на проблеми.

NoiseDesk **използва подаванните от РВД данни**

- за полетните трасета и информация за полетните планове.

Летателните данни се обработват и импортират в базата данни на ANOMS NoiseDesk.

### 2. Ежегодно калибриране



Фиг. 1 – Проследимост към използван еталон, 4226

СПЕКТРИ ЕООД ще осигурява един път в годината сервисна калибрация на всички терминали на системата за мониторинг на шума.

След всяко калибриране, СПЕКТРИ ЕООД изготвя доклад и индивидуални сертификати.

Еталонен акустичен мултичестотен и многостъпков калибратор, тип 4226 на Brüel & Kjær и съответен калибрационен софтуер/методика.



Фиг. 2 – Калибратор 4226

#### Основни характеристики на 4226:

Стандарти IEC 942 (1988) Клас 1

Калибрационни нива 94, 104 и 114 dB SPL

Калибрационни честоти 31.5 Hz до 16 kHz , в октавни стъпки Hz

Калибрационна точност  $\pm 0.2$  при 94 dB dB

Микрофонна мембрана 1/2-inch

Калибрирането е в съответствие с изискванията на EN 61672 - Акустична част, използвайки калибрационен софтуер Type I-304.

### 3. Експертна ежегодна оценка на шумовото въздействие върху град София в следствие дейността на Летище София

СПЕКТРИ ЕООД извършва всяка година

#### Ежегодно изготвяне на обобщен акустичен анализ:

- оценява шумовото въздействие върху града;
  - проверява нормативното съответствие на предоставяната информация за шума;
  - експертни оценки и препоръки относно функционирането на системата с цел облекчаване на шумовата обстановка над града и поддържане на позитивно обществено мнение относно Летище София
  - Обзор резултати от мониторинга на шум за последните 12 месеца
  - Регистрирани събития и превишения на нормативно определените
  - Граници за нива на шум в следствие дейността на Летище София
  - Допълнителни ръчни измервания – резултати
  - Анализ на причините за превишаване на граничните стойности на шум
  - Преглед и анализ адекватността на разположение и на броя на използваните постоянни и преносими терминали за мониторинг на шум.
  - Препоръки за мерки, процедури и/или действия от страна на Летище София за редукция на акустичното влияние върху засегнатите райони в гр. София
- Провеждане на допълнителни акредитирани натурални измервания
- Ежегодни еднократни допълнителни акредитирани натурални измервания на шум в 20 бр. критични точки в градската среда на гр. София. (критични от акустична

гледна точка – подложени на въздействие на източник „авиационен шум“).

- Измерванията са от сертифицирани специалисти на СПЕКТРИ ЕООД, както и сертифицирано оборудване, Клас 1 (с валиден калибрационен сертификат).

- СПЕКТРИ ЕООД е акредитиран от ИА “БСА” за провеждане на измервания в околната среда, под ОКС “СПЕКТРИ – ИЗМЕРВАНИЯ”.

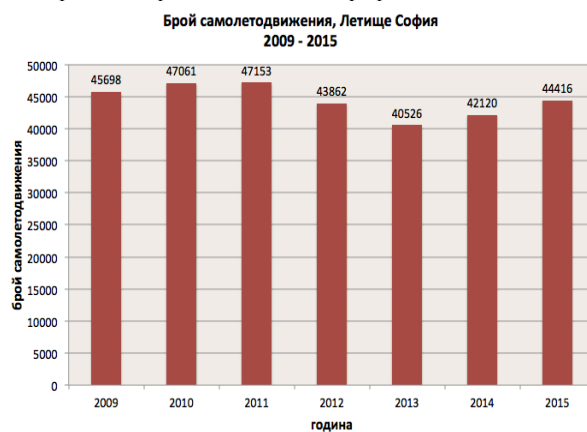
- Използваното от СПЕКТРИ оборудване е калибрирано, Клас 1 – (а) Ръчен акустичен анализатор, тип 2250 – Brüel & Kjær, както и (б) Акустичен ръчен калибратор, тип 4231 – Brüel & Kjær.

### 6. Резултати, 2015-206, Експертна ежегодна оценка на шумовото въздействие върху град София в следствие дейността на Летище София

Съпоставка с общия брой самолетодвижения за периода 2009 - 2015 г. (Вж. графиката по-долу) индицира следната тенденция:

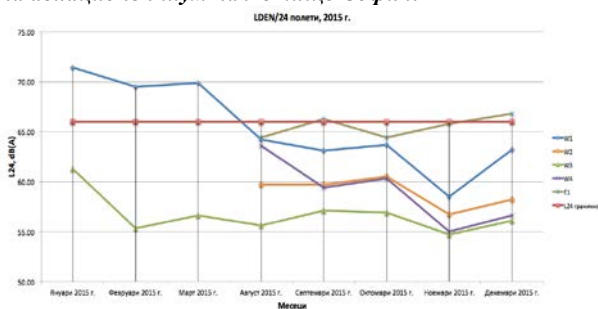
- Броят самолетодвижения е в рамките на 40-47000/год., т. е. по смисъла на END и ЗЗШОС, Летище София не е „основно летище“ по смисъла на Закона за защита от шум в околната среда, т.е. няма осъществени над 50 000 излитания и кацания годишно.

- Летище София е основен източник по смисъла на END и ЗЗШОС – що се отнася до шумово въздействие върху агломерация София от самолетен трафик.



Фиг. 3 – Самолетодвижения, 2009-2015

### Резултати от автоматичната система за мониторинг на авиационен шум на Летище София:

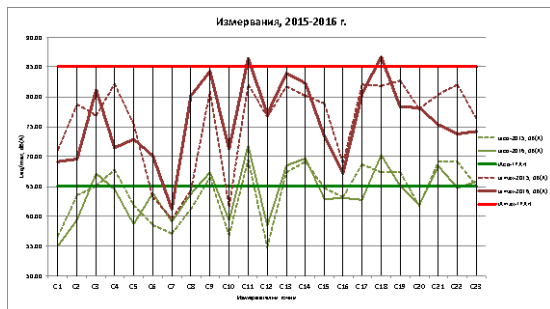


Фиг. 4 – Резултати – по терминали

Годишни допълнителни полеви измервания на шум в критични точки в градската среда на гр. София (подложени на въздействие на източник “авиационен шум”):



Фиг. 5 – Измервателни точки



Фиг. 6 – Резултати ръчни измервания, 2015-2016 г.

#### Препоръки към Летище София – за намляване на ошумяването на гр. София:

Преместване на терминал Е1 на светлинния килям до околоръстното шосе на 330 метра към летището в началото на светлинния килям.

Системно използване на наличния мобилен терминал.

Терминалът да бъде използван активно за

- наличие на нови локални оплаквания;
- дефиниране на нови точки за допълнителни терминали, или
- при решение за ре-локация на съществуващи (натрупвайки данни в съответствие с ISO20906:2009).

Въвеждане на процедура, мобилният терминал да се позиционира периодично в обществени сгради – училища, детски градини, сгради на общината и на министерствата, които се намират в близост до трасетата на прелитане в ошумените жилищни райони. За целта е необходимо да се локализируют такива сгради и да се извършат съответните административни действия за временно поставяне на мобилния терминал.

Поетапно увеличаване на броя стационарни терминали – с 3 бр. за 2016 г., и 3 бр. за 2017 г.

Предложението ни за допълнителни локации за нови терминали е базирано на поетапен подход, т. е. Етап 1 - 3 бр. през 2016г. (Вж. по-долу 4бр. варианти с цел подпомагане избора на три нови локации) и Етап 2 - допълнителни 3 бр. през 2017г. (определими след реализацията на Етап 1).

#### Прилагане на балансиран подход

От 2001 Общото събрание на ICAO изисква страните-членки да възприемат балансиран подход за управление на шума от въздухоплавателни тела. Това се състои в идентифициране на проблеми, свързани с шума на летищата и анализиране на различни мерки за намаляване на шума посредством проучване на четири основни елемента както следва

- намаляване при източника (по-тихи самолети),
  - планиране и управление на земеползването,
  - оперативни процедури за намаляване на шума,
  - оперативни ограничения,
- като целта е да се реши проблема с шума по възможно най-рентабилен начин. ICAO е разработил политики за всеки от тези елементи, както и по отношение на такси за шум.

**а.** Летище София по смисъла на ЗЗШОС и Директива 2002/49/ЕС не е основно летище (със самолето-движения < 50000/годишно). Независимо от този факт поради близостта си до агломерация София, а и според данните от СКШ от 2009г., дейността на Летище София оказва влияние върху здравето и нарушава съня и спокойствието на немалка част от жителите на Столична Община. Трябва да се има в предвид и последните публикации от Световната Здравна Организация доказващи вредното въздействие върху човешкия организъм на шум емитиран в околната среда за стойности > 40 dB(A). Не е без значение и статистиката за първия рунд СКШ за ЕС, от която е видно значителното въздействие върху акустичната среда на “не-основните” летища (Вж. графиката по-долу). **Това е причината да препоръчваме реализация на стратегическа карта за самото Летище София (според ЗЗШОС, “собствено иницириране”), както и на последващ План за действие.**

**Летище София да обмисли практически стратегии, като:**  
**Кампания “тихи подходи”:** Въздухоплавателното тяло приближава летището на два етапа. Пилотите могат да направят първия етап като намалят на постоянна скорост, което е познато като подход непрекъснато спускане (continuous-descent approach (CDA)). Алтернативният начин – спускане на стъпки с периоди на летене между тях е по-шумен, защото самолета лети на ниски височини за по-дълго време.

**Кампания за забавяне на свалянето на колесника:** Свалянето на колесника увеличава шума. Ако мощността на двигателя трябва да бъде увеличена за компенсиране, това също увеличава шума. Няма точни и ясни правила, посочващи кога да се сваля колесника: всеки пилот решава какво е безопасно за неговото въздухоплавателно средство и условията през деня. Препоръчваме да се говори с авиокомпаниите за насърчаване на по-тихи кацания без да се застрашава безопасността на въздухоплавателните средства. Също да се търсят начини за насърчаване на съгласуваността при разгръщането на колесника.

**Проучване на стръмни ъгли при приземяване:** Ъгълът на наклон на самолета има ефект върху шума, който хората долу чуват. Колкото по-стръмен е ъгъла, толкова по-малко време самолета прекарва на ниски височини и по-малко хора са засегнати от по-високите нива на шум. Препоръчваме да се оптимизира ъгъла, под който самолетите се приземяват на Летище София.

Препоръчваме да се определи като дългосрочна цел да се включат по-стръмни ъгли на приземяване.

**- По-добро разпределение и оптимизиране на нощния шум при кацане.**

**- Въвеждане на глоби за шумни излитания:**

Препоръчваме на въвеждане на процедура за глобяване на авиокомпаниите за нарушаване на ограниченията за шум при излитане.

**б.** Изграждане на специализиран **WEB базиран публичен портал**, който да позволява на потребителите да осъществяват обследване на полетните трасета – от всеки един компютър с интернет достъп.

Позволявайки публичен достъп и възможност за обследване на данните за полетите, летището е в състояние да:

- Подобри имиджа си в обществото – чрез повишена прозрачност и отвореност;
- Намали времето за оперативна поддръжка и отговор на различните запитвания;
- Се ангажира в конкретен диалог с обществеността, като по този начин намали първоначалната ѝ резистентност;

Подобна система би предоставяла една лесно достъпна и прозрачна информация за шума в околната среда от самолетна активност. По този начин се подсигурава по-голямата ангажираност на обществеността. Това е доказано най-ефективния за едно летище начин за подобри комуникационната си политика с обществеността.

Изграждане на **система за определяне на въглеродните емисии** за различните самолетни операции и за самото летище в цялост.

Независимо, че аеролиниите са директно отговорни за емисиите на CO<sub>2</sub> от самолетите им, самите летища трябва да се справят с проблема на местна почва (отговаряйки пред обществеността, групите за оказване на натиск по проблемите на околната среда, регулаторните органи, както и други лица). За да продължи стратегията си на растеж, летището се нуждае от:

- Разбиране на обема на CO<sub>2</sub> емисиите
- Разбиране на основните причинители
- Оценка и демонстрация на ефекта от различните стратегии по редукация
- Изготвяне на надеждни и точни доклади

С помощта на подобна система, Летище София получава:

- Автоматично определяне на емисиите, исторически, между различни дати
- Определянето включва детайлни маршрути, както и подробен LTO цикъл
- Използване на реални полетни трасета (а не осреднявания и предположения)
- Определяне на емисиите по самолет, оператор, както и фаза на полета
- Показване на трендове за дълъг период от време
- Нормализиране на емисиите според движения,

**Данни за автора:**

- (1) Борис Борисов Михайлов, Sound and vibration qualified expert (2001), инж.(1994), Електроника, Технически университет София, Brüel & Kjær

## PRESENTATION OF 2<sup>ND</sup> REGULAR ACOUSTICS PROJECT FOR "SOFIA AIRPORT" – REALISED BY SPECTRI LTD. THIS PROJECT IS PART OF THE UNDERGOING ON-LINE MONITORING AND ENVIRONMENTAL NOISE MANAGEMENT BY "SOFIA AIRPORT"

**Boris Mihaylov<sup>1)</sup>**

- <sup>1)</sup> SPECTRI Ltd., 30, "St. T. Turnovski" Str., Sofia 1421, [spectri@spectri.net](mailto:spectri@spectri.net), [www.spectri.net](http://www.spectri.net) (URL)

**Abstract:** In this paper is presented a comparison information re. the realised by SPECTRI Ltd. acoustical projects (2015, 2016). Presented are the overall concept and activities for realization of this complex project.

**Key words:** noise, noise impact, airport, aircraft noise, noise management, cloud service, acoustics expertise, Noise Desk, Brüel & Kjær, SPECTRI.

### References

- [1] [www.SPECTRI.net](http://www.SPECTRI.net)

- [2] <http://www.bksv.com/Products/EnvironmentManagementSolutions/AirportEnvironmentManagement/ANOMS%20NoiseDesk>
- [3] [www.BKSV.com](http://www.BKSV.com)

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛТАТОВ И ВЫВОДОВ РЕГУЛЯРНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВТОРОЙ ПРОЕКТ НУЖД "СОФИЯ" АЭРОПОРТ РЕАЛИЗОВАННОГО СПЕКТРИ ЕООД - ЧАСТЬ ПРОДОЛЖАЛА МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ ОТ ШУМА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ "СОФИЯ АЭРОПОРТА" ЕАД

**Борис Михайлов<sup>1)</sup>**

- <sup>1)</sup> СПЕКТРИ ЕООД, София, Т. Търновски 30, [spectri@spectri.net](mailto:spectri@spectri.net), [www.spectri.net](http://www.spectri.net) (URL)

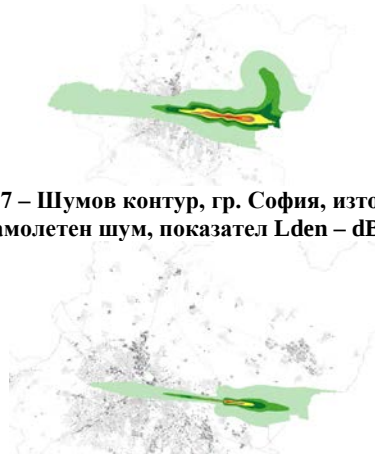
**Аннотация:** Этот документ содержит сравнительные данные по количеству СПЕКТРИ ЕООД акустических проектов в 2015 и 2016 годах представлено всю концепцию и комплекс мероприятий по реализации комплексного проекта.

**Ключевые слова:** шум, шумовое воздействие, аэропорт, шум самолета, управление шумом, облачный сервис, акустическая экспертиза, Noise Desk, Brüel & Kjær, СПЕКТРИ.

пътници и пътницикилометър.

Изграждане на информационни табла в зоните на стационарните мониторингови системи за информиране на обществеността.

**Шумови контури – Летище София, LimA-Predictor изчисления:**



**Фиг. 7 – Шумов контур, гр. София, източник – самолетен шум, показател Lden – dB(A)**

**Фиг. 8 – Шумов контур, гр. София, източник – самолетен шум, показател Lnight – dB(A)**

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] [www.SPECTRI.net](http://www.SPECTRI.net)
- [2] <http://www.bksv.com/Products/EnvironmentManagementSolutions/AirportEnvironmentManagement/ANOMS%20NoiseDesk>
- [3] [www.BKSV.com](http://www.BKSV.com)

University (2001). Съпредседател *Българска Асоциация за Обществен Контрол и Управление на Шума*, Управител *СПЕКТРИ ЕООД*.

|                                                                                   |                                                                                                                         |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="text-align: center;">АКУСТИКА</h1> <p style="text-align: center;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                               | Декември 2016 г.                                                                      |

## МЕТРОЛОГИЧНО ОСИГУРЯВАНЕ, КОНФИГУРАЦИЯ И СТАРТИРАНЕ НА НОВО СПЕКТРИ ТЕХНИЧЕСКО НАПРАВЛЕНИЕ – ЛАБОРАТОРИЯ ЗА КАЛИБРИРАНЕ НА ШУМОМЕРИ, КАЛИБРАТОРИ И ШУМОВИ ДОЗИМЕТРИ “СПЕКТРИ-ЛАБ”. СЪЗДАВАНЕ НА СОБСТВЕНИ МЕТОДИКИ И ПРИЛАГАНЕ НА РЕСПЕКТИВНИТЕ МЕЖДУНАРОДНИ СТАНДАРТИ

Борис Михайлов <sup>1)</sup>, Нина Михайлова <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> СПЕКТРИ ЕООД, София, Т. Търновски 30, spectri@spectri.net, www.spectri.net (URL)

<sup>2)</sup> СПЕКТРИ ЕООД, София, Т. Търновски 30, spectri@spectri.net, www.spectri.net (URL)

**Резюме:** В този документ се представят използваната концепция, техническо осигуряване и метрологично рефериране относно новосформираната в Р. България уникална лаборатория за калибриране на шумомери, калибратори, шумови дозиметри – “СПЕКТРИ - ЛАБ”.

**Ключови думи:** - Калибриране, системи за калибриране на шумомери, калибратори, шумови дозиметри

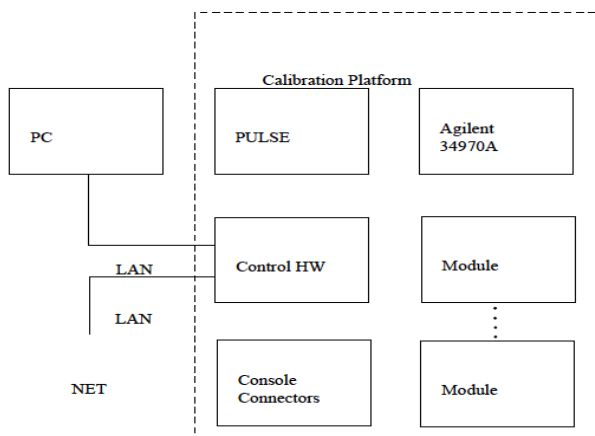
### 1. Въведение

Като естествено продължение на повече от 18 годишен успешен ангажимент в областта на измерването и управлението на шума (и вибрациите) СПЕКТРИ ЕООД стартира свое ново направление - Лаборатория за Калибриране на шумомери, калибратори и шумови дозиметри “СПЕКТРИ-ЛАБ”.

Фирмата инвестира в последно поколение измервателна апаратура и софтуер - от най-висок световен клас (производител Brüel & Kjær), за да предостави на българските си партньори и клиенти надеждна, бърза и гъвкава услуга в подкрепа на амбицията им за прецизна работа и качествено бизнес изпълнение.

Калибрирането е фундаментална стъпка в процеса на измерване. То гарантира, че инструментът, използван за изпитване показва точно необходимия измерван параметър и че уреда отговаря на своята спецификация.

СПЕКТРИ-ЛАБ ще използва следната калибрационна система (принципна схема):



### Фиг. 1 Елементи на калибрационната система

СПЕКТРИ-ЛАБ ще използва международните стандарти за калибриране на шумомери, както следва:

БДС EN 60942:2003

Методика за калибриране на акустичен калибратор

БДС EN 60651:1999;

БДС EN 60804:2003;

БДС EN 61672-1, 2, 3:2013

Методика за калибриране на шумомер

БДС EN 61252:2000

Методика за калибриране на персонален дозиметър

СПЕКТРИ-ЛАБ ще калибрира в следните обхвати:

**Акустичен калибратор** - ниво на звуково налягане: 90 ÷ 130 dB (реф. 20 µPa), номинална честота 250Hz, 1 kHz. СМС: 0.15 dB

**Акустичен мултифункционален калибратор** - ниво на звуково налягане: 90 ÷ 115 dB (реф. 20 µPa), номинални честоти 31.55 Hz ÷ 12.5 kHz. СМС: 0.2 dB: 31.5 Hz ÷ 4 kHz, 0.3 dB: 8 kHz ÷ 12.5 kHz

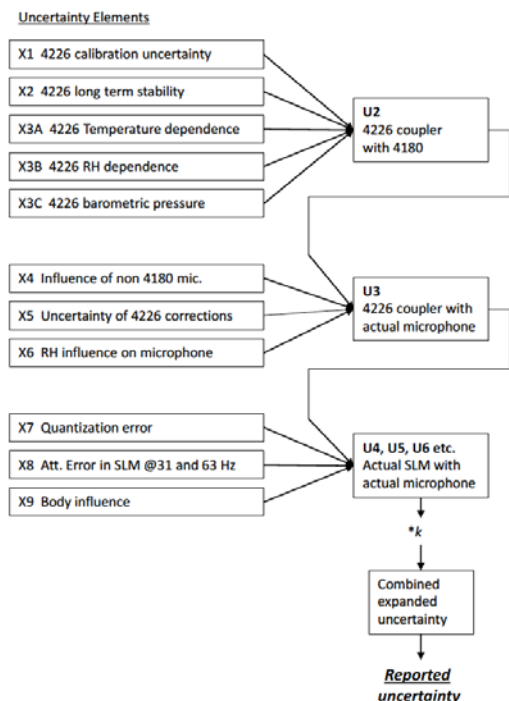
**Шумомер** - отговор на сигнал от акустичен калибратор: 94 ÷ 124 dB (реф. 20 µPa), номинални честоти 31.55 Hz ÷ 12.5 kHz. СМС: 0.3 dB: 31.5 Hz ÷ 12.5 kHz

**Шумомер** - отговор на електрически измервателни сигнали: 20 ÷ 140 dB (реф. 20 µPa) номинални честоти 20 Hz ÷ 20 kHz. СМС: 0.4 dB: 20 Hz ÷ 20 kHz

**Персонални дозиметри** - отговор на сигнал от акустични калибратори: ниво на звуковото налягане на калибратора 90 ÷ 115 dB; време на измерване 60 s ÷ 120s. СМС: 4%

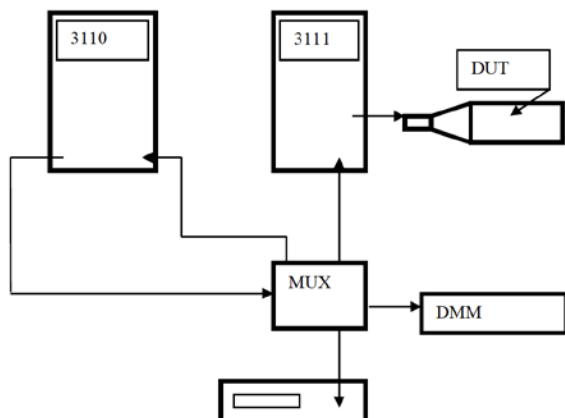
**Персонални дозиметри** - отговор на електрически измервателни сигнали: 0.3 Pa2h ÷ 105 Pa2h. СМС: 4%

Моделът, който използваме за определяне бюджета на неопределеността е както следва (елементи, които се включват):



Фиг. 2 Модел на неопределеността

## 2. Използван принцип на калибриране - шумомери

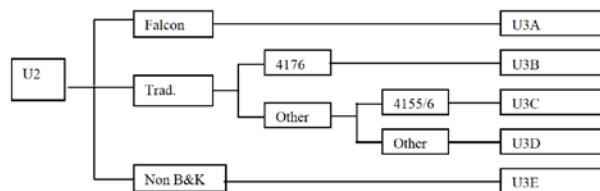


Фиг.3 Проверка аналогов ел. сигнал



Фиг.4 Автоматично акустично калибриране – шумомер 2238

## 3. Използван принцип при определяне на неопределеността при калибриране на шумомери:



| f [Hz] | X1 4226 cal | X2 Long term | X3A temp. | X3C pres. | NF1 | NF2 | NF3A  | NF3C  | u1    | u2    | u3A   | u3C   | U2 Comb Unc. |
|--------|-------------|--------------|-----------|-----------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 31.5   | 1.27        | 0.7          | 0.08      | 0.2       | 0.5 | 0.5 | 0.577 | 0.577 | 0.635 | 0.350 | 0.046 | 0.115 | 0.736        |
| 63     | 1.27        | 0.7          | 0.08      | 0.2       | 0.5 | 0.5 | 0.577 | 0.577 | 0.635 | 0.350 | 0.046 | 0.115 | 0.736        |
| 125    | 1.27        | 0.7          | 0.08      | 0.2       | 0.5 | 0.5 | 0.577 | 0.577 | 0.635 | 0.350 | 0.046 | 0.115 | 0.736        |
| 250    | 1.27        | 0.7          | 0.08      | 0.2       | 0.5 | 0.5 | 0.577 | 0.577 | 0.635 | 0.350 | 0.046 | 0.115 | 0.736        |
| 500    | 1.27        | 0.7          | 0.08      | 0.2       | 0.5 | 0.5 | 0.577 | 0.577 | 0.635 | 0.350 | 0.046 | 0.115 | 0.736        |
| 1k     | 1.27        | 0.7          | 0.08      | 0.2       | 0.5 | 0.5 | 0.577 | 0.577 | 0.635 | 0.350 | 0.046 | 0.115 | 0.736        |
| 2 k    | 1.04        | 0.7          | 0.08      | 0.2       | 0.5 | 0.5 | 0.577 | 0.577 | 0.520 | 0.350 | 0.046 | 0.115 | 0.639        |
| 4 k    | 1.15        | 0.7          | 0.08      | 0.2       | 0.5 | 0.5 | 0.577 | 0.577 | 0.575 | 0.350 | 0.046 | 0.115 | 0.685        |
| 8 k    | 1.5         | 0.7          | 0.08      | 0.2       | 0.5 | 0.5 | 0.577 | 0.577 | 0.750 | 0.350 | 0.046 | 0.115 | 0.837        |
| 12.5 k | 1.74        | 0.7          | 0.08      | 0.2       | 0.5 | 0.5 | 0.577 | 0.577 | 0.870 | 0.350 | 0.046 | 0.115 | 0.946        |

Фиг. 5 Неопределеност при калибриране на шумомери

## 4. Модел на акустично измерване при калибриране – използва се метода на пряко измерване с еталонен мултифункционален звуков калибратор:

Отклонението от действителната стойност на звуковото ниво "ΔLsp", dB относно 20 μPa се получава от уравнението:

$$\Delta L_{sp} = \Delta L_{spm} + \delta L_{spe} + \delta L_e$$

$$\text{като } \Delta L_{spm} = L_{spm} - L_{spe} \quad (2)$$

където:

ΔLspm - разликата между показанията на измервания шумомер и зададеното ниво от еталонния мултифункционален звуков калибратор dB;

Lspm - показание на измервания шумомер, dB относно 20 μPa;

Lspe - зададено ниво от еталонния мултифункционален звуков калибратор, dB относно 20 μPa ;

δLspe - отклонения от действителната стойност на звуковото ниво, dB

(от свидетелството за калибриране на еталонния звуков калибратор);

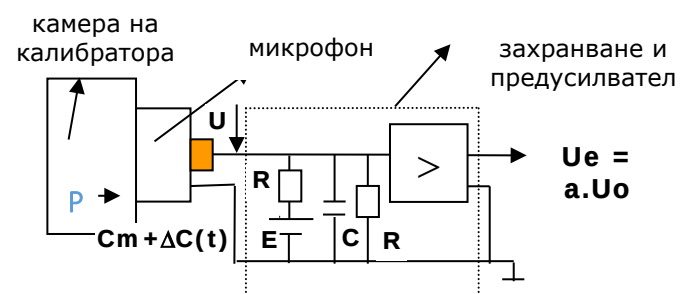
δLe - поправка на измерената стойност, дължаща се на разделителната способност на шумомера.

Еталонният мултифункционален звуков калибратор тип 4226 – Brüel & Kjær има обратна връзка за изравняване на атмосферното налягане. За това поправката от промяната на атмосферното налягане в посочените условия за калибриране е пренебрежимо малка. Това е отразено в техническата документация на калибратора.

## 5. Използван принцип на акустични калибратори

### 2.2. Принцип на калибриране

Уредите и спомагателните средства се свързват съгласно фиг.6



Фиг. 6 Автоматично акустично калибриране – калибратори  $P = U_o / S_o$ ;  $L_p = 20 \lg(P/P_o)$ ; където:  $P$  - звуково налягане (Pa);

$P_0$  - реперна стойност  $20 \mu\text{Pa}$  ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ );

$S_0$  - чувствителност на еталонния микрофон при отворена верига (V/Pa), изразявана в калибровъчните карти като  $M_0$ , dB относно 1V/Pa.

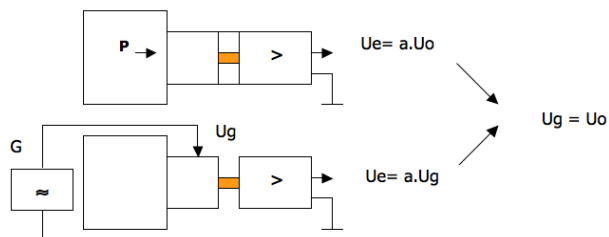
Определяне на  $U_0$ , чрез измерване ефективната стойност на изходното напрежение " $U_e$ " и отчитане на коефициента " $a$ ", който зависи от степента на натоварване на микрофонния изход (фиг. 6)

$U_e = a \cdot U_0$  или  $U_0 = U_e / a$ ,  $a = b \cdot C_m / (C_m + C)$ ;

където:

$U_e$  - напрежение на изхода на предусилвателя;  
 $C_m$  - капацитет на микрофонния капсул;  
 $C$  - входен капацитет на предусилвателя;  
 $b$  - коефициент на предаване по напрежение за комплекта предусилвател със захранващ блок.

Определяне на  $U_0$ , чрез непосредствено измерване по метода на заместващото напрежение (фиг. 2)



Фиг. 6 Определяне на  $U_0$

$U_g$  - синусоидално заместващо напрежение, подавано от генератор последователно на микрофонния капсул.

## 6. Модел на измерване за определяне на $L_p$ , чрез еталонен микрофон с нормиран коефициент на преобразуване на звуковото налягане в електрически сигнал:

Нивото на звуково налягане " $L_p$ " в камерата на измервания звуков калибратор се получава от уравнението:

$$L_p = L_0 - M_0 - L_{p0} - \delta L_{pa} + \delta L_v + \delta L_a + \delta L_e + \delta L_s + \delta L_t \quad (1)$$

където:

$L_0$  - стойност на измерваното ниво при отворена верига в изхода на еталонния микрофон, dB спрямо 1V;

$L_{p0}$  - опорно ниво, съответстващо на  $20 \mu\text{Pa}$ ,  $L_{p0} = 20 \cdot \lg(2 \cdot 10^{-5})$ , dB;

$M_0$  - ниво на чувствителност при отворена верига на еталонния микрофон, dB относно 1V/Pa;

$\delta L_{pa}$  - поправка от барометъра за атмосферно налягане;

$\delta L_v$  - поправка, зависеща от еквивалентния обем на използвания микрофон;

$\delta L_a$  - поправка от определяне на коефициента " $a$ ". При измерване по метода на заместващото напрежение тази поправка не се отчита;

$\delta L_e$  - поправка на измерената стойност, дължаща се на разделителната способност на звукоизмервателна система;

$\delta L_s$  - поправка на измерената стойност, зависеща от толеранса на поляризиращото напрежение за микрофона;

$\delta L_t$  - изменение нивото на чувствителност на еталонния микрофон от промяна на температурата.

## 7. Оценка $X_j$ на входните величини:

Измерена стойност ( $L_0$ )

При многократни измервания  $L_0$  се изчислява по формулата:

$$L_0 = \frac{\sum_{i=1}^n L_{i0}}{n} \quad (3)$$

където:  $L_{i0}$  - стойност на нивото, отчетено при  $i$ -тото измерване;

$n$  - брой на измерванията.

Опорно ниво ( $L_{p0}$ ) - Константна стойност

$$L_{p0} = 20 \cdot \lg(2 \cdot 10^{-5}) = -93,98 \text{ dB} \quad (4)$$

Оценката на нивото на чувствителност при отворена верига на еталонния микрофон по т.3.1 е " $M_0$ " dB отн. 1V/Pa от свидетелството на последното му калибриране за съответната честота.

Оценката на барометричната поправка ( $\delta L_p$ ) зависи от атмосферното налягане в момента на измерването и се отчита от съответния барометър. При някои типове звукови калибратори има въведена обратна връзка за изравняване на налягането и оценката на тази поправка е нула, а е завишен приносът към неопределеността. Това е отразено подробно в техническата документация на съответния калибратор.

Поправка, зависеща от еквивалентния обем на използвания микрофон ( $\delta L_v$ ). Има съвременни звукови калибратори с въведена обратна връзка по обем и затова е важно определянето на поправката ( $\delta L_v$ ) да е съобразно техническа документация.

Поправка от разделителната способност ( $\delta L_e$ )

Тази входна величина е с нулево очакване и грешка, равна на половината от стойността на най-малката значеща цифра на волтметъра.

Тъй като всички входни величини са некорелирани, средноквадратичната неопределеност на нивото  $L_p$  е равна на квадратния корен от сумата на дисперсиите (квадратите на приносите на неопределеността) на входните величини

$$u(L_p) = \sqrt{\sum u^2(X_i)}$$

## Разширена неопределеност, $U(L_p)$

Разширената неопределеност от измерванията  $U$  се получава чрез умножаване на средноквадратичната неопределеност на изходната оценка  $u(L_p)$  с коефициента на доверителния интервал  $k$ ,

$$U = k \cdot u(L_p)$$

При нормално (Гаусово) разпределение на измерваната величина и вероятност на доверителния интервал, приблизително 95 %,  $k=2$ .

## 5. Представяне на калибрационна система на СПЕКТРИ-ЛАБ

**Калибрационната платформа на Brüel & Kjær 3630** е универсална платформа за калибрация на инструменти и преобразуватели в областта на шума и вибрациите.

Използваните от СПЕКТРИ приложения са следните:

## Калибриране на шумомери (SLM) - калибрационен софтуер Type 7763

Калибрирането на шумомери е изключително управлявано от законодателството. Тъй като броят инструменти изискващи калибриране нараства, необходимостта от ефективна калибрационна система е налице.

Калибрационната система, (Sound level meters calibration) съответства на всички съответни международни стандарти и препоръки и е еднакво добре пригодена за използване в национални лаборатории за калибриране и в центрове за калибриране.

Системата комбинира най-съвременните информационни технологии с доказания опит на Brüel & Kjær в калибрирането на инструменти в областта на шума и вибрациите.

Калибриране на шумомери (SLM) с калибрационен софтуер Type 7763 не е просто един ефективен инструмент, всъщност това е система, поддържана в световен мащаб, лесна за рекалибриране и с бюджети за неопределеност, необходими за целите на акредитацията.

Използва се за акустично и електрическо калибриране на шумомери, калибратори, дозиметри, октавни филтри - по международни стандарти.

**Калибрационната платформа на Brüel & Kjær 3630** използва преносимия 100 kHz PULSE™ мултианализатор като основен елемент на системата. Преносимият PULSE™ е изключително гъвкав мултианализатор, който може да анализира нивото на сигнала, FFT, 1/n-octave филтри и цялостния обхват на параметрите на измерване. PULSE™ също генерира тестови сигнали, необходими за изпълнение на изискванията на международните стандарти.

Калибрационната система на шумомери Type 3630 платформа е проектирана да калибрира Brüel & Kjær инструменти, както и измерители на нива на звука на други производители, в съответствие с IEC 60651, IEC 60804, IEC 61672, както и всички останали релевантни стандарти. Системата се доставя с основния софтуер Type 7762 за измерване на нива на звук и опция за тестване Type 7763, изпълняваща различни тестове ръчно, полуавтоматично или в автоматичен режим. Тестовите са проведени както акустично така и електрически.

Наличие е функционалността за проследяване и контрол над калибрационните интервали по стандарт и на инструментите, използвани от системата се улеснява от софтуера на калибрационния мениджър, като се включва база данни на клиенти и инструменти. Измервателната верига е гарантирана от интегриран цифров волтметър DMM Agilent 34970 и Brüel & Kjær Type. Използван се като етални (а) 4226 мултичестотен калибратор, както и лабораторния стандарт за микрофони, тип 4180.



Фиг. 7 Калибрационна система Type 3630.

**Калибрационна платформа Type 3630 с калибрационен софтуер Type 7792 за дозиметри на шум**

Noise Dose Meter калибрационен софтуер Type 7792 за платформа Type 3630 за калибриране е автоматичен инструмент, предназначен за извършване на периодични тестове на дозиметри на шум в съответствие с IEC 61252. Софтуерът автоматично стартира разнообразни предварително

определени тестове в съответствие с избрани препратки. Системата включва база данни на текущите видове Brüel & Kjær дозиметри на шум, включително измерване на звуковото ниво и експозицията на шум. Нови видове дозиметри се вписват с диапазон на параметрите, необходими за тяхната дефиниция. Осигурени са бюджетите за неопределеност за улесняване на акредитацията на лабораторията (ISO 17025) и се генерират доклади за калибриране автоматично, за да се намали риска от човешки грешки.

**Калибрационна платформа Type 3630 с калибрационен софтуер Type 7794 за калибратори**

Платформа Type 3630 със софтуер за калибриране Type 7794 е инструмент за извършване на автоматизирани периодични тестове на калибратори в съответствие с IEC 60942. Системата извършва калибриране на акустични калибратори и пистонфони с една честота (250 Hz/1000 Hz), както и на многофункционални калибратори (с различни честоти и амплитуди на калибриране). Процедурите за калибриране за Brüel & Kjær акустични калибратори Видове 4220, 4228, 4230 и 4231 са предварително дефинирани в софтуера, който също позволява и добавяне на нови видове инструменти и процедури за калибриране. Осигурени са бюджетите за неопределеност за улесняване на акредитацията на лабораторията (ISO 17025) и докладите за калибриране се генерират автоматично.

**Налична опция за надграждане със система type 9699 за реципрочно калибриране на микрофони** (Първично калибриране)



Фиг.7 Система за реципрочно калибриране на микрофони

Използвана от Спектри ЕООД калибрационна система за калибриране на калибратори, шумомери, шумови дозиметри: тип 3630-Brüel & Kjær



Фиг. 8 Реална работна визуализация

### 3. ИЗВОДИ

Считано, от 2016г. СПЕКТРИ, чрез лабораторията си за изпитване и калибриране, СПЕКТРИ-ЛАБ предоставя нов тип услуги на българския пазар, а именно:

- изпитване и мониторинг на шум в индустриални локации
- калибриране на акустични калибратори
- калибриране на шумомери
- калибриране на шумови дозиметри

С тази своя инициатива, СПЕКТРИ ЕООД цели да заздравя портфолиото си от предлагани услуги в областта

на измерването, оценката и калибрирането на шум и вибрации, да увеличи своя експертен потенциал и не на последно място да предостави на своите клиенти допълнително улеснение и подкрепа в техните задачи по метрологично осигуряване и качествен контрол на използваното от тях обрудване.

#### 4. Литература

- [1] Sound and Vibration Calibration – Primary and secondary, Brüel & Kjær (www.bksv.com), 2014.
- [2] Sound Level Meter Calibration System Type 3630-A for Calibration Platform Type 3630, (www.bksv.com), 2014.
- [3] Мултифункционална система „Pulse“
- [4] БДС EN 60942:2003 Електроакустика. Звукови калибратори;
- [5] БДС EN 60651:1999 Уреди за измерване на звуково ниво;

[6] БДС EN 60804:2003 Интегрален уред за измерване на средно звуково ниво;

[7] БДС EN 61672-1,2,3:2013 Електроакустика. Уреди за измерване на звуково ниво

[8] БДС EN 61252:2000 - Електроакустика. Спецификации за персонални устройства за измерване нивото на звуковото облъчване

#### Данни за авторите:

Борис Борисов Михайлов, Sound and vibration qualified expert (2001), инж.(1994), Електроника, Технически университет София, Brüel & Kjær University (2001). Съпредседател *Българска Асоциация за Обществен Контрол и Управление на Шума*, Управител *СПЕКТРИ ЕООД*.

Нина Пешева Михайлова, инж. (1994), Машиностроене, Технически университет София, Brüel & Kjær University (2015), Ръководител “Проекти” в *СПЕКТРИ ЕООД*.

### **Metrological assurance, configuration and start-up of a new SPECTRI technological branch – Calibration laboratory of sound level meters, calibrators, noise dose meters “SPECTRI – LAB”. Creation of own methodology and international standards application**

**Boris Mihaylov 1) Nina Mihaylova 2)**

1) SPECTRI Ltd., Sofia, 30, T. Turnovski str, spectri@spectri.net, www.spectri.net (URL)

2) SPECTRI Ltd., Sofia, 30, T. Turnovski str, spectri@spectri.net, www.spectri.net (URL)

**Summary:** In this paper are presented the used concept, technical assurance, and metrological reference – re. the newly founded in Bulgaria unique laboratory for calibration of sound level meters, calibrators, and noise dose meters, “SPECTRI – LAB”.

**Keywords:** - Calibration, systems for calibration of sound level meters, calibrators, noise dose meters

#### References

- [1] Sound and Vibration Calibration – Primary and secondary, Brüel & Kjær (www.bksv.com), 2014.
- [2] Sound Level Meter Calibration System Type 3630-A for Calibration Platform Type 3630, (www.bksv.com), 2014.
- [3] Multifunktsionalna sistema „Pulse“
- [4] BDS EN 60942:2003 Elektroakustika. Zvukovi kalibratori;

[5] BDS EN 60651:1999 Uredi za izmervane na zvukovo nivo;

[6] BDS EN 60804:2003 Integralen ured za izmervane na sredno zvukovo nivo;

[7] BDS EN 61672-1,2,3:2013 Elektroakustika. Uredi za izmervane na zvukovo nivo

[8] BDS EN 61252:2000 - Elektroakustika. Spetsifikatsii za personalni ustroystva za izmervane nivoto na zvukovoto oblachvane

### **Метрологическое обеспечение, настройка и запуск нового СПЕКТРИ технического направления - Лаборатория калибровки звука Измерители уровня, калибраторов, шум дозиметры "СПЕКТРИ-ЛАБ". Создание свои собственные методы и внедрение соответствующих международных стандартов**

**Борис Михайлов <sup>1)</sup>, Нина Михайлова <sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> СПЕКТРИ ЕООД, София, Т. Търновски 30, spectri@spectri.net, www.spectri.net (URL)

<sup>2)</sup> СПЕКТРИ ЕООД, София, Т. Търновски 30, spectri@spectri.net, www.spectri.net (URL)

**Резюме:** Этот документ описывает использование концепции, техническая поддержка и метрологическое направление на недавно в Болгарии уникальную лабораторию для калибровки измерителей уровня звука, калибраторов, шума дозиметров – “СПЕКТРИ - ЛАБ”.

**Ключови думи:** - Калибровка системы для калибровки уровня шума метров, калибраторов, шума дозиметров

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                      |

## ИЗПЪЛНЕНИЕ НА ИЗИСКВАНИЯТА ЗА АКРЕДИТАЦИЯ НА ИА „БСА“ И ИЗИСКВАНИЯТА НА СТАНДАРТА ISO/IEC 17020:2012 НА ОРГАН ЗА КОНТРОЛ ОТ ВИД С „СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ“ ПРИ СПЕКТРИ ЕООД

Борис Михайлов <sup>1)</sup>, Милко Джамбазов <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Орган за контрол от вид С „СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ“ при СПЕКТРИ ЕООД,  
e-mail: [office@spectri.net](mailto:office@spectri.net), [www.spectri.net](http://www.spectri.net)

<sup>2)</sup> Научен секретар на Българско академично метрологично дружество,  
e-mail: [milkodjambazov@gmail.com](mailto:milkodjambazov@gmail.com)

**Резюме:** В документа са разгледани изискванията за акредитация и техническа компетентност на примерен орган за контрол от вид С „СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ“ при СПЕКТРИ ЕООД. Подробно е представен обхвата на акредитация, техническата обезпеченост и възможности за контролни измервания и оценка на параметрите на шум и вибрации от акредитирания орган.

**Ключови думи:** акредитация, шум, вибрации

### 1. Въведение

**БДС EN ISO/IEC 17020** е международен хармонизиран стандарт, който съдържа изисквания за компетентността на органите, извършващи контрол, тяхната безпристрастност и последователността на техните дейности свързани с контрола.

Този стандарт е приложим за **органите за контрол от вид "А", "В" или "С"**, които са определени в него и се отнася за всеки етап на контрол.

Видът на органа за контрол, според условията, при които извършва услугите си и видът на тяхната независимост са от вид:

- "А" - извършващ контрол от трета страна;
- "В" - извършващ контрол от първа страна и предоставя контрол само на организацията, от която е част, и
- "С" - извършващ контрол от първа страна, контрол от втора страна или и двата вида и предоставя услуги по контрол на организацията, от която е част или на други страни, или и двете.

Органите за контрол извършват оценяване на съответствието на контролирания обект спрямо предварително определените изисквания, които може да бъдат определени в: нормативни актове, стандарти, технически спецификации, и т.н.

През 2011 г. СПЕКТРИ ЕООД разработи и внедри система по качество в съответствието с изискванията на стандарта БДС EN ISO/IEC 17020. Органът за контрол СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ е от вид С. Целта на сертифицирането беше да се предложи на клиентите обслужване с доказана и призната техническа и експертна компетентност в област, в която дружеството и персонала се доказва ежедневно, а именно – шум и вибрации, без да се разпръскват ресурси и компетентност в други области.

За изпълнение на идеята и целта на акредитация, СПЕКТРИ ЕООД се ръководи от два основни факта – притежаване на оборудване от висок клас, което е метрологично проследимо и експертен персонал, който е

доказал своята компетентност в изпълнените десетки проекти с национално и обществено значение.

След 4 годишен акредитационен период през 2016 г. СПЕКТРИ ЕООД успешно премина преакредитация от ИА „БСА“.

СПЕКТРИ ЕООД предоставя на клиентите дейности по доставка, сервиз и поддръжка на измервателна техника в областта на акустиката и вибрациите и изпълнява инженерингови задачи във връзка с измерването, диагностиката и анализа на шум и вибрации.

Органът за контрол от вид С при „СПЕКТРИ“ ЕООД гр. София е акредитиран съгласно БДС EN ISO / IEC 17020:2012 от ИА „БСА“ с уникален номер на сертификат № 122 ОКС. Валидността на сертификата е до 30.11.2016 г., като предстои да бъде преиздаден за период от 4 години.

### 2. Обхват на акредитация на ОК С „СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ“:

**Шум в околна среда** с обхват на контрол по параметър: квивалентно ниво на шума, дневно, вечерно и нощно ниво на шум, dBA;

**Шум в помещения на жилищни и обществени сгради** с обхват на контрол по параметър: ниво на шум и еквивалентно ниво на шума, dBA;

**Шум в работна среда** с обхват на контрол по параметър: дневно ниво на експозиция на шум, средноседмично ниво на експозиция на шум, dBA, върхово ниво на звуково налягане, dBC, ниво на шум и еквивалентно ниво на шума, dBA;

**Вибрации предавани на системата „ръка-рамо“ и на цяло тяло**, с обхват на контрол по параметър: дневна стойност на експозиция на вибрации;

**Вибрации на машини** с обхват на контрол по параметър: виброускорение, виброскорост, вибропреместване;

**Вибрации в жилищни помещения** с обхват на контрол по параметър виброускорение.



Фиг. 1 Сертификат за акредитация

### 3. Нормативни документи по които се извършва контрола

Използвайки най-модерната и световно призната апаратура за измерване на параметрите на шум и вибрации СПЕКТРИ ЕООД е технически обезпечена за разнообразни измервания в зависимост от необходимостта на клиентите. Като условия на акредитация описаните параметри и заявен обхват се извършват в съответствие с изискванията на изброените по-долу методи за изпитване, вътрешни одобрени процедури за контрол, а оценката от проведения контрол се извършва в съответствие с цитираните нормативни документи.

3.1. При измерване на шум в околна среда, методите на контрол са в съответствие с БДС 15471, БДС ISO1996-1, БДС ISO1996-2 и вътрешно разработени процедури за измерване на шум в околна среда ПК 10-1. Оценката на съответствието се извършва в съответствие с Наредба № 6, ДВ бр. 58/2006г. (Приложение 2, табл.2) и Техническа спецификация;

3.2. Измерване на шум в помещения на жилищни и обществени сгради, методите за контрол са в съответствие с БДС 15471 и ПК 10-3, а оценката на съответствието в съответствие с изискванията на Наредба № 6, ДВ бр. 58/2006 г. (Приложение 2, табл.1), Наредба № 24, ДВ бр. 95/2003г., Наредба № 9, ДВ бр. 46/1994г., Наредба № 2, ДВ бр. 15/2007г., Наредба № 26, ДВ бр. 103/2008г., Наредба № 4, ДВ бр. 6/2007г. и Техническа спецификация на клиента.

Разполагайки с апаратура от висок клас, която е метрологично проследима, ние имаме възможността за предложим на нашите клиенти високо точни и изключителни измервания на тонална детекция, определяне на импулсен шум, шум от климатици, трафопости, асансьори, нискофрезови измервания и др.

3.3. Измерване на шум в работна среда, методите за контрол са в съответствие с БДС ISO 1999 (БДС EN ISO 9612), БДС 15471 и разработени и одобрени процедури ПК 10-2, оценката на съответствието е по Наредба № 6, ДВ бр. 70/2005г., Наредба № 6, ДВ бр. 58/2006г. (Приложение 2, табл.1), Наредба № 7, ДВ бр. 88/1999г., Наредба № 9, ДВ бр. 46/1994г., Наредба № 26, ДВ бр. 103/2008г. и Техническа спецификация на клиента.

3.4. Измерване на *вибрации предавани на системата „ръка-рамо“* и на *цяло тяло*, методи за контрол са определени в БДС ISO 2631-1, БДС EN ISO 5349-1, БДС EN ISO 5349-2, ПК 10-6, ПК 10-7, а оценката на

съответствието по Наредба № 3, ДВ бр. 40/2005г. и Техническа спецификация на клиента.

3.5. Измерване на *вибрации на машини* се извършват по описаните методи за контрол БДС ISO 10816 (-1-6), Наредба № 9 (ДВ бр. 72/2004г.) и одобрени процедури ПК 10-8, ПК 10-9, ПК 10-10, а оценката на съответствието се извършва по БДС ISO 10816 (-1-6), Наредба № 9 (ДВ бр. 72/2004 г.), и Техническа спецификация на клиента.

3.6. Измерване на *вибрации в жилищни помещения*, метода за контрол и оценка на съответствието е описан в Наредба № 9, (ДВ бр. 17/2010г.), а процедурата за измерване е описана в ПК 10-11.

### 4. Технически средства за контрол

4.1. Използваното техническо средство за осъществяване на *контрол на шум в околна, работна и битова среда* е интегриращ шумомер, 20 – 140 dB(A), тип 2250, производител Brüel & Kjær. Еталона за калибриране е Звуков калибратор, 94 dB(A)/1kHz, тип 4231, производител Brüel & Kjær. Уредите са клас 1 и отговарят на изискванията на стандарта и метрологично проследими.



Фиг. 2 Интегриращ шумомер тип 2250

В изпълнение на целите и политиката по качество за непрекъснато развитие и подобряване на услугите, които предлага ОКС СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ – техническо и експертно, през 2016 г. СПЕКТРИ ЕООД закупи за целите на контрола персонален шумов дозиметър тип 4448 за измерване на параметрите на шум на работно място, с възможност за определяне на дневно ниво на експозиция на шум, средноседмично ниво на експозиция на шум, dBA.



Фиг. 3 Персонален шумов дозиметър тип 4448

4.2. За осъществяването на контрол на *вибрации предавани на системата „ръка-рамо“* и на *цяло тяло* използваме вибрационен анализатор за „човешки вибрации“ тип 4447, производител Brüel & Kjær, три канални акселерометър за система „цяло тяло“ – 4515-B-002 и акселерометър тип 4515-B-002, Brüel & Kjær, еталона за калибриране на техническите средства е вибрационен калибратор тип 4294, на нашите партньори Brüel & Kjær.



Фиг. 4 Вибрационен анализатор тип 4447

4.3. При извършване на контрол на *вибрации на машини* и *вибрации на сгради* се използва многоканален мултианализатор PULSE, тип 3560-B-140 и акселерометър 4514-B-001, производител Brüel & Kjær. Калибрирането преди всяко измерване се извършва с еталон тип 4294 на Brüel & Kjær.



Фиг. 5 Мултианализатор Pulse, тип 3560-B-140

Еталони за калибриране на техническите средства за шум и вибрации



Фиг. 6 Звуков калибратор тип 4231



Фиг. 7 Вибрационен калибратор, тип 4294

Освен изброените технически средства за контрол, преди всяко измерване се регистрират параметрите на околната среда с чрез измерителя на условия на околна среда тип 5000 на Кестрел.

Органът за контрол спазва политиката за проследимост на ИА БСА и съгласно изискванията на BAS QR 27 използва следните източници на проследимост:

Национални метрологични институти (НМИ), включително Българският институт по метрология (БИМ), за области, публикувани в Приложение С (Appendix C) на CIPM MRA и акредитирани лаборатории за калибриране, които са с призната възможност за калибриране и измерване и проследимост с подходяща неопределеност, акредитирани от Национален орган за акредитация, страна по Многостранното споразумение на ЕА (EA MLA) или ILAC (ILAC-MRA) в област калибриране.

##### 5. Фирмени компетенции и персонал

Специалистите в органа са назначени от Управителя на фирмата. Те са с дългогодишен опит и допълнителни квалификации по отношение на оценката и контрола на шум и вибрации и могат да извършват определените за тяхната длъжност контролни дейности, както и да правят професионални оценки на съответствието от контрола и да оценяват значимостта на откритите отклонения/несъответствия.

Обучението на персонала са непрекъснати външни или вътрешни и се извършват с цел повишаване на квалификацията и повишаване качеството на извършваните контролни дейности.

Служителите са притежатели на сертификати за системи по качество и вътрешни одитори по БДС EN ISO/IEC 17020:2012, издаден от Съюза на Метролозите в

България и ИА БСА, обучение за измерване и контрол на шум в околна, работна и битова среда, издаден от Технически Университет София, обучение за измервания на вибрации от Технически Университет – София, обучение за работа с оборудване и решения на производителя Brüel & Kjær, а също така и обучение за метрологична проследимост на техническите средства от БИМ, и обучение на тема метрологична проследимост на средствата за измерване. Членове на екипа участват и в обученията организирани от Съюза на Метролозите в България като лектори.

Финансирането на обучението на персонала се извършва от фирмата, като текущо се набелязват нуждите от обучение и се използват всички съществуващи възможности за това. Управителят осигурява финансови ресурси за участие на специалистите на органа във външни форми на обучение като семинари, курсове, конференции и други.

##### 6. Примери от реални измервания

6.1. Измервания на дневна стойност на експозицията на вибрации – по X, Y, Z ( $A_w(8)x$ ,  $A_w(8)y$  и  $A_w(8)z$ ),  $m/s^2$  на педал на съединителя на Renault Traffic



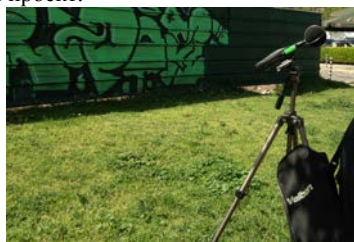
Фиг. 8 Реални измервания на вибрации „цяло тяло“

6.2. Измерване на шум в работна среда в Топлофикация София ЕАД, след изпълнени мероприятия по обезшумяване на парогенератор General Turbo T12-2, 1500 KVA, Un-6300V, Speed – 3000 r.p.m., P – 12750 KW, I – 1375 A, frequency – 50 Hz.



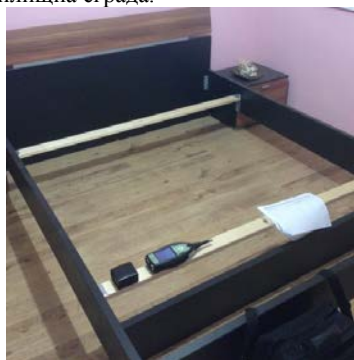
Фиг. 9 Реални измервания на шум в работна среда

6.3. Измервания на шум в околна среда – етап от акустичен проект.



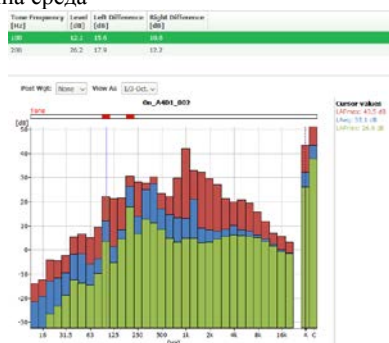
Фиг. 10 Реални измервания на шум в околна среда

6.4. Реализация на измерване, обследване и анализ на естество на оплакване от нискочестотен / тонален шум предизвикан от трансформатор, находящ се под спално помещение в жилищна сграда.



Фиг. 11 Реални измервания на тонален шум

Определяне, регистрация и отчитане на тонален шум е от изключително значение при контрола и оценката на шум в битова/околна среда



Фиг. 12 Представяне на резултатите в 1/3 октавен спектър

Корекцията в следствие на тонален шум би могла (каквото е и конкретния пример) да доведе до превишаване на нормативно определените гранични стойности. С оглед коректността и проследимостта в изготвяните заключения е от значение използването на надежден, доказуем и метрологично осигурен инструментариум (хардуер, софтуер)

6.5. Демонстрация при измервания на вибрации на сгради и вибрации на машини съгласно обхвата за акредитация



Фиг. 13 Демонстрация на измерване на вибрации на машини и вибрации на сгради по време на оценка и наблюдение за преакредитация.

## 7. Изводи

**Наличието на официално признание, акредитация** от специализиран държавен орган е необходимо условие за легитимността на всяко дружество в страната. То гарантира наблюдение и контрол на качеството на предоставяните услуги, поддържане на компетентността на персонала и поддръжката, управлението и развитието на материалната база през целия акредитационен период. Ето защо за нас е много важно да постигаме все по-добри резултати в своята работа. Акредитацията на услугите на СПЕКТРИ ЕООД чрез ОКС СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ е нашата мисия да доставим оценени и акредитирани високо качествени и признати услуги на нашите клиенти, да спечелим тяхното доверие, като гарантираме призната и поддържана безпристрастност и висока техническа и експертна компетентност.

## 8. Литература

- [1] БДС EN ISO/IEC 17020:2012
- [2] БДС ISO 1996-1/2005 Акустика. Описание, измерване и оценяване на шума в околната среда.
- [3] БДС ISO 1996-2/2011 Акустика. Описание, измерване и оценяване на шума в околната среда.
- [4] БДС ISO 1999 Акустика. Определяне въздействието на шума при работа и оценяване увреждането на слуха, причинено от шум
- [5] БДС 15471/1982 Шум. Методи за измерване и оценка в помещенията на жилищни, обществени сгради и населени места
- [6] БДС ISO 2631-1/2004 Вибрации и удар. Оценяване на въздействието на вибрациите върху цялото човешко тяло.
- [7] БДС ISO 5349-1,2/2002 Вибрации. Измерване и оценка на въздействието на вибрациите, предаващи се по ръката на човека.
- [8] БДС ISO 10816-1,2,3,4,5,6/2002 Вибрации. Оценка на вибрациите на машини чрез измерването им на невъртящи се части.

## Данни за автора:

**Борис Борисов Михайлов**, Маг. инж. специалност „Микроелектроника“, Ръководител на Орган за контрол С „СПЕКТРИ-Измервания“ при СПЕКТРИ ЕООД, Управител СПЕКТРИ ЕООД.

Научни интереси: шум, вибрации, метрологична проследимост, метрологично осигуряване, системи по качество, вътрешни одити.

**Милко Тодоров Джамбазов**, Маг. инж. (1972) – Ленинградски институт по точна механика и оптика (ЛИТМО) – гр. Санкт Петербург – Русия по специалността „Прибори на точната механика“; д-р (1976), ЛИТМО по Теория на механизмите и машините. Месторабота: Научен секретар на Българско академично метрологично дружество (2014) – експерт по метрологично осигуряване.

**IMPLEMENTING THE REQUIREMENTS FOR ACCREDITATION OF EA "BAS" AND THE REQUIREMENTS OF  
STANDARD ISO / IEC 17020: 2012 OF CONTROL AUTHORITY WITH TYPE C "SPECTRI-MEASUREMENT" IN  
SPECTRI LTD**

**Boris Mihaylov <sup>1)</sup>, Milko Djambazov <sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> Control authority with type C "SPECTRI-MEASUREMENT" in SPECTRI LTD  
e-mail: [office@spectri.net](mailto:office@spectri.net), [www.spectri.net](http://www.spectri.net)

<sup>2)</sup> Scientific Secretary of the Bulgarian academic metrological company,  
e-mail: [milkodjambazov@gmail.com](mailto:milkodjambazov@gmail.com)

*Abstract:* Summary: In this document are discussed a requirement for accreditation and technical competence of exemplary control body type C "Spectri-measurements" in SPECTRI LTD are presented in detail the scope of accreditation, technical support and opportunities for control measurements and assessment of parameters of noise and vibration of the accredited body.

*Key-Words:* accreditation, noise, vibration

**References**

**[1] BDS EN ISO/IEC 17020:2012**

**[2] BDS ISO 1996-1/2005** Akustika. Opisane, izmervane i otsenyavane na шума v okolnata sreda.

**[3] BDS ISO 1996-2/2011** Akustika. Opisane, izmervane i otsenyavane na шума v okolnata sreda.

**[4] BDS ISO 1999** Akustika. Opredelyane vazdeystviето na шума pri rabota i otsenyavane uvrezhdaneto na sluha, prichineno ot shum

**[5] BDS 15471/1982** Shum. Metodi za izmervane i otsenka v pomesheniyata na zhlishtni, obshtestveni sgradi i naseleni mesta

**[6] BDS ISO 2631-1/2004** Vibratsii i udar. Otsenyavane na vazdeystviето na vibratsiите varhu tsyaloto choveshko tyalo.

**[7] BDS ISO 5349-1,2/2002** Vibratsii. Izmervane i otsenka na vazdeystviето na vibratsiите, predavashti se po rakata na choveka.

**[8] BDS ISO 10816-1,2,3,4,5,6/2002** Vibratsii. Otsenka na vibratsiите na mashini chrez izmervaneto im na nevartyashti se chasti.

ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ВЫПОЛНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПО АККРЕДИТАЦИИ ЕА "БАС" И ТРЕБОВАНИЯМИ  
СТАНДАРТА ISO / IEC 17020: 2012 ОРГАН КОНТРОЛЬ ТИПА С "СПЕКТРА-ИЗМЕРЕНИЕ" В СПЕКТРИ ЕООД

**Татяна Георгиева <sup>1)</sup> Милко Джамбазов <sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> Орган контрол вид С „СПЕКТРИ-ИЗМЕРЕНИЕ“ в СПЕКТРИ ЕООД  
e-mail: [office@spectri.net](mailto:office@spectri.net), [www.spectri.net](http://www.spectri.net)

<sup>2)</sup> Ученый секретарь болгарской академической метрологической компании  
e-mail: [milkodjambazov@gmail.com](mailto:milkodjambazov@gmail.com)

*Резюме:* В этом документе рассматриваются требования к аккредитации и технической компетентности в качестве примера управления органом типа С "Спектри-измерение" в СПЕКТРИ ЕООД. Подробно изложена область аккредитации, технической безопасности и возможностей для контрольных измерений и оценки параметров шума и вибрации аккредитованным органом.

*Ключевые слова:* аккредитация, шум, вибрация

|                                                                                   |                                                                                                                         |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="text-align: center;">АКУСТИКА</h1> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>11 - 12.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>29 - 30.11.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                               | Декември 2016 г.                                                                      |

## ПАТЕНТНИ РЕШЕНИЯ ЗА СНИЖАВАНЕ НА АКУСТИЧНИЯ ШУМ ЧРЕЗ ОТРАЗЯВАЩИ ПРОФИЛНИ ПРЕГРАДИ

Проф. д-р инж. Иван Кралов, Технически университет – София, България, kralov@tu-sofia.bg

## PATENT SOLUTIONS FOR REDUCING THE ACOUSTIC NOISE USING REFLECTING SHAPED BARRIERS

Prof. Eng. Ivan Kralov, PhD, Technical University of Sofia, Bulgaria, kralov@tu-sofia.bg

**Резюме:** В работата са представени основните патентни решения за снижаване на акустичния шум чрез отразяващи профилни прегради. Направен е анализ на основните им параметри и области на приложимост. Представени са нови конструкции на едностранна и двустранна бариера за шумозащита.

**Ключови думи:** шумозащита, акустичен шум, шумови бариери.

**Resume:** The main patent solutions for reducing of the acoustic noise using reflecting shaped barriers are presented in this study. An analysis of its principal parameters and areas of application is made. New constructions of one-side and two-side noise insulating barriers are presented.

**Keywords:** noise insulation, acoustic noise, noise barriers.

### Увод

Снижаването на акустичния шум е важен процес, влияещ пряко върху здравословните условия на труд и почивка на хората. Особено важен е шумът, който се възбужда функционално, и е трудно да бъде намален чрез конструктивни или технологични решения. Актуалността на проблема се вижда от огромния брой продължаващи изследвания и публикации [10, 11, 12, 13]. В редица случаи за постигане на нормите за шум в окръжаващата среда е нужно прилагането на сложни и скъпи технически и технологични решения. Основно методите за снижаване на шума се делят на пасивни, активни и комбинирани. При пасивните се използва основно преграждане на пътя на разпространение на звуковите вълни и нивото на шума се снижава чрез отразяване и поглъщане на тяхната енергия [1, 2, 3, 10, 11, 12, 13]. При активните методи в системата се въвежда допълнителна енергия чрез която се противодейства на акустичната енергия на източника – създаване на значим шумов фон, излъчване на акустични вълни в противофаза и т.н. [1, 2, 13]. Комбинираните методи включват едновременно елементи от предходните два.

Обект на изследване в настоящата работа са част от решенията за снижаване на шума чрез пасивни методи, тъй като те се характеризират с ниска себестойност, технологичност на производството, монтажа и експлоатацията им, както и възможността за широка

приложимост в индустрията. Основен принцип при разглежданите патентни решения е отразяването на звуковите вълни, генерирани от източника, чрез профилни прегради. В повечето от тези случаи има и съществено абсорбиране от преградата.

Класически пример за отразяваща преграда е патент № УД 96/16230 – 30.05.1996 [4]. При него върху бетонни колони са окачени дъговидно огънати навън надлъжни профили – фиг. 1. Постъпващите звукови вълни достигат до профила и част от тях се отразяват и гасят чрез наслагване с постъпващите. Друга част от звуковата енергия се поглъща от преградата и носещите колони. Останалата част от акустичната енергия преминава през преградата. Предимствата на това решение са: широк обхват на приложимост, конструктивна здравина и конструкция от еднотипни отразяващи елементи, което води до относително ниска себестойност при серийно производство. Като недостатък може да се посочи нуждата от различни колони при различна височина на преградата, което ги оскъпява, както и скъпия им транспорт и монтаж (поради големите габарити и маса на колоните). От акустична гледна точка в местата на съединяване на два профила може да се получи концентрация на постъпваща и отразена звукова енергия, която да се отрази допълнително от близките повърхнини на преградата и се яви като вторичен звуков източник в противоположна посока. Това би довело до усиление на нивото на шум в близост до преградата.

Подобен на описания е и патент US № 6305492 B1 / 23.10.2001 [5], като при него преградата е от огънати с различна форма вертикални профили, захванати от вертикални фиксирани колони – фиг. 2. Различното тук е, че профилите са разположени с вдлъбнатата част към постъпващите звукови вълни. По този начин наслагването на постъпващите и отразените става в по-голям обем, което е предпоставка за по-добро снижаване на шума.

Патент № US 7789193 B2 / 07.09.2010 г. [6] е за шумозащитна преграда, действаща на същия принцип като описаните две. При него отразяващата преграда е изградена от поредица свързани хоризонтални полу-тръбовидни профили с шестостенно напречно сечение – фиг. 3. Отново тук основно предимство е че профилите са разположени с вдлъбнатата част към постъпващите звукови вълни и наслагването на постъпващите и отразените става в по-голям обем, което води за по-добро снижаване на шума. Съществен недостатък тук е сложният голямогабаритен профил, който оскъпява производството и транспортирането му.

При патентно решение № AT 513615 A4 2014-06-15 [7] шумозащитната преграда е изградена от еластични елементи, които са части от употребявани автомобилни гуми – фиг. 4. Тези елементи могат да извършват ограничени движения, като по този начин наред с отразяването на част от звуковата енергия, преобразуват друга част в кинетична енергия на тези елементи. Екологично и икономическо предимство на това решение е и използването на отпадни замърсяващи продукти като автомобилните гуми в случая. Сред недостатъците трябва да се отбележи не съвсем естетичния вид на преградите.

Патентни решения № 89203035.4 / 29.11.1989 г. [8] (фиг. 5) и DE 42 20 547 A1 / 07.01.1993 г. [9] (фиг. 6) са предназначени предимно за шумоизолация при автомобилен и релсов транспорт. При първото решение е предвидена възможността за промяна наклона на отразяващата вдлъбната повърхност, а при второто е предвидено добавянето на многослойни силно абсорбиращи материали към преградата. В първия случай е налична

опростена и ефективна конструкция, но имаща скъпо транспортиране, монтаж и нужда от управление на наклона. При втория случай е налична опростена, не скъпа и ефективна шумозащитна конструкция, но тя е ограничено приложима на открити атмосферни условия, поради възможността от компрометиране на абсорбиращите материали в условия на дъжд и снеговалеж.

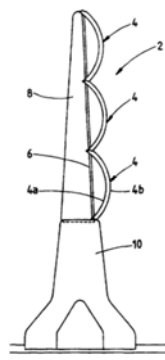
Масово използвано в съвремените са конструкции, подобни на патентно решение 10 2014 2017 767.7 / 10.03.2016 г. [10] (фиг. 7). В тези случаи преградите са от панели с дълги и не широки метални панели, наредени един върху друг, и захванати между вертикални колони. Разновидности на решението са наличието на перфорирана страна на панела от към падащите звукови вълни, и/или наличието на силно звукопоглъщаща материя в панела. Такъв тип конструкция е ефективна, лесна за транспортиране и монтаж, но е с относително висока себестойност. Последното се обуславя от използваните материали – обикновено алуминиев панел, за да е лесна перфорацията, да има малка маса при транспорт и монтаж, както и технологичност при запълване с абсорбиращата материя.

Въз основа на направения анализ на основните патентни решения за пасивни шумоизолиращи прегради, могат да се направят следните изводи:

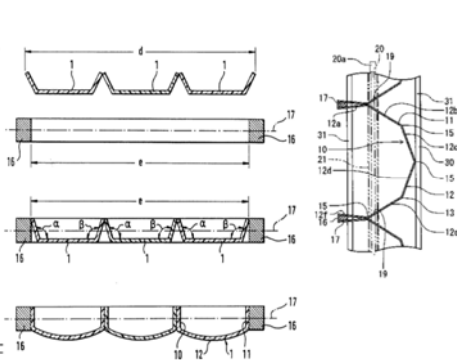
Основните патентовани пасивни шумоизолиращи решения чрез отразяване на шума са базирани на използването на различни профилни отразяващи повърхнини на преградите.

В някои от горните патентовани методи се използват силно еластични елементи с цел абсорбиране на част от звуковата енергия, а често и оползотворяване на отпадъчни индустриални продукти.

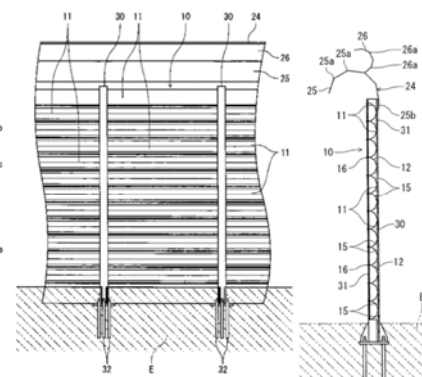
Повечето от съществуващите патентни решения за пасивна шумозащита, имащи добра ефективност, са нетехнологични или скъпи за производство.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

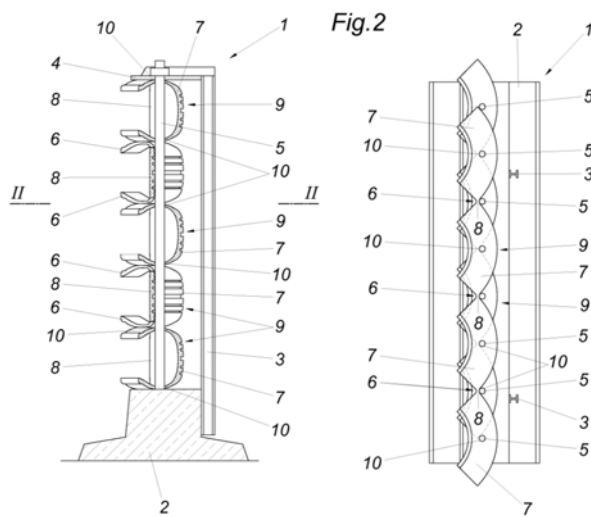
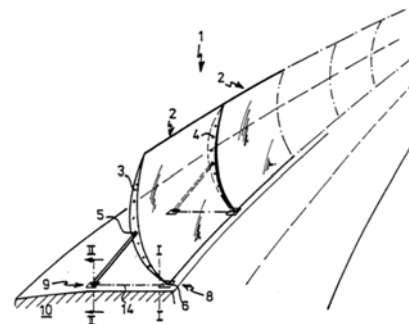
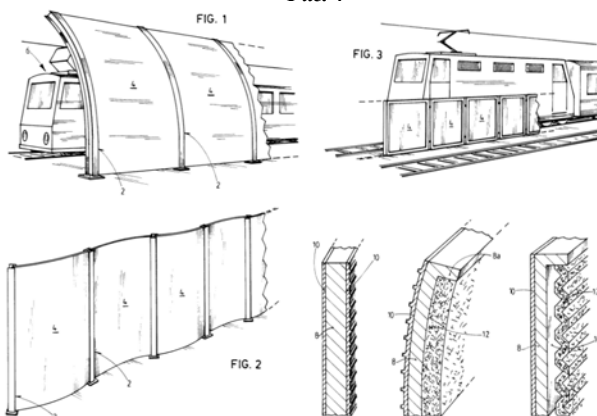


Fig.2

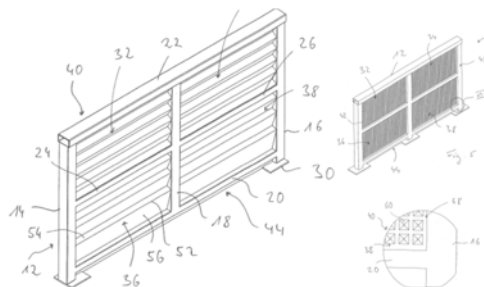


Фиг. 5



Фиг. 4

Фиг. 6



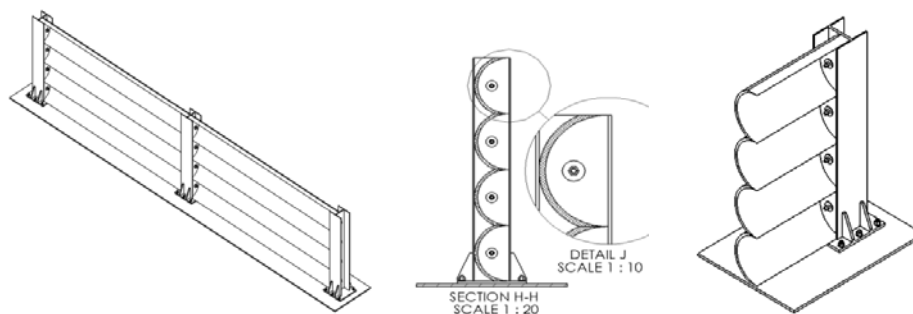
Фиг. 7

Въз основа на направените изводи е дефинирана и задачата за синтез на ново конструктивно решение за пасивна шумозащитна преграда, което да включва повечето от предимствата на наличните такива патентни решения и да избягва в максимална степен недостатъците им. На фиг. 8 е показано ново решение на шумоизолиращ панел и шумозащитна преграда, а на фиг. 9 – на двустранно шумоизолиращ панел и шумоизолираща бариера.

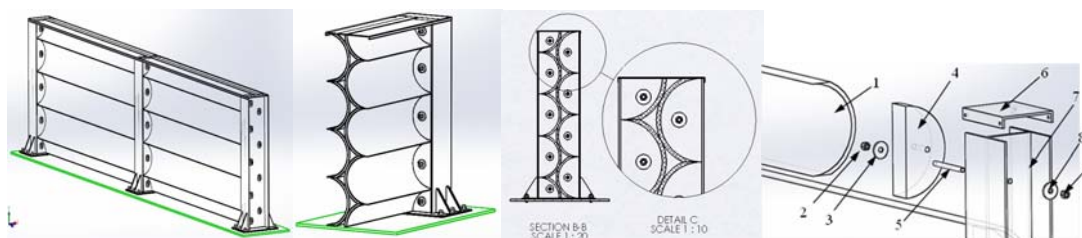
### НОВО КОНСТРУКТИВНО РЕШЕНИЕ

Шумоизолиращите панели са от неметални материали и се състоят от два или повече по същество хоризонтални неметални канала, разположени един върху друг, като вдлъбнатите страни на каналите са насочени странично в една и съща посока – към постъпващите звукови вълни. От съществено значение е, че вдлъбнатината на каналите е с форма на полуцилиндър, а граничната зона между два съседни канала е оформена като остър ръб. Тези канали са захванати във вертикални Н-образни колони, като

вертикалното фиксиране на полу-цилиндричните канали към тях става чрез неметални полу-дискове, с радиус като вътрешния на каналите, и болтови или шпилкови съединения. Колоните са фиксирани към фундамента чрез болтови съединения. При двустранно шумоизолираща панел има две групи от по два или повече по същество хоризонтални неметални полуцилиндрични канала, разположени един върху друг, като едната група канали са разположени от едната страна на панела с насочени странично вдлъбнати страни, а другата група канали са разположени от другата страна на панела, чиито вдлъбнатите страни са насочени странично в противоположна на първата група посока. Каналите на едната група са отместени във вертикална посока спрямо каналите на другата група на един радиус, като всеки полу-цилиндричен канал контактува по външната си повърхност с външната повърхност на двата срещуположно отворени канали.



Фиг. 8 - Шумоизолиращ панел и шумозащитна преграда



Фиг. 9 – Двустранно шумоизолиращ панел и шумозащитна преграда

При тази конструкция се цели ефективно снижаване на нивата на звуковото налягане, постъпващо и от двете страни на преградата. И в двете решения основен принцип на работа е отразяването постъпващите звукови вълни в малък обем от пространството в близост до конструкцията. Там постъпващите и отразените звукови вълни интерферират и се получава търсеният ефект. Степента на отразяване зависи основно от материала на преградата, честотното разпределение и постъпващото акустично налягане. Особеност на конструкцията е избегнатото наличие на плоски отразяващи повърхности откъм постъпващите вълни, както и точният полуцилиндричен профил на каналите. Така отразените вълни се фокусират към геометричния център на профила и насочват интерференцията в обема на пълния цилиндричен профил. Дебелината на профила и радиусите на каналите могат да се проектират в зависимост от параметрите на шума. Модулната конструкция позволява чрез добавяне на елементи да се изграждат прегради с различна височина. Двете конструкции са технологични за изработка, транспорт и монтаж, тъй като са съставени колони от стандартни профили, еднакви преградни елементи с несложна форма, които са лесни за транспорт. Монтажът не изисква специални инструменти или професионална квалификация от изпълнителите. Унифицираните елементи, съставляващи конструкциите, позволяват производството им в големи серии, което допълнително понижава тяхната себестойност. Предварителните проучвания показват степен на шумозащита, която е равностойна на аналогичните патентовани решения. Следва да се отбележи, че продължават изследванията – числени и експериментални, както за оптимизиране на параметрите на конструкциите, за синтезирането на материали за нея с висок клас на пожароустойчивост и др. Сред предимствата на новите решения е и възможността им за широко приложение в различни области – транспортни трасета, индустриални обекти, сгради и др. Към момента пред конструкторите остава да удовлетворят общите предизвикателства на

всички аналогични патентни решения като устойчивост на ветрови натоварвания, забавено стареене и дълготрайност на съоръженията.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение, предложените нови конструктивни решения за шумозащитни панели и прегради съчетават едновременно повечето от предимствата на съществуващите патентни решения, без да влошават ефективността, като в същото време са значително по-технологични за производство, транспорт, монтаж и поддръжка. Предстоят конкретни изследвания на икономическата обосновка за използването на тези решения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Банов, С., И. Кралов, Шум в транспортната техника, ИТУС, София, 2003.
2. Николов, Н, Д. Бенев, И. Шубин, Акустично проектиране на транспортни шумозащитни екрани, АСМО Academic Press, София, 2014.
3. Патент № УД 96/16230 – 30.05.1996 г.
4. Патент № US № 6305492 B1 / 23.10.2001.
5. Патент № US 7789193 B2 / 07.09.2010.
6. Патент № AT 513615 A4 2014-06-15.
7. Патент № 89203035.4 / 29.11.1989 г.
8. Патент № DE 42 20 547 A1 / 07.01.1993 г.
9. Патент № 10 2014 2017 767.7 / 10.03.2016 г.
10. Kralov, I., S. Terzieva, I. Ignatov, "Analysis of methods and MEMS for Acoustic Energy Harvesting with Application in Railway Noise Reduction", Proceedings of the 3rd International Conference MECAHITECH'11, Bucharest, 2011.
11. Kralov I., P. Sinapov, K. Nedelchev, I. Ignatov, Friction Induced Rail Vibrations, AIP, Vol. 1497, pp. 19-25, 2012.
12. Trevor, J., P. D'Antonio, Acoustic Absorbers and Diffusers, Taylor & Francis, 2009.
13. Thompson D. J., Railway Noise and Vibration, Elsevier, 2009.

|                                                                                   |                                                                 |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1>АКУСТИКА</h1> <p>Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                       | Декември 2016 г.                                                                   |

## ОЦЕНКА НА МЕХАНИЧНОТО НАПРЕГНАТО СЪСТОЯНИЕ В ГАЗОПРОВОДИ

П.Чукачев,\* Й.Мирчев,\* М.Миховски

[p.chukachev@multitest.bg](mailto:p.chukachev@multitest.bg), [nntdd@imbm.bas.bg](mailto:nntdd@imbm.bas.bg)

Мултитест ООД, гр. Варна, 9009, България, \*Институт по механика - БАН, София, България

**Резюме:** Чрез безразрушителен ултразвуков метод в процес на експлоатация на тръбопроводи да се определят възникналите напрежения на основание, на които да се предприемат мерки за отстраняване на риска от аварии, които могат да доведат до човешки жертви, замърсяване на атмосферата и скъпоструващи ремонти. Статията представя специфичните особености на приложението на ултразвуковите вълни при оценка на акусто-еластичните коефициенти и оценка на осевите и тангенциални напрежения търпящи промяна в хода на експлоатация на газопровода. Методът е разработен и внедрен в Лабораторията за ултразвуков контрол на Мултитест ООД. Разработена бе методика за оценка на механичното напрегнато състояние на газопроводи.

**Ключови думи:** ултразвукови вълни, механично напрегнато състояние, остатъчен ресурс, акустико-еластичен коефициент, осев напрежения, тангенциални напрежения.

## EVALUATION OF MECHANICAL STRESSED STATE IN GAS PIPELINES

P.Chukachev, \*Y.Mirchev, \*M.Mihovski

**Summary:** By nondestructive ultrasonic method under operating pipelines to be identify emerging tensions on the base, which should be taken to eliminate the risk of accidents which may result in casualties, air pollution and costly repairs. The article presents the specifics of the application of ultrasonic waves in the evaluation of acoustico-elastic coefficients and evaluation of axial and shear stresses experiencing a change in the course of operation of the pipeline. The method was developed and implemented in the Laboratory for ultrasound of Multitest Ltd. Was developed methodology for assessing the mechanical stress state of pipelines.

### Увод

Техническите свойства на материалите и структурните компоненти, най-вече срока на използването им до момента на разрушаване вследствие умора на материала, деформация, стабилност на размерите, устойчивост на корозия и крехко разрушаване, могат да бъдат значително повлияни от генерираните по време на експлоатацията им напрежения. Тези влияния обикновено водят до значителни разходи за ремонт и възстановяване на детайли, съоръжения и конструкции. Следователно, анализът на механичното напрегнато състояние е задължителен етап в процеса на работата на съоръженията под налягане и в частност на газопрепосните тръбопроводи, за да се гарантира тяхната надеждност в реални експлоатационни условия.

Обикновено механичните напрежения са един от главните фактори, определящи техническите свойства на материали, детайли и заварени елементи и трябва да бъдат взети под внимание по време на проектирането и производството на различни продукти. Макар да е постигнат прогрес в разработването на техники за контрол на остатъчните напрежения, все още са нужни значителни усилия за развитието на ефективни и рентабилни методи за измерване и анализ на механичното напрегнато състояние.

През годините са разработени различни методи за измерване на механичното напрегнато състояние [13,14,15,16,17] за различни видове компоненти, за да се получи надеждна оценка. Непрекъснато се усъвършенстват съществуващите методи на

безразрушителен контрол [18,19,20,21,22,23], което позволява да се получи по-детайлна информация за състоянието на материалите.

### Изложение

При строителството на газопроводи се контролират утвърдени обхвати от диаметри и дебелини, като същите са цитирани в документи като напр. ANSI Pipe Schedules, ASME/ANSI B 36.10/19 и др. (Таблица 1) [9].

Таблица 1. ANSI Pipe Schedules

| Pipe Size | OD in inches | 5     | 10    | 20    | 30    | 40    | STD   | 60    | 80    | XH    | 100   | 120   | 140   | 160   | XXH   |
|-----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1/8       | .405         | .025  | .049  | .075  | .099  | .125  | .149  | .175  | .200  | .225  | .250  | .275  | .300  | .325  | .350  |
| 1/4       | .540         | .049  | .075  | .100  | .125  | .150  | .175  | .200  | .225  | .250  | .275  | .300  | .325  | .350  | .375  |
| 3/8       | .675         | .075  | .100  | .125  | .150  | .175  | .200  | .225  | .250  | .275  | .300  | .325  | .350  | .375  | .400  |
| 1/2       | .840         | .099  | .125  | .150  | .175  | .200  | .225  | .250  | .275  | .300  | .325  | .350  | .375  | .400  | .425  |
| 3/4       | 1.050        | .125  | .150  | .175  | .200  | .225  | .250  | .275  | .300  | .325  | .350  | .375  | .400  | .425  | .450  |
| 1         | 1.315        | .150  | .175  | .200  | .225  | .250  | .275  | .300  | .325  | .350  | .375  | .400  | .425  | .450  | .475  |
| 1-1/4     | 1.660        | .175  | .200  | .225  | .250  | .275  | .300  | .325  | .350  | .375  | .400  | .425  | .450  | .475  | .500  |
| 1-1/2     | 1.900        | .200  | .225  | .250  | .275  | .300  | .325  | .350  | .375  | .400  | .425  | .450  | .475  | .500  | .525  |
| 2         | 2.375        | .250  | .275  | .300  | .325  | .350  | .375  | .400  | .425  | .450  | .475  | .500  | .525  | .550  | .575  |
| 2-1/2     | 2.875        | .275  | .300  | .325  | .350  | .375  | .400  | .425  | .450  | .475  | .500  | .525  | .550  | .575  | .600  |
| 3         | 3.500        | .300  | .325  | .350  | .375  | .400  | .425  | .450  | .475  | .500  | .525  | .550  | .575  | .600  | .625  |
| 3-1/2     | 4.0          | .325  | .350  | .375  | .400  | .425  | .450  | .475  | .500  | .525  | .550  | .575  | .600  | .625  | .650  |
| 4         | 4.5          | .350  | .375  | .400  | .425  | .450  | .475  | .500  | .525  | .550  | .575  | .600  | .625  | .650  | .675  |
| 4-1/2     | 5.0          | .375  | .400  | .425  | .450  | .475  | .500  | .525  | .550  | .575  | .600  | .625  | .650  | .675  | .700  |
| 5         | 5.563        | .400  | .425  | .450  | .475  | .500  | .525  | .550  | .575  | .600  | .625  | .650  | .675  | .700  | .725  |
| 6         | 6.625        | .425  | .450  | .475  | .500  | .525  | .550  | .575  | .600  | .625  | .650  | .675  | .700  | .725  | .750  |
| 7         | 7.675        | .450  | .475  | .500  | .525  | .550  | .575  | .600  | .625  | .650  | .675  | .700  | .725  | .750  | .775  |
| 8         | 8.625        | .475  | .500  | .525  | .550  | .575  | .600  | .625  | .650  | .675  | .700  | .725  | .750  | .775  | .800  |
| 9         | 9.625        | .500  | .525  | .550  | .575  | .600  | .625  | .650  | .675  | .700  | .725  | .750  | .775  | .800  | .825  |
| 10        | 10.75        | .525  | .550  | .575  | .600  | .625  | .650  | .675  | .700  | .725  | .750  | .775  | .800  | .825  | .850  |
| 11        | 11.75        | .550  | .575  | .600  | .625  | .650  | .675  | .700  | .725  | .750  | .775  | .800  | .825  | .850  | .875  |
| 12        | 12.75        | .575  | .600  | .625  | .650  | .675  | .700  | .725  | .750  | .775  | .800  | .825  | .850  | .875  | .900  |
| 14        | 14.0         | .600  | .625  | .650  | .675  | .700  | .725  | .750  | .775  | .800  | .825  | .850  | .875  | .900  | .925  |
| 16        | 16.0         | .625  | .650  | .675  | .700  | .725  | .750  | .775  | .800  | .825  | .850  | .875  | .900  | .925  | .950  |
| 18        | 18.0         | .650  | .675  | .700  | .725  | .750  | .775  | .800  | .825  | .850  | .875  | .900  | .925  | .950  | .975  |
| 20        | 20.0         | .675  | .700  | .725  | .750  | .775  | .800  | .825  | .850  | .875  | .900  | .925  | .950  | .975  | .1000 |
| 24        | 24.0         | .725  | .750  | .775  | .800  | .825  | .850  | .875  | .900  | .925  | .950  | .975  | .1000 | .1025 | .1050 |
| 26        | 26.0         | .750  | .775  | .800  | .825  | .850  | .875  | .900  | .925  | .950  | .975  | .1000 | .1025 | .1050 | .1075 |
| 28        | 28.0         | .775  | .800  | .825  | .850  | .875  | .900  | .925  | .950  | .975  | .1000 | .1025 | .1050 | .1075 | .1100 |
| 30        | 30.0         | .800  | .825  | .850  | .875  | .900  | .925  | .950  | .975  | .1000 | .1025 | .1050 | .1075 | .1100 | .1125 |
| 32        | 32.0         | .825  | .850  | .875  | .900  | .925  | .950  | .975  | .1000 | .1025 | .1050 | .1075 | .1100 | .1125 | .1150 |
| 34        | 34.0         | .850  | .875  | .900  | .925  | .950  | .975  | .1000 | .1025 | .1050 | .1075 | .1100 | .1125 | .1150 | .1175 |
| 36        | 36.0         | .875  | .900  | .925  | .950  | .975  | .1000 | .1025 | .1050 | .1075 | .1100 | .1125 | .1150 | .1175 | .1200 |
| 40        | 40.0         | .925  | .950  | .975  | .1000 | .1025 | .1050 | .1075 | .1100 | .1125 | .1150 | .1175 | .1200 | .1225 | .1250 |
| 48        | 48.0         | .1000 | .1025 | .1050 | .1075 | .1100 | .1125 | .1150 | .1175 | .1200 | .1225 | .1250 | .1275 | .1300 | .1325 |

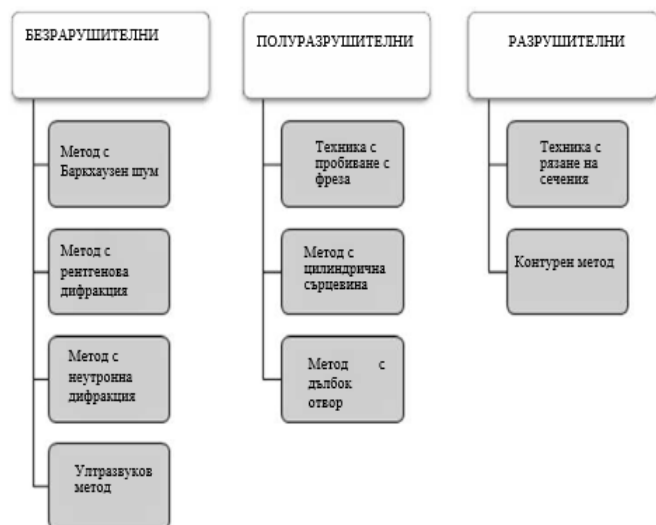
Основните видове дефекти, които се регистрират чрез методите на безразрушителния контрол са свързани с

производството, при монтажа, както и дефекти получени при експлоатация. (Фигура 1).



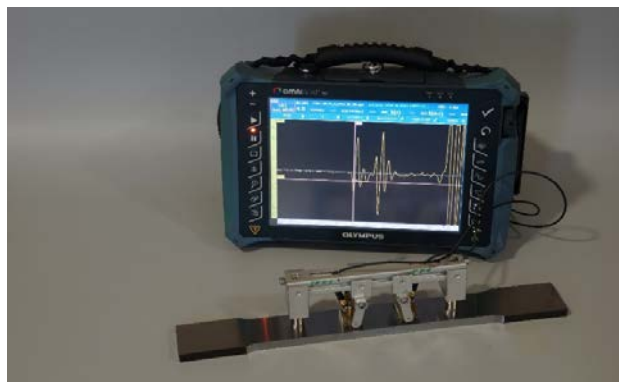
Фигура 1. Видове дефекти в газопроводи.

Освен широко известните методи за безразрушителен контрол като елемент от обследването на газопроводите се утвърдиха и много методи за измерване на остатъчни напрежения. (Фигура 2).[10,11,12]



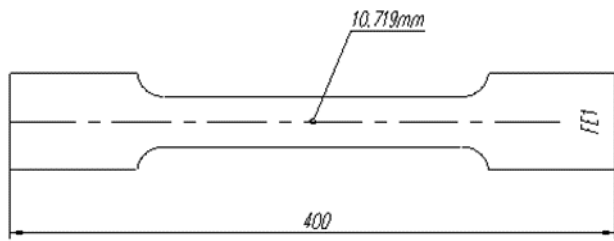
Фигура 2. Техники за измерване на остатъчни напрежения.

С цел оптимизиране на процесите на обследване на механичното напрегнато състояние в Лабораториите за ултразвуков контрол и механични изпитвания на материалите при Мултитест ООД бяха разработени опитни постановки с използване на ултразвукови системи за измерване на механичното напрегнато състояние. Проектирани и произведени бяха приспособления с натискови пружини, гарантиращи плътния и еднакъв контакт на измерващия пиезокристал към обследвания образец. (Снимка 1).



Снимка 1. Опитна постановка за измерване време на преминаване на ултразвуковите вълни (ToF) върху образец

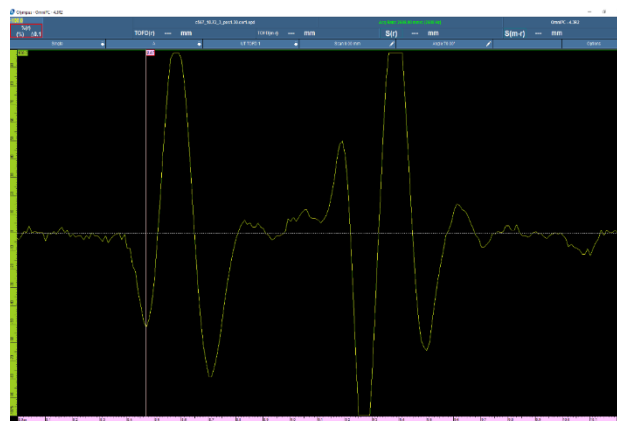
Чрез високопрецизен шлайф бяха изработени от стомана- марка C18D 4 образца с идентификации: FE1, FE2, FE3, FE4 и дебелина 10.72 mm. (Фигура 3).



Фигура 3. Изпитен образец FE1 .

Първоначално изпитните образци бяха подложени на измерване на времената на преминаване (ToF) при ненатоварено състояние в следната последователност (Фигура 4) :

- образец FE1- измерване на времето ToF чрез прилагане на нормален осезател генериращ надлъжни вълни,
- образец FE2-измерване на времето ToF чрез прилагане на нормален осезател генериращ напречни вълни в позиция 0° и 90°.
- образец FE3- измерване на времето чрез използване на ToFD осезатели генериращи подповърхностни вълни (creep wave).
- образец FE4- измерване на времето ToF чрез използване на ъглови осезатели 90° генериращи повърхностни вълни (вълни на Релей).



Фигура 4. Регистриране на подповърхностна вълна на образец FE3 .

Като втори етап от опитната постановка по оценка на механичното напрегнато състояние образците FE1, FE2, FE3, FE4 бяха подложени на опън в обхват от натоварвания 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa, 200 MPa, 250 MPa и 300 MPa. За всеки един от образците се измерва времето на преминаване на ултразвуковите вълни, идентично на ненатовареното състояние със съответния вид трансдюсер. (Снимка 2).

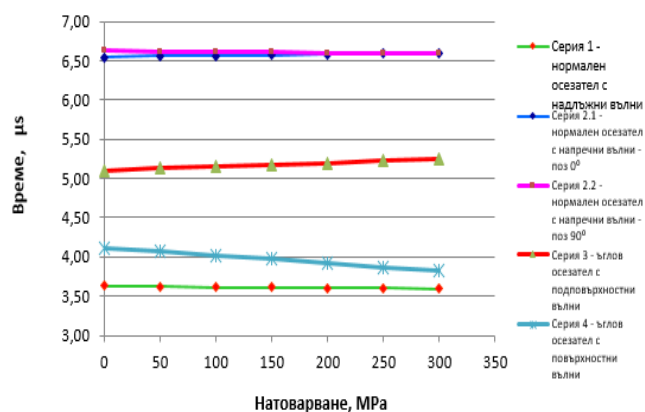


Снимка 2. Механично натоварване- опън на образец FE4 и измерване на времето на преминаване на повърхностните вълни в обхват от натоварвания 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa, 200 MPa, 250 MPa и 300 MPa.

От анализа на времето на преминаване се установи следната зависимост за материал стомана, марка C18D при прилагане на механично натоварване -опън (Фигура 5) [6,8]:

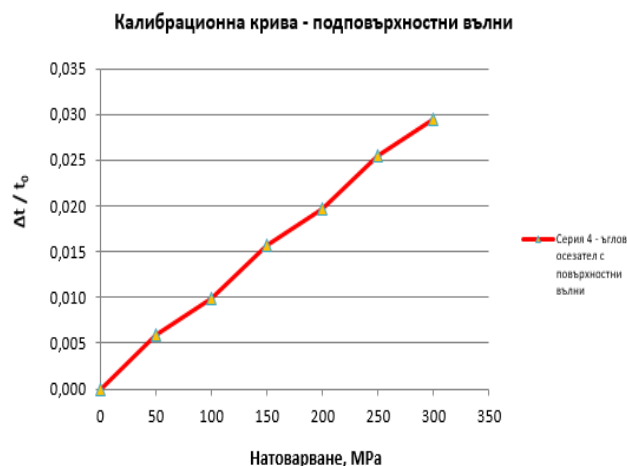
- времето на надлъжните вълни расте,
- времето на напречните вълни в позиция на осезателя 0°- расте,
- времето на напречните вълни в позиция на осезателя 90°- намалява,
- времето на подповърхностните вълни- намалява,
- времето на повърхностните вълни-намалява.

#### Време на разпространение на ултразвуковите вълни

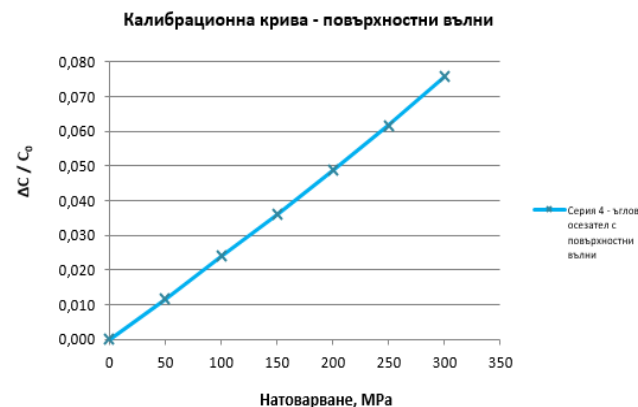


Фигура 5. Анализ време на преминаване (ToF) на ултразвуковите вълни.

Въз основа на събраните експериментални данни бяха построени калибрационни криви за подповърхностни вълни (Фигура 6) и повърхностни вълни (Фигура 7).



Фигура 6. Калибрационна крива за подповърхностни вълни



Фигура 7. Калибрационна крива за повърхностни вълни.

Основните величини, които се измерват и изчисляват при определяне на механичното напрегнато състояние са:

1. Време на разпространение на ултразвуковите вълни (ToF).
2. Напрежение- ( $\sigma_I$ ). На обекта се работи с опъновите напрежения.
3. Кофициенти на акустико- еластичните връзки- ( $KI$ ) и ( $K2$ ). Тези коефициенти осъществяват връзката между време и механично напрежение.

След провеждане на измервания на времето на преминаване на ултразвуковите вълни се преминава към изчисления на акустико- еластичните коефициенти ( $k$ ) за всяко натоварване за дадена вълна по посочените формули:

$$k_1 \cdot \sigma_z = \frac{L}{t_1} \cdot \frac{t_{01}}{L_0} - 1$$

$$k_1 = \frac{\frac{t_{01}}{t_1} - 1}{\sigma_z}$$

$$k_2 \cdot \sigma_z = \frac{L}{t_2} \cdot \frac{t_{02}}{L_0} - 1$$

$$k_2 = \frac{\frac{t_{02}}{t_2} - 1}{\sigma_z}$$

$$k_3 \cdot \sigma_z = \frac{L}{t_3} \cdot \frac{t_{03}}{L_0} - 1$$

$$k_3 = \frac{\frac{t_{03}}{t_3} - 1}{\sigma_z}$$

Определя се средно- аритметичната стойност на  $\bar{k}$  на базата на изчисления коефициент ( $k$ ) за всяко натоварване за дадена вълна. Определят се коефициентите ( $k$ ) за:

- $k_1$ - напречни вълни позиция на озезателя  $0^\circ$ ;
- $k_2$ - напречни вълни позиция на озезателя  $90^\circ$ ;
- $k_3$ - надлъжни вълни.

На основание стандарт ГОСТ Р 52731-2007 изчисляваме за всяко натоварване в обхват  $50 \div 300 \text{ MPa}$  коефициенти ( $K_1$ ) и ( $K_2$ ) на акустико- еластичните връзки по посочените формули [1,2,3,4,5]:

$$K_1 = \frac{k_1 - k_3}{(k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2}$$

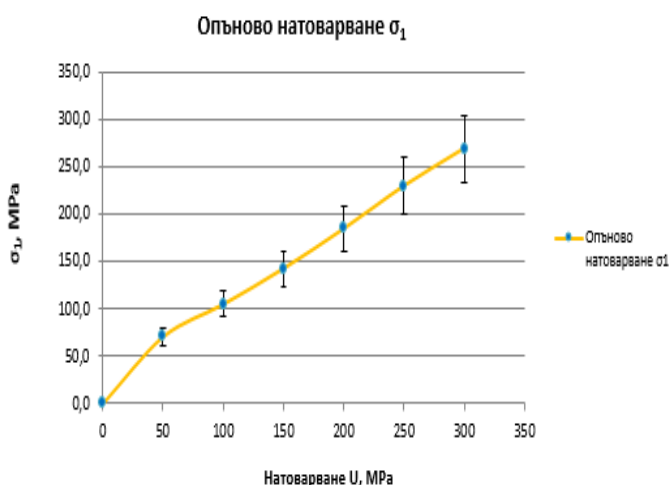
$$K_2 = \frac{k_2 - k_3}{(k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2}$$

Изчисляваме средноаритметичните стойности на  $K_1$  и  $K_2$ .

Изчисляваме  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  по стойности за  $K_1$  и  $K_2$ , за всяко натоварване:

-осеви напрежения ( $\sigma_1$ ) (Фигура 8);

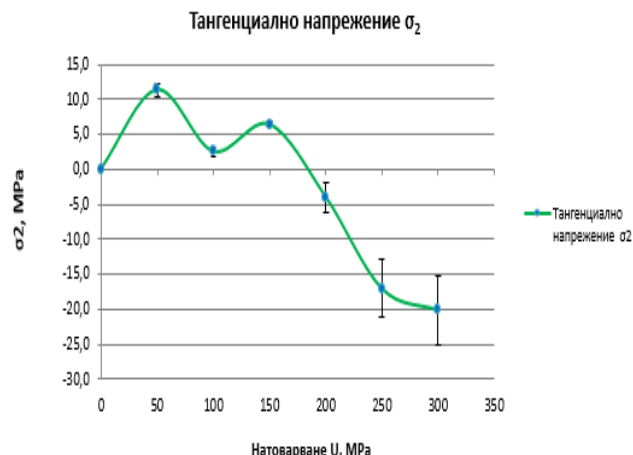
$$\sigma_1 = K_1 \left( \frac{t_{01} t_3}{t_{03} t_1} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_{02} t_3}{t_{03} t_2} - 1 \right)$$



Фигура 8. Графично представяне на зависимостта на осевите напрежения ( $\sigma_1$ ) от натоварването ( $U$ ,  $\text{MPa}$ )

-тангенциални напрежения ( $\sigma_2$ ) (Фигура 9):

$$\sigma_2 = K_1 \left( \frac{t_{02} t_3}{t_{03} t_2} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_{01} t_3}{t_{03} t_1} - 1 \right)$$



Фигура 9. Графично представяне на зависимостта на тангенциалните напрежения ( $\sigma_2$ ) от натоварването ( $U$ ,  $\text{MPa}$ )

В резултат на проведените експерименти се формулира следната методика:

1. При първоначално обследване:

- Подготовка на начален образец (свидетел) от тръбата.
  - Измерване на времената (ToF) и скоростите при ненатоварено състояние и обхват от натоварени състояния.
  - Определяме  $K_1$  и  $K_2$  от образца свидетел (използвайки измерените времена и опъновите напрежения  $\sigma$ ).
  - Създаване на графика на промяна на времената (ToF) при обхват от различни натоварвания, която се включва в досието на газопровода.
- Използване на графиката като сравнителна при последващо обследване на тръбопровод. Чрез отчитане на промяната на времената (ToF) се съди за промяна на напреженията.

2. В хода на експлоатация на газопровода /последващ контрол/:

- Строителство на газопровода.
- Подготовка на участък от тръбопровода.
- Определяне на нулевото време ( $t_0$ ) - може да бъде времето непосредствено измерено след изграждането на тръбопровода или измереното първоначално независимо от момента на пускането му в експлоатация.
- Покриване на участъка (консервиране).
- Периодичен контрол на времето в целевия участък от тръбата в различни интервали от време в хода на експлоатация на газопровода.
- За периода от определяне на нулевото време ( $t_0$ ) до второто (последващо) измерване на времето на разпространение на ултразвуковите вълни определяме изменението на напрежението във времето спрямо нулевия момент, т.е. извършваме: мониторинг на промяна на времето на разпространение на ултразвуковите вълни и мониторинг на промяна на напреженията в тръбата по време на експлоатация на газопровода.

На основание приложените изчисления са получени следните резултати (таблица 2):

Таблица 2. Стойности на  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  за марка стомана С18Д

| U, MPa                    | $\kappa_1$<br>[10 <sup>-1</sup> .М<br>Pa ] | $\kappa_2$<br>[10 <sup>-1</sup> .М<br>Pa ] | $\kappa_3$<br>[10 <sup>-1</sup> .М<br>Pa ] | $K_1$<br>[10 <sup>-5</sup> .MPa] | $K_2$<br>[10 <sup>-5</sup> .MPa] |
|---------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0                         | 0                                          | 0                                          | 0                                          | 0                                | 0                                |
| 50                        | -48.802                                    | 9.607                                      | 55.218                                     | -0.119                           | -0.053                           |
| 100                       | -27.443                                    | 22.692                                     | 47.026                                     | -0.15                            | -0.049                           |
| 150                       | -27.405                                    | 17.150                                     | 40.627                                     | -0.166                           | -0.057                           |
| 200                       | -27.368                                    | 18.939                                     | 37.448                                     | -0.167                           | -0.047                           |
| 250                       | -29.139                                    | 19.414                                     | 34.434                                     | -0.166                           | -0.039                           |
| 300                       | -28.796                                    | 18.72                                      | 33.37                                      | -0.17                            | -0.04                            |
| средно<br>аритме<br>тично | -31.492                                    | 17.663                                     | 41.354                                     | -0.156                           | -0.047                           |
| станда<br>ртно<br>откл.   | 8.515                                      | 4.59                                       | 8.387                                      | 0.019                            | 0.007                            |

Приложението на методиката за определяне на механичното напрегнато състояние може да бъде формулирана както следва [7]:

1.Индиректен метод за определяне на опъновото натоварване ( $\sigma_1$ )- по предварително създадена графика построена на базата на изпитване на образец- свидетел при различни натоварвания. Прилага се при използване на подповърхностни и повърхностни вълни.

Приемаме, че материала е със същия химичен състав и механични характеристики като тези на образца свидетел.

2.При прилагане на напречни и надлъжни вълни за определяне на изменението на напрежението във времето, поради влиянието на дебелината (отражението на УЗ вълни от дъното) се използва стандарт ГОСТ Р 52731-2007- Безразрушителен контрол. Акустичен метод за контрол на механичните напрежения. Общи изисквания.

Като допълнителни технически средства използвани при обследването на газопроводи в Мултитест ООД са разработени и се използват в практиката и следното оборудване:

1.Механизирана система за измерване дълбочина на питинг корозия на тръбопроводи- модел „Micro Cor S2“ (Снимка 3).

Системата се използва за високопрецизно определяне дълбочина на корозия на тръбопроводи чрез използване на калибриран дигитален индикаторен дълбокомер за отчитане на измерените стойности от контрола.



Снимка 3. Механизирана система за измерване дълбочина на питинг корозия на тръбопроводи- модел „Micro Cor S2“

2. Автоматизирана видеосистема за визуален контрол на тръбопроводи- кролер модел „Каросел 813“ (Снимка 4). Кролерът се използва за визуална инспекция на :

- тръбопроводи,
- трудно достъпни участъци.

При контрола се прави запис в реално време на състоянието на тръбопровода за наличие на несъвършенства и корозия в основния материал, завареното съединение и зоната на термично влияние.

Контролира се наличието на чужди тела и нарушена проходимост на магистралните тръбопроводи.



Снимка 4. Видеосистема-кролер за визуален контрол на тръбопроводи „Каросел 813“

### Заклучение

Комплексността в изследването на функциониращи газопроводи наложи въвеждането на съществуващи методи, като разшири обхвата на приложимостта им. Необходимостта от изследване на съоръжения и инсталации по време на експлоатацията им наложи разработване на нови, подобрени и същевременно лесно изпълними методи . За целта е необходимо използване на съществуващи техники при анализ на остатъчните напрежения, както и внедряване на достатъчно информативните и по-евтини ултразвукови методи за контрол на напрегнатото състояние на материалите. Чрез настоящите изследвания проведени в Лабораториите за ултразвуков контрол и механични изпитвания на материалите, практически е получена достоверна информация за промените в скоростите на ултразвуковите вълни, които се генерират при експлоатация на

съоръженията свързано с промени в напреженията на материала.

Оценката на акусто-еластичните коефициенти, както и оценката на осевите и тангенциални напрежения по време на експлоатация на газопровода е сигурен метод гарантиращ безаварийната му експлоатация, както и е свързано с минимизиране на риска от последствията от аварии.

Усъвършенстването на експерименталните модели позволи разработване на Методика за оценка на напрегнатото състояние на газопроводите.

## Литература

1. ГОСТ Р 52890-2007 Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования.
2. ГОСТ Р 52731-2007 Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования.
3. Ермолов И. Н., А. Х. Вopilкин, В. Г. Бадалян, Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник), Изд. ООО НПЦ НК „ЕХО+“, Москва, 2000.
4. Ермолов И.Н., Ю.В. Ланге, Неразрушающий контроль, Том3, Ультразвуковой контроль, Справочник, Издательство "Машиностроение, Москва, 2004.
5. Миховски М., Комплексно използване на безразрушителните методи за изследване на структурата и физикомеханичните свойства на метални материали. Докторска дисертация, Институт по механика –БАН., София-1991.
6. Миховски М., М. Лозев., Безразрушителен контрол в химическото машиностроене., Изд. Техника, София, 1987.
7. Никитина Н.Е., Акустоупругость, Опыт практического применения, Н.Новгород,, ТАЛАН, 2005.
8. Скордев Ал., Ултразвуков контрол без разрушаване – алгоритми, картинки и тезиси, том 1, издание „Скордев“ ЕООД, София, 2009
9. ASME/ANSI B31.8S "Supplement to B31.8 on Managing System Integrity of Gas Pipelines" (ASME/ANSI B31.8S-2002)
10. ASTM E837-13a Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.
11. ASTM E1928-07 Standard Practice for Estimating the Approximate Residual Circumferential Stress in Straight Thin-walled Tubing
12. ASTM E2860-12 Standard Test Method for Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction for Bearing Steels.
13. An Y., G.S. Schajer. Residual stress determination using cross-slitting and dual-axis ESPI. *Exp Mech* 2010; 50(2): 169–177.
14. Anawa E.M., A.G. Olabi. Control of welding residual stress for dissimilar laser welded materials. *Journal of materials processing technology* 2008; 204: 22–33.
15. Baldi A.. A New Analytical Approach for Hole Drilling Residual Stress Analysis by Full Field Method. *Journal of materials processing technology*. 2005; 127(2): 165.
16. Baldwin W.M.. Residual stresses in metals. Philadelphia: Proc. American Society for Testing and Materials 1949; p. 49.
17. Bonner N.W., D.J. Smith. Measurement of residual stresses using the deep-hole method. *Pressure Vessels and Piping* 1996; 327: 53–65.
18. Cabezas, E. E., , D. J. Celentano, Experimental and numerical analysis of the tensile test using sheet specimens, Finite element in analysis and design, Vol. 40, pp. 555-575, 2004.
19. DeWald A.T., M.R. Hill. Improved data reduction for the deep hole method of residual stress measurement. *J Strain Anal* 2003; 38(1): 65–78.
20. George D., P.J. Bouchard, D.J. Smith. Evaluation of through wall residual stresses in stainless steel weld repairs. *Materials Science Forum* 2000; 347–349: 646–51.
21. George D., D.J. Smith. Residual stress measurement in thick section components. Seattle: Proceedings of the ASME pressure vessels and piping conference 2000; 410: 275–82.
22. Jesensky M., J. Vargova. Calculation and measurement of stresses in thick-walled pressure vessels. *Svaracske Spravy* 1981; 4: 79–87.
23. Klechka E., Pipeline integrity management and corrosion control, *materials Performance*, 2002, pp. 24–27.



## ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ НА НЕСЪВЪРШЕНСТВАТА ПРИ ИЗПИТВАНЕ НА ТРЪБИ С НОРМАЛНИ ВЪЛНИ, ВЪЗБУДЕНИ С ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ АКУСТИЧНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### CHARACTERISATION OF DEFECTS IN GUIDED WAVE TESTING OF PIPES USING AN ELECTROMAGNETIC ACOUSTIC TRANSDUCERS

гл. ас. д-р инж. К. Стайков  
Технически Университет – София, България,  
e-mail: staikov@tu-sofia.bg

**Abstract:** EMAT technology using guided waves is a powerful tool for fast scanning on exposed tubes and tanks as well as inspections of inaccessible areas from a fixed position. It uses medium-range guided waves with a typical inspection range up to 3m to detect corrosion, cracks and discontinuities on tubes, gas lines, and oil pipelines. The paper discusses some limitations of this technology for defect characterization of pipes. Some ideas are proposed to overcome difficulties in characterization processes and to estimate the 3D shape, size and dimensions of the defects.

**KEY WORDS:** GUIDED WAVES, PIPES, DEFECTS CHARACTERISATION, CORROSION, EMAT, MEDIUM RANGE, MEANDER COIL.

#### 1. Увод

Най-честата причина за аварии в стоманените тръби и тръбопроводи в експлоатация е корозията. За целите на контрола без разрушаване най-важна е класификацията на корозионните дефекти от гледна точка на тяхната морфология. Според вида на разпределението на корозията по повърхността на изпитвания обект, корозията се разделя на обща и локална корозия. Локалните форми на корозия се смятат за по-опасни за съоръженията в сравнение с общата корозия, тъй като се явяват концентратор на механични напрежения, водещ много често до преждевременно и внезапно разрушаване. Локалната корозия обхваща около 70% от преките и косвени загуби от корозия [1].

Откриването на корозионни повреди в тръби в експлоатация чрез нормални ултразвукови вълни вече се прилага широко на много места по света. Напредъкът в теоретичното разбиране на вълните и бързото развитие на информационните технологии доведоха до преодоляване на редица ограничения на метода и до разработването на няколко различни комерсиални технологии, базирани на различен принцип за възбуждане на вълните. Това позволи решаването на широк спектър от задачи, което бе невъзможно с другите методи за безразрушителен контрол и доведе до разширяване на съвременния арсенал за превенцията на проблемите свързани с корозията. Основното предизвикателство в бъдещата научноизследователска и развойна дейност за доусъвършенстване на този метод остава подобряването на точността на процеса на характеризация на несъвършенствата [2].

Определянето на точните размери на корозионните дефекти чрез нормални вълни, възбудени в аксиално направление е сложна задача. В редица изследвания е доказано, че с известно приближение коефициентът на отражение е пропорционален на напречната площ на локалните корозионни дефекти. Тази пропорционалност важи строго за периферната дължина и с известно

приближение за дълбочината на дефектите. Установено е също, че коефициентът на отражение се влияе и от аксиалния размер на несъвършенствата, което допълнително затруднява точното определяне на размерите по амплитуда [3,4]. Този ефект е изследван за различни моди на нормалните вълни в тръби [3,4], като и за мода A<sub>0</sub> на вълните на Ламб в пластини [5], като е значително по-изявен при изкуствени дефекти с по-остри ръбове, отколкото при дефекти имитиращи локални корозионни язви и реални корозионни дефекти [4]. Влиянието на този ефект е една от основните причини за внедряване на многочестотното сканиране в най-новите комерсиални системи, базирани на пиезоелектрично възбуждане на вълните. Все пак повечето водещи изследователи са категорични, че на практика влиянието на аксиалния размер при реални дефекти е минимално и основната тежест върху коефициента на отражение оказва напречната им площ [4].

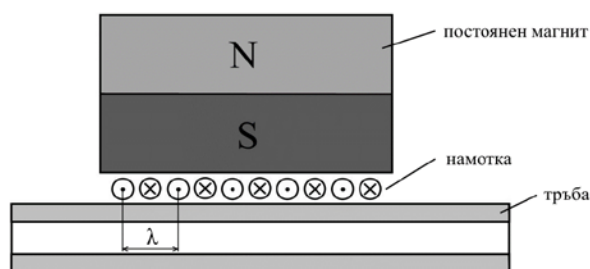
През последните няколко години технологията за изпитване на стоманени изделия от листов материал и тръби в експлоатация с нормални вълни, възбудени чрез електромагнитни акустични преобразуватели (EMAT) намира все по-широко практическо приложение. Безспорно съществено предимство на технологията е безконтактно възбуждане и приемане на нормалните вълни. То води до висока прецизност на резултатите и понижаване на субективния фактор в процеса на изпитване. Освен това липсата на акустичен контакт дава възможност за механизмиране на процеса на изпитване и прави технологията подходяща за контрол на изделия с по-груба и корозирала повърхност, както и на изделия, върху които са нанесени покрития [6-8].

Най-използваният тип EMAT за възбуждане на нормални вълни се състои от постоянен магнит и намотка тип „меандър“ (фиг. 1). При този тип EMAT чрез намотката в обекта на изпитване се генерира динамично магнитно поле, което възбужда в изделието вихрови токове, които при взаимодействието си с индуцираното магнитно поле образуват в изделието движеща сила, която се преобразува

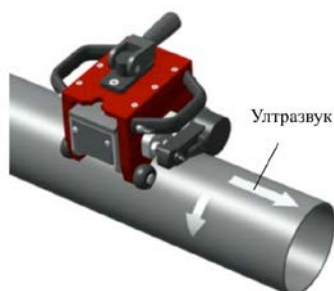
в акустични вълни. Като резултат се възбужда повърхностна вълна (при голяма дебелина на стената) или вълна на Ламб (при по-малка дебелина на стената) с дължина на вълната равна на два пъти разстоянието между пистите. Този тип ЕМАТ е най-подходящ за изпитване на тръби с надлъжни моди. Въпреки че възбуждането на вълните е аксиално-несиметрично, при голямо съотношение между диаметъра на тръбата и дължината на вълната огъващи моди не се възбуждат. Освен това фиксираната дължина на вълната ограничава възбуждането на други надлъжни моди освен основната при определена честота. Чрез този тип ЕМАТ в комбинация с подходящо сканиращо устройство е възможно сканирането на тръби с надлъжни моди на нормалните вълни да се извършва в аксиално и в периферно направление, като то може да се провежда както по импулсния ехо-метод, така и по метода на пропускането [6-8].

Особен интерес представлява периферното механизирано сканиране (фиг. 2), тъй като може да се използва за изпитване на участъци от тръби с ограничен достъп, като например тръбопроводи с изолация или такива, които навлизат или преминават през почва, сгради, стоманобетонни конструкции, както и други отговорни метални съоръжения с тръбни носещи елементи, като например стълбове за улично осветление, стълбове за градски транспорт, стълбове от пътната инфраструктура, билбордове, пилони, метални подпори и греди [6-8].

Към настоящия момент все още основното практическо приложение на метода остава бързо сканиране на участъци от тръби и последващо оразмеряване и оценка на откритите несъвършенства чрез други безразрушителни методи. Голяма част от изследователите в областта на контрола с нормални вълни проявяват интерес към възможностите на технологията за последваща характеристика на откритите несъвършенства. Основната мотивация произтича от нуждата от оценка на несъвършенствата в тръби с ограничен достъп, при които е трудно прилагането на конвенционалните безразрушителни методи, като целта в случая е избягване на изкопни, ремонтни и др. допълнителни дейности за осъществяване на достъп. Еднозначна информация и методика, касаещи процеса на характеристика на несъвършенствата липсват както в научните бази данни, така и от страна на производителите на оборудване.



Фиг. 1 ЕМАТ с намотка тип „меандър“ и постоянен магнит



Фиг. 2 Периферно сканиране на тръба чрез нормални вълни, възбудени с ЕМАТ по импулсния ехо-метод

Целта на изследването е да се установи експериментално възможностите и ограниченията на надлъжните нормални вълни, възбудени чрез механизирана ЕМАТ-технологията за определяне на характеристиките на несъвършенствата, които се получават в стоманени тръби в експлоатация.

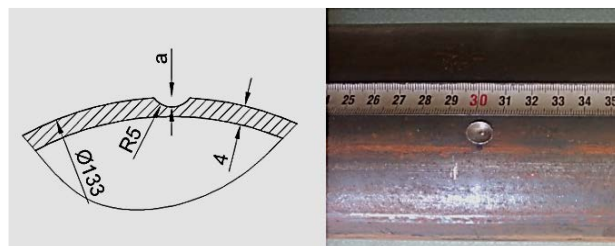
## 2. Използвана апаратура, сравнителни образци и експериментална методика

При изследванията е използвана апаратура на Innerspec Technologies, Inc., състояща се от:

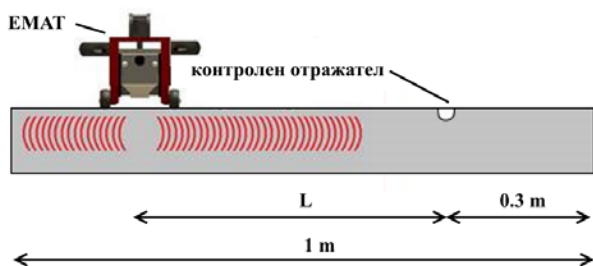
- Електромагнитен преобразувател за възбуждане и приемане на нормални вълни, който се състои от постоянен магнит (размер XXL) и набор от „меандър“ намотки тип RF, възбуждащи нормални вълни с различна дължина на вълната;
- Ръчен ролков скенер, снабден с механичен енкодер с разрешаваща способност 4 точки/mm (позволява периферно и аксиално сканиране на тръби);
- Мобилен ултразвуков дефектоскоп, модел temate® PowerBox H [4].

Електромагнитният преобразувател (постоянен магнит и намотка) е монтиран на ролковия скенер посредством винт с ръкохватка, чрез която може да се регулира разстоянието между преобразувателя и образца (фиг. 2). Чрез ролковия скенер могат да се записват ултразвукови А-изображения през 0.25 mm от обиколката на тръбата. Софтуерът на дефектоскопа конвертира записаните А-изображения в В-изображение, което дава цялостна картина за наличието на дефекти в изследваната зона. Софтуерът позволява запис върху вътрешен или външен електронен носител (SD-карта или USB-памет) на конфигурационни файлове със сравнителни DAC-криви, А- и В- ултразвукови изображения, доклади от изпитванията и др., което дава възможност за допълнителна оценка и одит на резултатите от контрола в лабораторни условия. Апаратурата е мобилна и позволява до 8 часа непрекъсната работа без нужда от достъп до ел. мрежата [6].

За сравнителни образци са използвани 5 бр. шевни стоманени тръби с диаметър 133 mm, номинална дебелина на стената 4 mm и дължина 1 m. Във всеки образец на разстояние 300 mm от единия край на тръбата, посредством карбиден шлайфгрифер със сферичен връх с диаметър 10 mm, на универсална фреза са изработени 4 бр. контролни отражатели, наподобяващи локална корозионна язва (фиг. 3). Отражателите са диаметрално разположени на 90° един от друг. Двадесетте отражателя са с дълбочина в диапазона 1-4 mm и след изработването им тяхната дълбочина е прецизно определена чрез серия от измервания с дигитален дълбокомер с точност +/- 0.05 mm (фиг. 3) [7].



Фиг. 3 Геометрични параметри на контролния отражател



Фиг. 4 Схемa на опитната постановка

Освен това, за потвърждаване на изложените хипотези, при изследванията са използвани също стоманени листове с дебелина 4 mm и размери 200x1000 mm с проходни отвори с различен диаметър и безшевна стоманена тръба с диаметър 89 mm и дебелина на стената 4 mm, в която е изработен напречен срез, който имитира напречна пукнатина в тръбата (фиг. 9). Всички сравнителни образци са от стомана марка S235JR, съгласно БДС EN 10025-1:2005.

Всички резултати са получени чрез открити тестове на образците от дефектоскопист с квалификация UT ниво 2 съгласно БДС EN ISO 9712:2012. Изследванията са проведени по импулсния ехо-метод чрез периферно сканиране на сравнителните образци, съгласно схемата на фиг. 4. При всички изследвания контролните отражатели се намират в далечното поле на преобразувателя, като са спазени мерките за получаване на висока прецизност съгласно БДС ISO 5725 “Точност (истинност и прецизност) на методи за измерване и получените резултати“, а именно: тестовите са проведени за къс интервал от време с една и съща апаратура и едно калибриране от един дефектоскопист.

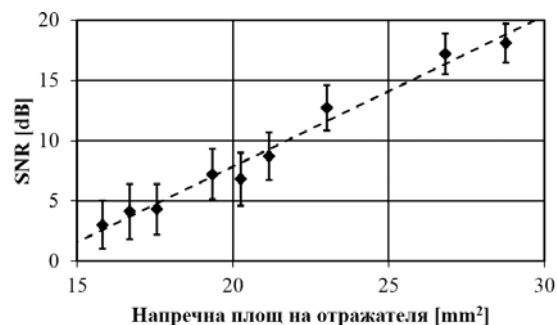
Чрез използваната конструкция EMAT мода A0 се възбужда лесно самостоятелно и има по-висока чувствителност към локална корозия спрямо другите моди от нулев и първи порядък [7-9]. В работна точка около 1.6 MHz.mm мода A0 достига гранична еквивалентна чувствителност. При дебелина на стената 4 mm гранична еквивалентна работна чувствителност с мода A0 на нормалните вълни се постига при честота 405 kHz, като в тази работна точка тя се възбужда с намотка с период 6.35 mm [9]. Поради тези причини, представените резултати от изследвания са сведени върху възможностите на мода A0 (възбудена с честота 405 kHz и намотка с период 6.35 mm) за характеризация на дефекти в стоманени тръби. Всички параметри на системата за изпитване са със стойности, при които се получава гранична работна еквивалентна чувствителност, с изключение на въздушната между преобразувателя и образците, която е минимална (0.3 mm) [9].

### 3. Резултати и дискусия

Тестовите са проведени съгласно схемата на фиг. 4 като са сканирани изкуствени корозионни язви, които имат дълбочина а по-голяма от критичната им дълбочина при 50% вероятност за откриване, определена в [7]. Това са контролните отражатели с дълбочина  $a > 2.6$  mm. За да могат да се съпоставят резултатите с другите технологии за възбуждане на нормални вълни, площта на напречното им сечение е изчислена точно посредством Autodesk® AutoCAD. Всеки контролен отражател е прозвучен 10 пъти, като всеки път преобразувателят е поставян наново върху сравнителния образец. Изчислени са средната стойност на отношението сигнал-шум и стандартното отклонение. Резултатите са представени на фиг. 5.

Наблюдава се монотонна зависимост на съотношението сигнал-шум от напречната площ на отражателите. Вероятно

това да се дължи отчасти и на факта, че надлъжният размер на корозионната язва (диаметърът  $\varnothing$ ) се мени в много тесни граници, като не е изключено при по-големи диаметри на корозионната язва ефектът на надлъжния размер да окаже някакво влияние върху коефициента на отражение.



Фиг. 5 Съотношение сигнал-шум във функция от напречната площ на контролните отражатели

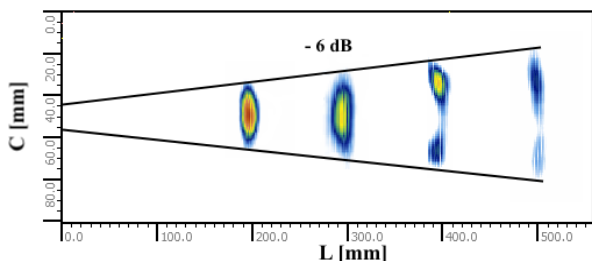
Ако се пренебрегне влиянието на аксиалния размер, както вече беше дискутирано, може да се приеме, че амплитудата на отражението от даден отражател, с размери по-малки от ултразвуковия сноп, е пропорционална на неговото напречно сечение. За да се определи дълбочината на отражателя обаче е необходимо да се знае неговата периферна дължина. Механизирането на EMAT-технологията позволява доста точно определяне на периферното местоположение на отражателите. Възможността за представяне на информацията под форма на В-изображение улеснява допълнително много този процес. Определяне на периферната дължина на отражателите с използваната технология обаче в повечето случаи е затруднено, като точността зависи основно от вида и размерите на отражателя и характеристиките на насоченост на преобразувателя.

Насочеността на източника на ултразвукови вълни е свойство, което се изразява със способността му да излъчва по-добре вълни в някои направления, отколкото в други. Характеристика на насоченост се нарича отношението на силовите характеристики на ултразвуковите вълни, определени на еднакво разстояние в далечната зона на полето в направление на максимално излъчване и в произволно направление. При прилагане на импулсния ехо-метод са от съществено значение също и характеристиките на насоченост при приемане. Освен на точността при определяне на местоположението и дължината на несъвършенствата по периферията на тръбата, характеристиката на насоченост на преобразувателя има пряка връзка с разделителната способност по фронта, т.е. способността за разделяне на два близки един до друг отражателя по периферията на тръбата.

Единственият възможен подход, който дава информация за характеристиката на насоченост на EMAT преобразувателя при възбуждане на мода A0 с тази техника в тръби е чрез сканиране от различни разстояния на малък обемен отражател, какъвто е контролният отражател с дълбочина  $a = 3.8$  mm, който се открива с 90% вероятност и 95% сигурност (фиг. 3) [7]. Изследването е проведено съгласно схемата на фиг. 4, като контролният отражател е сканиран от разстояния  $L = 0.2$  m,  $L = 0.3$  m,  $L = 0.4$  m и  $L = 0.5$  m при еднакво усилване на апаратурата. Индикациите от отражението от дефекта в получените В-изображения са изрязани при ниво на амплитудата -6 dB и наложени в едно В-изображение, на което абсцисата е разстоянието до контролния отражател, ординатата е разстоянието по периферията на тръбата, а амплитудата е кодирана в нюанси на сивия цвят. На база на това са построени и

границите на полето, при което се получава спад с 6 dB от максималното налягане на централния лъч, т.е. без да се отчита влиянието на затихването (фиг. 6).

Наблюдава се висока насоченост на вълновия фронт с ъгъл на дивергенция около  $3^\circ$ . Това влияе положително върху ограничаване на разпространението на спирални вълни по периферията, които са източник на фалшиви индикации в В-изображенията. Разрешаващата способност по фронта също е задоволителна и покрива очакванията. Например при разстояние до преобразувателя от 0.5 m могат да се различат два отражателя, ако са на разстояние по-голямо от 60 mm по периферията на тръбата.

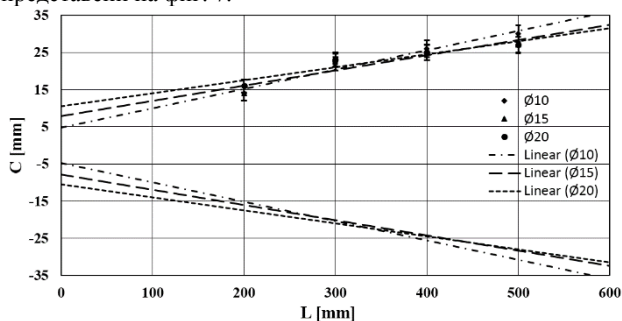


Фиг. 6 Поле на преобразувателя при сканиране на образец с изкуствена локална корозионна язва с дълбочина  $a=3.8$  mm

От проведенния експеримент обаче най-съществено значение има това, че дължината на получените индикации се различава много от реалния повърхностен диаметър на изкуствената корозионна язва ( $d=9.6$  mm). Това несъответствие се дължи на следните фактори:

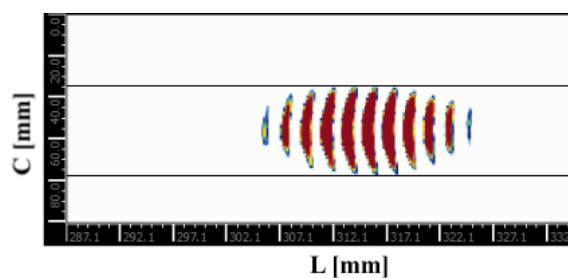
- отражателят е обмен и той разфокусира ултразвуковия сноп;
- периферната дължина на намотката е голяма (50.8 mm);
- преобразувателят приема вълните, дори когато попадат под малък ъгъл спрямо централната му ос.

Влиянието на тези фактори води до по-голяма дължина на индикацията спрямо реалния размер на локални корозионни язви, както вследствие на дивергенцията на снопа и голямата периферна дължина на намотката с увеличаването на разстоянието до отражателя това отклонение се повишава. Получените резултати дават също основание да се предположи, че съществува обратнопропорционална връзка между реалния размер на обменния отражател и отклонението в периферната дължина на индикацията на отражението от него, което прави невъзможно процентната корекция на дължината на индикацията и затруднява точното определяне на периферната дължина на отражателя. За потвърждаване на тази хипотеза са проведени експерименти в стоманени листове с дебелина 4 mm, в които са изработени проходни отвори с диаметър 10 mm, 15 mm и 20 mm. Образците са сканирани аналогично на предходния експеримент без промяна на настройките на апаратурата. Резултатите са представени на фиг. 7.



Фиг. 7 Поле на преобразувателя при сканиране на пластини с дебелина 4 mm с проходни отвори

Получената широчина на индикациите  $C$  за всеки отражател и разстояние между него и преобразувателя представлява осреднената стойност от 6 измервания на удвоеното разстояние между централния лъч и границата на полето при -6dB спад на амплитудата. На графиката са представени и стандартните отклонения. На база на тези стойности с линейна апроксимация са построени границата на полето при прозвучаване на всеки отражател. От представените резултати е видимо, че при по-малки обменни отражатели отклонението на периферната дължина на индикацията от реалния размер е голямо. С увеличаване на диаметъра на отражателя се наблюдава тенденция към намаляване на това отклонение. Освен това на фиг. 7 се вижда, че при определено разстояние между отражателя и преобразувателя е възможно индикация с определена дължина да отговаря едновременно на два отражателя с различни размери. Допълнително доказателство в тази посока дава и формата на индикациите, получени от обменни отражатели. Например на фиг. 8 е представена индикация от изкуствената локална корозионна язва с дълбочина  $a=3.8$  mm, която се открива с мода A0 с 90% вероятност и 95% сигурност [7]. Сканирана е 100 mm от периферията на образца съгласно схемата на фиг. 4 при разстояние между отражателя и преобразувателя  $L=0.3$  m. Представена е само индикацията от отражателя. На В-изображението е видима дъговидната форма на индикацията, която се дължи на различния път на разпространение на вълните в процеса на сканиране. Тъй като данните от процеса на сканиране се записват в цифров вид, за преодоляване на това ограничение е възможно да се използват някои от техниките за последваща обработка на данните, които се прилагат в конвенционалния ултразвуков контрол. Вероятно най-подходящ е някой от SAFT-алгоритмите (от. англ. Synthetic Aperture Focusing Technique). Те се използват точно за реконструиране на В- и С-изображения, съдържащи индикации от отражатели, които разфокусират вълните [10]. При избор на подходящи параметри на алгоритъма тази техника има потенциал за коригиране на отклонението и последващо определяне на дълбочината на язвата по амплитудата на отражението. Въпреки представените емпирични данни, потвърждаването на изложените хипотези вероятно изискват по-детайлно и многопараметрично изследване.



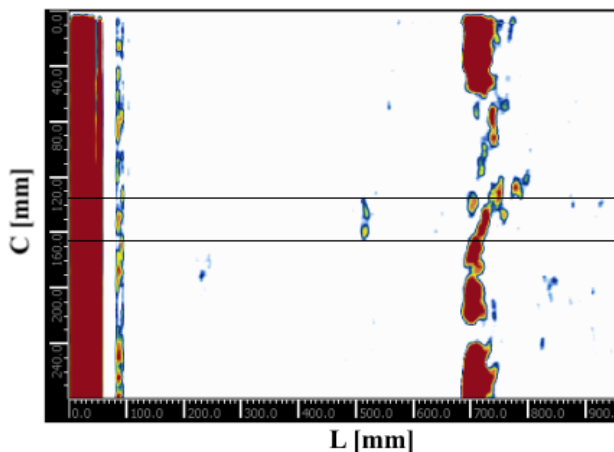
Фиг. 8 В-изображение при сканиране на корозионна язва с дълбочина  $a=3.8$  mm от разстояние  $L=300$  mm

При плоски отражатели обаче оразмеряването може да се осъществи относително точно без последваща обработка на В-изображението. Това се дължи на високата насоченост на вълновия фронт. Например на фиг. 10 е представено В-изображение от сканиране на безшевна стоманена тръба с диаметър 89 mm и дебелина на стената 4 mm съгласно схемата на фиг. 4. В тръбата е направен напречен срез с дълбочина 3 mm, широчина 3 mm и периферната дължина 32 mm, който имитира напречна пукнатина в тръбата (фиг. 9). На В-изображението индикацията от дефекта е видима при разстояние 500 mm и периферна позиция 160 mm. Наблюдава се дифракция от двата странични ръба на

отражателя. Двата маркера ограничават индикацията, като измерената периферна дължина съвпада с реалната.



Фиг. 9 Напречен срез, имитиращ напречна пукнатина в безшевна тръба с диаметър 89 mm



Фиг. 10 В-изображение, получено при сканиране на тръба с диаметър 89 mm с напречен срез от разстояние  $L=500$  mm

Формата на индикацията в В-изображенията позволява да се различат плоски от обемни отражатели, което е от особена важност при последващата оценка. Индикациите от обемни дефекти в В-изображенията са с дъговидна форма по периферията на тръбата, а формата на индикациите от напречни пукнатини е права.

#### 4. Заключение

От получените експериментални данни се потвърждава правопрпорционалната връзка между коефициента на отражение и напречната площ на локалните корозионни дефекти при възбуждане на мода  $A_0$  с ЕМАТ. Чрез получените резултати се систематизират до голяма степен възможностите и основните ограничения на надлъжните нормални вълни, възбудени чрез механизирана ЕМАТ-технологията за определяне на характеристиките на несъвършенствата, които се получават в стоманени тръби в експлоатация. Един от перспективните и новаторски подходи за преодоляване на тези ограничения е използването на последваща обработка на данните от изпитването чрез последваща обработка, като например синтетичното фокусиране. Успешното му прилагане ще доведе до коригиране на отклонението при определяне на периферната дължина на дефектите и последващо определяне на дълбочината на язвата по амплитудата на отражението. Доказването на тази хипотеза ще е с най-висок приоритет при бъдещите изследвания.

Въпреки проведената дискусия, основното приложение на изпитването с нормални вълни остава процеса на откриване на несъвършенства. В случаите на приложение на технологията за изпитване на тръби с ограничен достъп като критерий за осигуряването му до евентуални несъвършенства може да се използва само амплитудата на

отразения сигнал и последващото оразмеряване може да се извърши с други методи за безразрушителен контрол.

#### 5. Литература

- [1] Семенова И.В., Г.М. Флорианович, А.В.Хорошилов, Коррозия и защита от корозии, изд. Физматлит, 2002
- [2] Rose J.L., Successes and challenges in ultrasonic guided waves for NDT and SHM, Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation, NDE 2009, 2009
- [3] Demma, A., P. Cawley, M. Lowe, A. Roosenbrand, B. Pavlakovic, The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements, NDT&E International, Vol 37, pp167-180, 2004
- [4] Lowe M., P. Cawley, Long Range Guided Wave Inspection Usage – Current commercial capabilities and research directions, Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, <http://www.imperial.ac.uk/non-destructive-evaluation/>, London, 2006
- [5] Стайков К., Неразрушаващ контрол на стоманени листове с вълни на Ламб, Дисертация, Технически университет - София, София, 2013
- [6] Innerspec Technologies, Inc., [онлайн], <http://innerspec.com/en/>
- [7] Стайков К., Достоверност при откриване на локална корозия в тръби с нормални вълни, възбудени с ЕМАТ, Сборник доклади от XXXI Международна конференция „Дефектоскопия 2016”, Научни известия на НТСМ, год. XXIV, бр.1(187), 2016
- [8] Стайков К., Някои ограничения при изпитване на тръбопроводи с нормални вълни чрез ЕМАТ преобразуватели, сп. Акустика, год. XVII, бр. 17, стр. 167-170, 2015
- [9] Стайков К., Определяне на граничната работна еквивалентна чувствителност при изпитване на тръби с нормални вълни, възбудени с ЕМАТ, Годишник на Технически Университет-София, том 66, книга 3, стр. 165-174, 2016
- [10] Elbern A., L. Guimarães, Synthetic Aperture Focusing Technique for Image Restoration, International Symposium on NDT Contribution to the Infrastructure Safety Systems, Torres, 2009, [www.ndt.net](http://www.ndt.net), Vol. 5, 2000



## БЕЗКОНТАКТЕН УЛТРАЗВУКОВ КОНТРОЛ НА ЖЕЛЕЗОПЪТНИ РЕЛСИ С ВЪЛНИ НА РЕЛЕЙ

### CONTACTLESS ULTRASONIC TESTING OF RAILS USING RAYLEIGH WAVES

гл. ас. д-р инж. К. Стайков  
Технически Университет – София, България,  
e-mail: staikov@tu-sofia.bg

**Abstract:** The paper presents a new technique for automatic inspection 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. The experiments are carried on in order to determine the influence of wavelength and "lift-off" effect on sensitivity and testing range. The technique can be used for automatic detection of rolling contact fatigue defects and squat defects in the head of the rail.

**KEY WORDS:** RAYLEIGH WAVES, RAIL, ROLLING CONTACT FATIGUE DEFECTS, EMAT, MEANDER COIL.

#### 1. Увод

Железопътните релси са едни от най-отговорните конструктивни елементи в системата на железопътния транспорт. От надеждната и безотказна работа на релсите зависи безопасността на движение на влаковете, поради което въпросите, свързани с тяхната експлоатация и поддръжка са предмет на повишено внимание и подробно изследване. Разрушаването на релсата при преминаване на влака е явление, което не бива да бъде допуснато. Избягването на такива инциденти се постига чрез редица превантивни мерки, като една от най-важните е прилагането на надеждни и ефективни методи за контрол и диагностика на железния път, които дават възможност за навременно откриване на неизправностите [1].

На фиг.1 графично са представени данните за процентното съотношение между отделните видове откази на база на резултатите от контрола на релсите, извършен от Национална компания „Железопътна инфраструктура“ в периода 2006 г. – 2013 г. Изследването е базирано на открити 13407 неизправности в този период от различните секции на НКЖИ в страната. 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 откътрване на метал от закаления слой на работната контактна повърхност“, съгласно каталога на неизправностите в релсовите елементи от 2006 г. [1,2]. 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 откътрвания на метал от повърхността на главата. След откриване на неизправността, се наблюдава развитието ѝ, когато тя е с дълбочина до 3 mm и с дължина до 50 mm. Предвижда се смяна или напастяване на елемента в срок от 1 месец при регистриране на неизправност с дълбочина по-голяма от 3 mm и с дължина по-голяма от 50 mm [1,2].

Друг дефект, който се получава често в железопътната мрежа в България е „№14 Откътрване или окопаване, причинени от буксуване на колелата на

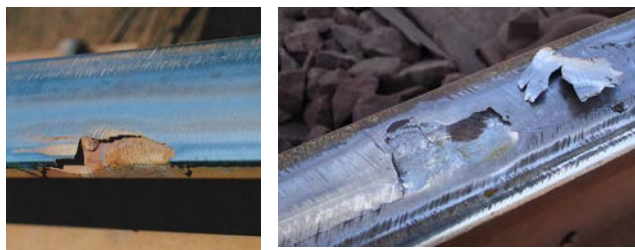
возилата“. Той се появява в резултат на въздействието на колелата на подвижния състав върху релсите при буксуване. Образуват се вдлъбнатини в повърхността на главата, като е възможно също да се получат откътрвания на метал от повърхността и възникване на пукнатини (фиг. 2). Мерките, които се предприемат след откриване на този дефект са същите като при дефект №17. Особено опасни дефекти са пукнатините в релсите. Те 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 [2].



Фиг. 1 Процентното съотношение между отделните видове откази в периода 2006 – 2013 година

Ултразвуковият контрол е най-използвания метод за автоматизиран контрол на релсовите елементи. По-голямата част от автоматизирани решения обаче са базирани на обемни ултразвукови вълни с пиезоелектрично възбуждане на вълните и с осъществяване на акустичен контакт – основно чрез т.нар. търкалящи осезатели.

Основните недостатъците на тези решения се коренят в неравномерния акустичен контакт, който влияе пряко върху достоверността при откриване на несъвършенствата. Наличието на акустичен контакт създава също триене и съответно износване на контактната повърхност на осезателя. Освен това използването на обемни вълни в мегагерцовия обхват предполага малка зона на наблюдение и ниски скорости на движение на подвижния състав, на който е монтирано оборудването. Повишаването на скоростта води до драстично увеличаване на количеството на фантомните индикации [3,4].



Фиг. 2 Разслояване и откъртване на метал от закаления слой на работната контактна повърхност

Техника, базирана на ниско-честотни повърхностни вълни на Релей, възбудени чрез електромагнитни акустични преобразуватели, има голям потенциал за автоматизирано откриване на дефекти в работната контактна повърхност, тъй като тя предлага решение на гореспоменатите ограничения на широко използваните техники. Основните преимущества на предлаганата техника са:

- Предвид вълноводния характер на повърхностните вълни, възбудянето им в надлъжно направление логично води до увеличаване на зоната на наблюдение и до възможност за увеличаване на скоростта на изпитване спрямо конвенционалните системи при една и съща честота на повторение на импулсите. Разликата в скоростта на движение на подвижния състав и скоростта на вълните е много голяма и влиянието на доплеровия ефект ще е пренебрежимо малко. Освен това затихването на повърхностните вълни е по-ниско от затихването на обемните ултразвукови вълни при една и съща честота [5];
- Възбудянето на вълните в килохерцовия диапазон води до голяма дълбочина на проникване и по-ниско затихване. Известно е, че над 95% от енергията на повърхностните вълни е концентрирана на дълбочина равна на една дължина на вълната [5];
- Безконтактната технология на възбудяне на вълните води до висока прецизност и еднозначност на резултатите и избягване на ограниченията, продиктувани от наличието на акустичен контакт.

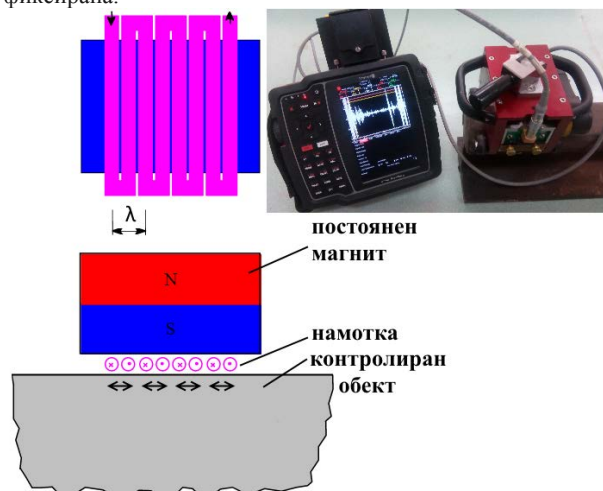
Тези предимства на техниката дават възможност за мониториране на оборудването върху влаковите композиции, които ежедневно осъществяват превоз на пътници и товари и осъществяване на регулярен мониторинг на състоянието на контактната повърхност на железния път. По този начин могат да се откриват неизправности, пропуснати от екипите, които провеждат безразрушителен контрол, както и неизправности, които са се развили бързо във времето. Регистрираните аномалии могат да се локализират или чрез използване на оптични енодери или чрез GPS, като последващата характеризация на несъвършенствата би могла да се осъществи с други методи за безразрушително изпитване.

Основната цел на първоначалните изследвания е да се определи пригодността на предназначение на тази техника и условията за достигане на гранична еквивалентна чувствителност и максимална зона за наблюдение в

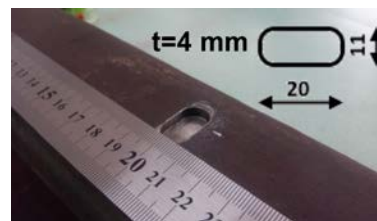
съответствие с предписаните гранични размери на дефектите, регламентирани в нормативните документи.

## 2. Използвани образци и апаратура

При експерименталната работа е използван електромагнитен акустичен преобразувател, който се състои от постоянен магнит и намотка тип „меандър“ (фиг. 3). При този тип ЕМАТ чрез намотката в обекта на изпитване се генерира динамично магнитно поле, което възбужда вихрови токове, които при взаимодействието си с индуцираното магнитно поле образуват движеща сила, която се преобразува в акустични вълни. Като резултат се възбужда повърхностна вълна (при голяма дебелина на стената) или вълна на Ламб (при по-малка дебелина на стената) с дължина на вълната равна на два пъти разстоянието между пистите, т.е. дължината на вълната е фиксирана.



Фиг. 3 ЕМАТ с намотка тип „меандър“ и постоянен магнит



Фиг. 4 Геометрични характеристики на контролния отражател

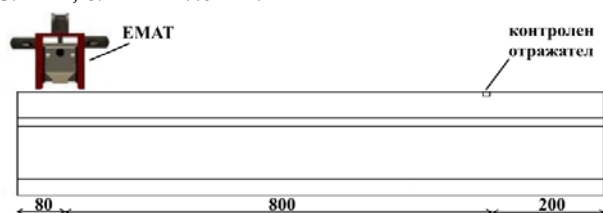
За експериментален образец е използван отрязък от релса S49 съгласно EN13674-1 с дължина 1.08 m. Този тип релса е най-използваният в България. В контактната зона на релсата, посредством палцов фрезер с диаметър 10 mm, е изработен изкуствен контролен отражател с размери 20x11 mm и дълбочина 4 mm (фиг. 4). Този тип отражател имитира откъртване на метал от работната контактна повърхност, като дълбочината му надвишава с 1 mm граничната дълбочина, над която се предприемат ремонтни дейности. Предпоставките при избора на размерите е да се имитира недопустим дефект, който е пропуснат от дефектоскопистите или се е развил бързо във времето. Трябва да се има предвид, че макар и голям по размери, този отражател има неблагоприятни геометрични характеристики за достоверно откриване с повърхностни вълни в сравнение с повечето реални дефекти. Той разфокусира ултразвуковия сноп, а освен това голяма част от енергията му преминава по стената му в дълбочина.

### 3. Предпоставки при избор на намотка и експериментална методика

За ограничение в нискочестотната област може да се приеме един феномен, описан от руския учен Викторов [5]. В пластината с ограничена дебелина, при произведение на дебелината и честотата по-големи от 6 MHz.mm за стомана, модите на вълните на Ламб от нулев порядък A0 и S0 имат много близки фазови скорости. В практически аспект това води до едновременното им възбуждане, като резултатната вълна се нарича квази-релеевска вълна, тъй като има близко поле на преместванията до това на повърхностните вълни на Релей. Разликата във вълновите числа обаче на двете води конструктивни и деструктивни интерферентни явления при разпространението ѝ и концентрация на енергията на вълните на горната или на долната повърхност на пластината през определено разстояние. При дължина на вълната, равна на 20% от дебелината на пластината обаче разстоянието между тези концентрации на енергия надвишава 60 m и с достаъчно приближение може да се предположи, че на разстояние няколко метра квазирелеевската вълна може да се приеме за вълна на Релей [5]. Тоест за чиста вълна на Релей може да се приема такава възбудена при произведение на дебелината и честотата по-големи от 15 MHz.mm за стомана или при  $\lambda > d/5$ , където  $d$  е дебелината на пластината. Ако приемем че дебелината на главата на релса S49 е 40 mm, то за избягване на възбуждане на квази-релеевска вълна дължината на вълната трябва да е по-малка от 8 mm.

От друга страна, същността на идеята предполага възбуждане на вълните с голяма дължина на вълната и респективно ниска честота, което ще доведе до по-ниско затихване, увеличаване на зоната на наблюдение и съответно до повишаване на максималната скорост на изпитване [5]. От анализа следва, че експерименталната работа следва да бъде проведена с намотки с период (дължина на вълната) в диапазона от 5 mm до 8 mm.

Освен това редица автори докладват повишена чувствителност на вълните на Релей при отношение на дълбочината на дефекта към дължината на вълната 0.5. [5-7]. Като се вземе предвид граничната дълбочина, над която се предприемат ремонтни дейности за често срещаните дефекти в релси, изборът на диапазон за периода на използваните намотки е целесъобразен и спрямо този критерий. От гореизложените съображения, за провеждане на експерименталната работа са избрани намотки с период 5.1 mm, 6.4 mm и 7.6 mm.



Фиг. 5 Схема на прозвучаване на контролния отражател

За всяка намотка е изчислена теоретичната честотата на възбуждане на вълните на Релей. Контролният отражател е прозвучен с всяка намотка, съгласно схемата на фиг.5. След това честотата е настроена фино до получаване на максимална амплитуда от контролния отражател. Записани са А-изображения от пролъчване на контролния отражател с всяка намотка. Измерена е амплитудата на отраженето на вълните от контролния отражател и максималното ниво на шумовете, което се получава в зоната от 500 mm до 700 mm в А-изображенията и е изчислено съотношението сигнал-шум. При експерименталната работа е използван начален

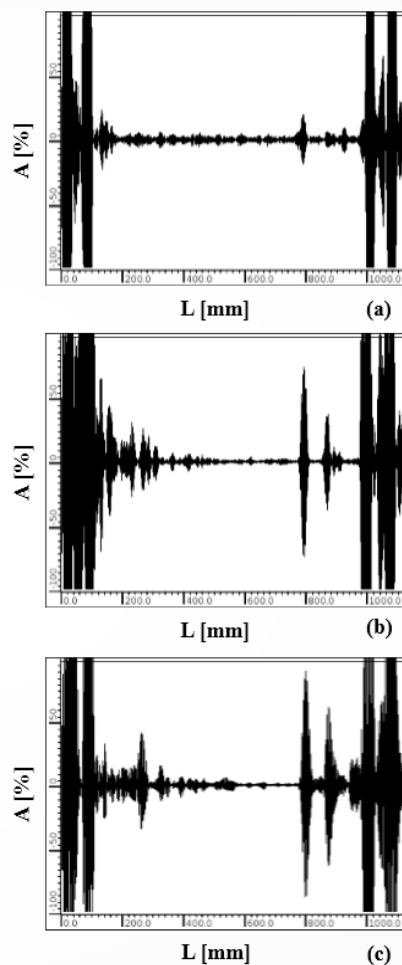
импулс, съставен от 5 бр. периоди и честотен филтър с лента 200–1000 kHz при ниво -6dB. Резултатите са представени в таблица 1, а записаните А-изображения – на фиг. 6.

Експериментално са определени също амплитудният коефициент на отражение от контролния отражател чрез измерване на амплитудите на отраженията от него и от края на образца от разстояние 0.5 m и коефициентът на затихване чрез измерване на амплитудите на отраженията от края на образца от разстояние 0.5 m и 0.8 m. Получените резултати са представени на фиг. 7. Те се базират на 6 измервания за всяка намотка и разстояние между отражател и преобразувател. Изчислени са средните стойности и стандартното отклонение. Всички експерименти са проведени без наличие на отстояние между преобразувателя и релсата.

Освен това е проведено изследване върху влиянието на отстоянието на преобразувателя  $h$  от релсата върху SNR на отражението от отражателя, съгласно схемата на фиг. 5. Прецизно изместване и измерване на отстоянието е осъществено чрез винто-гасения механизъм на скенера.

### 4. Резултати и дискусия

От А-изображенията, представени на фиг. 6, се вижда, че и с трите намотки, отражателят се открива уверено при разстояние между него и преобразувателя 800 mm. При разстояние 880 mm на А-изображенията се наблюдава допълнително отражение от контролния отражател, вследствие на геометрията на релсата.



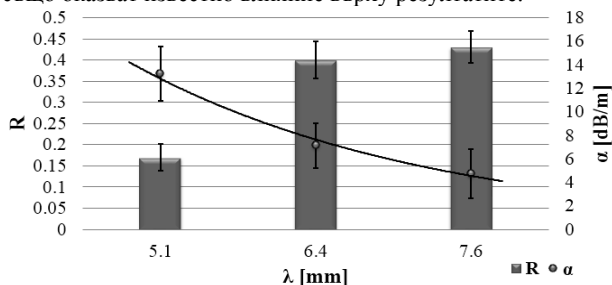
Фиг. 6 А-изображения, получени при прозвучаване на контролния отражател с намотка с периоди: (а) 5.1 mm, (б) 6.4 mm и (в) 7.6 mm.

Освен сигналите, получени от отражението на вълните от дефекта, на А-изображенията се наблюдават и сигнали от преки отражения (при  $L=80$  mm и  $L=1000$  mm) и двукратното отражение (при  $L=1080$  mm) на вълните от краищата на образца. Сигналите, които се наблюдават при разстояние около  $L=240$  mm представляват отражение на вълните от петата на релсата, вследствие на ограничените размери на образца и преминаване на част от акустичната енергия по челната повърхност на образца. При провеждане на реален контрол на железния път тези сигнали не би следвало да присъстват в А-изображенията.

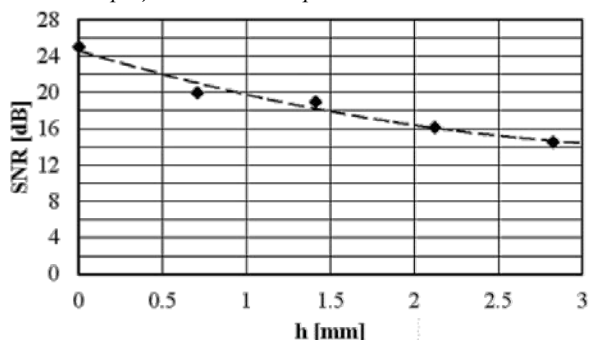
Таблица 1 Резултати от изследванията

| $\lambda$ [mm] | $f$ [kHz] | Усилване [dB] | SNR [dB] |
|----------------|-----------|---------------|----------|
| 5.1            | 575       | 30            | 8.5      |
| 6.4            | 640       | 25            | 23.6     |
| 7.6            | 380       | 20            | 25.2     |

Най-висока работна еквивалентна чувствителност ( $SNR=25.2$  dB) на техниката се наблюдава при прозвучаване на отражателя с намотка с период 7.6 mm (фиг. 6с). Това се потвърждава и от получените стойности на амплитудния коефициент на отражение  $R$  (фиг.7). Най-вероятно това се дължи на факта, че с намотка с период 7.6 mm отношението между дълбочината на дефекта и периода на намотката е най-близко до 0.5, при което редица изследователи докладват за максимум на амплитудния коефициент на отражение [5-7]. Освен това с тази намотка експерименталният коефициент на затихване  $\alpha$  е най-нисък, което потвърждава очакванията. Получените стойности на коефициента на затихване гарантират високо далекодействие на техниката и съответно осигуряване на голяма зона на наблюдение. При анализа на резултатите трябва да се има предвид, че качеството на намотките, както и спектъра на използваните хардуерните филтри също оказват известно влияние върху резултатите.



Фиг. 7 Влияние на дължината на вълната върху коефициентите на отражение и затихване



Фиг. 8 Влиянието на отстоянието на преобразувателя  $h$  от релсата върху SNR на отражението от дефекта

По данни на производителя максималното отстояние между изделието и преобразувателя е 4 mm. Логично е повишаването на това отстояние да повлияе негативно върху амплитудата на отражението на вълните от дефекта и респективно върху чувствителността. С повишаване на

отстоянието обаче, заедно с амплитудата, се понижава и нивото на шумовете. Поради тази причина за оценка на влиянието на този параметър върху чувствителността е по-правдоподобно да се измери съотношението сигнал-шум. На фиг. 8 е представен резултат от изследване върху влиянието на отстоянието на преобразувателя  $h$  от релсата върху SNR на отражението от дефекта при използване на намотка с период 7.6 mm. Резултатите показват, че при отстояние 2 mm, съотношението сигнал-шум се понижава с около 8 dB.

Анализът на резултатите показва, че контролният отражател може да се открие достоверно при отстояние между преобразувателя и контактната повърхност 2 mm на разстояние 1.5 m със съотношение сигнал-шум 12 dB. Ако се приеме, че зоната на наблюдение е 1.5 m и честотата на повторемост на импулсите е 20 Hz, то за осъществяване на 100% обем на изпитване е възможно подвижния състав да се движи със скорост до 110 km/h. Това е напълно достатъчно, предвид максималните скорости на движение на влаковете по железопътната мрежа в България. Тази хипотеза подлежи на експериментално доказване.

## 5. Заключение

Представени са първоначални изследвания върху пригодността по предназначение на техниката, използваща нискочестотни вълни на Релей за откриване на дефекти в контактната повърхност на главата на железопътни релси. 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 състав.

Тъй като преобразувателят възбужда вълните двупосочно, при автоматизирано изпитване би следвало евентуално несъвършенство да се регистрира минимум два пъти от системата – един път когато преобразувателят се намира преди дефекта и втори път, когато преобразувателят подмине дефекта. Това би могло да се използва за допълнително повишаване на достоверността на изпитването, както и за анулиране на фалшивите индикации.

При бъдещата работа е необходимо провеждане на по-детайлни изследвания с точно специфициране на вида и размерите на контролния отражател (със съдействие от НКЖИ) и провеждане на открити и слепи тестове с дрезина, върху която да бъде монтирана апаратурата.

## 6. Литература

- [1] Георгиев М., Пукнатиноустойчивост на железопътните релси, Издателско ателие АБ, 1999
- [2] Каталог на неизправностите в релсовите елементи, Национална Компания "Железопътна Инфраструктура", София, 2006
- [3] Clark R., Rail flaw detection: overview and needs for future developments, NDT & E International, 37:111–118, 2004
- [4] Peterson M. L., B. D. Jeffrey, and R. M. Gutkowski. Limitations in size and type of detectable defects in rail flaw inspection. Insight, 42(5):306–311, 2000
- [5] Викторов И.А., Звуковые поверхностные вольный в твердых телах, Наука, 1981
- [6] Mendelsohn D. A., J. D. Achenbach, L. M. Keer., Scattering of elastic waves by a surface-breaking crack. Wave Motion, 2:277–292, 1980
- [7] Vu B. Q., V. K. Kinra, Diffraction of Rayleigh waves in a half-space. I. Normal edge crack. J. Acoust. Soc. Am., 77(4):1425–1430, 1985



## УЛТРАЗВУКОВО ИЗПИТВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ВРЪЗКАТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ КОНТАКТИ, ЗАПОЕНИ С ТВЪРД ПРИПОЙ

### EVALUATION OF THE QUALITY OF BRAZED ELECTRICAL CONTACTS USING ULTRASONIC TECHNIQUE

доц. д-р инж. Д. Ганчев, гл. ас. д-р инж. К. Стайков  
Технически Университет – София, България,  
e-mail: ganchev\_d@tu-sofia.bg, staikov@tu-sofia.bg

**Abstract:** The paper presents a new technique for quick inspection and evaluation of the quality of brazed electrical contacts. High frequency ultrasonic scanning technique is applied and the resulting data is post-processed by calculating first order histogram based features. Information about quality of the brazed joint is obtained from the variance, skewness and kurtosis calculated from the C-Scan histogram. Experimental results confirm the ability of the proposed technique to detect and quantify microporosity in the brazed joint in automated mode.

**KEY WORDS:** ELECTRICAL CONTACTS, BRAZING, ULTRASONIC INSPECTION, POROSITY.

#### 1. Увод

Електрическите контакти се използват широко в енергийния сектор и промишлеността за комплексни комутационни приложения, като контактори, магнитни пускатели и релета, работещи при среден и тежък режим. На фиг.1 са представени типични примери за електрически контакти, запоени върху тоководещи медни носачи. Електрическите характеристики на контактите могат да варират в зависимост от метода и качеството на връзката с тоководещите носачи [1]. Технологията на свързване е от особена важност при изделия предназначени за работа при средна мощност и изпитващи многократни цикли на включване и изключване, както и в случаите, при който топлинната и електрическа проводимост на свързващия слой могат значително да влияят върху общата топлинна динамика и цялостния експлоатационен живот [2]. Металите от група 11 Au, Ag и Cu са сред най-широко използваните материали в областта на електрониката поради тяхната висока проводимост, химичната стабилност, топлопроводимост, както и по-ниско топлинно разширение.



Фиг. 1 Електрически контакти за превключване на токове до 80 А и напрежение до 700 V

Един от често използваните методи за закрепване на електрическите контакти към тоководещите носачи е запояването с твърд припой. При неспазване или отклонение в технологичния режим на запояване, често се получават газови включения в слоя припой. Това води до намаляване на топло и електро проводимостта на слоя и създаване на предпоставки за намаляване на надеждността и експлоатационния ресурс на електрическите контакти.

За изпитване на качеството на електрически контакти се прилагат както разрушителни, така и безразрушителни методи за контрол. Разрушителните методи са специфицирани в стандарт БДС EN 12797:2004/A1:2004 - Спояване с твърд припой. Изпитвания с разрушаване на съединения, споени с твърд припой [3]. От регламентираните видове изпитвания при електрическите контакти се прилага изпитване на опън и металографски анализ. Изпитването на опън дава само косвена оценка за качеството на връзката, като не предоставя информация за местоположението и големината на газовите включения [4]. Металографският анализ компенсира тези ограничения, но се отличава с много ниска производителност. Освен това, поради спецификата на изработване на металографските шлифове, металографският анализ дава само частична картина за дефектността на запоения слой.

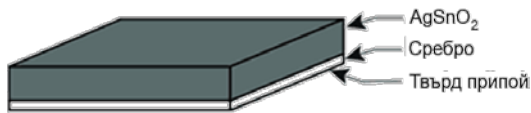
При изпитването без разрушаване (БДС EN 12799:2004 - Спояване с твърд припой). Изпитване без разрушаване на съединения, споени с твърд припой) се провежда само визуален контрол на запоеното съединение, като фокусът е основно върху проверка на позиционирането на електрическия контакт върху носача и наличието на припой в зоната на съединението [5].

Методите, които се използват за откриване и характеризация на вътрешни нецялостности, са ултразвуковия и радиографичен метод. Предвид малката дебелина на слоя припой в електрическите контакти и размерите на очакваните несъвършенства, използването на радиографичен метод е икономически необосновано. Прилагането му изисква използването на скъпо оборудване като микрофокусни рентгенови тръби и цифрови детектори на рентгеново лъчение (DDA). Високочестотният ултразвуков импулсен-ехо метод обаче има висок потенциал за надеждно откриване и локализация на дефектните зони [6; 7].

Целта на настоящата работа е да се изследва пригодността по предназначение на ултразвуковия импулсен ехо-метод в имерсионен вариант за изпитване на качеството на връзката на електрически контакти, запоени с твърд припой.

## 2. Използвани образци, апаратура и методология

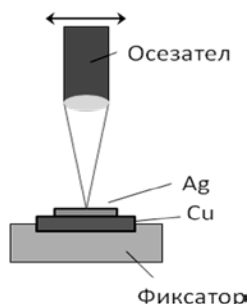
На фиг. 2 е представена конструкцията на контактните тела. Основният материал от който са изработени е сребро-калаен окис ( $\text{AgSnO}_2$ ) с добавка на бисмут (III) оксид ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) и подложка от чисто сребро. Размерът на зърната е от 2  $\mu\text{m}$  до 5  $\mu\text{m}$ , общото съдържание на оксиди е 14%, а дебелината е  $1,2 \pm 0,05 \text{ mm}$ . Този материал е често използван за електрически контакти, поради ниската си склонност към самозаваряване и висока стабилност на контактното съпротивление при голям брой цикли на включване и изключване [8].



Фиг. 2 Контактно тяло за запяване върху меден носител

За запояване на контактните тела към медния носител е използван медно-фосфорен твърд припой със сребро  $\text{Ag15CuP}$  (ISO17672 –  $\text{CuP386}$ ) без флюс. Неговото съдържание е 15% сребро, 80% мед, 5% фосфор. Дебелината на слоя е  $0,03 \pm 0,015 \text{ mm}$ .

Добавянето на сребро към медно-фосфорните припои понижава точката на топене, увеличава механичните характеристики на запоеното съединение, повишава електрическата проводимост и увеличава пластичността, устойчивостта на ниски температури и вибрации. Сплавта има подобрена течливост, което допринася за по-добро омекряне на повърхностите, водещо до по-високо качество на връзката [8].



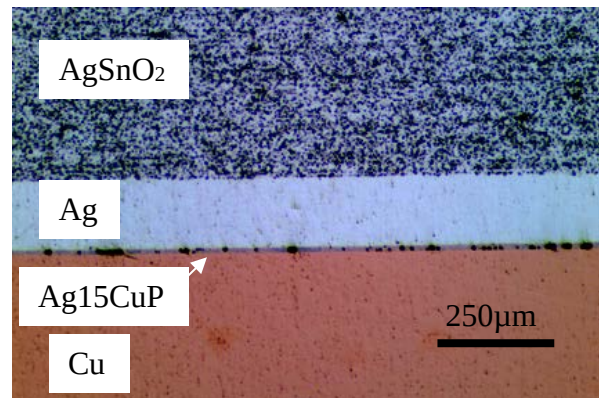
Фиг. 3 Схема на опитната постановка

Експерименталната работа е проведена по имерсионния вариант на ултразвуковия безразрушителен импулсен ехо-метод. Използван е фокусиран имерсионен осезател с номинална работна честота 25 MHz, който е сферично фокусиран на 75 mm във вода. Осезателят е производство на фирма Physical Acoustics Corp. модел IU25X1V. Сканирането на образците се осъществява чрез ултразвукова имерсионна вана с двукоординатна маса модел UPKI-T, произведена от P.A.C., USA. Разделителната способност на координатната маса по двете оси е  $\sim 0,05 \text{ mm}$  (500 точки/inch). За имерсионна течност е използвана дестилирана вода с постоянна температура от  $22^\circ\text{C}$  и скорост на разпространение на надлъжните ултразвукови вълни 1488 m/s. За записване на резултатите от изпитванията е използван компютърен дефектоскоп PCIUT3100 Ultrasonic Pulser/Receiver A/D Board, производство на US Ultratek, Inc. Той осигурява честота на дискретизация на входния сигнал 100 MHz. В имерсионната вана образците се поставят върху специална стойка, която гарантира точното им позициониране. Всеки от образците е сканиран и резултатите са записани във вид на база данни. В последствие от базата данни са извлечени А-, В- и С-изображения (фиг. 3). Изследвани са две партии

електрически контакти. При производството на едната е спазен стриктно технологичният режим на запояване, а при другата е нарушен умишлено с цел получаване на дефектни изделия.

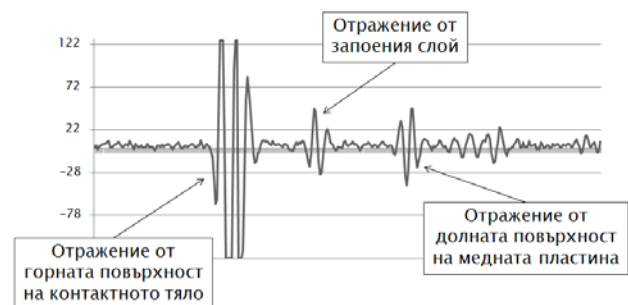
## 3. Резултати и дискусия

Качеството на двете партии е валидирано посредством металографски анализ. На фиг. 4 е представено металографско изображение на напречен шлиф на образец от дефектната партида. Наблюдават се клъстери от пори по дължината на целия шлиф. Най-големите са с диаметър около 0,03 mm.



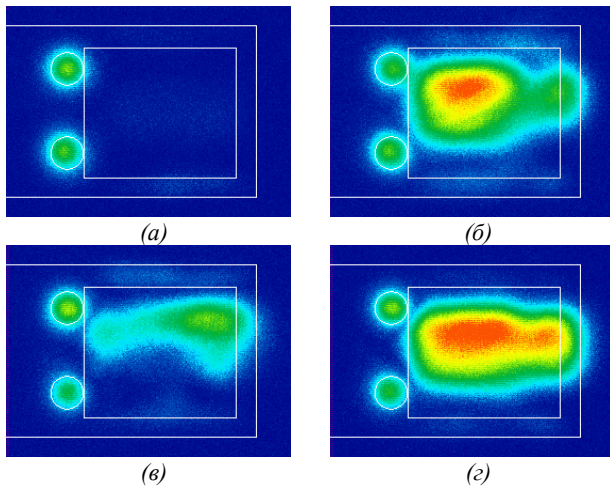
Фиг. 4 Металографска снимки на запоен контакт с наличие на газови включения

На фиг. 5 е представено А-изображение от прозвучаване на централната зона на електрически контакт от дефектната партида. Базирайки се на дебелините на слоевете и скоростите на разпространение на надлъжните ултразвукови вълни, са идентифицирани ехата в А-изображението. Отразеният сигнал от дефектния запоен слой е ясно различим, като амплитудата му надвишава нивото на структурните и електронни шумове с над 12 dB.



Фиг. 5 А-изображение от прозвучаване на дефектен електрически контакт

За всички сканирани образци от базата данни са извлечени С-изображения на амплитудата на ехото от запоения слой. Типични С-изображения са представени на фиг. 6, като на фиг. 6а е представено С-изображение от образец от бездефектната партида, а на фиг. 6б, 6в и 6г на такива от дефектната партида. За подобряване на интерпретацията на резултатите върху С-изображенията с бял контур са нанесени границите на електрическия контакт и медния носач. За точното локализиране на зоната на запоения слой в С-изображението се използват двата броя технологични сферични ограничителя върху медния носач, като техните контури също са представени върху изображението.



Фиг. 6 Амплитудни С-изображения на отразения сигнал от запоеия слой; (а) бездефектна партида; (б), (в) и (г) дефектна партида.

От С-изображенията, представени на фиг. 6, е видимо, че достоверно може да се различи дефектно от бездефектно съединение. Техниката позволява също точното локализиране и характеризация на газовите включения.

Проведените тестове с различни техники за последваща обработка на С-изображенията показаха, че най-голям потенциал за автоматизирана оценка на качеството на съединенията имат статистическите характеристики от първи ред. Всяко изображение може да се представи като правоъгълна матрица от дискретни данни (пиксели). Всеки пиксел  $p[m, n]$ , където  $m = 0, 1, \dots, M$ ,  $n = 0, 1, \dots, N$ , може да приема стойност  $i \in \{0, L - 1\}$ . Хистограмата описва честотата на появяване на пиксели с идентичен интензитет в изображението. От формална гледна точка хистограмата представя функция на разпределението на вероятността за съществуване на даден интензитет в изображението и се дефинира с помощта на делта функцията на Кронекер, като:

$$(1) \quad H(i) = \sum_n \sum_m \delta(p[m, n], i), \text{ за } i = 0, 1, \dots, L - 1,$$

$$\text{където: } \delta(p[m, n], i) = \begin{cases} 1 & \text{за } p[m, n] = i \\ 0 & \text{за } p[m, n] \neq i \end{cases}.$$

Хистограмите се използват за дефиниране на статистически характеристики на изображението от първи ред, като средна стойност, дисперсия, асиметрия, ексцес, енергия и ентропия.

Средната стойност се дефинира като средно аритметично на функцията на разпределение на хистограмата:

$$(2) \quad \bar{H} = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} H(i)$$

Дисперсията е мярка за разпределението на дадена случайна величина, т. е. нейното отклонение от математическото очакване:

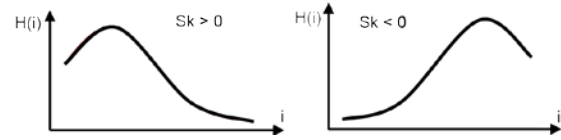
$$(3) \quad \sigma_H^2 = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} (H(i) - \bar{H})^2$$

Асиметрията (Skewness) измерва асиметрията на разпределението (фиг. 7). Дефинира се като:

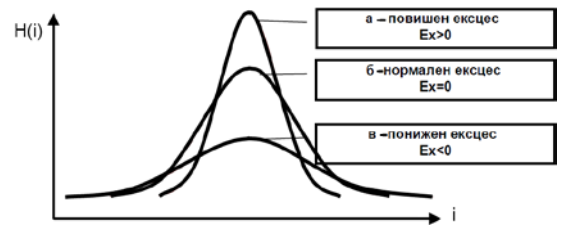
$$(4) \quad \text{skewness} = \frac{\frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} (H(i) - \bar{H})^3}{\sigma_H^3}$$

Ексцесът (Kurtosis) е мярка за връхната източност на разпределението (фиг.8). Изследваното разпределение се сравнява с нормалното разпределение, явяващо се еталон. Ексцесът се дефинира като:

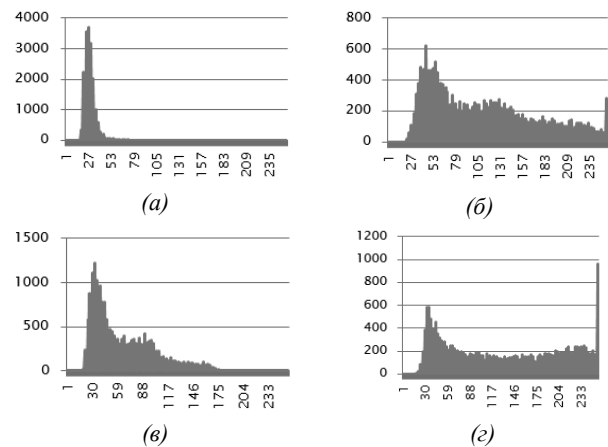
$$(5) \quad \text{kurtosis} = \frac{\frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} (H(i) - \bar{H})^4}{\sigma_H^4}$$



Фиг. 7 Асиметрията на хистограмата



Фиг. 8 Ексцес на хистограмата



Фиг. 9 Хистограми на получените данни от зоната на запояване; (а) бездефектна партида; (б), (в) и (г) дефектна партида.

На фиг. 9 са представени хистограми на С-изображенията от фиг. 6. Техните статистически характеристики от първи ред са представени в табл. 1.

Таблица 1 Статистически характеристики от първи ред на хистограмите представени на фиг. 7

| Образец | Средна стойност | Дисперсия | Асиметрия | Ексцес |
|---------|-----------------|-----------|-----------|--------|
| А       | 69,18           | 180168    | 7,18      | 52,99  |
| Б       | 69,18           | 14734     | 1,93      | 3,51   |
| В       | 69,18           | 35554     | 3,68      | 15,07  |
| Г       | 69,18           | 15068     | 2,77      | 12,52  |

Обикновено хистограмите на дефектни и бездефектни зони са силно несиметрични и изтеглени на ляво, т.е. техният коефициент на асиметрия е положителен. Наблюдават се по-високи стойности за коефициента на асиметрия при бездефектни образци, отколкото при дефектни.

При бездефектните участъци стойността на ексцеса е силно повишена спрямо тази на дефектните. Използването на ексцеса за оценка на качеството на връзката се отличава с по-висока чувствителност за разграничаване на дефектни от бездефектни съединения от другите статистически характеристики от първи ред.

Прилагането на този подход за обработка на С-изображенията позволява оценката на качеството дори само чрез използване на няколко В-изображения, получени в

ключови сечения на електрическия контакт. Това би увеличило производителността на изпитването многократно.

#### **4. Заключение**

Разработена и валидирана е нова високочувствителна техника за изследване на качеството на връзката на електрически контакти, запоеени с твърд припой. Техниката позволява достоверно откриване, характеризация и оценка на газови включения в припоия, които се получават при отклонения в технологичните режими на процеса на запояване. Високата ѝ производителност и чувствителност са основание за използването ѝ като заместител на традиционно прилагания до сега металографски анализ за изследване на такъв тип съединения. Характеристиките на техниката създава предпоставки за висок мултипликационен ефект и възможности за адаптирането ѝ към конкретните изисквания на производителя за качество, както и за изследване на съединения с различни геометрични параметри и запоеени с други технологии.

#### **5. Литература**

- [1] Guojian A., G. Horn, Influence of attachment quality on the performance of arcing electrical contacts, IET Conference Publications, Volume 2012, Issue 605:398-401, 2012
- [2] Pearce, A. D., W. Balme, A comparison of contact attachment methodology on the electrical performance of AgSnO<sub>2</sub> contacts, Proceedings of the 59th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, HOLM 2013
- [3] БДС EN 12797:2004/A1:2004 - Спояване с твърд припой. Изпитвания с разрушаване на съединения, споени с твърд припой
- [4] Traxler H., W. Arnold, W. Knabl, P. Rödhammer, Non-destructive evaluation of brazed joints by means of acoustic emission, J. Acoustic Emission, 20:257-264 (2002)
- [5] БДС EN 12799:2004 - Спояване с твърд припой. Изпитване без разрушаване на съединения, споени с твърд припой
- [6] Hellier C., Handbook of Nondestructive Evaluation, McGraw-Hill Professional, 1st edition, 2001
- [7] Schwartz M., Evaluation and quality control of braze joints, ASM International, pp. 339-346. Brazing, 2nd Edition, Chapter 9, Materials Park, OH, 2003
- [8] Witter, G., G. Horn, Contact Design and Attachment in: Electrical Contacts - Principles and Applications, Marcel Dekker, p.754, 1999



## APPLICATION OF IMMERSION MODE FOR INVESTIGATION OF LINEAR PHASED ARRAY ULTRASONIC BEAM

### ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДА НА МОДЕЛИРАНЕТО В ТЕЧНИ СРЕДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ РАБОТАТА НА ЛИНЕЕН ФАЗИРАЩ ОСЕЗАТЕЛ

Dr. Mirchev Y. N.<sup>1)</sup>, Eng. Chukachev P. H.<sup>2)</sup>, Prof. Dr.Sc. Mihovski M. M.<sup>1)</sup>,

<sup>1)</sup> Institute of Mechanics- BAS, Sofia, Bulgaria, e-mail: [mirchev@imbm.bas.bg](mailto:mirchev@imbm.bas.bg),

<sup>2)</sup> Multitest Ltd, Varna, Bulgaria, e-mail: [p.chukachev@multitest.bg](mailto:p.chukachev@multitest.bg).

#### Въведение

Използването на метода на моделирането в течни среди за изследване на особеностите на разпространение на ултразвукови вълни в настоящата работа се прилага за оценка на отражателната способност на границата течност – твърда среда при използване за възбуждане и приемане на вълните със линейно фазиращ многоелементен осезател.

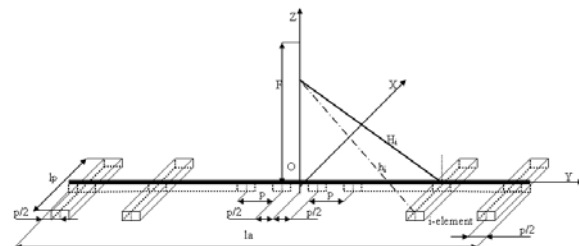
#### 1. Теоретично изчисляване на акустичното поле на линейно фазиран осезател

Разпространяваните ултразвукови вълни в изследваната среда се представят за ехо-импулсен метод с хармонична вълна имаща форма близка до камбановидна, която се дава със следната зависимост

$$A(t) = A_0 \cdot e^{j \cdot \omega_0 \cdot (t-t_0) - \beta^2 \cdot \omega_0^2 \cdot (t-t_0)^2} \quad (1.1)$$

където  $A_0$  е максимална стойност на излъчен импулс (във всички случаи на представяните в настоящата работа теоретични модели големината на амплитудата на излъчения сигнал приемаме условно за единица  $A_0=1$ ),  $e$ - неперово число,  $\omega_0=2\pi \cdot f_0$  - носеща кръгова честота,  $f_0$ - носеща линейна честота,  $t$ - времева скала или обхват,  $\beta=0.265/n_0$ - коефициент на форма и дължина на импулса,  $n_0$ - брой на трептенията в импулса на ниво на амплитудата  $A=0.5 \cdot A_0$ ,  $t_0=H(Z)/C$ - време на разпространяван импулс за изминаване на разстояние  $H(Z)$  със скорост  $C$  на разпространение на ултразвукова вълна в изследваната среда,  $j$ - имагинерна единица,  $k$ - вълново число.

Схематично на фиг.1 е представена една от възможните закономерности на закъсненията за линейно фазиращ многоелементен осезател, чрез активна група от елементи с дължина  $l_a$ , образувана от  $N_a$  броя елементи, със разстояние между тях  $p=l_a/N_a$  и дължина на всеки отделен елемент  $l_p$ .



Фиг.1. Схема на виртуална активна група на линейно фазиращ осезател.

$Z$  е означена оста на излъчване на фазиращия осезател,  $Y$ - активна ос по която се извършва електронно сканиране,  $X$ - пасивна ос,  $F$ - фокусно разстояние,  $H_i$ - разстояние от центъра на елемент с номер  $i$  до оста на излъчване  $Z$  на активната апертура от фазиращия осезател и  $h_i$ - разстояние от края на елемент с номер  $i$  до оста на излъчване  $Z$ . Оста на излъчване за линейно фазиращ осезател е перпендикулярна спрямо активната  $Y$  и пасивната  $X$  ос.

Излъчваното поле от елементите на фазиращия осезател и отразеното поле от дисковия отражател се заменят с точков източник, за  $k \cdot a > 1$ , където  $k$  е вълново число,  $a$ - половината от най-големия размер на правоъгълния елемент  $l_p$  на фазиращия осезател или радиуса на окръжността на дисковия отражател.

Полето, излъчвано от всеки единичен елемент на фазиращия осезател  $E_i^{PA}(Z)$  по неговата ос, се представя с приближен модел на Кирхоф [5÷7]

$$|E_i^{PA}(Z)| = \left| APA_i \left( t_0 = \frac{H_i}{C} \right) - \frac{H_i}{h_i} \cdot APA_i(t_0 = h_i) \right|, \quad (1.2)$$

където

$$h_i = \sqrt{H_i^2 + \left( \frac{l_p}{2} \right)^2}, \quad (1.3)$$

$APA_i(t_0)$  се изчислява по зависимост (1.1),  $H_i$ -разстояние между центровете на излъчвателя и отражателя, изчислено по зависимост (1.12).

Същият модел се използва и за представяне на отраженето от дисков отражател (цилиндър с плоска повърхнина) с модулът на интензитета на полето по неговата ос  $Id(Z)$  и се дава със следната зависимост

$$|Id_i(Z)| = \left| Ad_i \left( t_0 = \frac{H_i}{C} \right) - \frac{H_i}{\sqrt{H_i^2 + \left( \frac{d}{2} \right)^2}} \cdot Ad_i \left( t_0 = \sqrt{H_i^2 + \left( \frac{d}{2} \right)^2} \right) \right| \quad (1.4)$$

където  $Ad_i(t_0)$  се изчислява по зависимост (1.1),  $H_i$ -разстояние между отражателя и излъчвателя,  $d$ -диаметър на отражателя. Отражението от дисков отражател в близката зона на работа на осезател, какъвто е разглеждания случай в настоящата работа, се дава с отношения на площите на отражателя  $s$  и осезателя  $S$  [7]. Зависимост (1.4) се използва само за далечната зона на осезателя.

Изменението на отразено от дисков отражател ултразвуково поле в страни от акустичната му ос  $|\Phi d_i(Z)|$  се представя с класическа диаграма на насоченост [5÷6] в която се отчитат разположенията на елементите  $i$  на фазиращия осезател спрямо центъра на дисковия отражател и се записва в следния вид

$$|\Phi d_i(Z)| = \frac{2 \cdot J_1 \left[ \frac{d}{2} \cdot k \cdot \frac{p^2 \left( i - \frac{Na+1}{2} \right)}{H_i} \right]}{\left( \frac{d}{2} \cdot k \cdot \frac{p^2 \left( i - \frac{Na+1}{2} \right)}{H_i} \right)} \quad (1.5)$$

където  $J_1$  е Бесселова функция от първи порядък. Останалите означения са дадени по-горе в настоящата работа.

Стойността на излъчваното поле на линейно фазиращ осезател по неговата ос се пресмята, както сума от полетата излъчени от елементарен източник с местоположение в центъра на всеки от елементите в активната апертура, като се използват принципите на Хюйгенс и на Ферма [6,7]. В модела, разписан в настоящата работа, допълнително се отчита размера  $l_p$  на елементите в активната апертура със зависимост (1.2). Ултразвуковото поле  $IPA^{Na}(Z)$ , излъчвано от една активна апертура с  $Na$  броя елементи на линейно фазиращ осезател, се записва във вида

$$IPA^{Na}(Z) = \sum_{i=1}^{Na} [E_i^{PA}(Z) T_i^{PA}(Z) A_i^{PA}(\Delta t_i)], \quad (1.6)$$

където

$$T_i^{PA}(Z) = \frac{Z}{H_i^2(Z)}, \quad (1.7)$$

$$A_i^{PA}(\Delta t_i) = e^{j \cdot \omega_0 \cdot [t - (t_0 + \Delta t_i)] - \beta^2 \cdot \omega_0^2 \cdot [t - (t_0 + \Delta t_i)]^2}, \quad (1.8)$$

$$\Delta t_i(Z) = \Delta t_i^{NF}(Z) + \Delta t_i^{AF}(Z), \quad (1.9)$$

$$\Delta t_i^{NF}(Z) = \frac{[H_i(Z) - Z]}{C}, \quad (1.10)$$

$$\Delta t_i^{AF}(Z) = - \frac{\{H_i[Z = F(Z)] - F(Z)\}}{C}, \quad (1.11)$$

$$H_i(Z) = \sqrt{Z^2 + p^2 \cdot \left( i - \frac{Na+1}{2} \right)^2}, \quad (1.12)$$

-  $E_i^{PA}(Z)$  е полето, излъчвано от всеки един елемент  $i$  по акустичната му ос, участващ в активната група на фазиращия осезател с което се отчита в полето на фазиращия осезател дължината  $l_p$  на елементите му.

-  $T_i^{PA}(Z)$  – коефициент, отчитащ намаляване на полето вследствие на нарастване на фронта (ъгъла) на разпространяваната вълна от акустичната ос на осезател  $i$ , като не се разглежда изменение на полето за сметка на поглъщане и разсейване в средата.

-  $A_i^{PA}(\Delta t_i)$  – сигнал излъчен от елемент  $i$  в активната апертура с общото време за закъснение  $\Delta t_i$  на разпространяваната ултразвукова вълна, изминаваща разстояние  $H_i(Z)$ .

Времето за закъснение  $\Delta t_i^{NF}(Z)$  се отчита спрямо времето  $t_0 = Z/C$  по зависимост (1.10). С него се изчислява закъснението на излъчената вълна за всеки елемент  $i$  спрямо оста на излъчване  $Z$  от центъра  $O$  на активната апертура на фазиращия осезател. С  $Z$  се дава разстоянието от челото на фазиращия осезател до челото на дисковия отражател. Времето за закъснение  $\Delta t_i^{AF}(Z)$  изчислявано по зависимост (1.11), дава електронно зададено закъснение и се определя за всеки елемент  $i$  в активната апертура в зависимост от фокусното разстояние  $F(Z)$  на фокусиращата закономерност в активно фокусиран фазиращ осезател. Зададеното електронно закъснение със зависимост (1.11) се дава с отрицателен знак, за да пристигнат по едно и също време (без закъснение  $\Delta t_i = 0 \mu s$ ) изчисляваните по зависимост (1.9) ултразвукови вълни излъчвани от елементите на активната апертура в точката на фокусиране на разстояние  $F(Z)$ . Фокусиращата закономерност с  $F \approx \infty$  е случая, когато системата е нефокусирана и всички елементи излъчват едновременно с електронно зададена закономерност на закъсненията  $\Delta t_i^{AF}(Z)$ , клоняща към нула.

Теоретичното изчисляване на излъчен и приет сигнал от линейно фазиращ осезател след отражение от плоска повърхнина (дъно), в съответствие с класическите подходи в [5÷7], се записва в следния вид

$$IB(Z) = \sum_{i=1}^{Na} \left[ E_i^{PA}(2Z) \left( \frac{Z}{H_i(Z)} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot H_i(Z)} \cdot (A_i^{PA}(\Delta t_i))^2 \right] \quad (1.13)$$

Теоретичното изчисляване на излъчен и приет сигнал от линейно фазиращ осезател след отражение от дисков отражател, в съответствие с класическите подходи в [5÷7], се записва в следния вид

$$ID(Z) = IB(Z) \cdot \frac{S}{S'} \cdot \sum_{i=1}^{N_g} \left[ \frac{\Phi d_i(Z)}{H_i(Z)} \right] \quad (1.14)$$

Всички означения в зависимости (1.13) и (1.14) са описани по-горе в настоящата работа.

## 2. Резултати от изчисленията

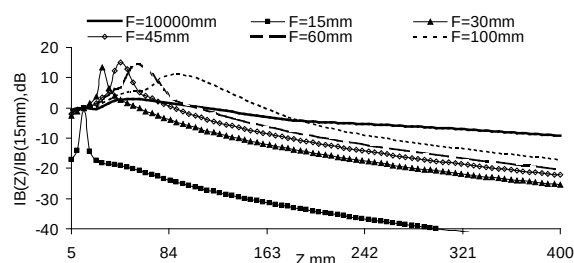
Предимство на модела е, че вместо да се използва разпространения числен метод “синтезиране на фокусиране на апертури” (synthetic aperture focusing technique) даден в [1] се работи с полето на една активна апертура с ос на излъчване  $Z$  насочена към центъра на отражателя. Това намалява значително времето за изчисляване.

Изчисленията се провеждат за една активна група от линейно фазиращ осезател с брой на елементите  $N_a=32$  и дължина  $l_a=19.2\text{mm}$ , за закономерности на закъсненията при фокусни разстояния  $F=15\text{mm}$ ,  $30\text{mm}$ ,  $45\text{mm}$ ,  $60\text{mm}$ ,  $100\text{mm}$  и  $10000\text{mm}$ . Дължината  $l_p$  на елементите в активната група е  $10\text{mm}$ , разстоянието между тях  $p=0.6\text{mm}$ .

Акустичните характеристики, използвани за изчисленията на излъчваните от елементите импулси в среда вода са: номинална честота  $f=5\text{MHz}$ , скорост на надлъжна ултразвукова вълна  $C=1.5\text{km/sec}$ , брой трептения на импулса на ниво половината от максимумат му  $p_0=1$ , дължина на импулса на половината от максимумат му  $200\text{ns}$ .

### 2.1. Отражение от безкрайна плоскост

Изчисленията за отражение от безкрайна равнина се провеждат по зависимост (1.13). На фиг.2 са представени резултати за стойности на амплитудата на полето  $IB(Z)$  от разстоянието по акустичната ос  $Z$  нормирана към  $Z=15\text{mm}$ .



Фиг.2 Стойности на амплитудата  $IB(Z)$  на отразен сигнал от плоска повърхнина разположена на разстояние  $Z$  от активната апертура

При нефокусиран линейно фазиран осезател ( $F=10000\text{mm}$ ) отразената амплитуда от плоска повърхнина се изменя незначително с нарастване на  $Z$  до около една близка зона (в случая около  $300\text{mm}$ ), като максимум се наблюдава на разстояние около  $55\text{mm}$ .

Този характер на изменение на амплитудата се дължи на факта, че в модела се отчита дължината на елементите на фазиращия осезател  $l_p$ .

В [4 и 5] не се отчита размера на елементите  $l_p$  и тогава от представените зависимости се вижда, че амплитудата монотонно намалява с нарастване на  $Z$  до една близка зона, след което много малко се изменя до две близки зони, а след това започва отново монотонно да намалява. Близката зона  $N$  на линейно фазиращ осезател в [2] се записва със зависимостта

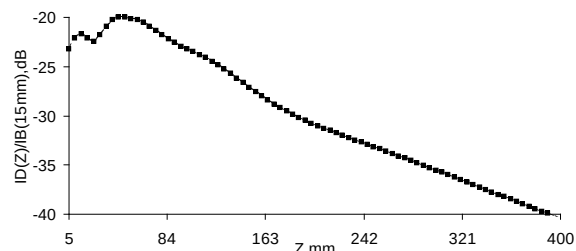
$$N = \frac{b \cdot L^2}{4 \cdot \lambda} \quad (2.1)$$

където  $b$  е коефициент, зависещ от отношението на  $l_a$  към  $l_p$ ,  $L$  - по-голямата дължина от тази на елементите  $l_p$  или на активната апертура  $l_a$ .

При фокусиран линейно фазиращ осезател от зависимости на фиг.2 следва, че максималната амплитуда във фокуса  $F$  намалява и дължината на фокуса (по акустичната ос  $Z$ ) на ниво минус  $6\text{dB}$  от максимума му нараства с увеличаване на фокусното разстояние  $F$ . От резултатите може да се направи извода, че на практика използването на линейно фокусиран фазиращ осезател е обосновано до фокусно разстояние приблизително равно на две близки зони.

### 2.2. Отражение от дисков отражател

Изчисленията за отражение от цилиндричен отражател с плоска повърхнина с диаметър  $d=4\text{mm}$  се провеждат по зависимост (1.14) за случая на нефокусиран линейно фазиран осезател с  $F=10000\text{mm}$ . На фиг.3 са представени резултати за стойностите на амплитудата на полето  $ID(Z)$  от разстоянието по акустичната ос  $Z$ , нормирана към амплитуда отразена от дъно  $IB(Z)$  на разстояние  $Z=15\text{mm}$ .



Фиг.3 Стойности на амплитудата  $ID(Z)$  на отразен сигнал от дисков отражател с  $d=4\text{mm}$ , разположен на разстояние  $Z$  от активната апертура

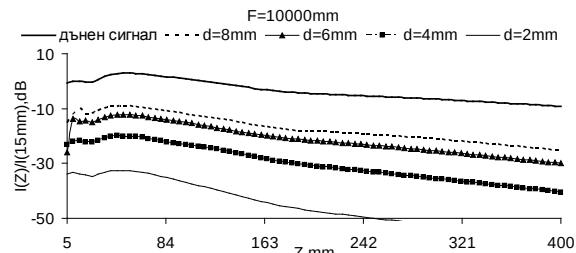
От фиг.3 се вижда изразен максимум на амплитудата на разстояние  $Z=55\text{mm}$ , които се получава след изчисленията в зависимост от акустичните и геометричните характеристики на осезателя.

### 2.3. Построяване на АРД-номограма

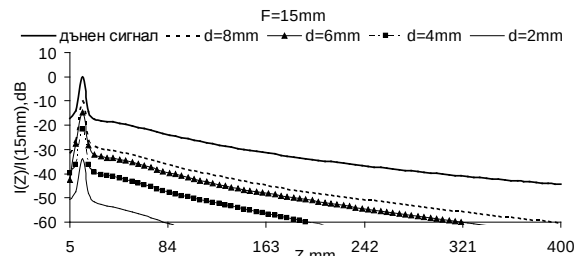
АРД-номограмата (амплитуда - разстояние и диаметър на отражателя) е приета да се използва за настройване на амплитудата при характеризирание и оразмеряване на нецялостности в материалите,

съгласно изискванията на стандарт БДС EN ISO 16827. За едноелементни конвенционални осезатели е много разпространена и лесна за изчисляване [3, 6 и 7], докато за фазиращи многоелементни осезатели има малко литературни данни за резултати от нейното изчисляване [4, 5].

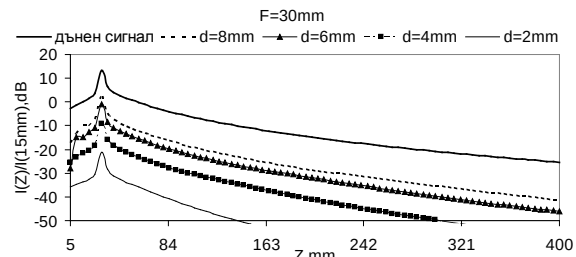
В настоящата работа са проведени изчисления по зависимости (1.13) и (1.14). Получените резултати за АРД-номограма на линейно фазиращ осезател при отражение от дъно и от дисков отражател са представени на фиг.4 за активна апертура с  $N_a=32$  броя елементи и разстояние между елементите  $p=0.6\text{mm}$ . Изчисленията се провеждат за отражение от дискови отражатели с диаметри  $d=2\text{mm}$ ,  $4\text{mm}$ ,  $6\text{mm}$  и  $8\text{mm}$  разположени на разстояние  $Z$  от  $5\text{mm}$  до  $200\text{mm}$  пред осезателя в среда вода, през  $5\text{mm}$ . АРД-номограмите са построени за нефокусиран с  $F=10000\text{mm}$  и за фокусиран с  $F=15\text{mm}$ ,  $30\text{mm}$ ,  $45\text{mm}$ ,  $60\text{mm}$  и  $100\text{mm}$  линейно фазиращ осезател. Фокусното разстояние  $F$  е дадено над всяка от АРД-номограмите. По ординатата е дадено разстоянието  $Z$  а по абсцисата е дадена амплитудата  $I(Z)$  нормирана към  $Z=15\text{mm}$ .



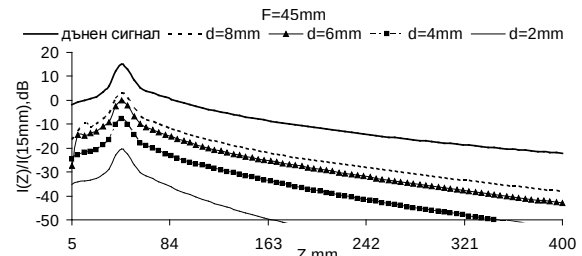
а) нефокусиран линейно фазиращ осезател с  $F=10000\text{mm}$



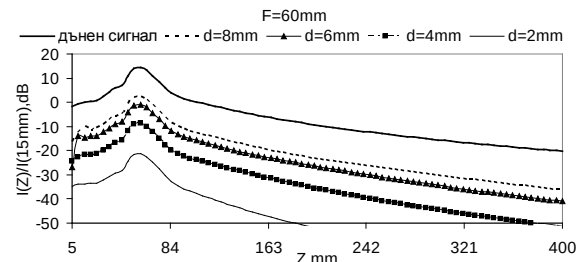
б) фокусиран линейно фазиращ осезател с  $F=15\text{mm}$



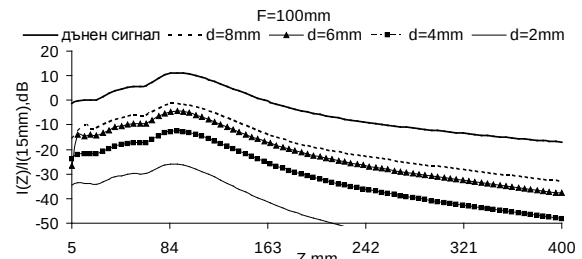
в) фокусиран линейно фазиращ осезател с  $F=30\text{mm}$



г) фокусиран линейно фазиращ осезател с  $F=45\text{mm}$



д) фокусиран линейно фазиращ осезател с  $F=60\text{mm}$



е) фокусиран линейно фазиращ осезател с  $F=100\text{mm}$

**Фиг.4. АРД-номограми на линейно фазиращ осезател с фокусно разстояние  $F$  и активна апертура с  $N_a=32$  броя елементи**

### 3. Метод на моделиране на разпространението на еластични вълни в течни среди

Този метод е намерил широко приложение при изучаване на особеностите на акустичния тракт в ултразвуковата дефектоскопия [3]. Средата в която се разпространяват ултразвуковите вълни е течност (вода, масло и др.). Образците които се изследват се изработват от метал, пластмаса и други материали. Основно предимство на метода е възможността с неголеми усилия да се реализира многовариантност на изследванията.

При интерпретиране на резултати е важно да се отчита факта, че във вода скоростта на разпространение на ултразвуковите вълни е приблизително 4-ри пъти по-малка от скоростта в стомана, съответно дължината на вълнат е почти 4 пъти по-малка при зададена честота.

Общите принципи на изследване с използване на метода на моделиране в течности има следните предимства:

- възможност за сравнително бързо и точно интерпретиране на отразяващите повърхнини спрямо разпространяващите се ултразвукови вълни;

- практически оптимален акустичен контакт с изследваните образци;
- възможност за постигане на оптимални съотношения между дължината на вълната и отразяващите обекти посредством смяна на честотите на използваните осезатели;
- практически точково измерване на интензивността на ултразвуковото поле в течността;
- автоматизация на изследванията посредством зададена схема на преместване на осезателя и отразяващата повърхнина;
- комплектоване на осезателите със съвременна апаратура за регистриране и документиране на информацията във вид на двумерни изображения.

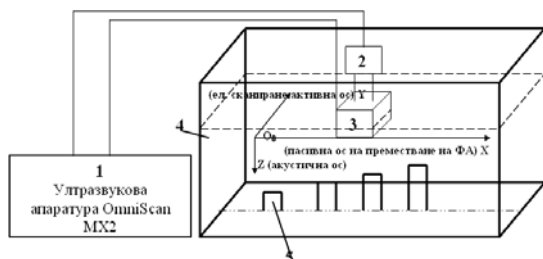
Недостатък на метода е, че в течностите се разпространяват само надлъжни ултразвукови вълни.

### 3.1. Апаратура и метод за изпитване

Изпитванията са проведени в имерсионен вариант с ултразвукова апаратура OmniScan MX2 и фазиращ осезател 5L64I1 с електронно линейно сканиране, с ъгъл на въвеждане на надлъжната ултразвукова вълна във вода  $0^\circ$ . Броят на елементите в активната група  $N_a=32$ , стъпка на електронното линейно сканиране е равна на разстоянието между два съседни елемента  $p=0.6\text{mm}$ . Размерът на активната апертура по ос Y на линейно сканиране е  $l_a=19.2\text{mm}$  (отговаряща на  $N_a=32$  броя елементи на разстояние  $p=0.6\text{mm}$  един от друг), а пасивната ос-  $l_p=10\text{mm}$  (дължина на елементите на фазиращия осезател). За отчитане на местоположението по пасивната ос X на фазиращия осезател спрямо центъра на отразителите се използва сканиращо устройство - енкодер.

Използва се закон на закъсненията (фазова закономерност) на елементите за постигане на фокусиране на осезателя върху дисковите отразители. В един от случаите фазовата закономерност е подбрана така, че електронното закъснение на елементите да клони към нула. Това е случая при който апаратурата работи с нефокусиран фазиран осезател. На практика това се реализира, като се задава в апаратурата фокусно разстояние  $F=10000\text{mm}$ .

Ултразвуковото изпитване е подготвено и проведено във акредитирана лаборатория "Мултитест" ООД. Блок схема за работата с имерсионната вана е дадена на фиг.5 и включва: 1- ултразвуков апарат OmniScan MX2, 2- енкодер, 3- фазиращ осезател 5L64I1 4- имерсионна вана с дестилирана вода, 5- дискови отразители тип плоскодънен отвор.

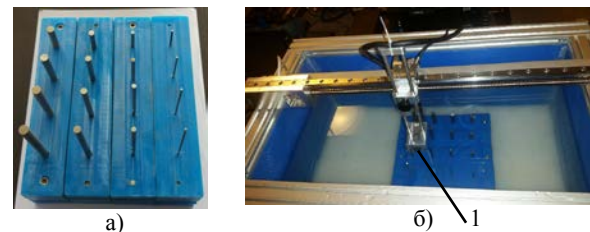


Фиг.5. Схема на автоматизирано имерсионно изпитване с линейно фазиращ осезател

Енкодерът записва местоположението на автоматично предвижващия се през  $1\text{mm}$  осезател по ос X, докато по активната ос Y се извършва електронно линейно сканиране. По ос Z се приемат след отражение излъчваните ултразвукови вълни от елементите на осезателя. Размерът на електронното сканиране по ос Y е  $19.8\text{mm}$ , със стъпка  $0.6\text{mm}$  и отговаря на 33 фазови закономерности с еднакви електронни закъснения на елементите. Отражателите са поставени последователно по ос X, като дължината на автоматично сканиране е  $160\text{mm}$ . Позицията от челото на осезателя до отразителите по ос Z е  $15\text{mm}$ ,  $30\text{mm}$ ,  $45\text{mm}$  и  $60\text{mm}$ . Информационните сигнали се записват в цифров вид и могат да се представят във вид на A, B- и C- изображение.

### 3.2. Образци и схема на ултразвуковите изпитвания

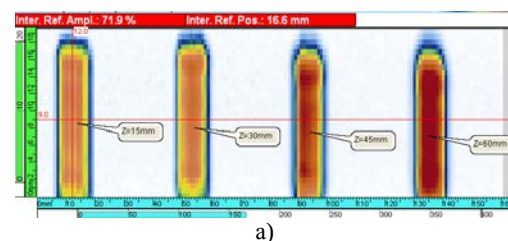
Експерименталните изследвания са проведени върху подготвени образци от свредла за пробивна машина с диаметри  $d=2\text{mm}$ ,  $4\text{mm}$ ,  $6\text{mm}$  и  $8\text{mm}$ . На фиг.6а са дадени цилиндричните свредла разположени на пластмасова поставка, имитиращи дискови отразители с плоска повърхнина. На фиг.6б е представена схемата на провежданите изпитвания, при която отразителите са поставени в имерсионна вана, така че плоските им чела са ориентирани успоредно на челото на фазиращия осезател 1 и са разположени на разстояние от него  $Z=15\text{mm}$ ,  $30\text{mm}$ ,  $45\text{mm}$  и  $60\text{mm}$ .

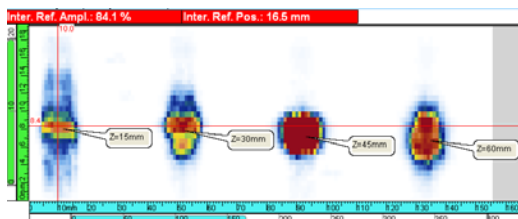


Фиг.6. Експериментални образци а), имитиращи дисков отразител с плоска повърхнина и схема на изпитванията б)

### 4. Експериментални резултати

На фиг.7 е представено типично C-изображение (изглед отгоре) за отразител с  $d=4\text{mm}$ . Използван е цветен код даващ стойностите на амплитудата от  $0\%$  (отговаря на бял цвят) до  $100\%$  (отговаря на червен цвят) от екрана. На фиг.7а и на фиг.7б са представени C-изображения на отразените сигнали, съответно за нефокусиран при  $F=10000\text{mm}$  и фокусиран с  $F=45\text{mm}$  линейно електронно фазиран осезател за едно автоматизирано сканиране по ос X.



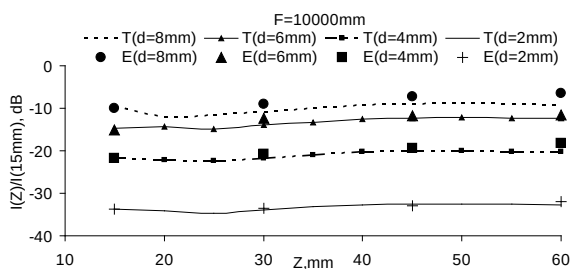


Фиг.7. С-изображения на отражения от дискови отражатели за нефокусиран а) и фокусиран б) линейно фазиран осезател.

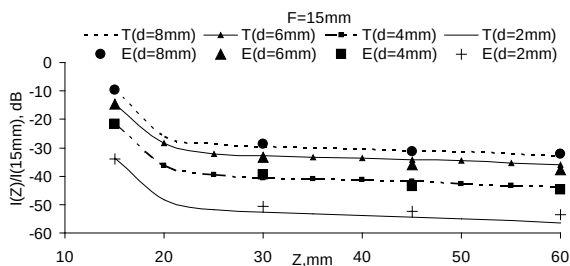
От представените С-изображения на фиг.7, се виждат условните размери на отражателите по двете оси Х (в светло син цвят) и Y (в светло зелен цвят). За един и същ отражател се вижда, че условните размери по ос Y са различни в зависимост от фокусиращата закономерност и от разположението на отражателя по ос Z.

С помощта на програмен продукт TomoVIEWER 2.7R4, са изследвани амплитудите на отразените сигнали от отражатели с различни диаметри, отнесени към сигнал отразен от отражателя разположен на разстояние  $Z=15\text{mm}$ . Изчислена е неопределеността на получените резултати за амплитудата на отразените сигнали за отражател с диаметър  $d=4\text{mm}$ . Направени са 10 независими автоматизирани сканирания по ос X, след което от 10-те получени С-изображения са отчетени амплитудите и е изчислена неопределеност  $\pm 1.8\text{dB}$ .

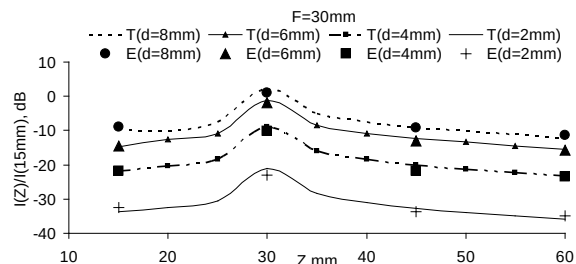
Резултатите на изследваните амплитуди  $I(Z)$  в dB са представени по ординатата на фиг.8, а по абсцисата е дадено разстоянието по ос Z на което са разположени отражателите от осезателя. Заедно с експерименталните резултати на фиг.8 са дадени и теоретичните изчисления. Теоретичните резултати са означени с буква T, а експерименталните с буква E.



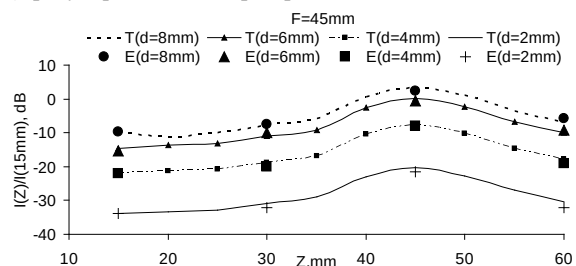
а) нефокусиран линейно фазиран осезател с  $F=10000\text{mm}$



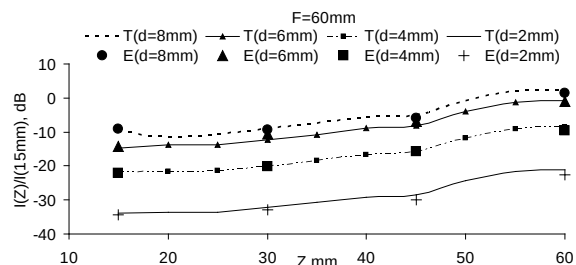
б) фокусиран линейно фазиран осезател с  $F=15\text{mm}$



в) фокусиран линейно фазиран осезател с  $F=30\text{mm}$



г) фокусиран линейно фазиран осезател с  $F=45\text{mm}$



д) фокусиран линейно фазиран осезател с  $F=60\text{mm}$

Фиг.8. Теоретично и експериментално получени амплитуди на отразени сигнали от дисков отражател с диаметър  $d$  за фокусно разстояние  $F$  и активна апертюра с  $Na=32$  броя елементи

Изчислена е неопределеността на получените резултати за амплитуда на отразените сигнали за отражател с диаметър  $d=4\text{mm}$ . Направени са по 10 независими автоматизирани сканирания по ос X, след което са отчетени амплитудите и е изчислена неопределеността, която е  $\pm 1.8\text{dB}$ .

На фиг.8 се наблюдава добро за практиката съвпадение на теоретични и експериментални резултати, което е в границите на неопределеността на резултатите от отчитането на амплитудите на отразените сигнали.

## Заклучение

Представена е една възможност за изчисления на ултразвуковото поле на линейно фазиращ осезател, при отражение от гладка дънна повърхнина и от дисков отражател с използване на приближен модел на Кирхоф за представяне на излъчваното поле от елементите на фазиращия осезател и отразеното поле от дисковия отражател. Закъсненията на отделните елементи от фазиращия осезател се определят чрез принципите на Хюйгенс и Ферма. Теоретичния модел е потвърден с експериментални резултати проведени в имерсионна

среда, подготвени и изпълнение във фирма "Мултитест".

Теоретичните и експерименталните резултати показват, че използването на ефекта от фокусиране на линейно фазиращ осезател е целесъобразно до около една близка зона, след което има незначителен максимум на амплитудата във фокуса и той е по-малък по същност от амплитудите на сигналите отразени преди него по оста Z.

С-изображенията показват, че условия размер на един и същ отражател по ос Y се изменя в зависимост от използваната фокусираща закономерност. За по-прецизно оразмеряване, трябва фокусната закономерност да е такава, че фокусното петно да бъде по-малко от размера на отражателя.

С потвърдения модел могат да се построят АРД-номограми за среда стома и да се използват за оразмеряване на нецялостности в стоманени изделия с използване на линейно фазиращ осезател.

### *Литература*

- [1] Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D., Post-processing of ultrasonic phased array data for optimal performance. *Insight*, 2005, v.47, № 2, p.88-90;
- [2] Meindert A. (coordinator), Moles M., Kass D., Nelligan T. (technical reviewers and advisers), *Phased Array Testing- basic theory for industrial application*, Canada, OLYMPUS NDT, Inc., November 2010;
- [3] Дюдин Б.В., Жидкосное моделирование отражательных свойств дефектов, ТРТИ, Таганрог, 1990;
- [4] Данилов В.Н., Воронков И.В., Моделирование работы прямого преобразователя с фазированной решеткой в режиме излучения, *Дефектоскопия (ISSN 0130-3082)*, 2010, № 7, с.3-17;
- [5] Данилов В.Н., Воронкова Л.В., Основы теории и некоторые аспекты применения преобразователей с фазированными решетками, Москва, Издателский дом "Спектр", 2015;
- [6] Ермолов И.Н., Теория и практика ультразвукового контроля, Москва, Машиностроение, 1981;
- [7] Ермолов И.Н., А.Х. Вopilкин, В.Г. Бадалян., *Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии.*, Москва, ООО НПЦ НК "ЭХО+", 2000;

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                                   |

## ЕНЕРГЕТИЧНИ ПАРАМЕТРИ НА МИКРОЛЕНТОВИ КЪСИ АНТЕНИ С ОБРАТНО ИЗЛЪЧВАНЕ С ДИЕЛЕКТРИЧНО ЗАПЪЛНЕН РЕЗОНАТОРЕН ОБЕМ И ПРОЦЕПНО ВЪЗБУЖДАН МИКРОЛЕНТОВ ИЗЛЪЧВАТЕЛ- ВЪЗБУДИТЕЛ

### ENERGETIC PARAMETERS OF MICROSTRIP SHORT BACKFIRE ANTENNAS WITH DIELECTRIC FILLED CAVITY VOLUME AND SLOT EXITED MICROSTRIP PATCH EXCITER

ас. д-р инж. Червенков Г. Ц.

Технически университет – Варна, България, g.t.chervenkov@tu-varna.bg

**Abstract** – This paper examines the influence of the peripheral screen on the radiation efficiency of a two microstrip short backfire antennas with dielectric filled cavity volume, slot exited microstrip patch exciter and a linear polarization of the radiated radio wave. It has been shown that the use of a multilayer peripheral printed screen causes an increase in antenna radiation efficiency due to reduced loss in the metal components. The analysis of the results indicates the potential for broadening of antenna bandwidth.

**Keywords:** microstrip short backfire antenna, radiation efficiency

#### 1. Въведение

Създаването на единични малогабаритни антенни излъчватели с добри енергетични параметри, широка честотна лента, компактна и механично устойчива конструкция, подходящи както за самостоятелно използване, така и като съставен елемент на плоски многоелементни антенни решетки, е актуален проблем, както от научен, така и от приложен аспект. Характеристиките и параметрите на антената определят в значителна степен характеристиките на радиокомуникационните устройства и системи, електромагнитната съвместимост, енергийните параметри и размери на радиомодула. В радиотехническите системи, при които от особено значение е антената да има малки размери и тегло, нископрофилна и устойчива на механични въздействия конструкция, позволяваща експлоатирането ѝ при мобилен режим на работа, най-често се използват микролентови антени. Микролентовите антени (МЛА) са част от общата тенденция за миниатюризация в телекомуникациите, което обуславя засиления интерес към този тип излъчватели на радиовълни – особено ярко изразено при системите за мобилна радиокомуникация, радиотелеметрия, радионавигация и радиолокация в микровълновата част от радиочестотния спектър [1]. Ниските коефициент на усилване (~ 6dB), ефективност на излъчване и КПД са едни от сериозните недостатъци на МЛА.

Микролентовите къси антени с обратно излъчване [2, 3] съчетават предимствата на резонаторните антени (високо усилване и КПД), и по-конкретно на късите антени с обратно излъчване [4, 5], за преодоляване на основните недостатъци на МЛА. Микролентовата къса антена с обратно излъчване (МКАОИ) е къса антена с обратно излъчване [6, 7], в която поне част от конструктивните елементи с функционално предназначение са реализирани от микролентови линии. Микролентовата къса антена с обратно излъчване с незапълнен резонаторен обем

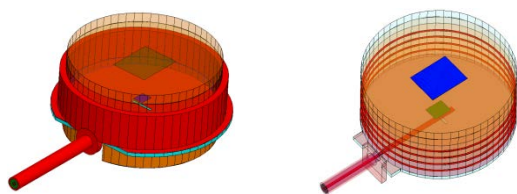
(МКАОИНРО), използваща за възбуждащ източник МЛА, осигурява над три пъти по-голям коефициент на усилване от идентична по площ микролентова антена и може да замени четири или повече елемента в конвенционална микролентова антенна решетка [2]. Основният недостатък на МКАОИНРО е обусловен от факта, че микролентовото изпълнение е реализирано само по отношение на възбудителя, а пространственото положение на малкият отражател спрямо големия и плоскопаралелността между тях се осигурява от тънка диелектрична подпора, което прави конструкцията механично неустойчива и непригодна за мобилен режим на работа.

Особено перспективни за използване в радиотехнически системи при мобилен режим на работа са микролентовите къси антени с обратно излъчване с диелектрично запълнен резонаторен обем (МКАОИДРО) [8], които са следващ етап на развитие на КАОИ, със запазване на предимствата на МКАОИНРО и преодоляване на основните им недостатъци. Освен получаване на механически устойчива конструкция и цялостно изработване по фотолитографска технология, основно тяхно предимство е и намаляването на обема на антената (поради приложеният метод за миниатюризация) при запазване на електродинамичните им характеристики [9, 10].

*Цел на изследването* – да се установи влиянието на конструкцията на периферния екран върху енергетичните параметри на микролентовите къси антени с обратно излъчване с диелектрично запълнен резонаторен обем, процепно възбуден микролентов излъчвател-възбудител и линейна поляризация на излъчената радиовълна.

#### 2. Изследвани антени

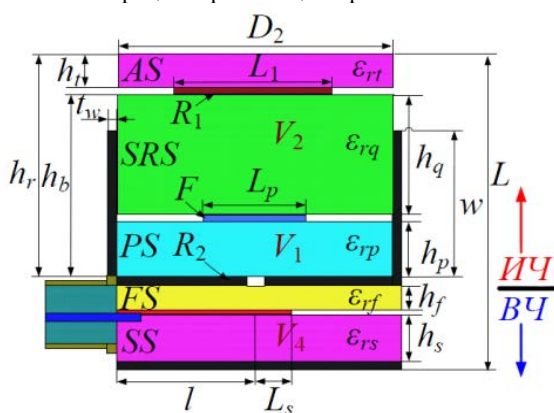
Изследвани са две МКАОИДРО – с плътен (фиг. 1а) и с печатен (фиг. 1б) периферен екран [9-12].



а) с плътен периферен екран – антена А1  
а) с печатен периферен екран – антена А3  
Фиг. 1. Микролентови къси антени с обратно излъчване с диелектрично запълнен резонаторен обем

Като базова антенна конструкция за изграждане на А3, и използвана за сравнение в това изследване, служи антена А1.

Антенa А1 (фиг. 2) условно може да се разглежда като съставена от две части – излъчваща (ИЧ) и възбуждаща (ВЧ). Двете части са разположени от двете страни на големия отражател R2, а електромагнитната връзка между тях се осъществява посредством правоъгълен процеп изрязан в центъра на R2.



Фиг. 2. Микролентова къса антена с обратно излъчване с плътен периферен екран (разрез)

Излъчващата част на антената включва: правоъгълен метален излъчващ елемент F, диелектрична подложка PS ( $\epsilon_{rp}=6.15$ ;  $\text{tg}\delta=0.0038$ ;  $h_p=1.27\text{mm}$ ), голям отражател R2, периферен метален екран, диелектрична подложка SRS ( $\epsilon_{rq}=4.1$ ;  $\text{tg}\delta=0.0033$ ;  $h_q=6.35\text{mm}$ ), малък правоъгълен отражател R1, диелектрична подложка AS ( $\epsilon_{rt}=2.6$ ;  $\text{tg}\delta=0.0019$ ;  $h_t=1.58\text{mm}$ ). Възбуждащата част на антената се състои от: диелектрична подложка FS ( $\epsilon_{rf}=6.15$ ;  $\text{tg}\delta=0.0038$ ;  $h_f=0.635\text{mm}$ ), диелектрична подложка SS ( $\epsilon_{rs}=2.6$ ;  $\text{tg}\delta=0.0019$ ;  $h_s=1.58\text{mm}$ ), възбуждаща микролентова линия (разположена между двете подложки – FS и SS) и метален екран (основа на антената).

Използваните микровълнови диелектрични материали в антенa А3 са като при антена А1, като диелектрична подложка SRS е съставена от пет броя диелектрични плоскости, височината на които е подбрана така, че формираният от пръстените многослоен печатен периферен метален екран функционално да бъде еквивалентен на плътния метален периферен екран при антена А1.

### 3. Резултати и дискусия

Изследването на антените се извърши с използване на комерсиалния софтуерен антенен симулатор AN-SOF, използващ конформния метод на моментите (Conformal Method of Moments) за електродинамично моделиране на антени [13]. Това позволява МКАОИДРО да бъдат моделирани триизмерно и максимално точно до изработения след това прототип, с отчитане на влиянията и взаимните връзки в реалната антенна конструкция.

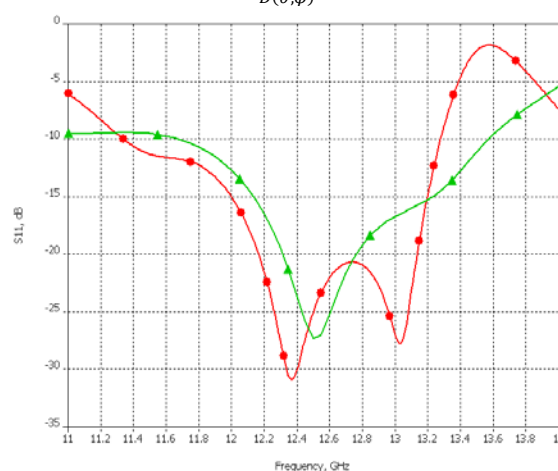
Енергетичният параметър *ефективност на излъчване*  $\eta_{rad}$  характеризира способността на антената да преобразува мощността на направляемите електромагнитни вълни  $P_t$  (радиочестотната мощност подавана към антената) в мощност на излъчените радиовълни  $P_{rad}$  и се определя от израза [14, 15]:

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_t}. \quad (1)$$

Мощността на излъчване на антената се определя посредством интегриране на плътността на потока на мощността  $\Pi(\theta, \varphi)$  по затворената повърхност S, обхващаща обема от пространството около антената съгласно израза:  $P_{rad} = \oint_S \Pi(\theta, \varphi) \cdot dS$ .

Определянето на ефективността на излъчване в честотната лента на антената е извършено посредством използването на известната аналитична взаимовръзка между енергетичните параметри *коэффициент на усилване*  $G = \Pi(\theta, \varphi)/(P_t/S)$  и *коэффициент на насочено действие*  $D = \Pi(\theta, \varphi)/(P_{rad}/S)$  на антената [15]:

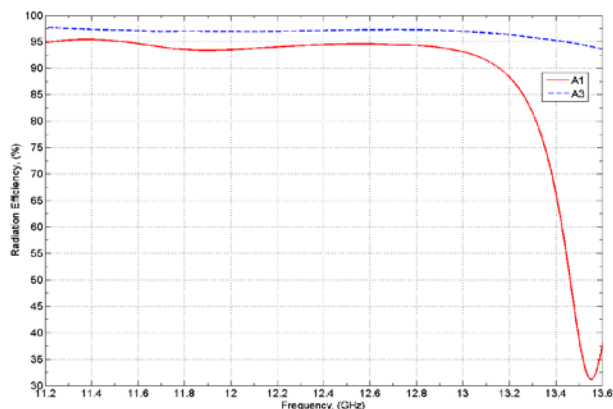
$$\eta_{rad} = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} \quad (2)$$



Фиг. 3. Честотни характеристики на модула на коефициента на отражение на МКАОИДРО

На фиг. 3 е показано изменението на модула на коефициента на отражение  $|S_{11}|$  от входа на антена А1 (непрекъсната линия с кръгли маркери) и антена А3 (непрекъсната линия с триъгълни маркери) във функция от честотата, при вълново съпротивление на захранващата коаксиална линия равно на  $50\Omega$ .

На фиг. 4 е показано изменението на ефективността на излъчване  $\eta_{rad}$  на антена А1 (непрекъсната линия) и антена А3 (прекъсната линия) във функция от честотата. От получените резултати (фиг.2) се вижда, че в работните честотни ленти и на двете антени – от 11.42GHz до 13.28GHz (12.3%) за А1 и от 11.7 GHz до 13.58 GHz (15%) за А3,  $\eta_{rad} \geq 82.1\%$  за А1 и  $\eta_{rad} \geq 83.3\%$  за А3. Ефективността на излъчване при преминаване от плътен (антена А1) към печатен периферен екран (антена А3) не само се повишава, с минимум 2.5%, но се наблюдава и по-малка неравномерност в хода на кривата.



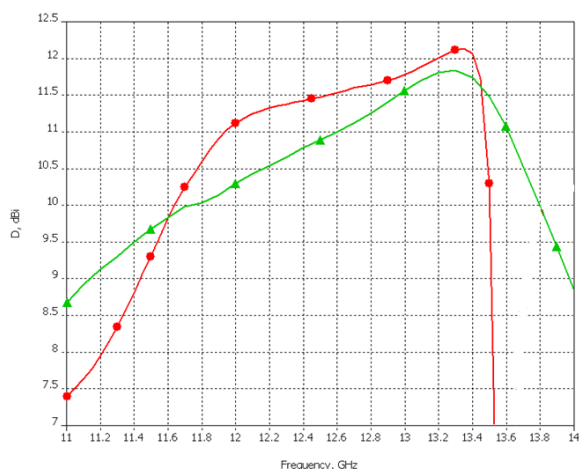
Фиг. 4. Честотни характеристики за ефективността на излъчване на МКАОИДРО

За да се разграничи приносът на загубите в проводниците  $L_c$  и диелектриците  $L_d$  и да се установи влиянието на конструкцията на периферния метален екран върху ефективността на излъчване са използвани еднакви диелектрични материали и честотни ленти в двете антенни конструкции. Известно е [15], че ефективността на излъчване на антените е равна на произведението:

$$\eta_{rad} = \eta_c \cdot \eta_d, \quad (3)$$

където  $\eta_c = 1 - L_c$  и  $\eta_d = 1 - L_d$ .

При антена A3 джауловите загуби в периферния метален екран са по-ниски, поради което се увеличава ефективността на излъчване, но това е съпроводено с понижаване на максималния коефициент на насочено действие (фиг.5) в работната лента на антената с 0.2dB –  $D_{max} = 11.9\text{dBi}$  при A1 и  $D_{max} = 11.7\text{dBi}$  при A3.



Фиг. 5. Честотни характеристики на коефициента на насочено действие на МКАОИДРО – антена A1 (непрекъсната линия с кръгли маркери) и антена A3 (непрекъсната линия с триъгълни маркери)

И при двете изследвани антени се наблюдава отчетлива тенденция, за намаляване на ефективността им на излъчване над максималната честота в работната им честотна лента (фиг.4) – по-слабо изразена при антена A3, но ясно забележима при антена A1. Следва да се отбележи, че и при двете антени, за честоти по-ниски от минималната честота в работната им честотна лента, не се наблюдава тенденция за намаляване на ефективността на излъчване, което е индикация за потенциална възможност за разширяване на работната им честотна лента.

#### 4. Заключение

Показано е влиянието на конструкцията на периферния екран върху ефективността на излъчване на

микролентовите къси антени с обратно излъчване с процепно възбуждане, диелектрично запълнен резонаторен обем и линейна поляризация на излъчената радиовълна. Установено е, че използването на решетъчен периферен екран води до увеличаване на ефективността на излъчване, поради намаляване на загубите в металните конструктивни елементи. Анализът на получените резултати, показва потенциалната възможност за разширяване на честотната лента по усилване на изследваните антени. Получените резултати са един от критериите при избор на единичен излъчвател за градивен елемент в антенни решетки.

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са извършени по проект НП7/2016г. в рамките на присъщата на ТУ-Варна научноизследователска дейност, финансирана целево от държавния бюджет.

#### 5. Литература

- [1]. Fujimoto K., J. R. James (Editors), "Mobile antenna systems handbook", Artech House, 2000.
- [2]. Kaloi C., D. Hatfield, P.Simon, "Microstrip Backfire Antenna", IEEE APS Symposium, vol.19, June 1981, pp.343-346.
- [3]. Kaloi C.M., "Microstrip Backfire Antenna", US Patent № 4 347 517, 31 Aug. 1982.
- [4]. Kirov G.S., Design of Short Backfire Antennas, IEEE Antennas Propag. Mag., Vol. 51, №.6, 2009, pp.110-120.
- [5]. Kumar A., H. D. Hristov, "Microwave Cavity Antennas", Artech House, 1989.
- [6]. Ehrenspeck H. W., „The Short Backfire Antenna“, *Proc. IEEE*, 53, № 8, August 1965, pp.1138-1140.
- [7]. Ehrenspeck H. W., „Short Backfire Antenna“, US Patent № 3 438 043, April 1969.
- [8]. Червенков Г.Ц., „Изследване на микролентови къси антени с обратно излъчване“, Дисертация за ОНС „доктор“, ТУ-Варна, 2013.
- [9]. Червенков Г.Ц., Г.С. Киров, „Микролентова къса антена с обратно излъчване с многослоен печатен периферен екран“, Патент за изобретение № 66 521/31.03.2016г., Патентно ведомство на РБ.
- [10]. Киров Г.С., Г.Ц. Червенков, „Микролентова къса антена с обратно излъчване с процепно възбуждане“, Патент за изобретение № 66 540/07.09.2016г., Патентно ведомство на РБ.
- [11]. Kirov G.S., G.T. Chervenkov, C.D. Kalchev, "Aperture Coupled Microstrip Short Backfire Antenna", Journal of Electrical Engineering, ISSN: 1335-3632, Vol. 63, №. 2, 2012, pp. 75-80.
- [12]. Kirov G.S., G.T. Chervenkov and Y.D. Kalchev, "Some Studies of Aperture Coupled Microstrip Short Backfire Antenna Arrays", Годишник на Техническият университет във Варна, ISSN: 1311-896X, Варна, 2011, т. I, стр. 105-109.
- [13]. <http://antennasoftware.com.ar>
- [14]. Пудовкин А.П., Ю.Н. Панасюк, А.А. Иванков, "Основы теории антенн", Тамбов, 2011.
- [15]. Balanis C. A., "Modern antenna handbook", 4<sup>th</sup> ed., 2016.

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                                   |

## ВИБРОАКУСТИЧНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПРЕДАВАТЕЛНИТЕ ЧИСЛА НА РЕДУКТОРИ

### VIBROACOUSTICAL GEAR RATIO DETERMINATION

гл. ас. д-р инж. Л. Георгиев, lig@tu-varna.bg  
Технически университет – Варна, България

**Abstract:** This paper describes a method for gear ratio determination on analysis of the action of unknown or insufficiently known machines or mechanisms, in which it is impossible or impractical to count the number of teeth of the cogwheels. A microphone, a strain gauge or another type of pickup with immediate contact to the machine (mechanism) is used to record an acoustical signal whose spectrum is examined to determine the frequencies corresponding to the angular velocities of the rotating gears and the shafts on which they are installed. Then their values are approximated to a rational number, which is the wanted gear ratio. This is repeated with a different rotational speed, if possible, to ensure that the ratio of the first measurement is correct. The method has been verified using an electric brush cutter with two reduction gears and validated by ensuring that the marked positions on the two rotating parts of each of them coincide after as many rotations of each of them as are the numerator and the denominator of the obtained gear ratio.

**Keywords:** Vibration, spectrum, frequency, cogwheel, reduction gear, gear ratio, electric brush cutter, rational approximation.

### 1. Увод

Предавателното число е най-важната характеристика на една редукторна зъбна предавка. То определя колко пъти нараства въртящият момент и съответно колко пъти намалява ъгловата скорост в резултат на действието ѝ. Най-простият начин да се изчисли това число е да се преброят зъбите на зъбните козела и да се раздели броят зъби на водимото зъбно колело (наричано още корона) на броя зъби на водещото зъбно колело (наричано пиньон). Полученото рационално число представлява предавателното число [1].

Тук е описан е метод за определяне на предавателните числа на редукторите при анализ на действието на непознати или недостатъчно изучени машини и механизми, в които не е възможно или практично да се броят зъбите на зъбните козела. (Те може да са недостъпни, трудно или частично достъпни.) Тогава именно може да се приложи описаният тук виброакустичен метод.

### 2. Условия за приложимост на метода

1. Да е известна с достатъчна точност поне 1 ъглова скорост.
2. Да е приблизително известно предавателното число.
3. Скоростта на въртене да бъде възможно най-висока.
4. Скоростта на въртене да може да се променя.

Последните две условия са само пожелателни с оглед повишаване на точността (условие №3) и достоверността на метода (условие №4).

### 3. Същност и особености на метода

Методът е пределно прост. Изследваната машина или механизъм се пуска в действие и с помощта на микрофон, тензодатчик или друг вид звукоотнемател, прилепен плътно до повърхността му, се записва звуков сигнал във файл. След това с помощта на звуков редактор или друга подобна програма се прави анализ на спектъра му. В него се търси известната честота на въртене (т. 1, условие №1) и по грубо известното предавателно число (условие №2) се търси не-

известната честота. Съотношението на тези две честоти се подлага на рационална апроксимация (например с помощта на програмния пакет „Matlab“) и така се намира търсеното рационално число, сиреч предавателното число. Процедурата се повтаря за всички редуктори в машината.

Известни са множество методи за диагностика на неизправности в зъбните предавки с помощта на кепстри [2]. Но в този случай целта не е диагностика на известен механизъм, а определянето на предавателното число на неизвестен такъв. Освен това на фона на шума от двигателя и поради високите обороти в спектъра не се забелязва никаква периодичност – хармониците, доколкото ги има, са в областта на средните и високи честоти и са маскирани от шума. Затова кепстралният анализ в случая е неизползваем.

### 4. Информация за обекта на изследването

Методът е проверен от автора чрез прилагането му върху електрическа коса „SF7A214-1“ на фирмата „Сафун“.

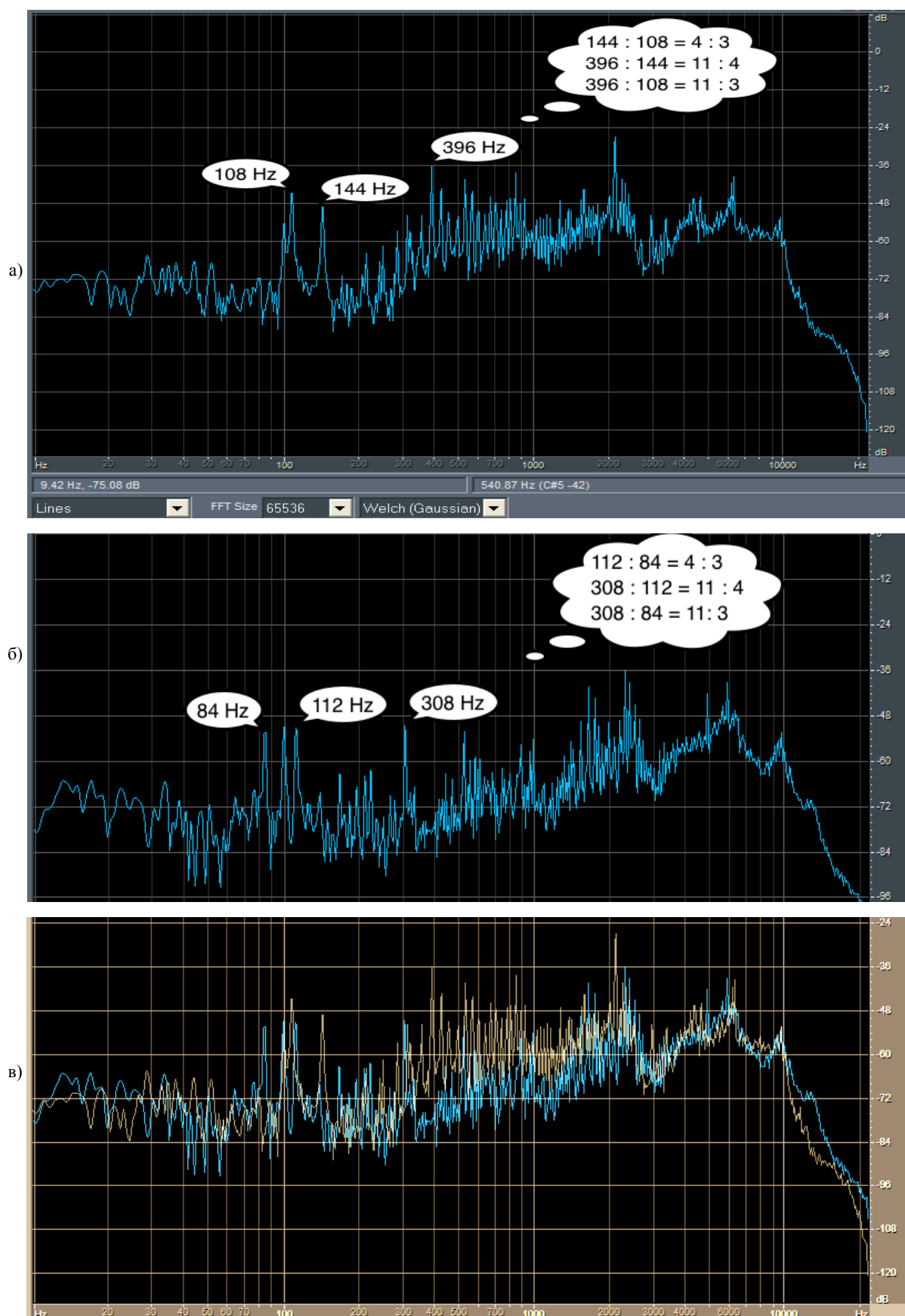


Фиг. 1 Микрофонът (горе) на дръжката на косата (долу).



**Фиг. 2** Различните имена и разцветки, под които се продава електрическата коса „SF7A214-1“ в различните страни:

|              |              |            |               |
|--------------|--------------|------------|---------------|
| „DABC 1400E“ | „MCE 147“    | „ВЭК-2000“ | „ТЭ 1200-38H“ |
| „DABC 1500E“ | „PET 1200CB“ | „ГРЭ-1,5“  | „ТЭ-1400P“    |
| „GET-1500SL“ | „RD-EB1400S“ | „ЗТС-1450“ |               |
| „GT22010“    | „RD-EBC02“   | „CK-1238Э“ |               |
| „HK214“      | „SF7A214-1“  | „TE-1200“  |               |



**Фиг. 3** Спектри на шума от работата на „SF7A214-1“ на пълни обороти (а), понижени обороти (б) и двата насложени (в).

Тази електрокоса се продава в Китай, България, Румъния, Англия и страните от бившия СССР под 17 различни имена (фиг. 2). Тя е подходяща за проверка на метода, защото при нея са изпълнени всичките 4 условия от т. 2 (условие №4 за

променливи обороти се изпълнява от симисторен регулатор на оборотите на колекторния ѝ двигател), както следва:

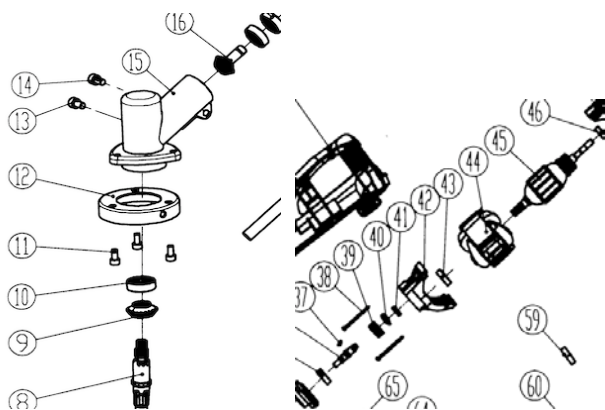
1. В данните на фирмения сайт [3] е дадена номинална скорост на въртене с кордова глава  $7000 \text{ min}^{-1}$  при  $1200 \text{ W}$

консумирана мощност. Измерената консумирана мощност бе 1153 W. Оттук се получава  $1153 : 1200 \times 7000 : 60 \approx 112$  Hz очаквана честота на въртене на вала на кордовата глава. Опитите бяха извършени с по-дебела корда (3 mm вместо 1,6 mm [6]). Поради по-голямото ѝ въздушно съпротивление честотата на въртене може да се очаква леко да се понижи.

2. На чертежа в инструкцията за експлоатация се вижда ъгловата предавка (фиг. 4 вляво), като пиньонът (16) е с видимо малко по-малък диаметър от короната (9), което определя честота на въртене на вала на трансмисията около 120–150 Hz. А редукторът на двигателя (фиг. 4 вдясно) е с пиньон на оста на ротора (45) с видимо 2–3 пъти по-малък диаметър от короната (39). Съответно толкова пъти ще бъде по-висока честотата на въртене на двигателя от тази на вала на трансмисията.

3. Честотата на въртене на всички въртящи се части е достатъчно висока, което означава добра точност на метода.

4. С включване на симисторен регулатор на оборотите може да се направи и второ измерване с понижени обороти, за да се проверят резултатите от измерването с номинални обороти.



Фиг. 4 Ъглова предавка (вляво) и двигател (вдясно).

При проверката на метода звукозаписът бе направен, като микрофонът бе плътно допрян до предната дръжка на косата (фиг. 1), за да се предават най-добре вибрациите ѝ.

### 5. Резултати и дискусия

Поради високото ниво на звука от работата на тази електрокоса се наложи силно да се намали усилването на микрофонния предусилвател, за избягване на „изрязването“ на отчетите. След като това бе постигнато, бяха записани 2 звукови файла – при номинални и при понижени с помощта на симисторен регулатор обороти на двигателя. От тях бяха „изрязани“ участъците на набирането на оборотите след включването на двигателя и на намаляването на оборотите до спирането му след изключването му. На така получените звукови файлове бе направен спектрален анализ с помощта на звуковия редактор „Cool Edit Pro“ версия 2.1 (фиг. 3). Стойностите на честотите от анализа бяха „експортирани“ като текстови файлове, в които бяха намерени стойностите на максимумите, показани на фиг. 3а (за номинални) и 3б (за понижени обороти), както следва:

а) номиналната честота на въртене на вала (8) от фиг. 4 се оказва 108 Hz, на вала на трансмисията 144 Hz, а на двигателя – 396 Hz; разделени на 36, те дават предавателни числа съответно  $144 : 108 = 4 : 3$  ( $1\frac{1}{3}$ ) и  $396 : 144 = 11 : 4$  ( $2\frac{3}{4}$ ), а общото предавателно число на двата редуктора се получава  $396 : 108 = 11 : 3$  ( $3\frac{2}{3}$ );

б) при понижени обороти валът (8) от фиг. 4 се въртя с честота 84 Hz, валът на трансмисията – с 112 Hz, а роторът

на двигателя – с 308 Hz; разделени на 28, те дават следните предавателни числа:  $112 : 84 = 4 : 3$  и  $308 : 112 = 11 : 4$ , като общото предавателно число става  $308 : 84 = 11 : 3$  – пълно съвпадение с резултатите при номинални обороти от т. (а).

Дори при измерването да не се получат толкова лесни за превръщане в рационални числа стойности, може да се използва „Matlab“ или подобна програма за апроксимация на тези съотношения на честотите до рационални числа.

Повтарящи се и следователно независещи от оборотите честоти на спектрите от фиг. 3а и 3б са 100 Hz и 9,8 kHz, което се установи с наслагване на двата спектъра (фиг. 3в). 100 Hz е удвоената честота на мрежовото напрежение. За честотата 9,8 kHz може да се предполага, че се получава от свиренето при засмукването на въздуха от вентилатора през отворите за охлаждане на двигателя (фиг. 5). Но тая честота е далеч от честотите на въртене на валовите и на двигателя.



Фиг. 5 Охлаждащи отвори и вентилаторна перка с белег.

Получените предавателни числа бяха проверени чрез поставяне на отметка на една от перките на вентилатора за охлаждане на двигателя (фиг. 5) и завъртането на кордовата глава на 3 оборота, при което тази отметка се завъртя около оста на двигателя 11 пъти. По подобен начин бе проверено и предавателното число на ъгловата предавка с разглобена щанга на трансмисията, за да се вижда зегерката на вала ѝ.

### 6. Заключение

Проверката на гореописания виброакустичен метод показва, че при спазване на условията за приложението му той дава възможност точно да се определят предавателните числа на редукторите на непознати или недостатъчно изучени машини и механизми, без да се налага те да се разглобяват, за да се преброят зъбите на зъбните им колела.

Авторът благодари на д-р инж. Христо Живомиров за предоставената литература относно анализа на вибрациите и шума с цел диагностика на лагери и зъбни предавки.

### 7. Литература

1. Orthwein, W., [Determination of Gear Ratios](#), *Gear Technology*, ISSN 0743-6858, September 1984, pp. 35, 36, 44.
2. Randall, R., [A History of Cepstrum Analysis and its Application to Mechanical Problems](#), *Proceedings of the International Conference Surveillance 7*, Chartres, 2013, pp. 11–16.
3. [SF7A214-1 Electric Grass Trimmer](#), Zhejiang Safun Industrial Co., Ltd., Yongkang, 15 September 2015.

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                                   |

## МУЛТИМЕДИЕН ПЛЕЙЪР ЗА АНДРОИД ВЪЗПРОИЗВЕЖДАЩ АУДИО И ВИДЕО

### MULTIMEDIA PLAYER FOR ANDROID WITH AUDIO AND VIDEO PLAYBACK

инж. Михаил Михайлов Стоянов, изучаващ магистратура по мобилни и оптични комуникации в ТУ-Варна

ръководител: доц. Екатеринослав Сираков

Технически Университет - Варна

Abstract: The following document shows the process of making a multimedia player, without going too deep into coding. It shows, the operational principle of every stage in the making of that player. Those stages involve 1) Getting information about the desired files and putting them into a list 2) Video playback 3) Audio playback.

Keywords: Android, player, audio, video

#### **1. Увод**

Броят на устройствата с операционна система андроид нараства всяка година, но плейърите за възпроизвеждане на аудио и видео файлове остават разделени на отделни приложения.

Настоящата публикация има за цел да открие, дали причината за това се корени в невъзможност за техническо изпълнение.

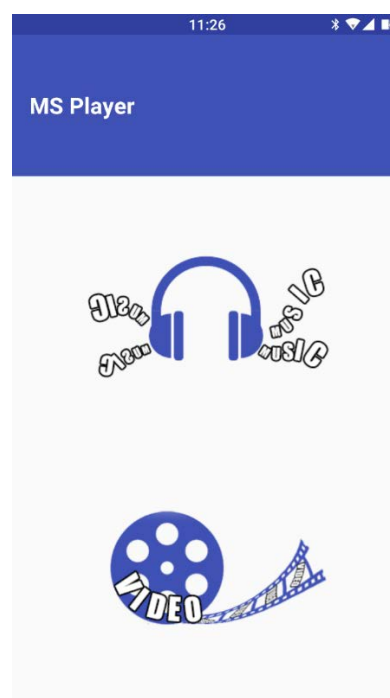
Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са извършени по проект НП7/2016г. в рамките на присъщата на ТУ-Варна научноизследователска дейност, финансирана целево от държавния бюджет.

#### **2. Обзор:**

Проектът е изработен на Android Studio и има за цел създаването на мултимедийен плейър, който да отговаря на следните изисквания:

- Предназначен за операционната система Android KitKat и по-съвременни
- Възпроизвежда аудио файлове
- Възпроизвежда видео файлове

Фигура



1.

Начален екран на мултимедийния плейър

#### **3. Основни етапи:**

- Извеждане на файловете в лист
- Възпроизвеждане на видео
- Възпроизвеждане на аудио

#### **4. Реализация:**

Извеждане на файловете в лист



Фигура 2. Принцип на извеждане на видео файловете в лист

За целта се създават класове, които да дефинират, каква информация е необходима за файловете.

|               |               |
|---------------|---------------|
| За аудио:     | За видео:     |
| -индекс       | -индекс       |
| -име на файла | -име на файла |
| -изпълнител   | -тъмбнейл     |

Използва се метод, който намира аудио или видео файлове, събира зададената информация и ги добавя в масив, който за потребителя ще се изобразява като лист.

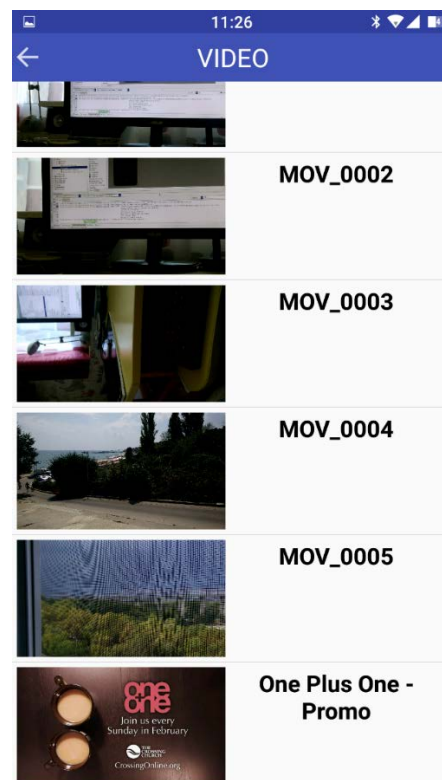
```
public void getVideoList() {
    ContentResolver videoResolver = getContentResolver();
    Uri videoUri=
    MediaStore.Video.Media.EXTERNAL_CONTENT_URI;
    Cursor videoCursor = videoResolver.query(videoUri, null,
    null, null, null);
    if(videoCursor!=null && videoCursor.moveToFirst()) {
        int titleColumn=videoCursor.getColumnIndex(
            MediaStore.Video.Media.TITLE);
        int ThumbnailColumn=videoCursor.getColumnIndex(
            MediaStore.Video.Thumbnails.DATA);
        int IdColumn= videoCursor.getColumnIndex(
            MediaStore.Video.Media._ID);
        do {
            long vidId=videoCursor.getLong(IdColumn);
            String vidTitle=videoCursor.getString(titleColumn);
            Bitmap vidThumbnail=
            ThumbnailUtils.createVideoThumbnail(videoCursor.getString(
            ThumbnailColumn),
            MediaStore.Video.Thumbnails.MINI_KIND);
            videoList.add(new Video(vidId, vidTitle,
            vidThumbnail));
        } while (videoCursor.moveToNext());
    }
}
```

Добавяме метод, който сравнява имената на файловете и ги подрежда по азбучен ред.

```
Collections.sort(videoList, new Comparator<Video>() {
    @Override
    public int compare(Video a, Video b) {
        return a.getvidTitle().compareTo(b.getvidTitle());
    }
});
VideoAdapter vidAdt=new VideoAdapter(this, videoList);
videoView.setAdapter(vidAdt);
vidPosn=0;
```

Създава се лейаут, който дефинира подредбата на отделните елементи от информация, която е зададена. Натискането на този елемент води до метод, който ще служи за избиране на самият елемент.

За свързването на лейаута с плейъра се използва адаптер клас.



Фигура 3. Завършен вид на листа с видео файлове

#### Възпроизвеждане на видео



Фигура 4. Принцип на действие възпроизвеждането на видео файлове

Създава се ново активити, което ще служи като екран.

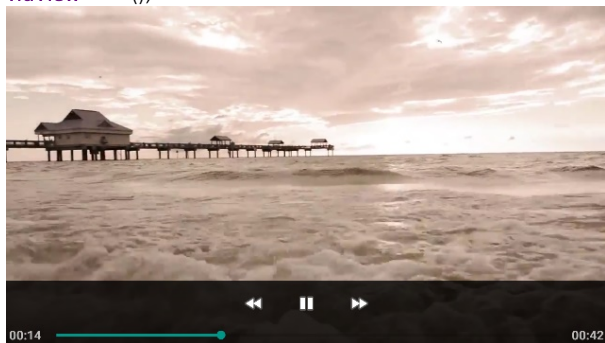
При селектиране на видео файл от листа се използва метод, който взема неговото местоположение на устройството и го препраща към екрана.

```
public void videoPicked(View view) {
    setVid(Integer.parseInt(view.getTag().toString()));
    Video playVideo = videoList.get(vidPosn);
    long currVideo=playVideo.getvidId();
    Uri vidUri=ContentUris.withAppendedId(
        MediaStore.Video.Media.EXTERNAL_CONTENT_URI,
        currVideo);
    vidPath=vidUri.toString();
    Intent gotoVid = new Intent(this, vidPlayer.class);
    gotoVid.putExtra("vidPath", vidPath);
    startActivity(gotoVid);
}
```

В класът на екрана се създава MediaController, който дава възможност на потребителя да паузира, превърта напред или назад видеото. Също така видеото се зарежда и пуска.

```
vidView=(VideoView) findViewById(R.id.vidView);
vidView.setVideoPath(getIntent().getExtras().getString("vidPath"));
MediaController vidControl = new MediaController(this);
vidControl.setAnchorView(vidView);
```

```
vidView.setMediaController(vidControl);
vidView.start();
```



Фигура 5. Екран по време на възпроизвеждане

## Възпроизвеждане на аудио



Фигура 6. Принцип на действие възпроизвеждането на аудио

Създава се сървис клас, който ще служи за възпроизвеждане на аудио, държане на устройството в полубуден режим и изкарване на известие, което да показва името на възпроизвежданият в момента файл.

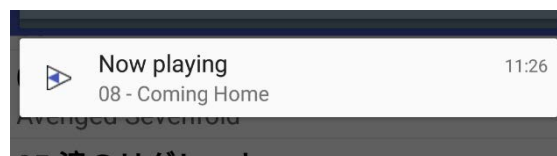
```
public void initAudioPlayer() {
    player.setWakeMode(getApplicationContext(),
        PowerManager.PARTIAL_WAKE_LOCK);

    player.setAudioStreamType(AudioManager.STREAM_MUSIC);
    player.setOnPreparedListener(this);
    player.setOnCompletionListener(this);
    player.setOnErrorListener(this);
}
```

```
public void playSong(){
    player.reset();
    Song playSong= songs.get(songPosn);
    songTitle=playSong.getTitle();
    long currSong=playSong.getId();
    Uri trackUri= ContentUris.withAppendedId(
        MediaStore.Audio.Media.EXTERNAL_CONTENT_URI,
```

```
currSong);
try{
    player.setDataSource(getApplicationContext(), trackUri);
}
catch(Exception e){
    Log.e("AUDIO SERVICE", "Error setting data source", e);
}
player.prepareAsync();
}
```

```
@Override
public void onPrepared (MediaPlayer player) {
    player.start();
    Intent notIntent = new Intent(this, Music_activity.class);
    notIntent.addFlags(Intent.FLAG_ACTIVITY_CLEAR_TOP);
    PendingIntent pendInt = PendingIntent.getActivity(this, 0,
        notIntent, PendingIntent.FLAG_UPDATE_CURRENT);
    Notification.Builder builder = new Notification.Builder(this);
    builder.setContentIntent(pendInt)
        .setSmallIcon(R.drawable.android_music_player_play)
        .setTicker(songTitle)
        .setOngoing(true);
    builder.setContentTitle("Now playing")
        .setContentText(songTitle);
    Notification not = builder.build();
    startForeground(NOTIFY_ID, not);
}
```



Фигура 7. Известие показващо възпроизвежданият в момента файл

Свързват се двата класа посредством binder.

Сървис:

```
public class MusicBinder extends Binder {
    AudioService getService(){
        return AudioService.this;
    }
}

private final IBinder musicBind = new MusicBinder();

@Override
public IBinder onBind(Intent intent) {
    return musicBind;
}

@Override
public boolean onUnbind(Intent intent){
    player.stop();
    player.release();
    return false;
}
```

Плейър:

```
private ServiceConnection musicConnection = new
ServiceConnection() {
    @Override
    public void onServiceConnected(ComponentName name,
        IBinder service) {
```

```

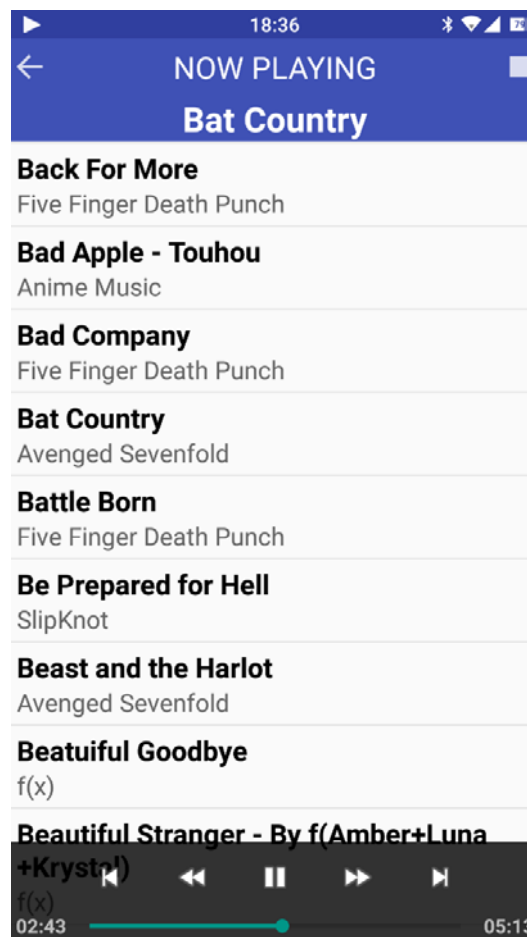
    AudioService.MusicBinder binder =
(AudioService.MusicBinder) service;
    aService = binder.getService();
    aService.setList(songList);
    musicBound = true;
}

    При избиране на файл от листа се използват
методи, които пускат сървис класът, зарежда се
избраният файл в плейъра и се пуска за възпроизвеждане.

public void songPicked(View view){
    aService.setSong(Integer.parseInt(view.getTag().toString()));
    aService.playSong();
    nowPlayLayout.setVisibility(LinearLayout.VISIBLE);
    status.setText("NOW PLAYING");
    nowPlaying.setText(aService.songTitle);
    if(playbackPaused==true || paused==true){
        setController();
        playbackPaused=false;
        controller.show(0);
        nowPlaying.setText(aService.songTitle);
    }
    else
        controller.show(0);
}

@Override
protected void onStart() {
    super.onStart();
    if (playIntent == null) {
        playIntent = new Intent(this, AudioService.class);
        bindService(playIntent, musicConnection,
Context.BIND_AUTO_CREATE);
        startService(playIntent);
    }
}
}

```



Фигура 8. Аудио плейъра по време на възпроизвеждане на файл

## 5. Заключение

Разработеното приложение отговаря на първоначалните изисквания.

Липсата на подобни приложения за платформата не са основани на невъзможност за техническо изпълнение.

## 6. Литература

- [1] Grant Allen , Beginning Android, 5th edition, New York, apress, 2016, 219-232
- [2] Интернет базирана информация:  
<https://developer.android.com/training>
- [3] Интернет базирана информация:  
<http://stackoverflow.com/search?q=Android+Studio>
- [4] Интернет базирана информация:  
<https://code.tutsplus.com/tutorials/create-a-music-player-on-android-song-playback--mobile-22778>

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p style="margin: 0;"><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                                      |

## ГЕНЕРИРАНЕ НА ИЗМЕРВАТЕЛНИ СИГНАЛИ С РАЗЛИЧНА ФОРМА НА ОБВИВАЩА ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА MATLAB

### GENERATION OF MEASUREMENT SIGNALS WITH DIFFERENT ENVELOPING FORM USING MATLAB IMPLEMENTATION

инж. Георги Марков

Технически университет - Варна, България. E-mail: [georgi.s.markov@mail.bg](mailto:georgi.s.markov@mail.bg)

доц. д-р инж. Екатеринослав Сираков

Технически университет - Варна, България. E-mail: [katosirakov@avb.bg](mailto:katosirakov@avb.bg)

#### Abstract

In the present paper the problem about generation of measurement signals with different enveloping form, used for acoustic and audio measurements, is considered. The generation of the signals is accomplished through Matlab® solutions. Short theoretical definitions of the generated signals are given. Matlab® scripts for generation of each of the signals are suggested. Conclusions with practical value have been made. Topics for future work are also considered.

**Keywords:** signals, generation, measurement, Matlab®.

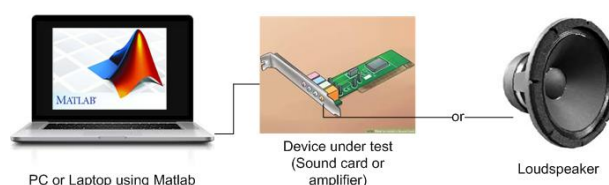
#### УВОД

В настоящата статия се разглежда въпросът за генерирането на тестови сигнали с различна форма на обвиваща, използвани за акустични и аудио измервания. Показано е приложението на програмния продукт Matlab®, като са използвани възможностите предоставени от Signal Processing Toolbox [1] и Data Acquisition Toolbox [2]. Като изходно периферно устройство е показано използването на вградена или външна звукова карта (soundcard). Даден е общ алгоритъм за генериране на сигнали с Matlab®. Представени са сигнали с различна форма на обвиващата във времевата област.

Генерирането (синтезирането) на изпитателни (тестови) сигнали заема централно място в сферата на реализацията, практическите изследвания и измервания на веригите и системите (circuits and systems), както в областта на сигналите и системите (signals and systems) така и в областта на акустиката. Глобално погледнато въпросът се разпростира върху цели области от познанието: образна диагностика, геодезия, сеизмология, радио-, хидро- и аудио- локацията, архитектурна акустика, машиностроене, идентификацията на системи и редица други.

### 1. ПРЕДПОСТАВКИ И НАЧИНИ ЗА РЕШАВАНЕ НА ПРОБЛЕМА

На фиг. 1 е представена схема на опитна постановка за генериране на измервателните сигнали чрез използване звукова карта, персонален компютър (лаптоп) и възможностите на програмния продукт Matlab®. На изхода на аудиокартата може да се включват различни устройства които са обект на изследване (напр. филтри, усилватели и др.) или преобразователи (напр. високоговорител, хидрофон и др.).



Фиг. 1. Схема на опитната постановка

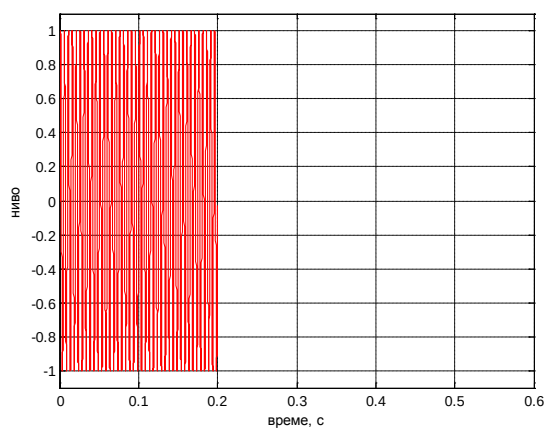
В настоящото изследване се използва стандартна звукова карта – Realtek High Definition Audio. Последната е разглеждана като DAQ-система, притежава параметри:

- честота на дискретизация: 8000, 16000, 24000, 44100, 48000, 96000 Hz;
- 16 bit DAC/ ADC → ≈ 90 dB динамичен диапазон;
- тип на изхода – AC;

Тези параметри на хардуера и програмния продукт Matlab® позволяват да се генерират различни измервателни сигнали в аудиочестотния обхват.[5] За синтезирането на тестови сигнали е използвана 32-битова версия на Matlab. В зависимост от характера на изследването и вида на устройствата, които ще се изследват може да се генерира честота на запълване от хармоничен вид функция описана с израза:

$$(1) \quad x(t) = \sin(\omega_0 t) = \sin(2\pi f_0 t) \quad [3]$$

Стандартния тестов сигнал с правоъгълна форма на обвиващата и ниво 1 V, със запълваща честота 200 Hz и времетраене 0,2s и период на повторение е показан на фиг.1.

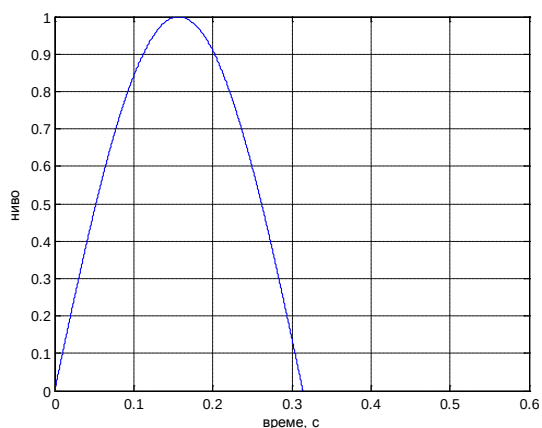


Фиг. 2. Правоъгълен сигнал, с продължителност – 0,2s, честота  $f_0=200\text{Hz}$  и период на повторение 0,2s.

За изменение на формата на обвиващата се използват функции от вида:

- хармонична форма:

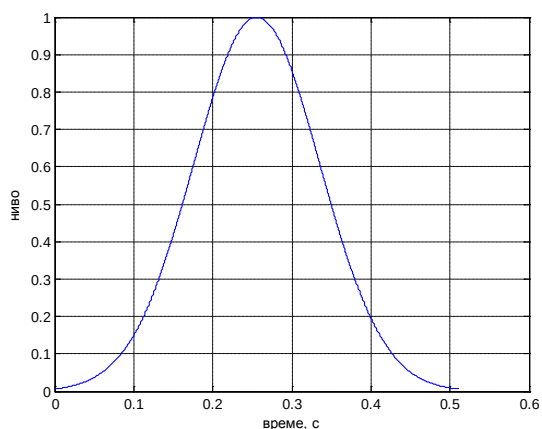
(2)  $A(t) = \sin(\varphi_a t)[4]$



Фиг. 3. Графика на функция  $\sin(\varphi_a t)$

- форма с функция на Гаус:

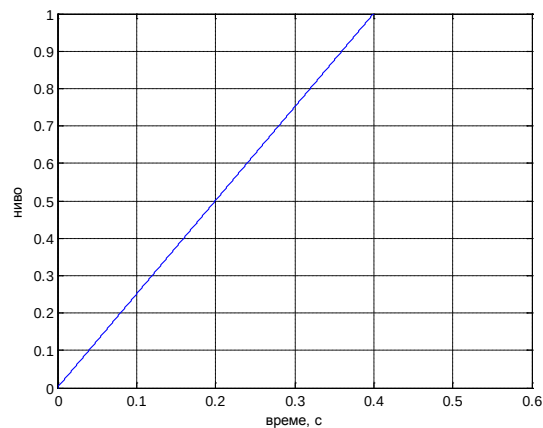
(3)  $A(t) = ae^{-\frac{(t-b)^2}{2c^2}}[4]$



Фиг. 4. Графика на функция на Гаус

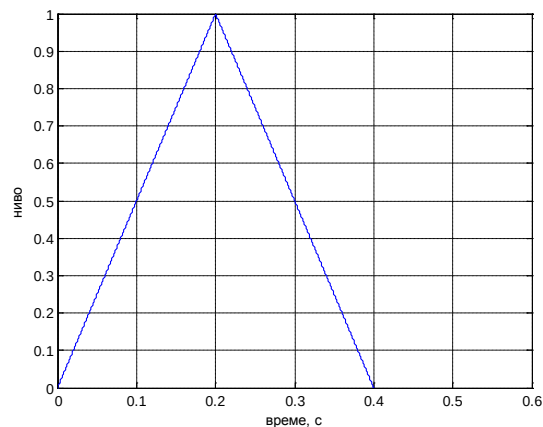
- триънообразна форма (линейно нарастване на формата на обвиващата от 0 до 1V)

(4)  $A(t) = k \cdot t$



Фиг. 5. Графика на триънообразна функция триъгълна форма:

(5) 
$$A(t) = \begin{cases} 0, & t = 0 \\ 1, & t = ttri - \frac{t}{\tau}, t \leq \tau[4] \\ 0, & t = ttri \end{cases}$$



Фиг. 6. Графика на функция с форма равнобедрен триъгълник

Основни критерии заложи при изследването са константна площ на генерираните импулси и максимално ниво от 1V, а продължителността на генерираните импулси се изменя за осигуряване на еднаква площ на сигналите.

За получаване на различна форма на сигнала се използва умножение на функциите на запълващата и на обвиващата:

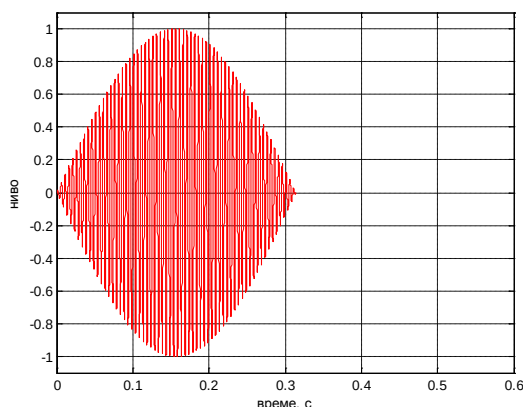
(6)  $y(t) = A(t) * x(t)$

За генерираните сигнали чрез *Matlab*® за постигане на константна площ се използват следните изрази на математическите функции:

- звуков тестов сигнал хармонична форма на обвиващата:

(7)  $y_{sin}(t) = \sin(3.18051612 * \pi * tsin) * \sin(2 * \pi * f_0 * tsin),$

където продължителността  $tsin$  е 0.314 s, а максимумът от 1 V се достига при 0,157 s.

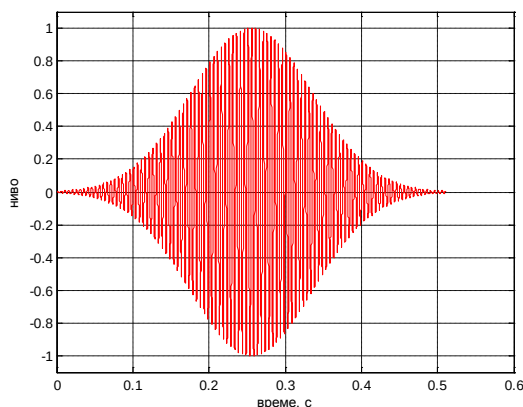


Фиг. 7. Графика на звуков тестов сигнал съгласно израз (7) с  $f_0=200\text{Hz}$

- звуков тестов сигнал с форма на обвиващата функция на Гаус:

$$(8) \quad y_g(t) = e^{-\frac{(t_g-0.2557)^2}{2.0799^2}} \sin(2\pi f_0 t_g),$$

където продължителността  $t_g$  е 0.5114s, а максимумът от 1 V се достига при 0,2557 s.

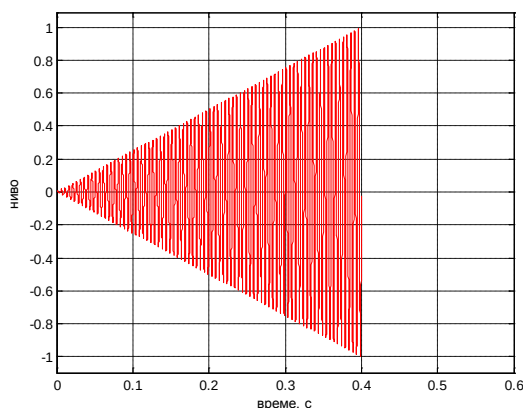


Фиг. 8. Графика на звуков тестов сигнал съгласно израз (8) с  $f_0=200\text{Hz}$

- звуков тестов сигнал с триънообразна форма на обвиващата:

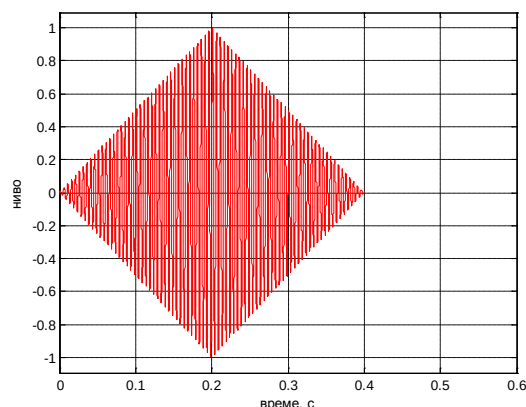
$$(9) \quad y_{saw}(t) = 2.5 t_{saw} \sin(2\pi f_0 t_{saw}),$$

където продължителността  $t_{saw}$  е 0.4 s, а максимумът от 1 V се достига при 0,4 s.



Фиг. 9. Графика на звуков тестов сигнал съгласно израз (9) с  $f_0=200\text{Hz}$

Сигнал с форма равнобедрен триъгълник с продължителност  $t_{tri} = 0.4\text{ s}$ , а максимумът от 1 V се достига при време 0,2 s.



Фиг. 10. Графика на звуков тестов с форма на равнобедрен триъгълник и  $f_0=200\text{Hz}$

Коефициентите в изразите са подбрани по такъв начин, че да се получат равни площи на импулсите следователно да е изпълнено условието за равна енергия на генерираните сигнали.

Използването на прозрачни тестови сигнали започващи от нула и достигащи максимум 1 V за експерименти с електромеханични системи, каквито са електроакустичните преобразователи допринася за предпазването на мембраните им от резки реакции в началото и края на сигнала[6].

## 2. РЕШЕНИЕ НА ПРОУЧВАНИЯ ПРОБЛЕМ

За осъществяване на генериране на звукови сигнали посредством звуковата карта на персонален компютър с Matlab® е необходимо: да се конфигурира Аналогов изход и да се зададе честота на дискретизация[5], което при 32-битовите версии на Matlab се осъществява по следния начин:

```
A0=analogoutput('winsound');
addchannel(A0,1);
A0.SampleRate=44100;
```

След което е необходимо да се зададат основните променливи за генерирането на сигналите: продължителност на импулса, времетраене на изследването[7]:

```
endtimesq=0.2;
tsq=(0:1/A0.sampleRate:endtimesq-
1/A0.SampleRate)';
endtimesaw=0.4;
tsaw=(0:1/A0.sampleRate:endtimesaw-
1/A0.SampleRate)';
endtimesin=0.314;
tsin=(0:1/A0.sampleRate:endtimesin-
1/A0.SampleRate)';
endtimeg=0.5114;
tg=(0:1/A0.sampleRate:endtimeg-
1/A0.SampleRate)';
```

Следващ етап е задаване на функциите за генерираните сигнали:

```
ysin=sin(3.18051612
*pi*tsin).*sin(2*pi*f0*tsin);
ysaw=2.5*tsaw.*sin(2*pi*f0*tsaw);
ysq=sin(2*pi*f0*tsq);
yg=exp(-(tg -
0.2557).^2/(2*0.0799^2)).*sin(2*pi*f
0*tg);
w = 400e-3;
```

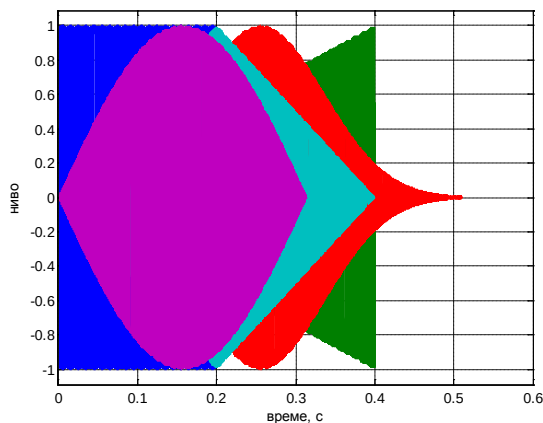
```
ytri=tripuls(ttri-
0.2,w).*sin(2*pi*f0*ttri);
```

В системата е поставена и възможност за въвеждане от оператора на стойност на запълващата честота ( $f_0$ ), на период на повторение ( $p$ ) и брой повторения ( $r$ ), което позволява използването на системата за извършване на разнообразни изследвания с разгледаните сигнали:

```
f0=input('Въведете запълваща честота
в Hz='); %Запълваща честота в Hz;
r=input('Въведете брой на
повторения='); %Брой повторения;
p=input('Период на повторение=');
%Период на повторение в секунди;
```

```
for counter = 1:r
    putdata(A0,[y]);
    start(A0);
    pause(p)
end
```

Системата позволява изобразяване на графиките на описаните в теоретичната постановка на проблема във времевата област (фигури 2,7,8,9,10) с възможност за онагледяване чрез наслагване на графиките на всички разгледани функции (фиг. 11):



Фиг. 11. Обобщена графика на генерираните тестови сигнали с  $f_0 = 2000\text{Hz}$

Системата автоматично изчислява площ на функциите на обвиващата  $A(t)$ , което се явява своеобразно доказателство за константна площ на генерираните сигнали.

```
sgaus=trapz(tg,exp(-(tg -
0.2557).^2/(2*0.0799^2)))
ssin=trapz(tsin,sin(3.180516*pi*tsin))
ssaw=trapz(tsaw,2.5*tsaw)
stri=trapz(ttri,tripuls(ttri-0.2,w))
```

За изобразяване на сигналите във времевата област за всеки тип сигнал се използва команда:

```
plot(t,y),
```

За използване на системата за спектрален анализ е може да се добави възможност за изобразяване на сигналите и в честотната област чрез изобразяване на триизмерна спектрограма и спектрална плътност.

### 3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

Разгледан е проблемът за генериране на аудио измервателни сигнали с променлива форма на обвиващата в средата на Matlab®. Генерираните сигнали се подават на аналоговият изход на звуковата карта (моно). Системата има способността за работа при различни стойности на запълващата честота в звуковия честотен диапазон.

Системата има възможност за определяне на различни стойности на период на повторение и продължителност на паузата.

Предложени са критерии за сравнение на разгледаните тестови сигнали:

- еднаква площ на формата на обвиващата;
- максимална стойност на амплитудата от 1V.

С минимална доработка на предложените кодове, може да се:

- добавят функции за изобразяване на триизмерни спектрограми;
- с минимални доработки могат да се добавят различни математически функции за форма на обвиващата;

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са извършени по проект НП7/2016г. в рамките на присъщата на ТУ-Варна научноизследователска дейност, финансирана целево от държавния бюджет.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модела на изграждане на системата за генериране на сигнали позволява използването и като компонент от по-сложни системи и вграждането и в програмни продукти за извършване на анализ на аудио устройства като източник на тестови сигнали с различна форма на обвиващата.

Системата е приложима при провеждане на научни изследване в областта на акустиката и аудиотехниката.

Настоящата работа може да има приложение във всички сфери на изследователската и инженерна работа, където е необходимо да се генерират измервателни и/или тестови сигнали.

Конкретно приложение на системата ще се търси за извършване на анализ на звукови сигнали в честотната област и акустични измервания на характеристиките на електроакустични преобразователи от различни видове.

Проблема за спектралните характеристики на звукови тестови сигнали с различна форма на обвиващата е разгледан доклад на тема: „Анализ на измервателни сигнали с различна форма на обвиващата в честотната област“.

### ЛИТЕРАТУРА:

- [1] *Signal Processing Toolbox User's Guide.pdf*. The MathWorks Inc, 2010 revised for version 6.14 (2010b);
- [2] *Data Acquisition Toolbox User's Guide.pdf*. The MathWorks Inc, 2010 revised for version 2.17 (2010b);
- [3] А. Опенхайм, А. Уилски, Я. Йънг. *Сигнали и системи*. СОФИЯ, „ТЕХНИКА“, 2002;
- [4] K.M.M. PRABHU, *Window functions and their applications in signal processing*, CRC Press Taylor & Francis Group 2014
- [5] Хр. Живомиров, И. Илиев. *Генериране на измервателни сигнали с приложение на Matlab*, Международна научна конференция АКУСТИКА 2013 Година XV, брой 15, Декември 2013 г. ISSN 1312-4897
- [6] И. Илиев, Ек. Сираков, Хр. Живомиров. *ACOUSTIC EXAMINATION OF THE ANECHOIC CHAMBER IN TECHNICAL UNIVERSITY - VARNA*, Международна научна конференция АКУСТИКА 2014 Година XVI, брой 16, Декември 2014 г. ISSN 1312-4897
- [7] Ек. Сираков. *Електроакустика*, Варна, Технически университет – Варна, 2008.

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                   |

## АНАЛИЗ НА ИЗМЕРВАТЕЛНИ СИГНАЛИ С РАЗЛИЧНА ФОРМА НА ОБВИВАЩАТА В ЧЕСТОТНАТА ОБЛАСТ

### ANALYSIS OF MEASUREMENT SIGNALS WITH DIFFERENT ENVELOPING FORM IN FREQUENCY DOMAIN

доц. д-р инж. Екатеринослав Сираков

Технически университет - Варна, България. E-mail: [katiosirakov@avb.bg](mailto:katiosirakov@avb.bg)

инж. Георги Марков

Технически университет - Варна, България. E-mail: [georgi.s.markov@mail.bg](mailto:georgi.s.markov@mail.bg)

#### Abstract

In the present paper the problem about spectral characteristics of measurement signals with different enveloping form, used for acoustic and audio measurements, is considered. Analysis of the signals is accomplished in frequency domain. Short theoretical definitions of the spectral characteristics is being given. Conclusions with practical value have been made. Topics for future work are also considered.

**Keywords:** signals, analysis, measurement.

#### УВОД

В настоящата статия се разглежда въпросът за спектралните характеристики на тестови сигнали с различна форма на обвиваща, използвани за акустични и аудио измервания. Осъществено е изобразяване на сигнали в честотната област. Представени са сигнали с променлива форма на обвиващата в честотната област.

Извършен е анализ на спектрални характеристики на измервателни сигнали с различна форма на обвиващата.

Глобално погледнато въпросът се разпростира върху цели области от познанието: образна диагностика, геодезия, сеизмология, радио-, хидро- и аудио- локацията, архитектурна акустика, машиностроене, идентификацията на системи и редица други.

### 1. ПРЕДПОСТАВКИ И НАЧИНИ ЗА РАЗРЕШАВАНЕ НА ПРОБЛЕМА

За изследване на спектралните характеристики на звукови тестови сигнали се използват математически изрази на прозоречни функции запълнени с честота на запълване.

За описване на запълващата честота се използва изразът:

$$(1) \quad x(t) = \sin(\omega_0 t) = \sin(2\pi f_0 t) \quad [2].$$

Изследвани са сигнали със следните форми на обвиващата:

- Хармонична – (2)  $A(t) = \cos(\varphi_a t) \quad [3];$

- Гаусова – (3)  $A(t) = e^{-(bt)^2} \quad [3];$

- Триъгълна – (4)  $A(t) = \begin{cases} 1 - \frac{|t|}{\tau}, & |t| \leq \tau \\ 0, & |t| > \tau \end{cases} \quad [3].$

Сравнени със стандартен тестов сигнал с правоъгълна форма на обвиващата при еднаква стойност на запълващата честота  $f_0 = 10\text{Hz}$

За получаване на различна форма на обвиващата се използва умножение на функциите на запълващата и на обвиващата:

$$(5) \quad y(t) = A(t) * x(t)$$

Стандартен тестов сигнал с правоъгълна форма на обвиващата описан с израз (1) е изобразен във времевата област на фиг. 1. Изследваните сигнали с хармонична, Гаусова и триъгълна форма описани с аналитични изрази (2), (3) и (4) са изобразени на фиг. 2, 3 и 4.

Основен способ за решение на научния проблем в настоящото изследване е решение на интеграл на Фурие за спектралната плътност:

(6)

Интеграл на Фурие за спектрална плътност на стандартен тестов сигнал с правоъгълна форма на обвиващата.

(7)

Интеграл на Фурие за спектрална плътност на тестов сигнал с хармонична форма на обвиващата.

(8)

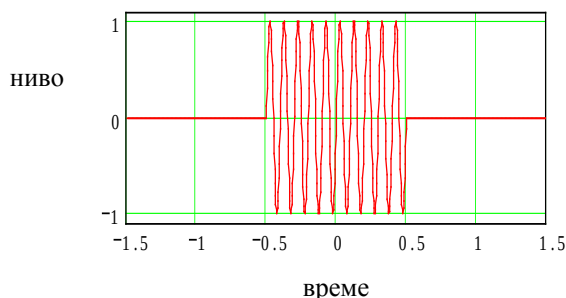
Интеграл на Фурие за спектрална плътност на тестов сигнал с Гаусова форма на обвиващата.

$$(9) \quad \text{triangle}(t) = \begin{cases} 0, & -\infty \leq t \leq -1 \\ (t+1), & -1 \leq t < 0 \\ (-t+1), & 0 \leq t < 1 \\ 0, & 1 \leq t < \infty \end{cases}$$

Израз (9) описва формата на равнобедрен триъгълник

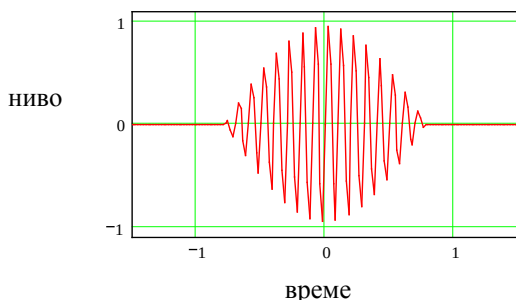
(10)

Интеграл на Фурие за спектрална плътност на тестов сигнал с триъгълна форма на обвиващата.

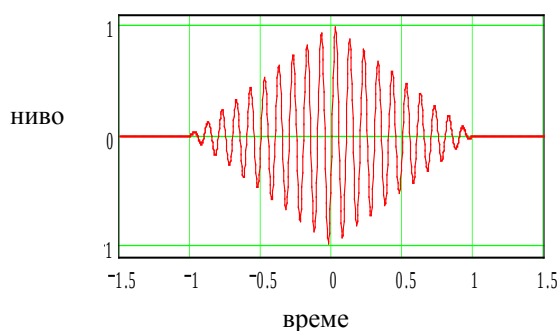


Фиг. 1. Сигнал със стандартна правоъгълна форма с честота 10 Hz и продължителност 1s.

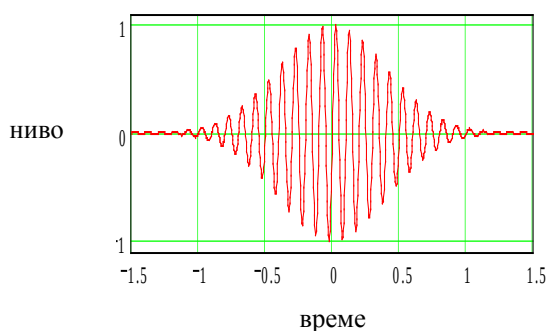
Следващ сигнал използван в изследването е с косинусоидална форма:



Фиг. 2. Сигнал с косинусоидална форма на обвиващата и честота на запълване 10 Hz и продължителност  $\frac{\pi}{2}$ .



Фиг. 3. Сигнал с триъгълна форма на обвиващата и честота на запълване 10 Hz и продължителност 2 s.

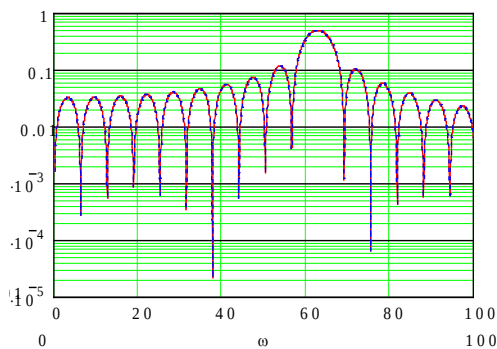


Фиг. 4. Сигнал с Гаусова форма на обвиващата и честота на запълване 10 Hz и продължителност 3 s.

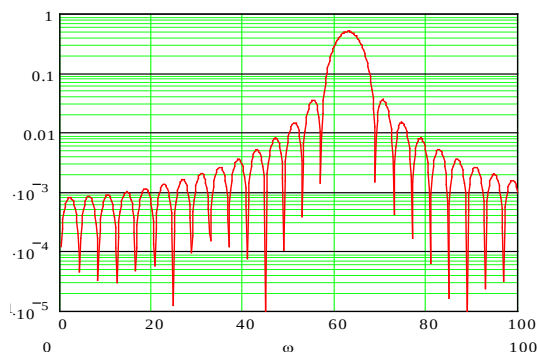
Изобразения на фиг. 4 сигнал е с Гаусова константа  $b=1.772$

## 2. РЕШЕНИЕ НА ПРОУЧВАНИЯ ПРОБЛЕМ

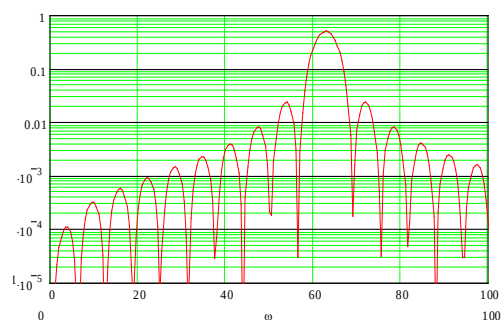
За анализ на изследваните сигнали изобразени на фиг.1,2,3 и 4 в честотната област е необходимо извършване на право и обратно преобразование на Фурие и решение на интеграла на Фурие за получаване на спектралната плътност[4], [5], [6].



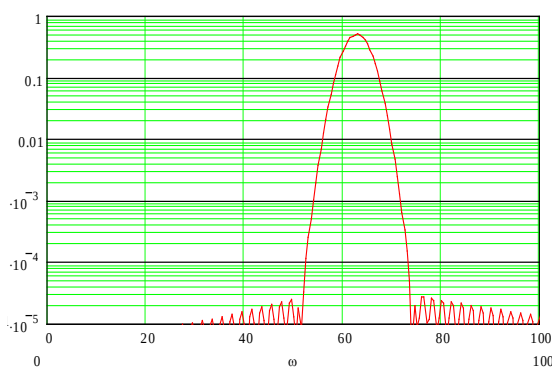
Фиг. 5. Модул на спектралната плътност на стандартен тестов сигнал с правоъгълна форма.



Фиг. 6. Модул на спектралната плътност на сигнал с хармонична форма.



Фиг. 7. Модул на спектралната плътност на сигнал с триъгълна форма.



Фиг. 8. Модул на спектралната плътност на сигнал с Гаусова форма.

Резултат от решенията на интеграла на Фурие за спектралните плътности са ширините на спектъра и нивото на първите странични листи за всеки един от разглежданите сигнали:

Таблица 1. Резултати от извършени аналитични изследвания на спектрални съставляващи на сигнали с различна форма на обвиващата

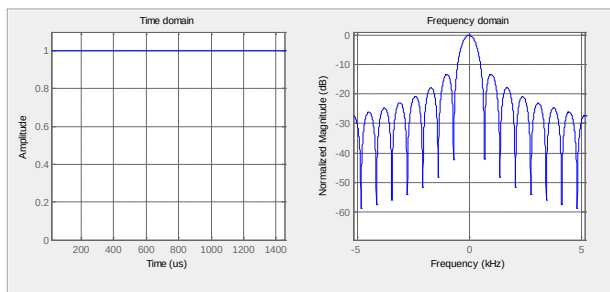
| Изследвана спектрална характеристика             | Форма сигнал |         |                       |           |
|--------------------------------------------------|--------------|---------|-----------------------|-----------|
|                                                  | Правоъгълна  | Косинус | Гаус                  | Триъгълна |
| Ширина на спектрална плътност при ниво 0,1       | 10,3         | 9,15    | 9                     | 8,2       |
| Ширина на спектрална плътност при ниво $10^{-3}$ | 12,5         | 12,1    | 17                    | 12,2      |
| Ниво на първа спектрална съставляваща            | 0.12         | 0,035   | $2,468 \cdot 10^{-5}$ | 0.023     |

Основни критерии заложили при извършване на анализа на спектралните характеристики на сигнали с различна форма на обвиващата са:

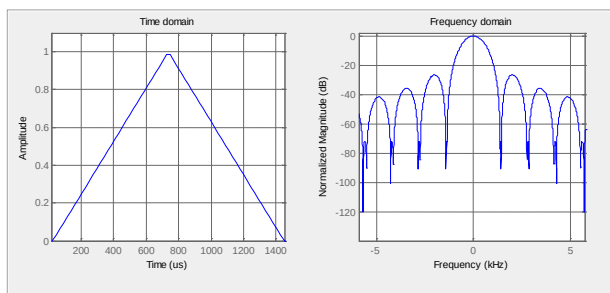
- Ширина на лентата при ниво 0,1
- Ширина на лентата при ниво  $10^{-3}$
- Ниво на първа спектрална съставляваща.

От получени те резултати се заключава, че тестов сигнал с Гаусова форма е с най-подходящи спектрални характеристики за изследване на електроакустични преобразователи и лабораторни изследвания в областта на акустиката.

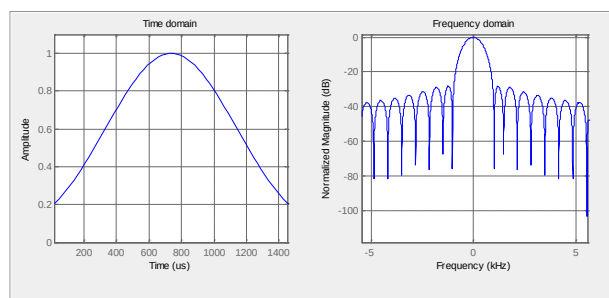
За изследване на намаляването на нивата на страничните спектрални съставляващи в настоящото изследване се използва Matlab инструмент Window Visualization Tool (wvtool), който освен графично изобразяване предоставя и информация за: Leakage Factor (Фактор на загубите), Relative sidelobe attenuation (Относително отслабване на страничните съставляващи) и Mainlobe width (Ширина на основната спектрална съставляваща) [1].



Фиг. 9. Тестов сигнал с правоъгълна форма на обвиващата симулиран в 64 точки с честота на дискретизация 44100Hz.



Фиг. 10. Тестов сигнал с триъгълна форма на обвиващата симулиран в 64 точки с честота на дискретизация 44100Hz.



Фиг. 11. Тестов сигнал с Гаусова форма на обвиващата симулиран в 64 точки с честота на дискретизация 44100Hz и Гаусова константа 1,772.

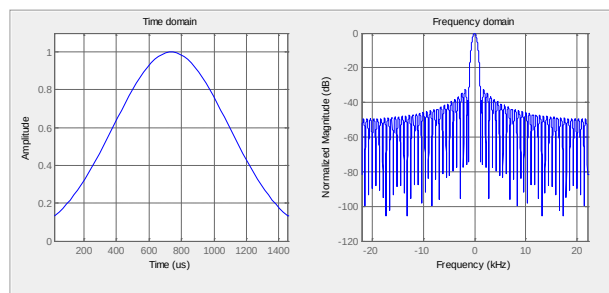
Таблица 2. Резултати от извършени симулационни изследвания на спектрални съставляващи на сигнали с различна форма на обвиващата с Matlab.

| Изследвана спектрална характеристика                      | Форма сигнал |       |           |
|-----------------------------------------------------------|--------------|-------|-----------|
|                                                           | Правоъгълна  | Гаус  | Триъгълна |
| Фактор на загубите (%)                                    | 9.63         | 0.44  | 0.29      |
| Относително отслабване на страничните съставляващи (dB)   | -13          | -28.3 | -26.5     |
| Ширина на основната спектрална съставляваща при -3dB (Hz) | 602          | 764   | 882       |

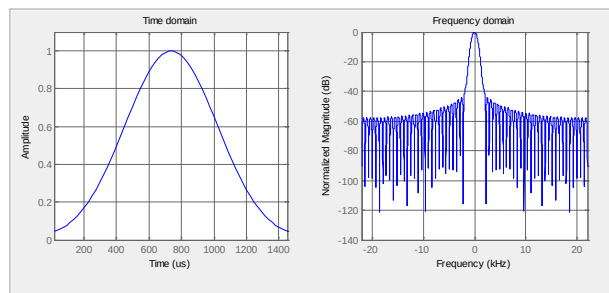
Резултатите получени от изследваните прозрачни функции потвърждават аналитичните резултати и доказват преимуществата на тестов сигнал с Гаусова форма на обвиващата.

Гаусовата функция е от така наречените функции с възможност за настройка (Adjustable Function) т. е. формата е постоянна във вид на камбана, но в зависимост от константата на Гаус се променя нейната ширина[3].

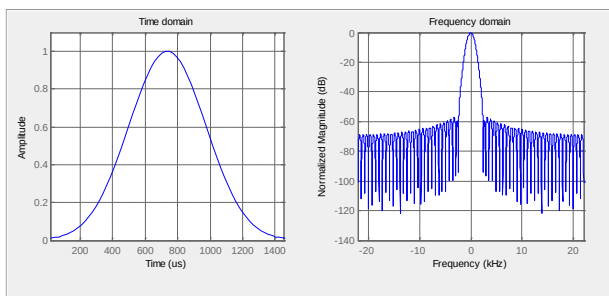
Следващ етап от изследването е сравнение на тестови сигнали с Гаусова форма на обвиващата при различни стойности на константата на Гаус.



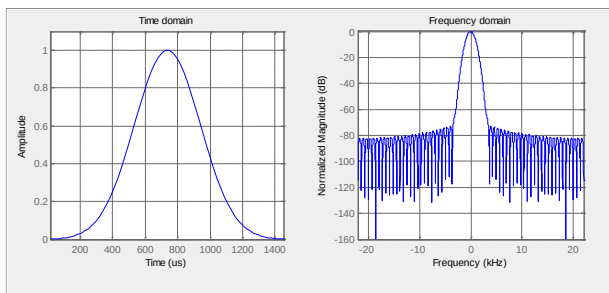
Фиг. 12. Тестов сигнал с Гаусова форма на обвиващата симулиран в 64 точки с честота на дискретизация 44100Hz и Гаусова константа 2.



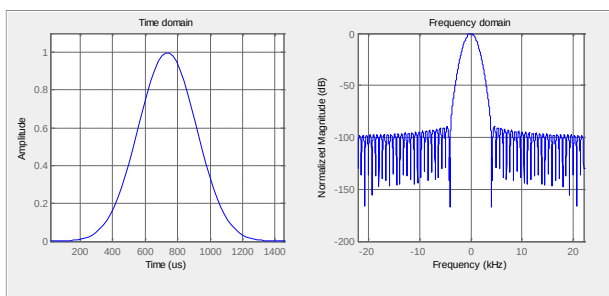
Фиг. 13. Тестов сигнал с Гаусова форма на обвиващата симулиран в 64 точки с честота на дискретизация 44100Hz и Гаусова константа 2,5.



Фиг. 13. Тестов сигнал с Гаусова форма на обвиващата симулиран в 64 точки с честота на дискретизация 44100Hz и Гаусова константа 3.



Фиг. 14. Тестов сигнал с Гаусова форма на обвиващата симулиран в 64 точки с честота на дискретизация 44100Hz и Гаусова константа 3,5.



Фиг. 15. Тестов сигнал с Гаусова форма на обвиващата симулиран в 64 точки с честота на дискретизация 44100Hz и Гаусова константа 4.

Таблица 3. Резултати от извършени симулационни изследвания на спектрални съставляващи на сигнали с Гаусова форма на обвиващата с Matlab при различни стойности на константата на Гаус.

| Константа на Гаус | Параметър              |                                                         |                                                           |
|-------------------|------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                   | Фактор на загубите (%) | Относително отслабване на страничните съставляващи (dB) | Ширина на основната спектрална съставляваща при -3dB (Hz) |
| 1,772             | 0,44                   | -28,3                                                   | 764                                                       |
| 2                 | 0,16                   | -32,4                                                   | 818                                                       |
| 2,5               | 0,01                   | -44,1                                                   | 947                                                       |
| 3                 | 0                      | -57,2                                                   | 1109                                                      |
| 3,5               | 0                      | -72,7                                                   | 1292                                                      |
| 4                 | 0                      | -89,5                                                   | 1475                                                      |

Получените резултати от сравнителния анализа на сигнали с Гаусова форма на обвиващата с различни стойности на константа на Гаус показва, че с увеличаване на константа:

- Фактора на загубите достига до нула
- Намалва нивото на страничните спектрални съставляващи
- увеличава се ширината на лентата на основната съставляваща

От изобразените на фиг. 10 до 15, сигнали с Гаусова форма на обвиващата се вижда и намаляването на площта на сигналите с увеличаване на константата, което ще доведе и до намаляване на енергията. Резултатите показват,

че е необходимо да се избират константи на Гаус от 2 до 3 по този начин сигнала ще има необходимата енергия за извършване на акустични изследвания и ще е с подходящи спектрални компоненти.

### 3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

Разглежда въпросът за спектралните характеристики на тестови сигнали с различна форма на обвиваща, използвани за акустични и аудио измервания. Осъществено е изобразяване на сигнали в честотната област. Представени са сигнали с променлива форма на обвиващата във честотната област.

Извършен е анализ на спектрални характеристики на измервателни сигнали с различна форма на обвиващата. Извършен е сравнителен анализ на сигнали с Гаусова форма на обвиващата.

Предложени са критерии за аналитичен анализ на спектралните характеристики на сигнали с различна форма на обвиващата:

- Ширина на лентата при ниво 0,1
- Ширина на лентата при ниво  $10^{-3}$
- Ниво на първа спектрална съставляваща.

Получените от изследването резултати довеждат до изводи с практическа приложимост за изграждане на системи за извършване на тестове в акустиката и аудио техниката.

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са извършени по проект НП7/2016г. в рамките на присъщата на ТУ-Варна научноизследователска дейност, финансирана целево от държавния бюджет.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящата работа може да има приложение във всички сфери на изследователската и инженерна работа, където е необходимо да се използват измервателни и/или тестови сигнали. От извършеното изследване се доказват важни преимущества на сигналите с променлива форма на обвиващата спрямо стандартния правоъгълен тестов сигнал. На база на получените резултати се предлага се като сигнал за извършване на тестове в акустиката да се използва сигнал с Гаусова форма на обвиващата с константа на Гаус между 2 и 3. Конкретно приложение на резултатите от изследването ще се търси при извършване на експерименти с електроакустични преобразователи от различен тип. Доклад на тема „Генериране на измервателни тестови сигнали с различна форма на обвиващата чрез Matlab“ разглежда проблема за генерирането на изследваните сигнали.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Signal Processing Toolbox User's Guide.pdf. The MathWorks Inc, 2010 revised for version 6.14 (2010b);
- [2] А. Опенхайм, А. Уилски, Я. Йънг. Сигнали и системи. СОФИЯ, „ТЕХНИКА“, 2002;
- [3] K.M.M. PRABHU, Window functions and their applications in signal processing, CRC Press Taylor & Francis Group 2014
- [4] И. Илиев, Ек. Сираков, Хр. Живомиров. ACOUSTIC EXAMINATION OF THE ANECHOIC CHAMBER IN TECHNICAL UNIVERSITY - VARNA, Международна научна конференция АКУСТИКА 2014 Година XVI, брой 16, Декември 2014 г. ISSN 1312-4897
- [5] Ек. Сираков. Електроакустика, Варна, Технически университет – Варна, 2008.
- [6] Frédéric Cohen Tenoudji, Analog and Digital Signal Analysis From Basics to Applications, Springer International Publishing Switzerland 2016, ISSN 2364-4915

|                                                                                   |                                                                                               |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b><br/>Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                     | Декември 2016 г.                                                                   |

## ПОТЕНЦИАЛНА РАЗДЕЛИТЕЛНА СПОСОБНОСТ ПРИ СИГНАЛ ВЪВ ВИД НА ПАКЕТ КОХЕРЕНТНИ ИМПУЛСИ

### COHERENT PULSE TRAIN POTENTIAL RESOLUTION

инж. Илиян Илиев

Технически университет - Варна, България. E-mail: [iliyan.j.iliev@gmail.com](mailto:iliyan.j.iliev@gmail.com)

#### Abstract

In the present paper analysis of the potential resolution of a signal consisting of one pulse, three coherent pulse train signal and five coherent pulse train signal are presented. The difference between potential and real resolution is explained. The potential resolution of a single measured parameter as well as the potential resolution of two simultaneously measured parameters is shown. The relation between the signal form and the potential resolution is illustrated by the ambiguity functions and the ambiguity plots of all three types of signal. The potential range and Doppler resolution are calculated for all three types of signal (invariability of the parameters is taken into account). Conclusions with practical value have been made.

**Keywords:** Ambiguity function, Resolution, Pulse train.

#### УВОД

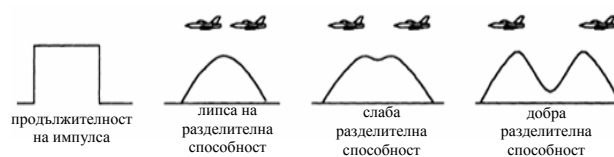
Сведенията, които се извличат от приетите радиолокационни сигнали се нарича радиолокационна информация.

Тази информация се основава на няколко принципа [1, 2]:

- получава за сметка на „възбуждане“ на средата от обекта или за сметка на излъчените от самия обект електромагнитни вълни;
- използват се закономерностите при разпространението на електромагнитните вълни в пространството (праволинейно разпространение, почти независимо от метеорологичните условия и с постоянна скорост) и способността им да се отразяват;
- откриването и разделянето на слабите сигнали, получавани от обектите става за сметка на различията между сигнала и шума, както и за сметка на различията между сигналите от самите обекти;
- информацията се получава паралелно или последователно във времето и постъпва в приемника във вид на информационни потоци.

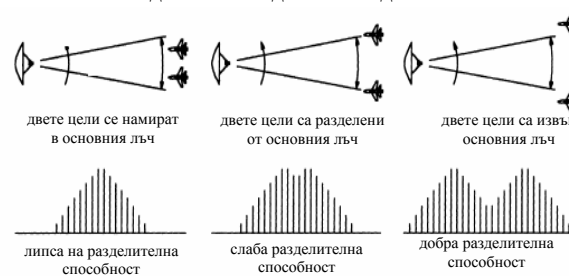
Разделителна способност по разстояние се нарича минималното разстояние, на което могат да се намират два обекта, разположени на еднакви ъглови координати и притежаващи еднакви радиални скорости, за да се наблюдават поотделно. Това разстояние зависи от продължителността на импулса и времето на възстановяване на приемника (ако не е пренебрежимо малко) [1].

Пример за възможността за разделяне на две близко разположени цели е изобразен на фиг. 1.



Фиг. 1. Разделяне на две цели по разстояние

Разделянето на цели по ъглови координати (фиг. 2) се извършва посредством минималният ъгъл (азимут -  $\beta$  или елевация -  $\varepsilon$ ), на който могат да са разположени два обекта, намиращи се на еднакво разстояние от радиолокационната станция (РЛС) и притежаващи еднаква радиална скорост, на който могат да се наблюдават поотделно.



Фиг. 2. Разделяне на две цели по ъглови координати

Разделителна способност по радиална скорост се нарича минималната разлика в скоростите на два обекта, намиращи се на еднакво разстояние и еднакви ъглови координати спрямо РЛС, при която е възможно разделното наблюдаване на двата обекта.

#### 1. ПОСТАНОВКА НА ПРОБЛЕМА

##### 1.1. Реална и потенциална разделителна способност

Анализът на приетия сигнал и оценката на съответната разделителна способност зависи от отношението сигнал-шум ( $S/N$  – signal to noise ratio) и от формата на сигнала.

Формата на сигнала се определя от тялото на неопределеност, нормираната двумерна автокорелационна функция (НДАФ) и нормираната функция на неопределеност (НФН).

В пространството, почти винаги се наблюдават множество цели, но на практика разделянето им се свежда до разделянето на две цели една от друга. Задачата на това разделяне се решава, чрез анализиране на напрежението на сигнала на изхода на приемника като за разликата в разстоянието се анализира времето на закъснение на сигнала от различните цели, за разликата в радиалните скорости се анализира доплеровото изменение на честота им, а за разликата в ъгловите координати се анализират различните направления, от които се приема сигнала.

В реални условия е много трудно да се реализират потенциалните възможности на сигнала поради влиянието на различни устройства, участващи в обработката му. Това налага въвеждането на понятията потенциална и реална разделителна способност.

Потенциалната разделителна способност зависи от формата на сигнала, от неговата енергия и от шума. При реалната разделителна способност се отчита влиянието на всички фактори, влошаващи разделителната способност в процеса на обработка.

За оценяване на разделителната способност се използва сигналната функция  $S(t, \omega)$ , която има вида [1]:

$$(1) \quad S(t, \omega) = \frac{2}{N_0} \int_0^{t_c} u_c(t, \omega_c) u_c(t - \tau, \omega_c - \Delta\omega) dt,$$

където  $N_0$  е спектрална плътност на енергията на шума;

$u_c(t, \omega_c)$  - приетият сигнал;

$u_c(t - \tau, \omega_c - \Delta\omega)$  - опорният сигнал;

$t_c$  - време за наблюдение на приемания и опорния сигнал;

$(t, \omega_c)$  - текущото време и носещата честота;

$(\tau, \Delta\omega)$  - изразява разликата във времето на закъснение на отразения сигнал спрямо времето, на което е настроен съгласуващия филтър и разликата между доплеровата честота на приетия сигнал и доплеровата честота, на която е настроен филтъра.

При  $\tau = 0$  и  $\Delta\omega = 0$  интегралът от сигналната функция е равен на енергията на сигнала  $E_c$ . Следователно за израз (1) се записва [1]:

$$(2) \quad S(t, \omega) = \frac{2E_c}{N_0} \chi_0(\tau, \Delta\omega) = q_0 \chi_0(\tau, \Delta\omega),$$

където:

$$(3) \quad \chi_0(\tau, \Delta\omega) = \frac{1}{E_c} \int_0^{t_c} u_c(t, \omega_c) u_c(t - \tau, \omega_c - \Delta\omega) dt.$$

Израз (3) се нарича смесена автокорелационна функция или НДАФ. От изразите (2) и (3) може да се направи извод, че изходния сигнал (при оптимална филтрация) е равен на произведението между отношението  $S/N$ , енергията и НДАФ на входния сигнал.

За да се изчисли разделителната способност по даден параметър е необходимо да се реши корелационната функция и да се определи нейната ширина на дадено ниво. За определяне на нивото в радиолокацията е приет критерий на Релей - ниво 0.5 от максимума ѝ [1].

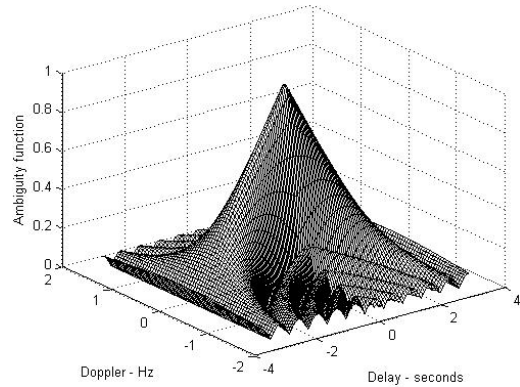
## 2. Потенциална разделителна способност по един измерван параметър.

За изчисляване на потенциалната разделителна способност по разстояние е необходимо да се реши израз (3) за  $\Delta\omega = 0$ , а за определяне на разделителната способност по радиална скорост при  $\tau = 0$ . И в двата случая се получава едномерна автокорелационна функция на сигнала по оста на времето или по оста на честотата.

Нормираната функция на неопределеност на сигнал във вид на импулс с правоъгълна форма и постоянна носеща честота се описва с [1, 4, 5, 6]:

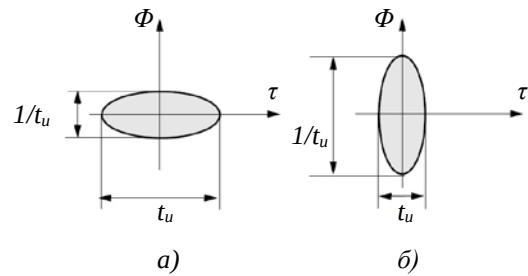
$$(4) \quad \rho(\tau, \Phi) = \begin{cases} \left| \frac{\sin \pi \Phi(t_u - |\tau|)}{\pi \Phi t_u} \right| & \text{при } |\tau| \leq \frac{t_u}{2} \\ 0 & \text{при } |\tau| > \frac{t_u}{2} \end{cases}.$$

Тялото на неопределеност на такъв сигнал е представено на фиг. 3.



Фиг. 3. Тяло на неопределеност на правоъгълен импулс с постоянна носеща

В зависимост от продължителността на импулса се разглеждат се два случая - импулсът с голяма продължителност и импулсът с малка продължителност (фиг. 4) [3].



Фигура 4. Диаграми на неопределеност:

а) импулс с голяма продължителност;

б) импулс с малка продължителност.

Поради това, че функцията има ножовидна форма, когато импулсът е с голяма продължителност тялото на неопределеност ще е ориентирано по оста на времето  $\tau$ , а когато импулса е с малка продължителност тялото ще е ориентирано по оста на честотата  $\Phi$ .

При импулс с малка продължителност (фиг. 4б) всички отразени сигнали по разстояние попадат в диаграмата на неопределеност и няма да могат да се разделят. Възможно е

отчитане на малка промяна в доплеровата честота. Докато при импулс с голяма продължителност (фиг. 4а) се получава обратното – добра разделителна способност по разстояние, но липсва разделителна способност по радиална скорост.

За изчисляване на потенциалната разделителна способност по разстояние на такъв сигнал е необходимо да се изчисли израз (3) при  $\Delta\omega = 0$ . Получава се едномерна автокорелационна функция на сигнала по оста на времето.

Корелационната функция на обвивката на сигнала е [1, 4, 5, 6]:

$$(5) \quad \rho(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{|\tau|}{t_u} & \text{при } |\tau| \leq t_u \\ 0 & \text{при } |\tau| > t_u \end{cases}.$$

Корелационната функция се решава за стойност на  $\tau$ , при която ще е 0.5 от максимума [1, 5]:

$$(6) \quad \rho(\tau_{0,5}) = 1 - \frac{|\tau_{0,5}|}{t_u} = 0,5.$$

Прилага се критерий на Релей и се установява ширината на корелационната функция, определяща разделителната способност по разстояние [1]:

$$(7) \quad |\tau_{0,5}| = 0,5t_u.$$

Разстоянието се измерва чрез времето на разпространение на сигнала, следователно за потенциалната разделителна способност по разстояние се записва [1, 2, 3, 4]:

$$(8) \quad \delta(R)_{nom} = \frac{c}{2} 2|\tau_{0,5}| = 0,5ct_u.$$

За изчисляване на потенциалната разделителна способност по радиална скорост е необходимо да се изчисли израз (3) при  $\tau = 0$ . Ширината на НАКФ на ниво 0.5 е [1]:

$$(9) \quad 2(\Delta\omega_{0,5}) = \frac{7,6}{t_u}.$$

Радиалната скорост може да се изрази чрез доплеровата честота [1, 4]:

$$(10) \quad v_r = \frac{F_D c}{2f_c} = \frac{\omega_D c}{2\omega_c} = \frac{F_D \lambda}{2}.$$

Най-малкото изменение на носещата честота, което е възможно да се отчете е  $2(\Delta\omega_{0,5})$ . Следователно ако се замести  $\omega_D$  в израз (10) с  $2(\Delta\omega_{0,5})$  за потенциалната разделителна способност по радиална скорост ще се получи [1]:

$$(11) \quad \delta(v_r)_{nom} = \frac{c}{2\omega_c} 2(\Delta\omega_{0,5}) = \frac{3,8c}{\omega_c t_u}.$$

### 3. Потенциална разделителна способност по два едновременно измервани параметъра

За определяне на съвместната разделителна способност по два параметъра се анализира тялото на неопределеност по двете оси (по оста на времето и оста на доплеровото

изменение на честотата). НДАФ се решава съответно при  $\tau \neq 0$  и  $\Delta\omega \neq 0$ .

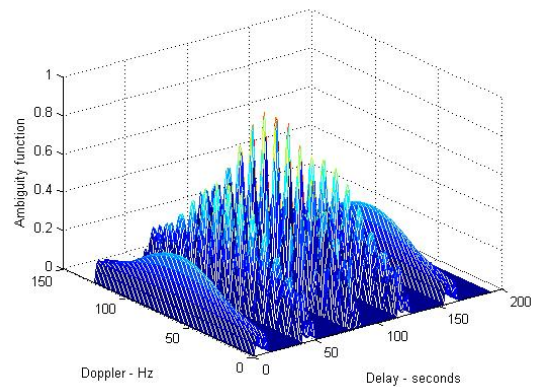
При сигнал във вид на пакет кохерентни импулси съществува възможността за едновременно разделяне на сигналите по разстояние и радиална скорост. НФН на сигнал, съставен от пакет кохерентни импулси с правоъгълна форма, се представя с уравнението [1]:

$$(12) \quad \rho(\tau, \Phi) = \frac{1}{Nt_u} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}(t) \dot{U}^*(t - \tau) e^{j2\pi\Phi t} dt \right|.$$

където  $N$  е броя на импулсите в пакета;

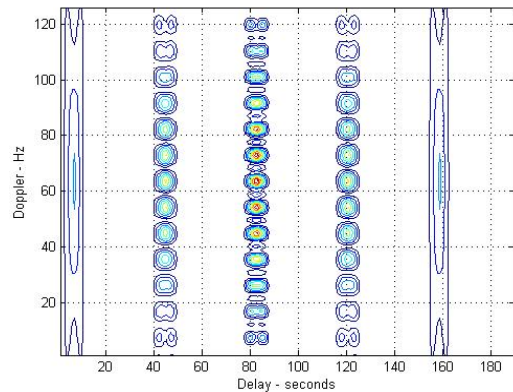
$t_u$  - продължителност на импулса.

Формата на тялото на неопределеност на сигнал във вид на пакет от три кохерентни импулса е представена на фиг. 5. Тялото на неопределеност представлява релеф с множество върхове като най-широк е основният.



Фиг. 5. Тяло на неопределеност на сигнал във вид на пакет от 3 кохерентни импулса.

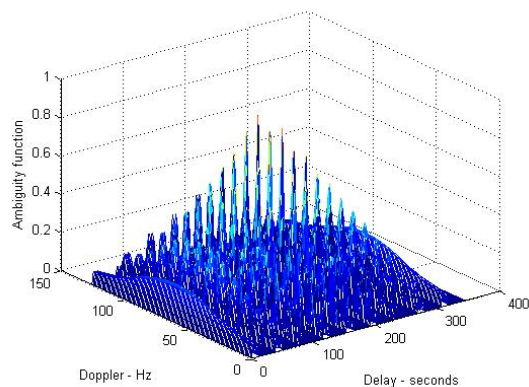
На фиг. 6 е показана диаграма на неопределеност на тялото на неопределеност или сечение с паралелна равнина на равнината образувана от осите на времето и доплеровото изменение на честотата.



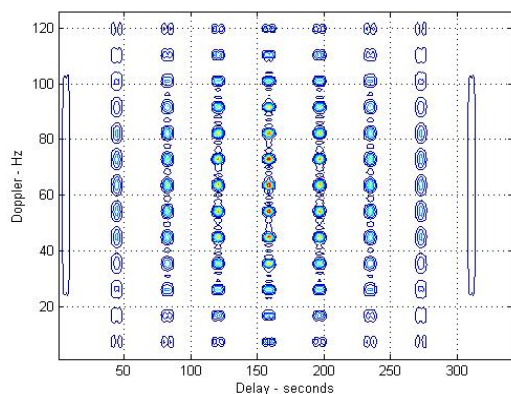
Фиг. 6. Диаграма на неопределеност на сигнал във вид на пакет от 3 кохерентни импулса.

Формата на тялото на неопределеност на сигнал във вид на пакет от пет кохерентни импулса е представена на фиг. 7, а диаграмата на неопределеност е изобразена на фиг. 8.

Главният връх е разположен симетрично и широчината му, измерена в основата, е равна на удвоената продължителност на импулса  $2t_u$ . Ширината на всеки пакет от импулси има продължителност  $2NT_{II}$ .

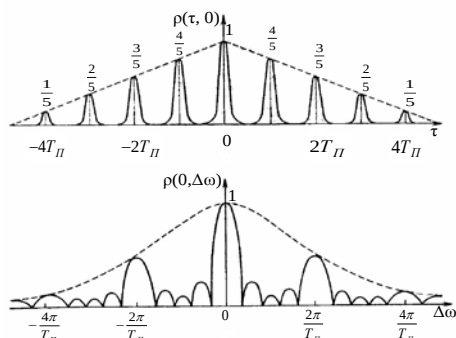


Фиг. 7. Тяло на неопределеност на сигнал във вид на пакет от 5 кохерентни импулса.



Фиг. 8. Диаграма на неопределеност на сигнал във вид на пакет от 5 кохерентни импулса.

На фиг. 9 са представени сеченията по осите  $(\rho, \tau)$  [1].



Фиг. 9. Сечения на тяло на неопределеност на пакет от 5 кохерентни импулси.

Разстояние ще бъде еднозначно тогава, когато времето на закъснение на отразения сигнал е по-малко от половината период на повторение на импулсите в пакета  $(cT_{II} / 2)$ . Зоната на еднозначно измерване на доплеровото изменение на честотата е  $1/2T_{II}$ . Най-голяма точност в измерването ще има в началото на координатната система, когато  $\tau = 0$  и  $\Phi = 0$ . При всяко друго положение ще се получава грешка в измерването, съответстваща на дадения връх по оста на времето и на доплеровото изменение на честотата.

Разделителната способност при сигнал от пакет кохерентни импулси се определя от ширината на основния връх на тялото на неопределеност. Следователно, разделителната способност по разстояние е същата, както

при единичния импулс, а разделителната способност по радиална скорост е равна на [1, 4]:

$$(13) \quad \delta(v_r)_{nom} = \frac{c}{2\omega_c} \frac{2\pi}{NT_{II}} = \frac{c\pi}{2\pi fNT_{II}} = \frac{\lambda}{2NT_{II}}.$$

#### 4. Изводи

Резултати от направени изчисления чрез изрази (8), (11) и (13) за потенциалната разделителна способност по разстояние и по радиална скорост при продължителност на импулса  $2t_u = 0.3\mu s$ , период на повторение на пакет от импулси  $T_{II} = 2ms$ , дължина на вълната  $\lambda = 0.1m$  са показани в таблица 1. Параметрите са подбрани предимно за да се получи по-добра представа за подобряване на разделителната способност по радиална скорост чрез увеличаване на броя на импулсите в пакета, а не за постигане на точност.

Таблица 1.

| вид сигнал                | единичен импулс   | пакет от 3 импулса | пакет от 5 импулса |
|---------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| разделителна способност   |                   |                    |                    |
| по разстояние (m)         | 45                | 45                 | 45                 |
| по радиална скорост (m/s) | $2,02 \cdot 10^5$ | 8,3                | 5                  |

## 2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На практика сигнал от единичен импулс, характеризиращ се със зададените параметри използвани за изчисленията не притежава разделителна способност по радиална скорост. Колкото повече импулси има в пакет, толкова по-добра ще бъде разделителната способност по радиална скорост, но ще нарасне периода на повторение на пакета, а също така ще е необходима и повече енергия за излъчване.

Друго предимство на сигнал във вид на пакет от кохерентни импулси е по-голямата точност на измерване и по-добра възможност за шумозащитеност. Ако сигналът е подбран така, че спектърът на смущението да попада в минимумите на тялото на неопределеност, даденото смущение няма да се пропусне от съгласуващия филтър. Избирането на сигнала се състои в определяне на броя, продължителността и периода на повторение на импулсите в пакета, както и периода на повторение на самия пакет от импулси.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иванов К. И. Радиолокация и радиолокационни системи. Част първа. Теория на радиолокационните системи. Варна, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, 2010;
- [2] Желязов, П. М., Петков, Г. Д., Кръстев С. Б., Анчев С. К. Теоретически основи на радиолокацията. Шумен, ВНБАУ „Г. Димитров“, 1983;
- [3] Werner W. Radar System Engineering. 13th Edition, WS 2006/2007, Universität Karlsruhe;
- [4] Bassem R. Mahafza. Radar Signal Analysis and Processing Using MATLAB. CHAPMAN & HALL/CRC, 504 pages, 2008;
- [5] Григорин – Рябов. Радиолокационные устройства. М., Советское. радио“, 1970;
- [6] Wei Zhang. An algorithm of resolving the range ambiguity using a single PRF. Proceedings of IEEE ICCAS 2010, 2010.

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                                   |

## КЛАСИФИКАЦИЯ И СРАВНЕНИЕ НА МЕТОДИТЕ ЗА ДИРЕКТЕН ЦИФРОВ СИНТЕЗ

### CLASSIFICATION AND COMPARISON OF DIRECT DIGITAL SYNTHESIS METHODS

**Мариана Шотова**

Технически университет - Варна, България. E-mail: [marianashotova@gmail.com](mailto:marianashotova@gmail.com)

#### Abstract

In the present paper a comparison between the different methods for direct digital synthesis is made –with ROM table, with sine series and combined. The pros and cons for the different methods are presented as well as the advantages and disadvantages towards the dynamic range of the direct digital synthesis and the processing speed of the output sine wave. A detailed classification combining all the current methods for direct digital synthesis is presented.

**Keywords:** Direct digital synthesis, digital signal processing.

#### УВОД

Генерирането на хармоничен сигнал с висока спектрална чистота и стабилност на честотата е необходимост при реализацията на различни високотехнологични уреди и апарати, в това число: телекомуникационни системи, радиолокационни, хидроакустични и измервателни устройства. Съвременен метод, задоволяващ тези условия при много добри характеристики е методът на Директния Цифров Синтез (ДЦС) [1,2,3,4].

В зависимост от изчислителната платформа методът може да бъде реализиран и приложен по два специфични начина – софтуерно и хардуерно. Хардуерният ДЦС се характеризира с компактност, висока честота на синтезирания сигнал и минимални ресурси. Въпреки характерните си предимства съществен недостатък са ограничените функционални възможности и влиянието на цифрово-аналоговия преобразувател (ЦАП) върху изходния сигнал. Софтуерният ДЦС използва цифров сигнален процесор (ЦСП), като за синтезиране на сигнала се използват ресурсите на процесора, така е възможно програмиране на желаните математически и логически операции, което допринася за гъвкавостта на алгоритмите. Основните недостатъци са по-ниската синтезирана честота спрямо тактовата честота на процесора и честотата на хардуерния ДЦС, и непълното използване ресурсите на процесора [5,6,7,9,10].

Към момента са разработени различни схеми и алгоритми за подобряване на хардуерния и софтуерния ДЦС с цел повишаване динамичния диапазон на синтеза[1].

Настоящият доклад има за цел да класифицира и сравни различните методи за синтез и да представи възможности за подобряване характеристиките на синтезирания сигнал в частност при софтуерния ДЦС.

## 1. ПОСТАНОВКА НА ПРОБЛЕМА

### 1.1. Принцип на работа на базов ДЦС

Блоковата схема характеризираща ДЦС е представена на фиг.1. Основните компоненти на синтезатора са:

(1)Честотен регистър (ЧР), запазващ подадената на входа честотна дума FW; (2) Суматор; (3) Фазов регистър (ФР), в който се записва пълната фаза PW (n) на сигнала в даден момент от времето; (4)Фазов акумулатор (ФА), обединяващ в себе си суматора и ФА, сумира пълната фаза PW (n-1) на сигнала в предходния момент от време с честотната дума FW и се управлява с тактов сигнал с честота  $f_c$ ; (5)Преобразувател фаза-сигнал (ПФС), който преобразува фазата в синусоиден сигнал. Има различни реализации – ROM таблица, от която се извличат дискретите на синуса или чрез апроксимиране на синус функцията в ред на Тейлор и изчисляване на дискретите на сигнала по зададен фазов ъгъл [1,4,5].

Принципът на работа на директния честотен синтезатор се състои в следното: на входа се подава работна честота под формата на двоично число, т.н. честотна дума FW. Тя се акумулира във ФА чрез натрупване и така получената фазова дума PW се подава на ПФС за преобразуването на сигнала от линейно нарастваща фаза в синусоиден сигнал. В зависимост от вида обработка в ПФС и ресурсите на процесора е възможно налагането на отхвърляне на младши битове от фазовата дума PW. ЦАП преобразува дискретния сигнал в аналогов, като преди това при необходимост (според предназначението на синтезатора) може да се приложи филтрация, модулация или друг вид обработка [1].

Като един от основните фактори за оценка на качеството на синтезирания сигнал е динамичният диапазон на изходния сигнал. Той се определя от спектралната диаграма на сигнала и представлява разликата между основната съставляща и най-силно изразената странична спектрална съставляща, която отговаря на нивото на смущенията, породени от специфични грешки при синтезирането на сигнала, както и от ограниченията, наложени от използването на даден сигнален процесор.

### 2. Класификация на ДЦС

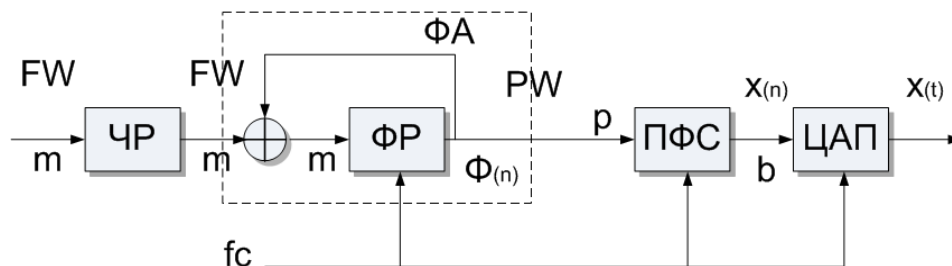
В зависимост от начина на синтез, ДЦС се дели на три основни групи – табличен, изчислителен и комбиниран (Фиг.3). Табличният използва ROM-таблица на синуса, в която за записани дискретите на една вълна на синусоида. Изчислителният ДЦС използва познатият от литературата

ред на Тейлор за изчисляване на синусоидалния сигнал по зададен фазов ъгъл. Комбинираният ДЦС обединява двата метода – табличен и изчислителен, като особеност в случая е, че използва малки ROM таблици и апроксимация на синуса от нисък ред [1,2,3,5,8,10].

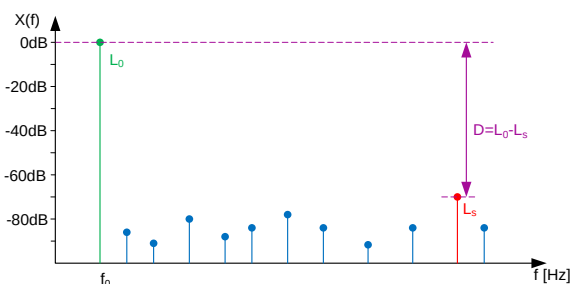
от своя страна намалява честотния обхват на ДЦС.

В литературата съществуват много начини за намаляване размера на ROM таблицата и премахване на нежеланите странични спектрални съставлящи.

Един от най-простите методи е чрез използване симетрията



Фиг. 1 Блокова схема на базов ДЦС



Фиг. 2 Спектр на синтезиран синусоидален сигнал

#### • Табличен ДЦС

##### о Базов ДЦС

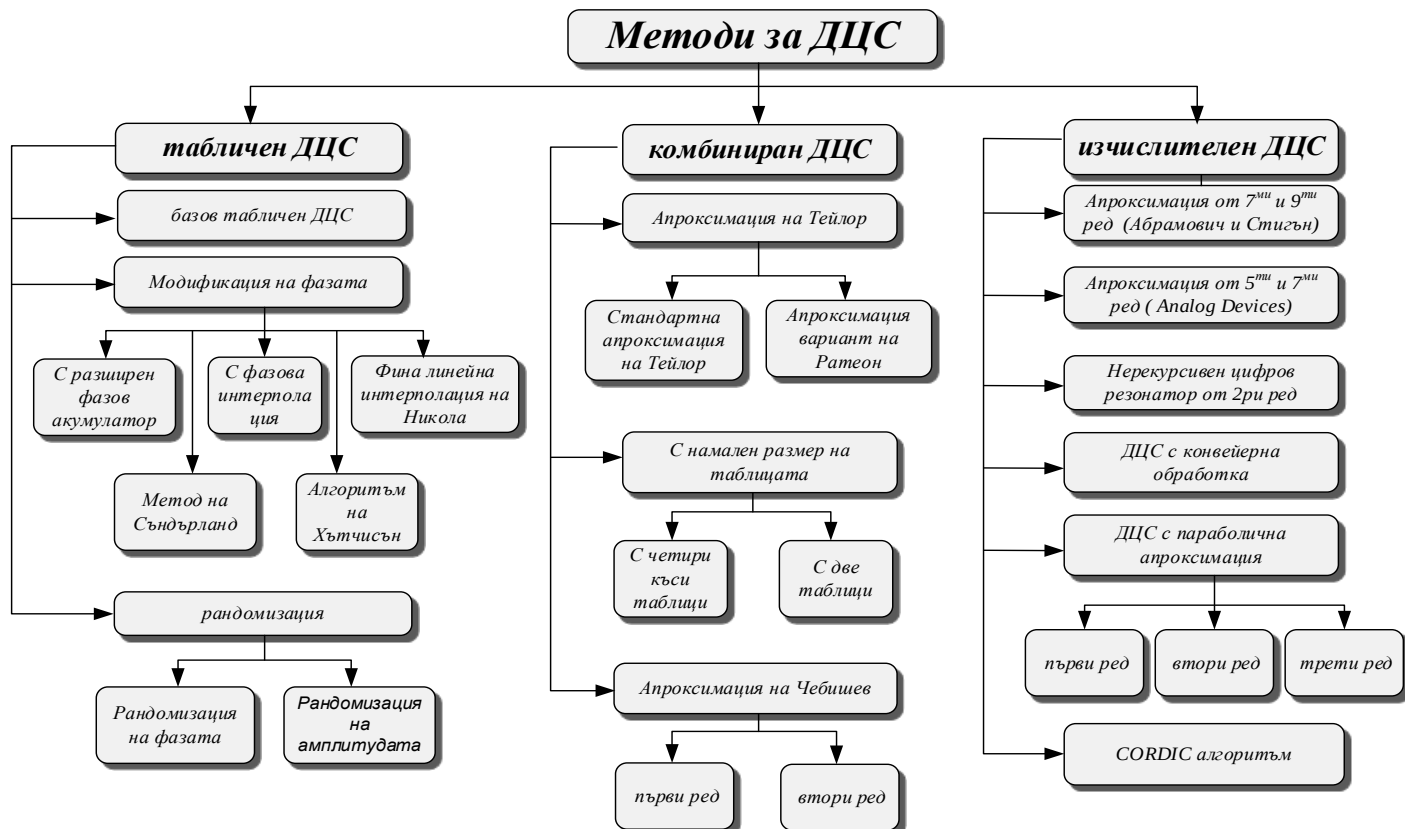
Най-простият ДЦС използва ROM таблица на синуса, в която се записват дискретите на една вълна на синусоида. За да се постигне приемлив динамичен диапазон D на синтезатора, е необходимо използването на големи ROM таблици. Така обаче се увеличава времето за достъп, което

на синуса [11,12,13,14,26,23]. В този случай размерът на ROM таблицата може да се намали до 75% т.е. да се запише в паметта четвърт вълна на синусоида. Особеност при тази компресия е, че поради симетрията на синуса, се генерира симетричен сигнал, който по дефиниция няма четни хармоници.

Въпреки компресирането на ROM таблицата със 75%, което се използва в почти всички цифрови честотни синтезатори, основен проблем остава избора на работна честота.

Внимателно трябва да се планира работната честота на синтезатора, като тя не трябва да е кратна на честотата на тактовия сигнал. Съществуват т.н. „лоши“ честотни думи, при които в спектъра на сигнала се получава една силна странична спектрална съставляща, влияеща отрицателно на динамичния диапазон на синтезатора.

С цел избягване на това драстично намаляване на динамичния диапазон на синтезатора и най-вече на планирането на работната честота, Analog Devices Inc. в книгата си [8] предлагат метод за намаляване на нивото на определена спектрална съставляща. Технологиата използва допълнителен канал за ДЦС, за да прибави още един сигнал



Фиг. 3 Класификация на методи за ДЦС

със същата честота и амплитуда като най-лошата странична спектрална съставляща, като този сигнал е дефазирен на  $180^\circ$ . Резултатът е, че се намалява значителна част от нежеланата спектрална съставляща.

*Основен недостатък на технологията е намаляването на амплитудата на само една спектрална съставляща и използването на ресурсите на процесора за втори синтезатор. Също така внимателно трябва да се изчисли честотата на нежеланата спектрална съставляща.*

- **Модификация на фазата**

Освен използване на свойството за симетрията на синуса, се прилагат и други техники за намаляване нивото на страничните спектрални съставлящи и увеличаване на динамичния диапазон на синтезатора, които са свързани с модификация на фазата при синтеза на сигнали.

В [1], [2] се предлага ДЦС с разширен фазов акумулатор, при който се контролира препълването на фазовия акумулатор. За праг за препълване на акумулатора служи втора честотна дума, при която фазовият акумулатор се нулира. Изпълнението на честотния синтезатор е хардуерно. Динамичният диапазон в случая е  $D=60\text{dB}$ , което е с  $10\text{dB}$  повече от ДЦС без допълнителен праг за препълване на фазовия акумулатор. Методът е предназначен за безжични комуникации, при които се изисква бързо честотно превключване. *Недостатък е, че въпреки подобрението, динамичния диапазон остава нисък.*

Методът на Хъгчисън [3], [4] използва продължителността на синусовата и косинусовата функция, за да намали размера на ROM таблицата. В него се предлага първи квадрант от синусоида да се раздели на сегменти ( $K_1$  и  $K_2$ ), така че  $K_1$  да е винаги сравнително малко число в сравнение с честотната дума  $FW$ . Тогава синуса ще може да се представи чрез две под-таблицы и по този начин да се спести памет. Първата ROM таблица представлява пълната ROM таблица за даден синтезатор, но с по-ниска разделителна способност, а във втората таблица е записана разликата между идеалната синусоида и тази, изчислена с  $K_1$  точки. Изходните сигнали на двете таблици се събират, за да се получи желаната стойност от синусоида.

Рандомизацията е друг основен метод за намаляване на нивата на страничните спектрални съставлящи при табличния ДЦС. Характеризира се с допълнителен генератор на псевдослучайни последователности, който внася шум в сигнала от синтезатора. Известни са два метода – рандомизация на фазата и рандомизация на амплитудата [18], [115], [116]. Рандомизация на амплитудата прибавя  $d$ -битовото случайно число към изходния сигнал на преобразувателя фаза-сигнал [115]. *Сложността произлиза от това, че ЦАП е вътрешен за схемата и някои нежелани странични спектрални съставлящи се внасят от самия ЦАП.*

- **Изчислителен ДЦС**

Освен с извличане на дискрети от ROM таблица, друг метод за ДЦС е чрез изчисляване на синуса по зададен фазов ъгъл, чрез използване на известния от литературата полином на Тейлор. Тъй като полиномът е безкраен ред, за целите на ДЦС този ред се отсича до избрана степен.

*Основният проблем при изчислителния ДЦС е понижаването на динамичния диапазон на синтезатора поради отсичане на краен ред, тъй като всеки един коефициент от реда оказва влияние върху спектралните съставлящи на сигнала. Друг проблем, който води също до намаляване на динамичния диапазон на синтезатора е намаляването степенята на реда, но в случая се намаляват и броя на математически операции, което е основно предимство, поради необходимостта от бърза обработка в реално време.*

За подобряването качеството на генерирания сигнал се използват методи и алгоритми за оптимизиране

коефициентите на реда, използващи различни апроксимации.

Analog Devices Inc. в [8] предлагат полином от  $5^{\text{та}}$  степен с област на апроксимация  $[0, \pi/2]$ . Динамичният диапазон достига  $105\text{dB}$ , а броят математически операции е 5 умножения и 4 сумирания за изчисляване на дискрет от синусоида. Конвейерният ДЦС без ROM таблица, генериращ косинусоида с умножен по 8 фазов ъгъл е представена в [17,18,19]. Използва се ред от 8ма степен, на който два пъти се прилага апроксимация на косинуса като фазовият ъгъл се изменя в интервала  $[0, \pi/16]$ . Динамичния диапазон на синтезатора е  $D=94\text{dB}$  за 16 битов процесор. ДЦС с параболична апроксимация от  $1^{\text{ви}}$ ,  $2^{\text{ри}}$  и  $3^{\text{ти}}$  ред – преобразува натрупаната в ФА фаза в желаната парабола [21,23,25,28]. При апроксимацията от 2ри ред, грешката между идеалната и генерираната синусоида е  $\epsilon = 9 \cdot 10^{-4}$ , което е еквивалентно на квантувана 10 битова синусоида. И при трите варианта, се изчислява грешката между генерираната и идеалната синусоида и се търси начин да се намали грешката. Реализацията е хардуерна и се базира на логически устройства, без да използва ROM таблица. За динамичния диапазон на ДЦС с параболична апроксимация от  $2^{\text{ри}}$  ред се получава  $D=64\text{dB}$ , а за  $3^{\text{ти}}$  ред  $D=78\text{dB}$ .

*Основен недостатък е, че динамичния диапазон е  $D=55\text{dB}$  при ниски честоти и бързо намалява при увеличаване на работната честота.*

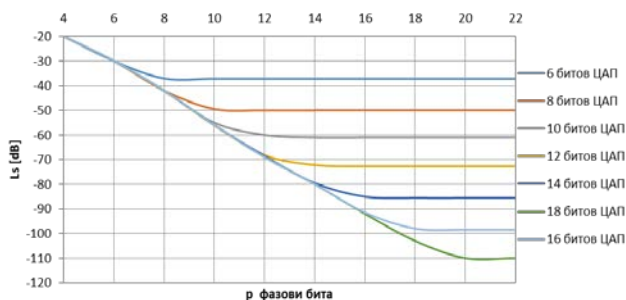
- **Комбиниран ДЦС**

Комбинираният метод за ДЦС се характеризира с това, че използва малка ROM таблица и апроксимация на синуса от нисък ред.

В [1,26,28] е представена архитектура, базирана на CORDIC алгоритъма (COordinate Rotation DIgital Computer или цифров компютър за изчисляване на координатното завъртане). Методът изчислява синус и косинус функция, започвайки от начално зададен ъгъл, за който стойностите на синус и косинус са известни и продължава с елементарни завъртания по координатните оси докато се достигне необходимият ъгъл. Реализацията изисква малка ROM таблица за съхраняване на стойностите за малък брой ъгли (обикновено 8 до 16) и серия операции „пеперуда“, всяка от които изчислява елементарно завъртане, чрез използване на два суматора и два преобразувателя в допълнителен код.

Реализацията на цифровия синтезатор може да се изпълни по два начина - хардуерно с цифрови логически схеми или софтуерно, чрез програмиране на ЦСП.

Хардуерната реализация на блоковете на ДЦС позволява лесно управление на честотата, контрол на амплитудата и фазата на генерирания сигнал, както и фазова, честотна или амплитудна модулации [30]. Стъпалата работят каскадно, което допринася за постигане на висока честота на синтезирания сигнал. Интегрирането на един или два цифрово аналогови преобразуватели (ЦАП) намалява броя на интегралните схеми, заемащата площ и крайната цена. Трябва да се отбележи, че ЦАП значително влияе на динамичния диапазон на генерирания сигнал, тъй като внася допълнителни смущения. Софтуерната реализация от своя страна използва 16/32 битов сигнален процесор, обединяващ в себе си всички блокове необходими за целите на ДЦС. За целите на синтеза се използват ресурсите на процесора: аритметично-логическото устройство (АЛУ), преместващ регистър и програмна памет [22]. Възможността за програмиране на желаните математически и логически операции придава гъвкавост на алгоритмите. Като основни недостатъци могат да се посочат по-ниската работна честота спрямо хардуерната реализация и слабото използване на ресурсите на сигналния процесор. На фиг. 4 е представено влиянието на ЦАП с различна разделителна способност върху динамичния диапазон на синтезатора.



Фиг. 4 Нива на страничните спектрални съставки при различни размери на фазовата дума и различна разделителна способност на ЦАП

От фигурата се вижда, че при увеличаване на фазовата дума  $p$  и разделителната способност на ЦАП се намалява нивото на страничните спектрални съставки  $L_s$  на синтезирания сигнал. Тъй като от практиката е известно, че е по-лесно да се намали фазовия шум, отколкото да се оптимизира схемата на един ЦАП, за целта е по-удобно да се използват повече  $p$  фазови бита при синтезирането на синусоида.

## 2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От така анализирания алгоритми за ДЦС могат да се направят следните изводи: (1) един от основните проблеми при табличен ДЦС е изборът на работна честота: компресирането на ROM таблицата с до 75%, не нарушава периодичността на честотната дума на грешката и в спектъра на сигнала остава силната странична спектрална съставка, намаляваща динамичния диапазон на синтезатора; (2) Проблем при изчислителния ДЦС е понижаването на динамичния диапазон на синтезатора поради отсичане на краен ред. Въпреки това, намаляването на броя операции умножение и събиране, допринася за бързодействието на синтезатора. От тук следва, че може да се търси компромисен вариант на полином от ниска степен с намален брой математически операции. (3) Друга особеност е използваният след синтеза ЦАП - от практиката е доказано, че е по-лесно да се намали фазовия шум от, колкото да се оптимизира схемата на един ЦАП, т.е. по-удобно е да се използват повече  $p$  фазови бита при синтезирането на синусоида.

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са извършени по проект НП7/2016г. в рамките на присъщата на ТУ-Варна научноизследователска дейност, финансирана целево от държавния бюджет

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Goldberg, B.G. "Digital frequency synthesis demystified", Technology Publishing, 1999.
- [2] J.Tierney, Ch. Rader, B.Gold, "A digital frequency synthesizer", IEEE transactions of Audio Electroacoustics, 1971, Vols. AU-19.
- [3] Gordesses, L. Direct digital synthesis: A tool for periodic wave generation-Part I. IEEE Signal Processing Magazine. July 2004
- [4] Lahiji, A. M. Sodagar and G. R., "A pipelined ROM-less architecture for sine-output direct digital frequency synthesizers using the second-order parabolic approximation", IEEE Trans Circuits Syst. II. Sept. 2001, Tom. vol. 48, pp.850-857.
- [5] Sodagar A.M., "Mapping from phase to sine-amplitude in direct digital frequency synthesizer using parabolic approximation", IEEE Trans. Circuits Syst. II. Dec. 2000, Tom. vol.47, pp. 1452-1457.
- [6] Strollo, D. D. Caro and A. G. M., "High-Performance Direct Digital Frequency Synthesizer Using Piecewise-Polynomial Approximation", IEEE Transactions on Circuits and Systems. Feb. 2005, Tom. vol. 52, pp. 324-337.
- [7] Adhami, A. Ashrafi and R., "Theoretical Upperbound of the Spurious-Free Dynamic Range in Direct Digital Frequency Synthesizers Realized by Polynomial Interpolation Methods", IEEE Transactions on Circuits and Systems I. Oct. 2007, Tom. vol.54, pp. 2252-2261.
- [8] Ashrafi, A. Adhami, R. Milenkovic, A., "A Direct Digital Frequency Synthesizer Based on the Quasi-Linear Interpolation

- Method", IEEE Transactions on Circuits and Systems I. April 2010, Vol 57, 4.
- [9] Bellaouar A., Fahim A., "Low-Power Direct Digital Frequency Synthesis for Wireless Communications", IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS. 2000, Vol35, 3.
- [10] Zhao Xin, Qi Jun, Tu Bi-hai, Zhang Yi, Cheng Jie-xiang, Liu Jian-guo, Zhao Pin-jian, "Design Parallel Direct Digital Frequency Synthesizer Using Interpolation and QLA Technology", ICSP2006 Proceedings. 2006
- [11] McEwan A., Collins S., "Direct digital frequency synthesis by analog interpolation", IEEE Transactions Circuits and Systems II. Nov.2006, Vol 53, 11.
- [12] Torosyan A., Willson A. Jr., "Exact analysis of DDFS spur and SNR due to phase truncations and arbitrary phase-to-amplitude errors", IEEE Proceedigns of international Frequency Control Symposium Expo. Aug 2005
- [13] De Caro D., Napoli E., Strollo A., "Direct digital frequency synthesizers with polynomial hyperfolding technique", IEEE Transactions of Circuits and Systems II. Jul 2004, Vol 51, 7.
- [14] Langlois J., Al-Khalili D., "Novel approach to the design of direct digital frequency synthesizers based on linear interpolation", IEEE Transactions of Circuits and Systems II, Analog Digital Signal Processing. Sep. 2003, Vol 50, 9.
- [15] Yi, Shu-Chung., "A direct digital frequency synthesizer based on ROM free algorithm", International Journal of Electronics and Communication (AEU), 2010
- [16] Vankka J., "Methods of mapping from phase sine amplitude in direct digital synthesis", IEEE Transactions Ultrasonic, Ferroelectr. Freq. Contr., 1997, Vol. 44.
- [17] De Decaro D., Strollo A., "High-performance direct digital frequency synthesis in 0.25 mm CMOS using dual-slope approximation", IEEE Journal of Solid-State Circuits. Nov.2005, Vol 40, 11.
- [18] Wang C. C., Tseng Y. L., She H. C., Li C. C., and Hu R., "A 13-Bit resolution ROM-less direct digital frequency synthesizer based on a trigonometric quadruple angle formula", IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst. Sep. 2004, Vol 12, 9.
- [19] Wang C. C., Huang J. M., Tseng Y. L., Lin W. J., and Hu R., "Phase-adjustable pipelined ROM-less direct digital frequency synthesizer with a 41.66-MHz output frequency", IEEE Trans. Circuits Syst. II. Oct. 2006, Vol 53, 10.
- [20] Bellaouar, O'brecht M., Fahim A., and Elmasry M., "Lowpower direct digital frequency synthesis for wireless communications", IEEE J. Solid-State Circuits. 2000, Vol 35, 3.
- [21] Ashrafi, Pan Z., Adhami R., and Wells B. E., "A novel ROM-less direct digital frequency synthesizer based on Chebyshev polynomial interpolation", Proc. 36th Southeastern Symp. Syst. Theory, SSST'04. Mar. 2004
- [22] Chimakurthy L. S. J., Ghosh M., Dai F. F., and Jaeger R. C., "A novel DDS using nonlinear ROM addressing with improved compression ratio and quantization noise", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr. Feb. 2006, Vol 53, 2.
- [23] Adhami, A. Ashrafi and R., "Theoretical upperbound of the spurious free dynamic range in direct digital frequency synthesizers realized by polynomial interpolation methods", IEEE Trans. Circuit Syst. I. Oct. 2007, Vol 54, 10.
- [24] Ashrafi, A. Milenkovic, and R. Adhami, "A 1 GHz direct digital frequency synthesizer based on the quasi-linear interpolation method", Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. May 2007
- [25] Strollo G. M., De Caro D., and Petra N., "A 630 MHz, 76 mW direct digital frequency synthesizer using enhanced ROMcompression technique", IEEE J. Solid-State Circuits. Feb 2007, Vol 42.
- [26] De Caro D., Petra N., and Strollo A. G. M., "Reducing lookup-table size in direct digital frequency synthesizers using optimized multiparmultipartite table method", IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers. Aug. 2008, Vol 55, 7.
- [27] Hatai, I. Chakrabarti, I., "A high-speed, ROM-less DDFS for software defined radio system", IEEE International Conference on Communication Control and Computing Technologies (ICCCCT), 2010, 2010
- [28] Curticapean F., Niittylahti 1., "A hardware efficient direct digital frequency synthesizer", Proceedings of IEEE International Circuits and Systems Conference (ICECS 2001). 2001, Vol 1.
- [29] Babak F., Keshavarzi P., "A novel DDFS based on trigonometric approximation with a scaling block", Proceedings of Sixth International Conference on Information Technology: New Generation. 2009
- [30] Li X., Lai L., Li A., Lai Z., "A direct digital frequency synthesizer based on two segment fourth-order parabolic approximation", IEEE Transaction on Consumer Electronics. 2009, Vol 55, 2.
- [31] Presti L., "A direct digital frequency synthesizer using an IIR filter implemented with a DSP microprocessor", IEEE International Conference on Avoustic, Speech and Signal Processing, vol3, pp 201-204

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                                   |

## INTELLIGENT AUDIO LOGGER FOR BIRD SOUNDS

## ИНТЕЛИГЕНТЕН АУДИО ЛОГЕР ЗА ЗВУЦИ ОТ ПТИЦИ

Nikolay Dukov, Prolet Deneva, Todor Ganchev, Plamen Parushev

Technical University of Varna, str. Studentska 1, 9010 Varna, Bulgaria

E-mail: [tganchev@tu-varna.bg](mailto:tganchev@tu-varna.bg), URL: <http://tu-varna.bg/aspl/>

**Abstract:** Wearable tracking devices provide the opportunity to closely monitor certain behaviors of animals. Such trackers typically transmit timestamped location and temperature information (and some tracker self-diagnostic data) that provide important clues about the migration patterns and schedule of birds and mammals. Nonetheless, an adequate behavior and lifecycle monitoring studies depend on human expert based prolonged field observations, which are logistically challenging and expensive. In the present contribution, we outline the conceptual design of a wearable audio logger for animal sounds, which is capable of sound event recognition and species identification. This logger makes possible the registration of specific types of sound events, associated with the lifecycle and activity patterns of large birds, or the recording of all sound events that exceed certain predefined sound level. Such a logger is seen an important tool for the collection of detailed information in support of long-term studies on behaviors and lifecycle of birds.

**Key words:** sound activity detection, automated acoustic recognition of bird species, feature extraction, probabilistic neural network (PNN), field-programmable gate array (FPGA), complex programmable logic devices (CPLD)

### 1. INTRODUCTION

Bird monitoring is associated with the need to obtain observational data that facilitate the better understanding of species behavior and lifecycle. Most often, the quantities of primary concern are related to population dynamics, population density, and disease transmission vectors. Typical bird monitoring procedures involve the identification of observational sites, where equipment for audio-visual monitoring and data logging is deployed. Such automated or semi-automated recording setups typically rely on fixed-position recording devices. These devices capture contextual information and register animal activity allowing researchers to infer knowledge about behaviors of species in the specific habitat type, usually within a relatively small area.

In addition, when the primary objective of studies is to register the movement patterns of birds, researchers rely on wearable trackers<sup>1,2</sup>, which are attached to preselected adult animals. Depending on the wearable tracker weight, here we provisionally distinguish among three categories of trackers:

- small – 20-25 grams,
- medium – 30-40 grams,
- big – 50-90 grams.

Each of these three categories is oriented towards a specific subset of bird species grouped with respect to the birds' weight, size of feathers, flight capabilities etc. The use of tracker of an inappropriate size increases the risks of worsening the survival chances of tracked individuals, or the energy balance of the tracker due to the feather size.

The category-specific parameters of the aforementioned groups of trackers are summarized in Table 1. In brief, trackers differ primarily in weight, length, width, height, output power,

and operational lifetime.

Among the common technical characteristics of these trackers are:

- sensors – GPS, battery voltage, activity, temperature, transmission counter, uptime,
- attachment – “leg band”, “backpack”, “under skin”, “patagial”, “neck mount”,
- transmit interval – 60 second rate standard, adjustable,
- duty cycles – programmable,
- antenna length – 195.55 mm,
- transmitter frequency – 401.66 MHz,
- operating temperature range – -20°C to 50°C,
- power source – lithium battery, solar cell with rechargeable battery.

All aforementioned categories of trackers do not register, process, or store acoustic events. In the present contribution, we present the conceptual design of an intelligent wearable device for bird monitoring with functionality allowing the registration, recognition, and storage of audio events. In particular, the proposed tracker is capable of sound event recognition and species identification. The last makes feasible the registration of specific types of sound events, associated with the lifecycle and activity patterns of large birds, or the recording of all sound events that exceed certain predefined sound level. Such audio logger is seen as an important tool for the collection of detailed information in support of long-term studies on bird migration, behaviors, and lifecycle of birds. In this regard, the main challenges are associated with the size, weight, and energy consumption of the tracking device. Our primary objective was to investigate the complexity of design and the feasibility of implementation by means of ASIC / CPLD / FPGA / SoC technology.

In Section 2 we outline the overall concept of the proposed tracker and in Section 3 discuss the feasibility of FPGA-based implementation of the audio processing and pattern recognition

<sup>1</sup> North Star Science and Technology, LLC, URL: <http://www.northstarst.com/tracking-birds>

<sup>2</sup> Advanced Telemetry Systems, Inc., URL: <https://atstrack.com/contact.html>

methods. Finally, in Section 4 we offer discussion and concluding remarks.

Table 1. Category-specific parameters of wearable bird trackers

| Group            | Small                              | Medium                             | Big                                |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Weight           | 20 – 25 g                          | 30 – 40 g                          | 55 – 90 g                          |
| Length           | 50.8 – 63.5 mm                     | 63.5 mm                            | 63.5 – 74.93 mm                    |
| Width            | 20.6 – 22.6 mm                     | 22.6 mm                            | 34 – 37.01 mm                      |
| Height           | 13.97 – 16.0 mm                    | 15.74 – 17.27 mm                   | 27.94 – 37.94 mm                   |
| Output Power     | 200 – 225 mW standard - adjustable | 200 – 225 mW standard - adjustable | 250 – 300 mW standard - adjustable |
| Operational Live | From 500 hours to 3 years          | From 1000 hours to 4 years         | From 1000 hours to 4 years         |

## 2. INTELLIGENT AUDIO LOGGER

We present the conceptual design of an intelligent audio logger purposely designed for the needs of automated acoustic monitoring of bird activity. The mandatory functionality involves registering and recognition of certain sound events of interest for specific species or alternatively of all sound events, which exceed some predefined audio level. The conceptual diagram of the audio logger is shown on Fig.1. As with the traditional tracker devices,<sup>1,2</sup> *Optional Modules* such as GPS, GSM, and UHF/VHF Radio are considered, as well as *Additional Modules* such as Accelerometer, Temperature sensor etc. The optional and additional modules are not mandatory and might not be implemented to secure longer autonomous operation of the device, however most often these are desirable as they provide additional contextual information. Such information provides the opportunity for a more accurate interpretation of the registered sound events.

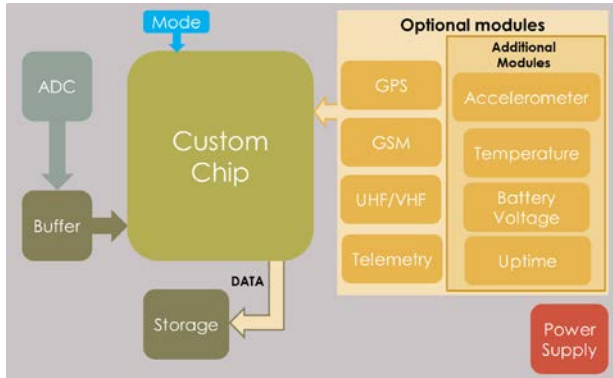


Fig. 1. Overall block diagram of the intelligent audio logger

Mandatory modules in the current design are the ADC, Buffer, and Custom chip. All intelligence and data processing functionality of the audio logger is implemented in the Custom Chip. At the current stage, we aim at the development of functional demonstrator, which is implemented in an FPGA chip. The ADC permits up to 48 kSPS with resolution of 16-bit per sample. The Buffer is designed to store up to 5 seconds of sound and is implemented with an 8-Mbit SRAM. The memory size is straightforwardly extendable, so larger buffers are feasible. The Storage module is implemented with a micro SD card with capacity up to 256 GBs. The block Mode should be perceived as a switch which controls whether every sound event with significant energy should be recorded, or only those recognized by the species-specific recognizer(s).

Depending on the particular configuration of mandatory, optional and additional modules, various types of complementary data (temperature, location etc.) can be recorded as well for each logged sound event.

## 3. FPGA IMPLEMENTATION

The Custom Chip implements four main blocks – *Acoustic Activity Detector*, *Feature Extraction*, *Probabilistic Neural Network* and *Storage Controller*. In the following subsections we discuss the design of the first three of these components.

### 3.1 Acoustic activity detector

The acoustic activity detector considers signal frames with duration of 1 ms, for which the signal energy is calculated:

$$E_s = \sum_{n=0}^{N-1} |S(n)|^2. \quad (1)$$

Here  $n = 0, 1, \dots, N-1$  corresponds to one sound frame of  $N$  samples. From the perspective of prospective hardware implementation, the mathematical operation *power of two* can be realized as a simple shift operation. This saves considerable amount of chip resources compared to the more costly multiplication.

The energy computed through (1) is further used in order to detect the boundaries of significant portions of an audio event. Here we made use of energy-based method which calculates the short-term energy (1) and then compares it to two thresholds (Fig.2).

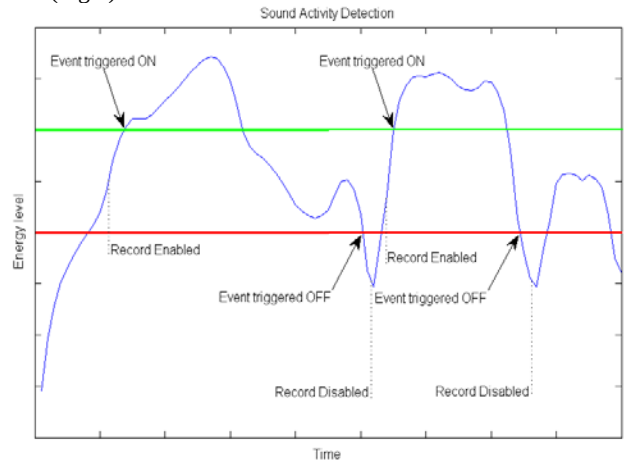


Fig. 2. Energy-based acoustic activity detection method

The two thresholds have the following meaning:

- sound event on-set – the value at which an event is triggered on (where the event begins).
- sound event off-set – the value at which the event is triggered off (where the event ends).

Furthermore, a 3-tap median filter smooths the sudden changes in energy levels, which might be due to environmental noise or interferences from non-target sound sources.

### 3.2 Feature extraction

For the purpose of sound event recognition, we consider feature extraction process, which computes the linear frequency cepstral coefficients (LFCC). The procedure for LFCC computation implements the following steps. Each audio block becomes subject to the discrete Fourier transform (DFT):

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot \exp\left(\frac{-j2\pi nk}{N}\right), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

where  $n$  is the index of the time-domain samples and  $k$  is the index of frequency component in the Fourier coefficients  $S(k)$ . Next, a linear equal-spaced and equal-width filter-bank is applied on the power spectrum:

$$H_i(k) = \begin{cases} 0 & \text{for } k < f_{b_{i-1}} \\ \frac{(k - f_{b_{i-1}})}{(f_{b_i} - f_{b_{i-1}})} & \text{for } f_{b_{i-1}} \leq k \leq f_{b_i} \\ \frac{(f_{b_{i+1}} - k)}{(f_{b_{i+1}} - f_{b_i})} & \text{for } f_{b_i} \leq k \leq f_{b_{i+1}} \\ 0 & \text{for } k > f_{b_{i+1}} \end{cases} \quad (3)$$

Here, the index  $i$  stands for the  $i$ th filter,  $f_{b_i}$  are the boundary points of the filters, and  $k = 1, 2, \dots, N$  corresponds to the  $k$ th coefficient of the  $N$ -point DFT. After applying the filter-bank the log-energy output is computed as:

$$S_i = \log_{10} \left( \sum_{k=0}^{N-1} |S(k)|^2 \cdot H_i(k) \right), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

where  $S_i$  is the output of the  $i$ th filter,  $|S(k)|^2$  is the power spectrum, and  $N$  is the DFT size.

In order to obtain the LFCC parameters a decorrelation is performed by means of DCT:

$$LFCC(r) = \sum_{i=1}^M S_i \cos\left(\frac{r(i-0.5)\pi}{B}\right), \quad r = 0, 1, \dots, R-1 \quad (5)$$

Here  $r$  is the LFCC index and  $R \leq M$  is the total number of unique LFCC that can be computed. For larger  $R$  the values of the LFCC with index  $r \geq M$  mirror these of the first  $M$  coefficients.

The hardware implementation of LFCC feature extraction follows the sequence of operations (2)-(5) and it is composed of four modules: (i) an FFT module, which outputs the absolute spectrum values, (ii) a filter-bank module with linear-spaced equal-width triangular filters, (iii) a logarithmic module, (iv) a DCT module.

The workflow of the *Feature Extraction* module as well as the subsequent *Probabilistic Neural Network* module activate only when the acoustic activity detector selects portion of audio for further processing and *Mode* is set to recognition. Otherwise, when *Mode* is set to sound level, all events are logged. The last will require higher power consumption and shorten the autonomy period of the logger.

When a sound event is detected, a 20 ms window is used to cut segments for the FFT module. A 1024-point FFT is implemented by means of the IP provided by the manufacturer of the FPGA chip. After that, the filter-bank of linear-spaced triangular filters is applied on the power spectrum. The next two modules needed for forming the cepstral coefficients are rather complicated and expensive to implement in a FPGA chip, so they are approximated with LookUp tables. In order to save resources these are implemented as a single LUT that approximates the combined effect of both operations.

### 3.3 Probabilistic neural network

The PNN [1] is a three-layer structure which in the first and second layer estimates the probability density function (PDF) for each and every class and then in the third layer makes use of a Bayesian optimal classification scheme to decide the winning class. Most often, the PDF is estimated by employing a sum of spherical Gaussian functions that are centered at each training vector:

$$p_i(x | k_i) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} \sigma_i^d} \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{M_i} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2} (x - x_{ij})^T (x - x_{ij})\right) \quad (6)$$

where  $i=1, \dots, K$  is the class index,  $\sigma_i^d$  is the *sigma* aka *smoothing factor*, which regulates the receptive field of the kernel function. The input vector  $x$  and the centers  $x_{ij}$  of the kernel are of dimensionality  $d$ , and  $M_i$  is the number of pattern units in a given class  $k_i$ . Finally, *exp* stands for the exponential function, and the superscript  $T$  denotes the transpose of the vector.

Consequently, the PNN makes the classification decision in accordance with the Bayes' strategy for decision rules:

$$D(x) = \arg \max_i \{P(k_i) p_i(x | k_i)\}, \quad i = 1, \dots, K \quad (7)$$

where  $P(k_i)$  is the *a priori* probability for class  $k_i$ . Besides the decision, PNNs also provide a probability and confidence measure of each classification.

The hardware implementation of PNN requires coping with three important design considerations:

- custom chip area,
- classification accuracy,
- computational speed.

Furthermore the implementation of the *PDF* of the PNN is a challenge by itself. Using the traditional Parzen window *PDF* as in (6) we can expect a rather complicated and expensive implementation due to the exponential function. A workaround is to use a LUT to approximate the exponent [2]. However, a special attention should be paid to its size, values, and etc. and not only to make a good estimate, but to utilize the chip resources efficiently [3].

Another solution is the use of different *PDF* altogether [4] and more precisely a hardware friendly one [5]. However, this approach requires the performance evaluation of various probability density functions for each problem and the definition of criteria for the selection of the most appropriate. In the present work, for the needs of the intelligent audio logger we consider the implementation of the PNN with the commonly used *PDF* combined with LUT for the exponential part.

## 4. DISCUSSION AND CONCLUSION

In the present work we evaluate the feasibility of wearable audio logger and propose a conceptual design, which is integrated based on of-the-shelf components, sensors, and modules. In the same time we introduced functionality for the automated recognition of certain set of audio events (or species), so that only certain sound events of interest are recorded. Alternatively all sound events which exceed certain threshold can be logged. Such functionality facilitates the automated acoustic monitoring of bird behavior.

The implementation of such logger is currently at the stage of development of functional proof-of-concept prototype based on the Cyclone IV FPGA chip. At this stage we are focused on experimenting with different implementations of the main and optional modules and with the optimization of resources required. The mid-term objective of this project is to design and implement a battery powered mobile prototype, and the long-term objective is miniaturization of the audio logger.

## REFERENCES

- [1]. D. Specht. *Probabilistic Neural Networks*, Neural Networks, Vol. 3, 1990, pp. 109 – 118.
- [2]. N. Dukov, T. Ganchev, D. Kovachev. *FPGA implementation of Probabilistic Neural Network with the Altera Cyclone family*, Proc. of the International Scientific Conference UNITECH-2014 Gabrovo. 21-22 November 2014, vol.1, pp. 309 – 314.
- [3]. N. Dukov, T. Ganchev, D. Kovachev. *Empirical Study Of PNN Sensitivity To The Exponential Function Approximation In FPGA Implementations*, Yearbook TU-Varna, Vol. 1, 2014, pp. 53 – 58.
- [4]. T. Cacoullos. *Estimation of a multivariate density*, Annals of the Institute of Statistical Mathematics, Vol. 18 (1), 1966, pp. 179 – 189.
- [5]. N. Dukov. *Comparative evaluation of Probability Density Estimators for the Probabilistic Neural Network*. Proc. XXV International Scientific Conference Electronics - ET2016, September 12 - 14, 2016, Sozopol, Bulgaria

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p>Варна<br/>14 - 15.10.2016 г.<br/>София<br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                     |

## МНОГОКАНАЛЕН ХИБРИДЕН M&Q MC- CDMA/ TDMA- ПРЕДАВАТЕЛ С ЕДИНЕН НАБОР ОРТОГОНАЛНИ ПОДНОСЕЩИ ЧЕСТОТИ И РАЗЛИЧНИ ОРТОГОНАЛНИ КОДОВИ ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТИ

### MULTICHANNEL HYBRID M & Q MC- CDMA / TDMA- TRANSMITTER WITH ONE CLASS ORTHOGONAL SUBCARRIER FREQUENCIES AND DIFFERENT ORTHOGONAL CODES SEQUENCES

доц. д-р инж. Петров П. П., доц. д-р инж. Димова Р. С., доц. д-р инж. Найденов Б. Г.

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА, България, E-mail: rdim@tu-varna.bg, borna@tu-varna-bg

**Abstract:** It is formulated the main technical contradiction of hybrid multichannel transmitter and adapted method for dealing with. On this basis it is synthesized and analyzed a new architecture of hybrid multi-channel base station transmitter of the new generation, which has preserved all the advantages and remove the main disadvantage of the prototype.

**Keywords:** Duplicated Frequency Spreading, Frequency Diversity; Multi Carrier-Code Division Multiple Access; Orthogonal Frequency Division Multiplexing; Time Division Multiplexing.

#### 1. УВОД

Постановка на задачата. За съществено намаляване влошаването на характеристиката на достоверността на приетата информация в условия на многолъчевост в [1] е предложен многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател за базова станция от ново поколение с единна кодова последователност и различни набори ортогонални подносещи честоти (фиг. 1). Последните са обособени в  $N \times G$  - правоъгълна матрица, като в G-те на брой колони са подредени последователни подносещи честоти, минималният интервал между които е  $\Delta f = 1/T_x$ , а в N-те на брой редове – непоследователни подносещи честоти, минималният интервал между които е  $N/T_x$ . Това означава, че ако честотите от един ред, например n-тия се използват за разнасяне по честота на символа  $x_n(t)$ , тогава условието за разнасяне по честота [2, 3, 4]

$$(1) \Delta f_{FD} = r/T_x \geq \Delta f_{coh} \approx 1/T_{max}; T_{max} \geq T_x/r; r \geq 2$$

приема вида

$$(2) \Delta f_{FD} = N/T_x \geq \Delta f_{coh} \approx 1/T_{max}; T_{max} \geq T_x/N$$

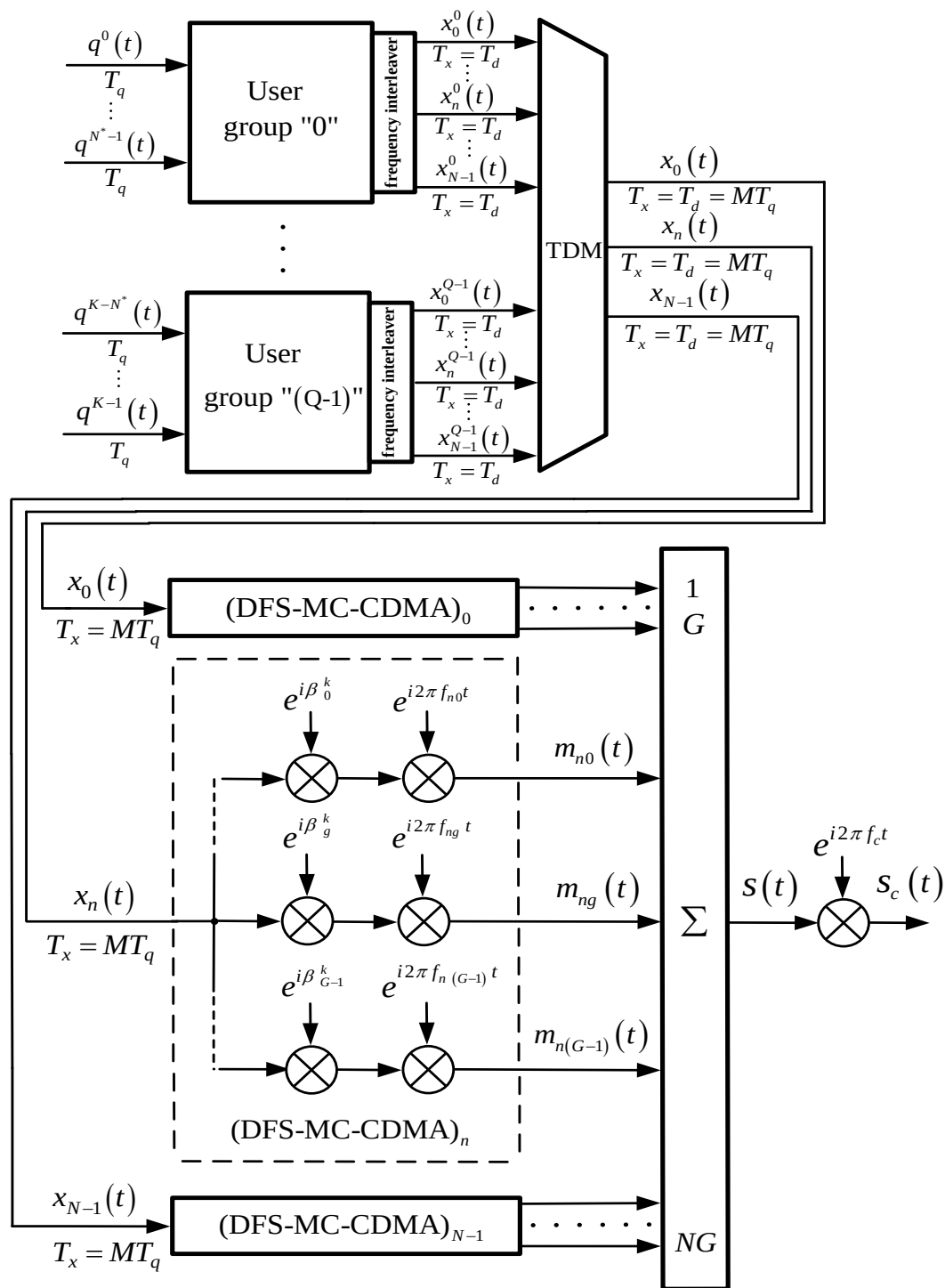
В тези формули  $\Delta f_{coh} \approx 1/T_{max}$  е кохерентна ширина на лентата (Coherence Bandwidth);  $T_{max}$  - максимално допълнително закъснение (Maximum Excess Delay);  $T_x = MT_q$  - продължителност на TDM (Time Division Multiplexing) – мултиплексирани символи  $x_0(t), ..., x_n(t), ..., x_{N-1}(t)$  на съответния ползвател;  $N=MN^*$ ; M– брой на последователно предаваните високоскоростни символи (всеки с продължителност ) от всеки ползвател, които след серийно-паралелен преобразовател се предават едновременно по M-броя

подканални чрез нискоскоростните символи (всеки с продължителност  $T_d = MT_q$ ) на паралелния код;  $N^*$  – брой на чиповете в ортогоналната кодова последователност на Уолш, използвана за кодиране на нискоскоростните символи на съответния ползвател.

Тъй като в (2),  $N=MN^* \gg 2$  [1], тогава условието за разнасяне по честота  $\Delta f_{FD} \geq \Delta f_{coh}$  практически ще се изпълнява и за най-тежките условия за функциониране на мобилната система. От тази гледна точка, определено може да се каже, че предавателят от фиг. 1 е най-добрият.

Единствен и в същото време много голям недостатък на предавателя от фиг. 1 е G-пъти по-широката му честотна лента в сравнение с тази на многоканалния хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател (фиг. 2 [5]). Това означава, че е налице сериозно техническо противоречие: за осигуряване на висока спектрална ефективност на мобилната радиокommunikationна система е необходимо  $G=1$  (което се реализира чрез предавателя от фиг. 2 с традиционен OFDM – модулатор), а за осигуряване на висока достоверност на приетата информация в условия на многолъчево затихване на сигналите, доближаващо се до BER (Bit Error Rate) в условия само на AWGN (Additive White Gaussian Noise) е необходимо  $G \rightarrow \infty$  (което се реализира чрез предавателя от фиг. 1 с G –кратно разнасяне по честота).

Целта е да се синтезира и анализира нова архитектура на многоканален хибриден предавател, чрез която да се преодолее това техническо противоречие и се запазят всички предимства на предавателя от фиг. 1.



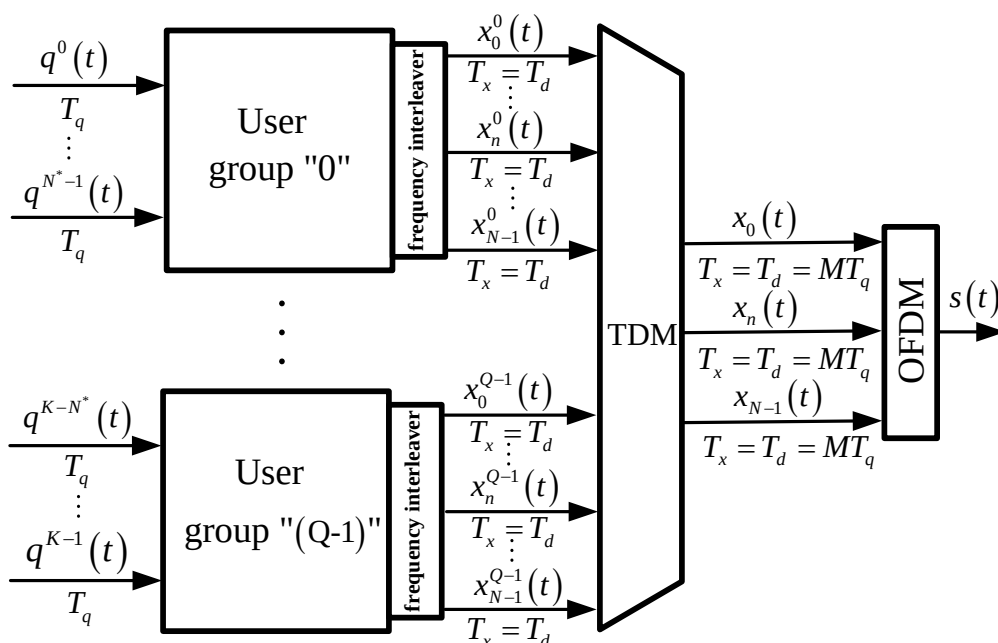
Фиг. 1. Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател с единна кодова последователност и различни набори ортогонални подносещи честоти

## 2. ИЗЛОЖЕНИЕ

**Принцип на построяване на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател с единен набор ортогонални подносещи честоти и различни ортогонални кодови последователности**

В съответствие с [6-8] за преодоляване на техническото противоречие в предавателя от фиг. 1 се

предлага всеки от TDM – мултиплексираните символи  $x_0(t), \dots, x_n(t), \dots, x_{N-1}(t)$  да се предава чрез един и същи набор от  $G=N$  ортогонални честоти с минимален интервал между тях  $\Delta f_{FD} = r / T_x = 2 / T_x = 2 / MT_q$  и собствена ортогонална кодова последователност  $C_n(f)$  от матрицата



Фиг. 2. Структура на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA - предавател

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} c_0^0 & c_1^0 & \dots & c_g^0 & \dots & c_p^0 & \dots & c_{N-1}^0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_0^n & c_1^n & \dots & c_g^n & \dots & c_p^n & \dots & c_{N-1}^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_0^m & c_1^m & \dots & c_g^m & \dots & c_p^m & \dots & c_{N-1}^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_0^{N-1} & c_1^{N-1} & \dots & c_g^{N-1} & \dots & c_p^{N-1} & \dots & c_{N-1}^{N-1} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{matrix} C^0(f) \\ \dots \\ C^n(f) \\ \dots \\ C^m(f) \\ \dots \\ C^{N-1}(f) \end{matrix}
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

Кодовата последователност  $C^n(f) = \{c_0^n, c_1^n, \dots, c_g^n, \dots, c_p^n, \dots, c_{N-1}^n\}$ , когато се използват съответно кодове на Уолш или CI (Carrier Interferometry) – кодове [8] има вида [9]:

$$(4) \quad C^n(f) = \{c_0^n = e^{i\beta_g^n}, \dots, c_g^n = e^{i\beta_g^n}, \dots, c_{N-1}^n = e^{i\beta_{N-1}^n}\};$$

$$\begin{aligned}
 (5) \quad C^n(f) &= \left\{ c_0^n = e^{i\theta_g^n}, \dots, c_g^n = e^{i\theta_g^n} = \right. \\
 &= e^{ig\theta^n}, \dots, c_{N-1}^n = e^{i\theta_g^n} = e^{i(N-1)\theta^n} \left. \right\},
 \end{aligned}$$

където  $c_g^n = e^{i\beta_g^n} = \{-1, +1\}$  е g-ти чип на n-тата ортогонална кодова последователност на Уолш  $W_n^N; \beta_g^n = \{0, \pi\}; c_g^n = e^{i\theta_g^n}$  - g-ти чип на n-тата ортогонална CI-кодова последователност;

$$(6) \quad \theta_g^n = [(2\pi/N)n]g = g\theta^n; n = 0, 1, \dots, N-1.$$

Изразите (4) и (5) показват, че ортогоналните кодове на Уолш се явяват частен случай на ортогоналните CI-кодове, което позволява тяхното разглеждане от единна позиция.

На основата на гореизложеното може да се синтезира показаната на фиг. 3 структура на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател с единен

набор ортогонални подносещи честоти  $f_g = 2\pi g \Delta f_{FD} t$  ( $g=0,1,\dots,G-1$ ) и различни ортогонални кодови последователности на Уолш (4).

Във всеки DFS-MC-CDMA (Duplicated Frequency Spreading MC-CDMA) – блок (например, n-тия) всеки  $G=N$ -пъти дублиран символ  $x_n(t)$ , например g-тия се кодира с предназначения за него код  $c_g^n = \exp(i\beta_g^n)$ , представляващ g-тия чип на n-тата ортогонална кодова последователност на Уолш  $W_n^N = C^n(f)$  (4) и имащ същата продължителност  $T_x$ . Тогава в съответствие с [1,5] за j-тия времеви интервал  $T_x = MT_q (j = 0, 1, \dots)$ , съответстващ на определен слот от честотно-времовото разпределение на ресурса на връзката:

1) на изхода на всеки g-ти лентов модулатор от n-тия DFS-MC-CDMA- блок се формира модулирания сигнал

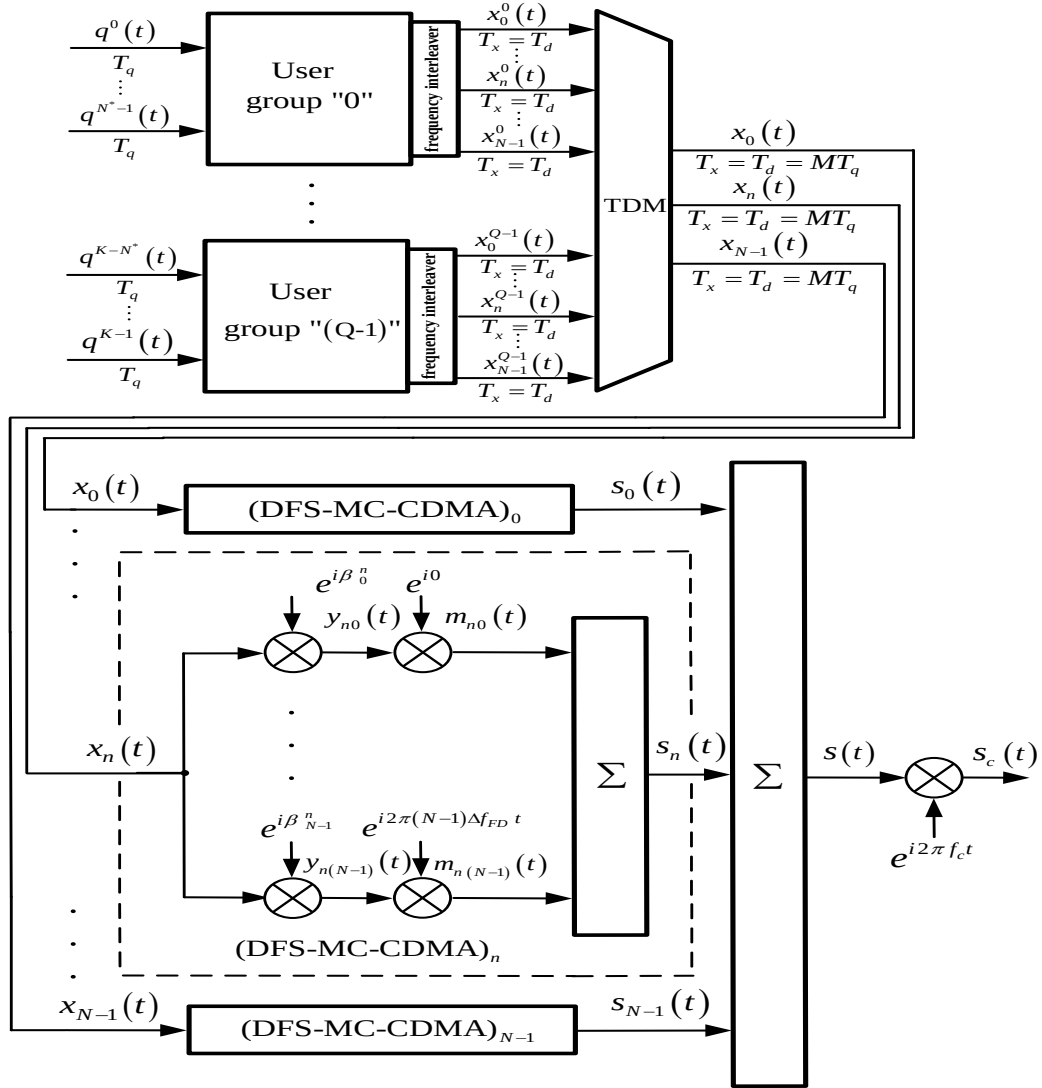
$$\begin{aligned}
 (7) \quad m_{j,ng}(t) &= x_{j,n}(t) e^{i\beta_g^n} e^{i\omega_g t} = \\
 &= A_{j,n}(t) e^{i[\phi_{j,n}(t) + \beta_g^n]} e^{i2\pi g \Delta f_{FD} t} = y_{j,ng}(t) e^{i2\pi g \Delta f_{FD} t},
 \end{aligned}$$

2) на изхода на всеки DFS-MC-CDMA – блок, характеризиращ предаването на символа  $x_n(t)$  чрез пълния набор от  $G=N$  ортогонални подносещи честоти се формира подканалния модулиран сигнал

$$\begin{aligned}
 (8) \quad s_{j,n}(t) &= \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} m_{j,ng}(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} y_{j,ng}(t) e^{i2\pi g \Delta f_{FD} t} = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} A_{j,n}(t) e^{i[\phi_{j,n}(t) + \beta_g^n]} e^{i4\pi g t / T_x};
 \end{aligned}$$

3) на изхода на общия суматор  $\Sigma$  се формира пълния base band – сигнал

$$\begin{aligned}
 (9) \quad s_j(t) &= \sum_{n=0}^{N-1} s_{j,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{g=0}^{G-1} y_{j,ng}(t) e^{i2\pi g \Delta f_{FD} t} = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{g=0}^{G-1} A_{j,n}(t) e^{i[\phi_{j,n}(t) + \beta_g^n]} e^{i2\pi g \Delta f_{FD} t}
 \end{aligned}$$



Фиг. 3. Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA - предавател с единен набор ортогонални подносещи честоти и различни ортогонални кодови последователности на Уолш

4) след техническата функция за линеен пренос на спектъра на (9) на необходимата висока носеща честота  $\omega_c = 2\pi f_c$  за аналоговия алгоритъм, формиращ предавания високочестотен сигнал се получава:

$$s_{j,c}(t) = s_j(t)e^{i\omega_c t} = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{g=0}^{G-1} A_{j,n}(t) e^{i[\varphi_{j,n}(t) + \beta_g^n]} e^{i2\pi(g\Delta f_{FD} + f_c)t}, \quad (10)$$

който се редуцира до вида

$$s_{j,c}(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{g=0}^{G-1} a_{j,n}(t) e^{i\beta_g^n} \cos 2\pi(g\Delta f_{FD} + f_c)t \quad (11)$$

при използване на BPSK (Binary Phase Shift Keying).

По такъв начин, в сравнение с многоканалния предавател от фиг. 1, където всеки символ  $x_0(t), \dots, x_n(t), \dots, x_{N-1}(t)$  се предава чрез собствен набор от  $G=N$  на брой подносещи честоти, в предлаганата архитектура на многоканален хибриден предавател (фиг. 3), всичките символи се предават чрез един и същи набор от  $G=N$  на брой ортогонални подносещи честоти в честотна лента

$$F_{M\&Q\ MC-CDMA/TDMA/DFS-Уолш} = G\Delta f_{FD} = rG\Delta f = rG/T_x = rN/T_x = 2G/T_x = 2N/T_x \quad (12)$$

Последната е  $N/r = N/2$  - пъти по-тясна от пропусканата честотна лента на M&Q MC-CDMA/TDMA/DFS - предавателя (фиг. 1) [1]

$$F_{M\&Q\ MC-CDMA/TDMA/DFS} = NG/T_x = MN^*G/T_x \quad (13)$$

и само  $r = 2$  пъти по-широка от тази на многоканалния M&Q MC-CDMA/TDMA - предавател (фиг. 2) [5]

$$F_{M\&Q\ MC-CDMA/TDMA} = F_{group"Q"} = N/T_x = MN^*/T_x \quad (14)$$

### 3. ИЗВОДИ

В предложения многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA/DFS-Уолш - предавател (фиг. 3) чрез подходяща стойност на  $M$  лесно се изпълнява условието за отсъствие в канала на честотно-избирателни и бързи затихвания на сигналите

$$\Delta f_{coh} \approx 1/T_{max} > F_x \approx 1/T_x > f_D \approx 1/T_{coh}; \quad T_{max} < T_x = MT_q < T_{coh}, \quad (15)$$

а чрез предаване на един и същи символ  $X_n(t)$  на  $G$  на брой ортогонални подносеци честоти, минималното разстояние между които удовлетворява условието

$$(16) \Delta f_{FD} = r/T_x \geq \Delta f_{coh} \approx 1/T_{max}; T_{max} \geq T_x/r; r \geq 2$$

се осъществява ефективна борба с намаляването на SNR (Signal-to-Noise Ratio), вследствие амплитудното или бавното затихване на сигналите. В резултат на използваната комбинация от методи за борба с многолъчевото затихване на сигналите, всеки от честотно-разнесените канали може да се разглежда като неизбирателен по честота, с бавни затихвания и с разпределение на обвиващата на сигнала по закона на Релей.

#### 4. ЛИТЕРАТУРА:

[1]. Петров, П. Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предаватели с единна кодова последователност и различни набори ортогонални подносеци честоти. Научна конференция Акустика'2013.  
[2]. Петров, П., Б. Найденов. Принципи на построяване, технически ограничения и сравнителна оценка на OFDM и MC-CDMA – предаватели в условия на многолъчево затихване на сигналите – част 1. Юбилейна научна сесия на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”, Варна, 2011.

[3]. Петров, П., Б. Найденов. Принципи на построяване, технически ограничения и сравнителна оценка на OFDM и MC-CDMA – предаватели в условия на многолъчево затихване на сигналите – част 2. Юбилейна научна сесия на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”, Варна, 2011.

[4]. Клър, Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. под ред. А. В. Назаренко. Москва, издательский дом „Вильямс”, 2003, 1104с.

[5]. Петров, П. Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател за базова станция от ново поколение. Научна конференция Акустика'2013.

[6]. Петров, П. Комбинирано използване на методите за разнасяне по честота и хибридно multicode-TDM-OFDM – мултиплексиране в низходящата линия за връзка на 4G-част 1. Научна конференция “Акустика” 2011.

[7]. Петров, П. Комбинирано използване на методите за разнасяне по честота и хибридно multicode-TDM-OFDM – мултиплексиране в низходящата линия за връзка на 4G-част 2. Научна конференция Акустика' 2011.

[8]. Nasar, C., Natarajan B., Wu Z., Wiegandt D., Zekavat S., Shattil S. Multi – Carrier Technologies for Wireless Communication. Kluwer Academic Publishers, 2002.

[9]. Петров, П. Метод за хибридно SS-TDM-MC-мултиплексиране в низходящата линия на 4G. Национална конференция на Шуменски университет „Еп. К. Преславски“, 2011.

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p>Варна<br/>14 - 15.10.2016 г.<br/>София<br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                     |

## ПРИЛОЖЕНИЕ НА ОРТОГОНАЛНИТЕ СИ – КОДОВЕ В МНОГОКАНАЛЕН ХИБРИДЕН M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS – ПРЕДАВАТЕЛ С ЕДИНЕН НАБОР ОРТОГОНАЛНИ ПОДНОСЕЩИ ЧЕСТОТИ И РАЗЛИЧНИ ОРТОГОНАЛНИ КОДОВИ ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТИ – ЧАСТ 1

### APPLICATION OF ORTHOGONAL CI - CODES IN MULTICHANNEL HYBRID M&Q MC- CDMA/TDMA/CI-DFS - TRANSMITTER WITH A SINGLE SET OF ORTHOGONAL SUBCARRIERS AND DIFFERENT ORTHOGONAL CODE SEQUENCES – PART I

доц. д-р инж. Петров П. П., доц. д-р инж. Димова Р. С., доц. д-р инж. Найденов Б. Г.

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – Варна, България, E-mail: rdim@tu-varna.bg, borna@tu-varna-bg

**Abstract:** Architecture of multi-channel hybrid M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS - transmitter with a single set of orthogonal subcarriers and different orthogonal CI - code sequences for new generation base stations is synthesized. Have been achieved its basic functional dependencies and have been analyzed the capabilities of M & Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS system in attenuation condition of the signals by the Raleigh law.

**Keywords:** Carrier Interferometry, Code Division Multiplexing, Multi Carrier-Code Division Multiple Access, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Orthogonal Frequency Multiple Access.

#### 1. УВОД

За повишаване достоверността на приетата информация в условия на многолъчевост в [1] чрез комбинирано използване на методи за разнасяне по честота (Frequency Diversity - FD) и хибридно CDM/OFDM/TDM – мултиплексиране е синтезирана и анализирана нова архитектура на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA/DFS – предавател за базова станция от ново поколение с единен набор ортогонални подносещи честоти и различни ортогонални кодови последователности на Уолш (фиг. 1). Големите възможности на построената на тази база мобилна радиокомуникационна система се определят преди всичко от възможностите на включените в нейния състав DFS-MC-CDMA (Duplicated Frequency Spread MC-CDMA) – блокове (модулатори, демодулатори).

#### 2. ИЗЛОЖЕНИЕ

##### 2.1 Постановка на задачата.

Във всеки DFS-MC-CDMA – модулатор от фиг. 1 за осигуряване на ортогоналност на TDM – мултиплексираните символи при предаването им с един и същи набор от на брой ортогонални подносещи честоти, освен кодирането им с широко използваните ортогонални кодове на Уолш, могат да се използват и кодове на Голд, на Zadoff Chu и CI (Carrier Interferometry)- кодовете [2].

Сравнителна оценка на възможностите на DFS-MC-CDMA - система, използваща съответно кодове на Голд, на Уолш и CI-кодове, относно средната честота за появяване на грешно възстановени в приемника символи (Bit Error Rate – BER) за релеев многолъчев канал при минимална разлика между съседните подносещи честоти е направена в [2]. Установено е, че системата с CI-кодове, често наричана CI-DFS-MC-CDMA – система, при прочие равни

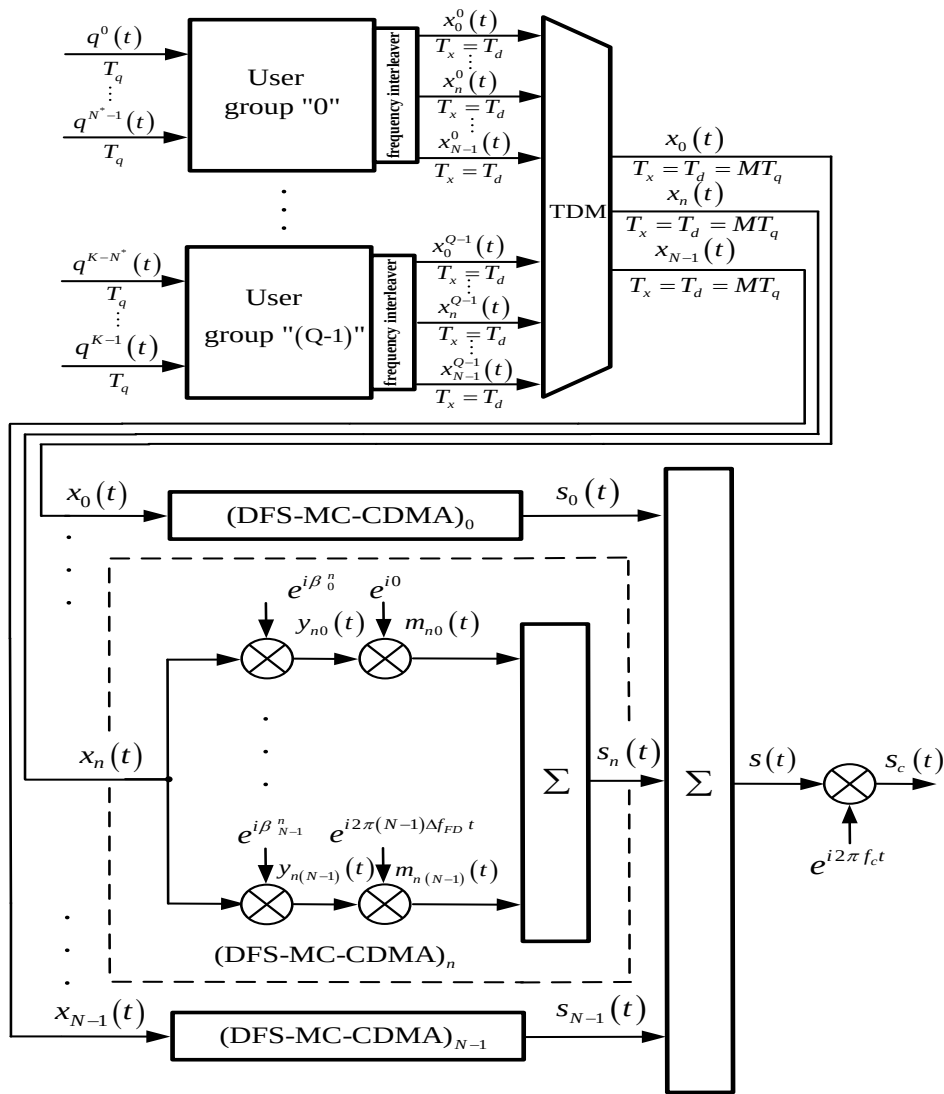
условия осигурява както по-голям капацитет, така и по-малка стойност на BER, което я прави изключително привлекателна за синтез на нови радиокомуникационни системи.

Целта е да се синтезира многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS – предавател с единен набор ортогонални подносещи честоти и различни ортогонални CI – кодови последователности, да се установят неговите основни функционални зависимости и се анализират възможностите на M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS – система при затихване на сигналите по закона на Релей.

##### 2.2. Синтез на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS – предавател с единен набор ортогонални подносещи честоти и различни ортогонални CI-кодови последователности

За количествена и сравнителна оценка на възможностите на многоканалния предавател от фиг. 1 е удачно подканалният модулиран сигнал [1]

$$\begin{aligned}
 (1) \quad s_{j,n}(t) &= \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} m_{j,ng}(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} y_{j,ng}(t) e^{i2\pi g \Delta f_{FD} t} = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} A_{j,n} e^{i[\phi_{j,n}(t) + \beta_g^n]} e^{i4\pi g t / T_x}
 \end{aligned}$$



Фиг. 1 Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA/DFS - предавател с единен набор ортогонални подносещи честоти и различни ортогонални кодови последователности на Уолш

на изхода на всеки DFS-MC-CDMA-модулятор, характеризиращ предаването на символа  $x_{j,n}(t) = A_{j,n}(t)e^{i\phi_{j,n}(t)}$  за  $j$ -тия времеви интервал  $T_x = MT_q$  да се преобразува във вида

$$(2) s_{j,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} A_{j,n}(t) e^{i\phi_{j,n}(t)} e^{i\beta_g^n} e^{i2\pi g \Delta f_{FD} t} = \frac{A_{j,n}(t) e^{i\phi_{j,n}(t)}}{\sqrt{G}} [(C^*)^n(t)],$$

където

$$(3) [(C^*)^n(t)] = \sum_{g=0}^{G-1} c_g^n e^{i2\pi g \Delta f_{FD} t}$$

може да се разглежда като сумарен разширяващ код на предадения  $n$ -ти символ  $x_n(t)$ ;  $c_g^n = e^{i\beta_g^n} = \{-1, +1\}$  –  $g$ -ти чип на  $n$ -тата ортогонална кодова последователност на Уолш  $W_n^N$ ;  $\beta_g^n = \{0, \pi\}$ ;  $\Delta f_{FD} = r/T_x = 2/T_x = 2/MT_q$ ;

$$N=G; n=0,1,\dots,N-1; g=0,1,\dots,G-1;$$

$$jT_x \leq t \leq (j+1)T_x; j=0,1,\dots;$$

$$(4) \begin{vmatrix} e^{i\beta_0^0} & e^{i\beta_1^0} & \dots & e^{i\beta_g^0} & e^{i\beta_{G-1}^0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{i\beta_0^n} & e^{i\beta_1^n} & \dots & e^{i\beta_g^n} & e^{i\beta_{G-1}^n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{i\beta_0^{N-1}} & e^{i\beta_1^{N-1}} & \dots & e^{i\beta_g^{N-1}} & e^{i\beta_{G-1}^{N-1}} \end{vmatrix} \rightarrow \begin{matrix} C^0(f) = W_0^N \\ C^n(f) = W_n^N \\ C^{N-1}(f) = W_{N-1}^N \end{matrix}$$

- система от ортогонални последователности на Уолш.

При използване в предавателя на BPSK (Binary Phase Shift Keying), тогава:

$$a_{j,n}(t) = \pm 1;$$

$$b_{j,n}(t) = 0;$$

$x_{j,n}(t) = \sqrt{[(a_{j,n})^2 + (b_{j,n})^2]} \exp\{\arctg[b_{j,n}(t)/a_{j,n}(t)]\} = a_{j,n}(t)$ , в резултат на което (2) и (3) се редуцират съответно до вида:

$$(5) s_{j,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} a_{j,n}(t) e^{i\beta_g^n} \cos(2\pi g \Delta f_{FD} t) =$$

$$= \frac{a_{j,n}(t)}{\sqrt{G}} [(C^*)^n(t)];$$

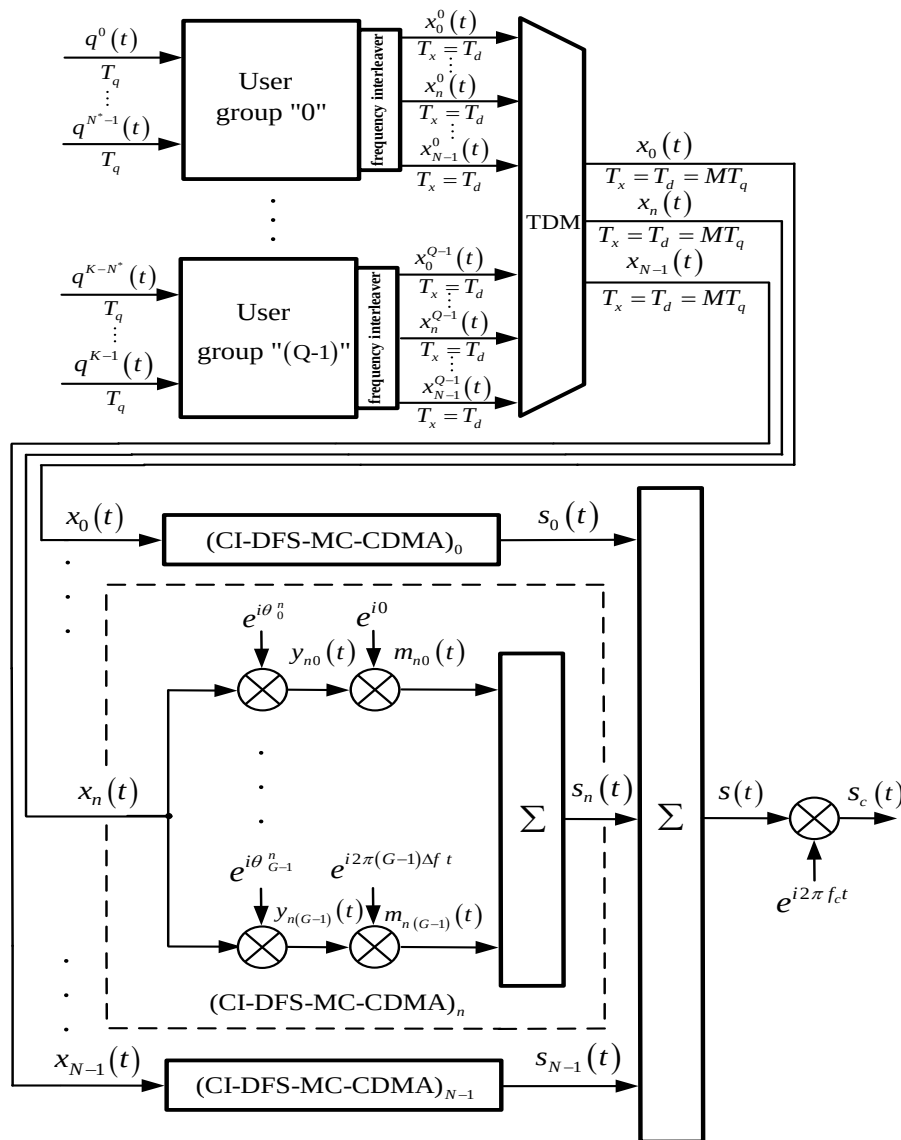
$$(6) [(C^*)^n(t)] = \sum_{g=0}^{G-1} c_g^n \cos(2\pi g \Delta f_{FD} t)$$

За общия случай всеки от TDM – мултиплексирани символи

$x_0(t), \dots, x_n(t), \dots, x_{N-1}(t)$  трябва да се предава чрез един и същи набор от  $G=N$  ортогонални честоти с минимален интервал между тях

$\Delta f_{FD} = r / T_x = 2 / T_x = 2 / MT_q$  и собствена

ортогонална кодова последователност  $C_n(f)$  от матрицата [1]



Фиг. 2. Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS – предавател с единен набор ортогонални подносеци честоти и различни ортогонални CI-кодови последователности

$$(7) \begin{matrix} \begin{bmatrix} c_0^0 & c_1^0 & \dots & c_g^0 & \dots & c_p^0 & \dots & c_{N-1}^0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_0^n & c_1^n & \dots & c_g^n & \dots & c_p^n & \dots & c_{N-1}^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_0^m & c_1^m & \dots & c_g^m & \dots & c_p^m & \dots & c_{N-1}^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_0^{N-1} & c_1^{N-1} & \dots & c_g^{N-1} & \dots & c_p^{N-1} & \dots & c_{N-1}^{N-1} \end{bmatrix} & \rightarrow & \begin{matrix} C^0(f) \\ C^n(f) \\ C^m(f) \\ C^{N-1}(f) \end{matrix} \end{matrix}$$

Кодовата последователност  $C^n(f) = \{c_0^n, c_1^n, \dots, c_g^n, \dots, c_p^n, \dots, c_{N-1}^n\}$ , когато се

използват съответно кодове на Уолш или CI - кодове [2] има вида [1]:

$$(8) C^n(f) = \{c_0^n = e^{i\beta_0^n}, \dots, c_g^n = e^{i\beta_g^n}, \dots, c_{N-1}^n = e^{i\beta_{N-1}^n}\}$$

$$(9) C^n(f) = \left\{ c_0^n = e^{i\theta_0^n}, \dots, c_g^n = e^{i\theta_g^n} = e^{i\theta^n}, \dots, c_{N-1}^n = e^{i\theta_{N-1}^n} = e^{i(N-1)\theta^n} \right\}$$

където  $c_g^n = e^{i\beta_g^n} = \{-1, +1\}$  е g-ти чип на n-тата ортогонална кодова последователност на Уолш

$W_n^N; \beta_g^n = \{o, \pi\}; c_g^n = e^{i\theta_g^n}$  -  $g$ -ти чип на  $n$ -тата ортогонална CI-кодова последователност;

$$(10) \theta_g^n = [(2\pi/N)n]g = g\theta^n; n = 0, 1, \dots, N-1.$$

Изразите (8) и (9) показват, че ортогоналните кодове на Уолш се явяват частен случай на ортогоналните CI-кодове, което позволява тяхното разглеждане от единна позиция.

Следователно, в DFS-MC-CDMA – модулаторите от фиг. 1, вместо ортогоналните кодови последователности на Уолш (4), могат да се използват ортогоналните CI – последователности

$$(11) \begin{bmatrix} e^{i\theta_0^0} & e^{i\theta_1^0} & \dots & e^{i\theta_g^0} & e^{i\theta_{G-1}^0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{i\theta_0^n} & e^{i\theta_1^n} & \dots & e^{i\theta_g^n} & e^{i\theta_{G-1}^n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{i\theta_0^{N-1}} & e^{i\theta_1^{N-1}} & \dots & e^{i\theta_g^{N-1}} & e^{i\theta_{G-1}^{N-1}} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{matrix} C^0(f) \\ \\ C^n(f) \\ \\ C^{N-1}(f) \end{matrix}$$

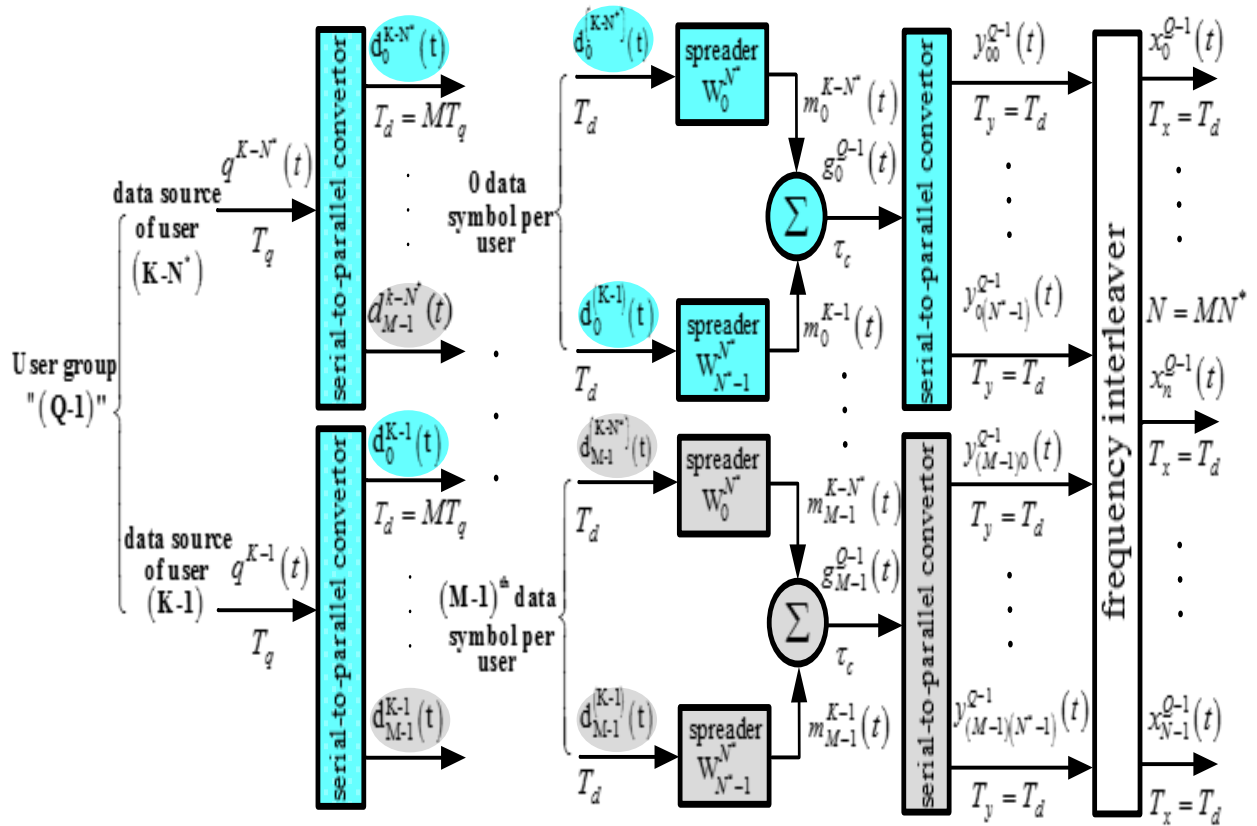
където  $C^n(f)$  е предназначена за  $n$ -тия символ  $x_n(t)$   $n$ -та ортогонална кодова последователност;  $\exp(i\theta_g^n)$  -  $g$ -ти чип на  $n$ -тата CI – последователност;

$$\theta_g^n = [(2\pi / N)n]g = g\theta^n; \theta^n = (2\pi / N)n;$$

$$n = 0, 1, \dots, (N-1); g = 0, 1, \dots, (G-1); N = G.$$

Когато широчината на пропусканата честотна лента на мобилната радиокомуникационна система е един от най-важните показатели, тогава независимо от последствията на нарушеното условие [1]

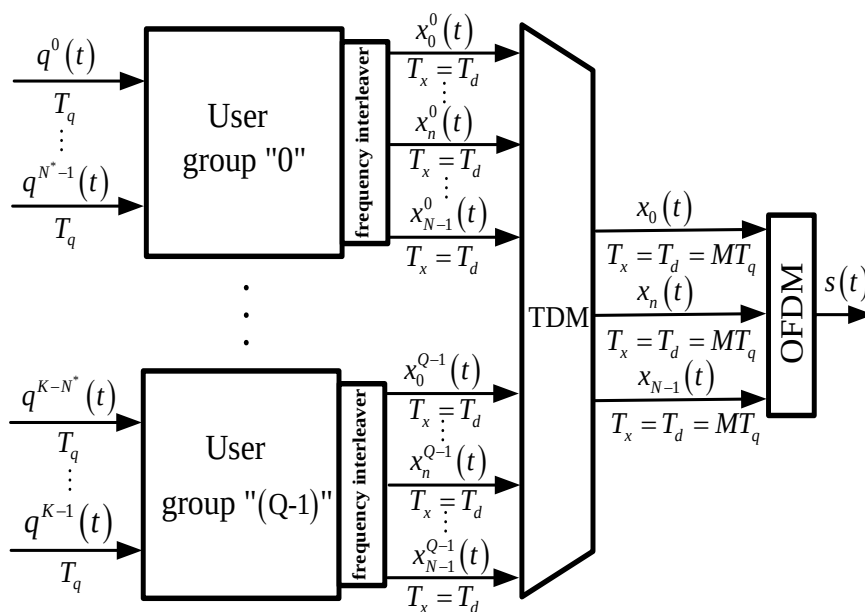
$\Delta f_{FD} = r/T_x \geq \Delta f_{coh} \approx 1/T_{max}; T_{max} \geq T_x / r; r \geq 2$  за предаване чрез много честотно-разнесени и ортогонални подносещи честоти се приема  $\Delta f_{FD} = \Delta f = 1/T_x$  [2].



Фиг. 3. Принцип на построяване на „(Q-1)“-ва група от  $N^*$  на брой ползватели в многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател

На основата на гореизложеното и по аналогия с фиг. 1, може да се синтезира показаната на фиг. 2 схема на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS – предавател с единен набор ортогонални подносещи честоти и различни ортогонални CI-кодови последователности. Тук както и в многоканалния хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател за базова станция от ново поколение [3], големият брой ползватели  $K = QN^*$  равномерно е разпределен на  $Q$  на брой групи, като в

първата („0“-ва) група номерацията на ползвателите е от 0 до  $(N^* - 1)$ , а в последната („(Q-1)“-ва) група – от  $(K - N^*)$  до  $(K - 1)$ . Принципет на построяване на ползвателските групи (например, „(Q-1)“-та група) е показан на фиг. 3 [3], а обработките на сигналите във всяка група се извършва в пълно съответствие с механизма на „M&Q-модификация“ на многоканален MC-CDMA – предавател [4].



Фиг. 4. Структура на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA - предавател

В основата на синтеза на схемата от фиг. 2 е залегнал принципът на хибридно мултиплексиране, представляващ последователна комбинация от: мултиплексиране с кодово разделяне (Code Devision Multiplexing - CDM) на  $M$  на брой паралелни подканални на всеки ползвателски канал; мултиплексиране с ортогонално честотно разделяне (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) на „ $m$ ”-подгрупите на всяка ползвателска група; мултиплексиране с времево разделяне (Time Division Multiplexing – TDM) на ползвателските „ $q$ ”-групи. В резултат на това всеки ползвател за времетраенето на предназначения за него времеви слот предава  $M$ -брой информационни символи (всеки с продължителност  $T_q$ )

чрез всичките  $N = MN^*$  на брой TDM – мултиплексирани символи  $x_0(t), \dots, x_n(t), \dots, x_{N-1}(t)$  (всеки с продължителност  $T_x = T_d = MT_q$ ).

Схемата от фиг. 2 се различава от схемата на многоканалния хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA/DFS-Уолш – предавател (фиг. 1) по това, че: 1) минималната разлика между съседните ортогонални подносещи честоти е  $\Delta f = 1/T_x = 1/MT_q$ , а всяка подносеща се определя с формулата  $f_n = n\Delta f$ , където  $n = 0, 1, \dots, N-1$ ; 2) вместо ортогоналните кодови последователности на Уолш (4) се използват ортогоналните CI-последователности (11).

### 3. ИЗВОДИ

При  $G=1$ , т. е. без разнасяне по честота, схемата от фиг. 2 се редуцира до многоканалния хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател (фиг. 4 [3]) с традиционен OFDM – модулатор, чрез който се осигурява ефективна борба с честотно-избирателните и/или бързите затихвания на сигналите, но не се решава задачата за борба с намаляването на средната стойност на отношението сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio-SNR) при амплитудно (плоско) или бавно затихване на сигналите.

Тази работа е извършена в рамките на проект №BG161PO003-1.2.04-0044-C0001/20.08.2013, финансиран по ОП "Конкурентноспособност".

### 4. ЛИТЕРАТУРА:

- [1]. Петров, П., Р. Димова, Б. Найденов. Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател с единен набор ортогонални подносещи честоти и различни ортогонални кодови последователности. Сб. научни доклади на ТУ – Варна.
- [2]. Nassar, C., Natarajan B., Wu Z., Wiegandt D., Zekavat S., Shattil S. Multi – Carrier Technologies for Wireless Communication. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [3]. Петров, П. Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател за базова станция от ново поколение. Научна конференция Акустика`2013.
- [4]. Петров, П. „M&Q – модификация” на многоканален MC-CDMA – предавател на базова станция от ново поколение. Научна конференция Акустика`2013.

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p>Варна<br/>14 - 15.10.2016 г.<br/>София<br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                     |

## ПРИЛОЖЕНИЕ НА ОРТОГОНАЛНИТЕ СИ – КОДОВЕ В МНОГОКАНАЛЕН ХИБРИДЕН M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS – ПРЕДАВАТЕЛ С ЕДИНЕН НАБОР ОРТОГОНАЛНИ ПОДНОСЕЩИ ЧЕСТОТИ И РАЗЛИЧНИ ОРТОГОНАЛНИ КОДОВИ ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТИ – ЧАСТ 2

### APPLICATION OF ORTHOGONAL CI - CODES IN MULTICHANNEL HYBRID M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS - TRANSMITTER WITH A SINGLE SET OF ORTHOGONAL SUBCARRIERS AND DIFFERENT ORTHOGONAL CODE SEQUENCES – PART II

доц. д-р инж. Петров П. П., доц. д-р инж. Димова Р. С., доц. д-р инж. Найденов Б. Г.

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – Варна, България, E-mail: rdim@tu-varna.bg, borna@tu-varna.bg

**Abstract:** Architecture of multi-channel hybrid M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS - transmitter with a single set of orthogonal subcarriers and different orthogonal CI - code sequences for new generation base stations is synthesized. Have been achieved its basic functional dependencies and have been analyzed the capabilities of M & Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS system in attenuation condition of the signals by the Raleigh law.

**Keywords:** Carrier Interferometry, Code Division Multiplexing, Duplicated Frequency Spread MC-CDMA, Frequency Diversity, Multi Carrier-Code Division Multiple Access, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Orthogonal Frequency Multiple Access.

#### 2.3. Основни функционални зависимости на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS – предавател с единен набор ортогонални подносещи честоти и различни ортогонални кодови CI – последователности

В съответствие с формула (2) от част 1 на настоящата работа, подканалният модулиран сигнал на изхода на n-тия CI-DFS-MC-CDMA – модулатор (фиг. 2 от част 1), характеризиращ предаването на символа  $x_{j,n}(t) = A_{j,n}(t)e^{i\varphi_{j,n}(t)}$  за j-тия времеви интервал  $T_x$  на съответния времеви слот, може да се представи във вида

$$s_{j,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} A_{j,n}(t) e^{i\varphi_{j,n}(t)} e^{ig\theta^n} e^{i2\pi g\Delta f t} = \frac{A_{j,n}(t) e^{i\varphi_{j,n}(t)}}{\sqrt{G}} [(CI)^n(t)], \quad (12)$$

където

$$[(CI)^n(t)] = \sum_{g=0}^{G-1} c_g^n e^{i2\pi g\Delta f t} = \sum_{g=0}^{G-1} e^{ig\theta^n} e^{i2\pi g\Delta f t} \quad (13)$$

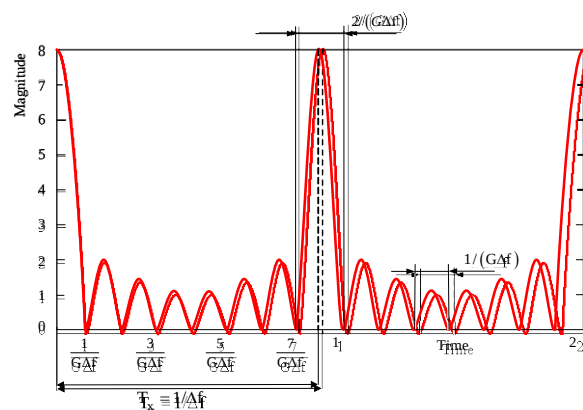
е сумарен разширяващ код на n-тия символ  $X_n(t)$ ;  $\Delta f = 1/T_x$ .

От (12), за CI-сигнала на изхода на първия CI-DFS-MC-CDMA – модулатор ( $n=0$ ,  $\theta^n=0$ ) за j-тия времеви интервал  $T_x$  се получава

$$s_{j,0}(t) = \frac{x_{j,0}(t)}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} e^{ig\theta^0} e^{i2\pi g\Delta f t} = \frac{A_{j,0}(t) e^{i\varphi_{j,0}(t)}}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} e^{i2\pi g\Delta f t} \quad (14)$$

който при използване на BPSK се редуцира до вида

$$(15) s_{j,0}(t) = \frac{a_{j,0}(t)}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} \cos 2\pi g\Delta f t = \frac{a_{j,0}(t)}{\sqrt{G}} [(CI)^0(t)].$$



Фиг. 5. Сигнал във времевата област с  $G = 8$

Следователно, CI-сигналят на изхода на първия ( $n = 0$ ) CI-DFS-MC-CDMA- модулатор

$$(16) [(CI)^0(t)] = \sum_{g=0}^{G-1} \cos 2\pi g\Delta f t$$

е концептуално най-елементарен и представлява сума от  $G=N$  ортогонални подносещи честоти, които съвпадат по фаза и са с нулево фазово изместване. От гледна точка на традиционните радиокommunikационни системи той представлява версия на функцията sinc ( ) и във времевата област има вида, показан на фиг. 5 [2].

По аналогичен начин при използване на BPSK за CI-сигнала на n-тия CI-DFS-MC-CDMA – модулатор се получава

$$(17) [(CI)^n(t)] = \sum_{g=0}^{G-1} e^{ig\theta^n} e^{i2\pi g\Delta f t} = \sum_{g=0}^{G-1} \cos(2\pi g\Delta f t + g\theta^n).$$

В [2] е установено, че сумарните разширяващи кодове (16) и (17), наричани CI-сигнали се характеризират със следните основни свойства:

1. Период на повторение –  $T_x = 1/\Delta f$ .

2. Всеки  $j$ -ти период на всеки сумарен разширяващ код съдържа основен пик (пикова енергия, mainlobe) с продължителност  $2/(G\Delta f) = 2T_x/G$ , съсредоточен във времето

$$(18) jT_x + \Delta t_n = jT_x + \left[ \theta^n / (2\pi\Delta f) \right] = jT_x + n / (G\Delta f)$$

3. Всеки  $j$ -ти период съдържа странични отскоци (малка енергия, sidelobes), всеки с продължителност  $1/(G\Delta f) = T_x/G$ , като максималната амплитуда (нормирана относно амплитудата на основния пик) на  $g$ -тия страничен отскок е

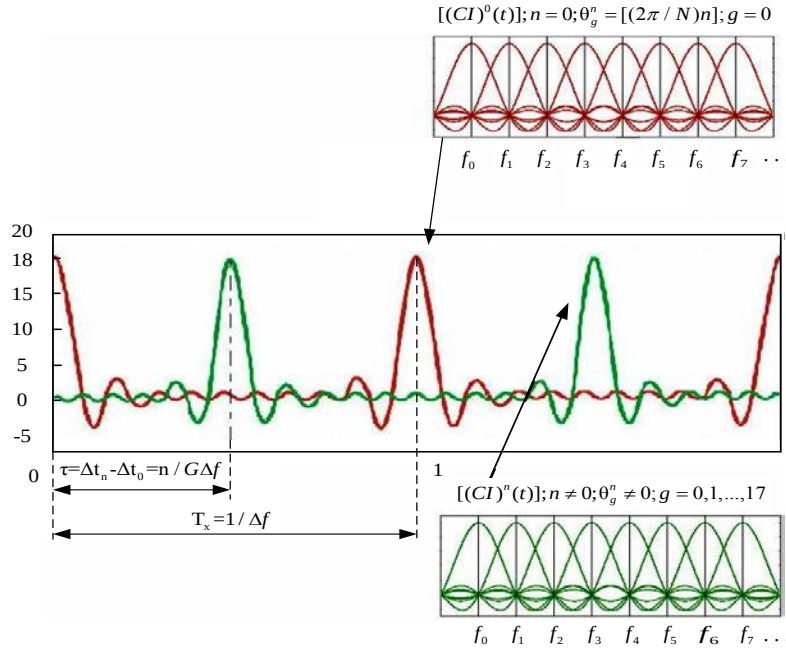
$$(19) A(g) = \frac{1}{G \sin[(\pi/G)(g+1/2)]}.$$

4. Сигналят (16) с mainlobe, съсредоточен във времето  $jT_{CNk} + \Delta t_0 = 0, T_x, 2T_x, \dots$  (фиг. 5 [2]), представлява сума от  $G=N$  ортогонални подносещи, всяка с нулево фазово изместване, т.е.  $\{\theta_0^0, \dots, \theta_g^0, \dots, \theta_{G-1}^0\} = \{0, \dots, 0, \dots, 0\}$ .

5. Сигналят (17) с mainlobe, съсредоточен във времето  $jT_x + \Delta t_n = jT_x + n/(G\Delta f)$  представлява сума от  $G=N$  ортогонални подносещи, всяка с фиксирано фазово изместване, т.е.

$$(20) \{\theta_0^n, \dots, \theta_g^n, \dots, \theta_{G-1}^n\} = \{0, \dots, g\theta^n, \dots, (G-1)g\theta^n\};$$

$$\theta^n = (2\pi/N)n.$$



Фиг. 6. Ортогоналност на CI – сигналите във времевата област

6. Взаимната корелация между CI – сигнала (17) на  $n$ -тия CI-DFS-MC-CDMA модулатор и сигнала на  $m$ -тия CI-DFS-MC-CDMA – модулатор

$$(21) [(CI)^m] = \sum_{g=0}^{G-1} \cos(2\pi g\Delta f t + g\theta^m)$$

се определя с изразите [2]:

$$(22) R_{n,m}(\tau) = \frac{1}{2\Delta f} \sum_{g=0}^{G-1} \cos(2\pi g\Delta f \tau);$$

$$(23) \tau = \Delta t_n - \Delta t_m = (\theta^n - \theta^m) / (2\pi\Delta f),$$

които дефинират  $G-1$  еднакво разделени „нули“ във времената  $\tau = n / (G\Delta f)$ , където  $n = 1, 2, \dots, N-1$ .

Тези нули показват (фиг. 6 [2]), че когато един кодов набор (например, (16)) реализира основен пик (mainlobe) в този момент всички други кодови набори имат нулеви странични отскоци (sidelobes).

След сумиране на сигналите (12) от всичките CI-DFS-MC-CDMA – модулатори на изхода на главния суматор (фиг. 2 от част 1) се формира пълният модулиран сигнал

$$(24) s_j(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_{j,n}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A_{j,n}(t) e^{j\theta_{j,n}(t)}}{\sqrt{G}} [(CI)^n(t)],$$

където  $[(CI)^n(t)]$  се дефинира с израз (13).

След линеен пренос на спектъра на (24) на необходимата носеща честота  $\omega_c = 2\pi f_c$  за аналоговия алгоритъм, формиращ предавания високочестотен сигнал се получава:

$$(25) \quad s_{j,c}(t) = s_j(t)e^{i\omega_c t} = \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A_{j,n}(t)e^{i\varphi_{j,n}(t)}}{\sqrt{G}} \left[ \sum_{g=0}^{G-1} e^{i\theta^n} e^{i2\pi g \Delta f t} \right] \right\} e^{i2\pi f_c t} = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{g=0}^{G-1} A_{j,n}(t) e^{i\varphi_{j,n}(t)} e^{i[g\theta^n + 2\pi g(\Delta f + f_c)t]},$$

който при използване на BPSK се редуцира до вида [2]:

$$(26) \quad s_{j,c} = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{g=0}^{G-1} a_{j,n}(t) \cos[2\pi(g\Delta f + f_c)t + g\theta^n],$$

където  $a_{j,n}(t)$  е предадения в j-тия времеви интервал n-ти символ  $X_n(t)$  и който приема стойности +1 и -1.

От гореизложеното следва, че в разглеждания предавател (фиг. 2 от част 1) минималното разстояние между съседните ортогонални подносещи  $\Delta f = 1/T_x = 1/MT_q$  е свързано с 50%-во спектрално препокриване, поради което пропусканата му честотна лента

$$(27) \quad F_{M\&Q\ MC-CDMA/TDMA/CI-DFS} = (G+1)(1/T_x) \approx \approx G/T_x = N/T_x = MN^*/T_x$$

е: г=2-пъти по-тясна от тази на M&Q MC-CDMA/TDMA/DFS-Уолш – предавателя от фиг. 1 на част 1 и точно равна на пропусканата честотна лента на M&Q MC-CDMA/TDMA - предавателя от фиг. 4 на част 1. В сравнение с последния, където всеки символ  $X_n(t)$  се предава чрез собствена подносеща, в предавателите от фиг. 1 и фиг. 2 всички символи  $X_0(t), \dots, X_n(t), \dots, X_{N-1}(t)$  се предават чрез един и същи набор от  $G=N$  на брой ортогонални подносещи честоти.

#### 2.4. Възможности на M&Q MC-CDMA/TDMA/CI-DFS – система в условия на многолъчевост

Във всеки j-ти времеви интервал  $T_x$ , сигналът на входа на приемника на мобилната станция (фиг. 7 [2]),

базиран на предадения сигнал (26) аналитично се изразява във вида [2]:

$$(28) \quad r(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{g=0}^{G-1} \alpha_g a_{j,n}(t) \cos(2\pi g \Delta f + 2\pi f_c + g\theta^n + \Phi_g) + n(t),$$

където  $\alpha_g$  е коефициент на затихване на g-тия подканал;  $\Phi_g = \varphi_g - 2\pi f_g \tau_3$  - фазово изместване на g-тата ортогонална подносеща;  $\varphi_g$  - начална фаза на подносещата;  $\tau_3$  - закъснение на предадения сигнал;  $n(t)$ - AWGN.

След традиционна корелационна обработка и despreading на входовете на обединител (Combiner) се получават резултатите [2];

$$(29) \quad z_g^n = \frac{1}{\sqrt{G}} \alpha_g a_{j,n}(t) + \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq n}}^{N-1} \frac{1}{\sqrt{G}} \alpha_g a_{j,m}(t) \cos[g(\theta^n - \theta^m)] + \eta_g,$$

където вторият член характеризира смущенията от останалите (N-1) символи;

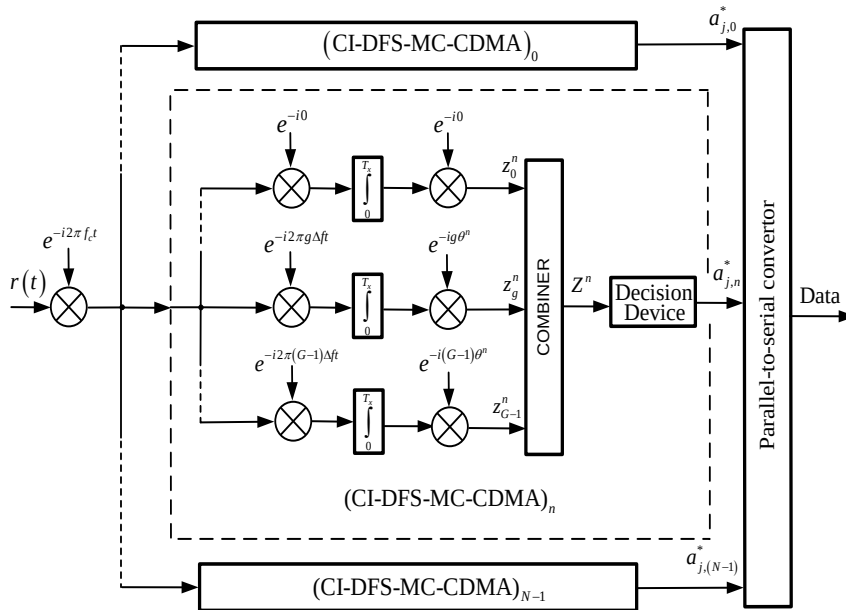
$\eta_g$  - гаусова случайна променлива с нулево средно значение и средна мощност  $N_0/2$ ;  $N_0$  - спектрална плътност на мощността на шума.

В техническата литература [2, 5, 6] са разгледани различни стратегии за обединяване на резултатите (29) на паралелните подканални и формиране на променливата величина  $Z^n$ , целта на които е минимизиране на смущенията от другите символи и точно възстановяване на предадения символ (в случая  $a_{j,n}(t)$ ). В неизбирателните канали, характеризиращи се с  $\alpha_0 = \alpha_1 = \dots \alpha_g = \dots \alpha_{G-1}$ , резултатът от сумирането

$$Z^n = \sum_{g=0}^{G-1} z_g^n$$

води до отстраняване на второто събираемо на (29) и максимизиране на SNR когато сумарните разширяващи кодове  $[(CI)^n(t)]$  (17) и  $[(CI)^m(t)]$  (21) са ортогонални. В реалните многолъчеви канали това е невъзможно, а в зависимост от способа за приемане (кохерентен или некохерентен), синхронизацията и т. н. приложение намират [2, 5, 6] критериите за обединяване на резултатите на паралелните подканални: MMSEC (Minimum Mean Square Error Combining); MRC (Maximum Ratio Combining); EGC (Equal Gain Combining) и др. В [2] е доказано, че критерият MMSEC е най-ефективен за разглежданите

OFDM/CI-DFS-MC-CDMA-радиокомуникационни системи от гледна точка на минимизиране на BER.



Фиг. 7. Структура на OFDM/CI-DFS-MC-CDMA – приемник

Алгоритмът на критерия MMSEC аналитично се представя във вида [2]:

$$E\{[a_{j,n}(t) - Z^n]z_g^n\} = 0; g = 0, 1, \dots, G-1, \quad (30)$$

където

$$Z^n = \sum_{g=0}^{G-1} w_g^n z_g^n \quad (31)$$

е величина за приемане на решение;  $E\{\cdot\}$ - математическо очакване.

Решението (30) е [2]

$$w_g^n = C^{-1} A, \quad (32)$$

където

$$C = E\{z_g^n \cdot [z_g^n | \alpha_g]\} = \alpha_g^2 \sum_{n=0}^{N-1} \cos[g(\theta^n - \theta^m)]^2 + N_0 / 2; \quad (33)$$

$$A = E\{a_{j,n}(t) \cdot [z_g^n(t) | \alpha_g]\} = \alpha_g. \quad (34)$$

След заместване на (33) и (34) в (32) за тегловия коефициент на MMSEC се получава:

$$w_g^n = \frac{\alpha_g}{\alpha_g^2 \sum_{n=0}^{N-1} \cos[g(\theta^n - \theta^m)]^2 + N_0 / 2}, \quad (35)$$

откъдето за величината за приемане на решение следва

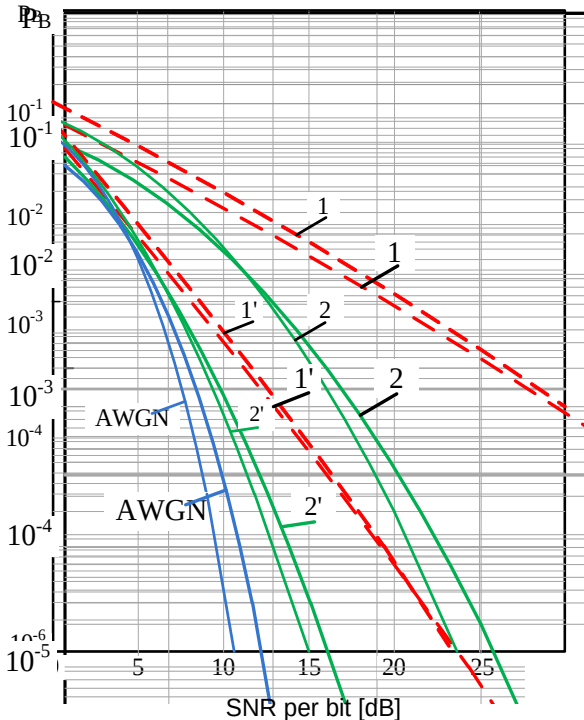
$$Z^n = \sum_{g=0}^{G-1} \frac{\alpha_g \cdot z_g^n}{\alpha_g^2 \sum_{n=0}^{N-1} \cos[g(\theta^n - \theta^m)]^2 + N_0 / 2}. \quad (36)$$

OFDM – радиопредаватели, в които преди S/P се използва конволюционно кодиране и блоково разместване (Interleaver), често се наричат „Coded OFDM (COFDM)” [2]. Сравнителна оценка на възможностите на OFDM и COFDM и OFDM/CI-DFS-MC-CDMA и COFDM/CI-DFS-MC-CDMA – системи относно BER е показана на фиг.8 [2].

Всяка от радиокommunikационните системи използва BPSK и предава в релеев канал едновременно  $N=32$  символа  $x_n(t)$  на  $G=N=32$  ортогонални подносещи честоти. В приемниците на OFDM и OFDM/CI-DFS-MC-CDMA – системите е използвано решаващо устройство с

твърдо решение, а в COFDM и COFDM/CI-DFS-MC-CDMA – системите са използвани конволюционно кодиране със скорост на кодиране  $R_c^*=1/2$  и алгоритъм на Viterbi с меко решение. От приведените графични резултати могат да се направят следните по-важни изводи:

1. При  $BER=10^{-3}$  OFDM/CI-DFS-MC-CDMA – системата (крива 2), базирана на многоканалния предавател от фиг. 2, осигурява 10 dB по-добра енергийна ефективност в сравнение с традиционната OFDM-система (крива 1), базирана на многоканалния предавател от фиг. 4, като тази ефективност значително се увеличава с намаляване на BER (при  $BER=10^{-4}$  тя е 18 dB).



1-OFDM; 2-OFDM/CI-DFS-MC-CDMA, 1'-COFDM; 2'-COFDM/CI-DFS-MC-CDMA

Фиг. 8. Сравнителна оценка на възможностите на OFDM (COFDM) и OFDM (COFDM)/CI-DFS-MC-CDMA-системи

2. При  $BER=10^{-3}$  COFDM – системата (крива 1') осигурява 14 dB по-добра енергийна ефективност в сравнение с OFDM – система (крива 1).

3. При  $BER=10^{-3}$  OFDM/CI-DFS-MC-CDMA – системата (крива 2) осигурява само 4 dB по-лоша енергийна ефективност в сравнение с COFDM – системата (крива 1'), при  $BER=10^{-6}$  енергийната ефективност на системите е почти еднаква, а при BER по-малка от  $10^{-6}$  енергийната ефективност на OFDM/CI-DFS-MC-CDMA – системата става по-добра.

4. При  $BER=10^{-3}$  COFDM/CI-DFS-MC-CDMA – системата (крива 2') осигурява 2 dB по-добра енергийна ефективност в сравнение с COFDM – системата (крива 1'), като тази ефективност се увеличава с намаляне на BER (при  $BER=10^{-4}$  тя е 3 dB).

### 3. ИЗВОДИ

На основата на гореизложеното и допустимите граници за скоростта на предаване на данните и BER на различен трафик, може да се направи извода, че за реален трафик, изискващ  $BER=10^{-6}$  -  $10^{-9}$ , енергийната ефективност на разглежданата OFDM/CI-DFS-MC-CDMA – радиосистема в сравнение с традиционната OFDM – система (използвана в стандарти LTE и Mobile WiMAX) е многократно по-голяма. Този ефект допълнително се увеличава от възможностите на използваното хибридно мултиплексиране, чрез което за времеви интервал

$T_x = T_d = MT_q$  всеки m-ти информационен символ от

всеки ползвателски канал се предава чрез  $N^*$  на брой OFDM – символи, а всеки ползвателски канал предава M-брой информационни символи чрез съответстващите им  $N=M N^*$  – броя OFDM – символи.

### 4. ЛИТЕРАТУРА:

- [1]. Петров, П., Р. Димова, Б. Найденов. Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател с единен набор ортогонални подносеци честоти и различни ортогонални кодови последователности. Сб. научни доклади на ТУ – Варна, 2013.
- [2]. Nassar, C., Natarajan B., Wu Z., Wiegandt D., Zekavat S., Shattil S. Multi – Carrier Technologies for Wireless Communication. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [3]. Петров, П. Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател за базова станция от ново поколение. Научна конференция Акустика`2013.
- [4]. Петров, П. „M&Q – модификация” на многоканален MC-CDMA – предавател на базова станция от ново поколение. Научна конференция Акустика`2013.
- [5]. Y a n g, L. Multicarrier Communications. John Wiley&Sons Ltd, 2009.
- [6]. F a z e l, K., S. Kaiser. Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems: From OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX. John Wiley&Sons, Ltd, 2008.

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                      |

## ЗВУКОПОГЛЪЩАНЕ НА КОМПОЗИТНИ МАТЕРИАЛИ, ПРЕДНАЗНАЧЕНИ ЗА НЕНОСЕЩИ ПРЕГРАДНИ СТЕНИ И ЗВУКОИЗОЛАЦИЯ С ТЯХ

доц. д-р Й. Иванова<sup>1,4</sup>, проф. д-р Л. Лаков<sup>2</sup>, доц. д-р Т. Парталин<sup>3</sup>,  
д-р Ст. Рафаилов<sup>2</sup>, д-р Кр. Тончева<sup>2</sup>, гл. ас. д-р Б. Живов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт по Механика – БАН, ул. Г. Бончев, бл. 4, София 1113, България

<sup>2</sup>Институт по Металознание, Съоръжения и Технологии с Център по Хидро- и  
Аеродинамика „Акад. А. Балевски” - БАН, ул. "Шипченски проход" № 67, София 1574, България

<sup>3</sup>Софийски Университет, ФМИ, бул. Дж. Баучер 6, София, България

<sup>4</sup>Софийски Университет, ФзФ, бул. Дж. Баучер 6, София, България

**Резюме:** В работата се представени резултати от експериментално изследване на коефициенти на звукопоглъщане, звукоотражение и звукоизолация на нови композитни материали, предназначени за неносещи преградни стени и външни изолации. Опитните образци представляват панели тип сандвич състоящи се от вътрешен слой от композитен материал получен от пеностъклени гранули и свързващо вещество във вид на водна дисперсна колоидна система с участие на портландцимент и зеолит и външни слоеве от нанесена водоустойчива замазка. Изделията са получени по екологична технология с употреба на отпадъчни суровини (стъклени отпадъци). Полученият продукт е незапалим, негорим, дълготраен, притежава ниска топлопроводност, устойчивост на климатични цикли и добра водоустойчивост.

### Увод

Съществен проблем при проектирането, строителството и експлоатацията на сгради е постигането на необходимата енергийна ефективност и добра звукоизолация на обитаемите битови и промишлени помещения. Намалването на преноса на топлинна енергия в сградите представлява основен фактор за понижаване на разхода на енергия за отопление през зимния период и охлаждане през летните месеци. Един от възможните подходи за решаване на този въпрос в съвременното строителство представлява употребата на нови звуко и топлоизолационни материали, които най-ефективно да удовлетворят съществуващите стандарти в бранша. В настоящият момент приложение намират различни изолационни материали: изделия от клетъчен бетон, продукти от пеностъкло, запалими и горими полистиролови плоскости (EPS, XPS и др.), минерални и стъкленни ватаи с ниска водоустойчивост. Известен е топлоизолационен конструкционен полистиролбетон изготвен от полистиролови гранули (40-60 %), портланд цимент, порообразуватели и пластификатори [1]. Поради наличието на лесно запалим и горим органичен добавъчен материал той съществено понижава конструкционните си показатели в условията на пожар. След проучване и анализ на технологичните, експлоатационни и пазарни характеристики на съществуващите топло и звуко изолационни материали са разработени иновативни панели на силикатна основа и рентабилна технология за тяхното получаване с употреба на рециклируеми отпадъчни продукти.

### Разработване на нови композитни материали от пеностъкло на база стъклени отпадъци

Колектив от ИМСТЦХА-БАН усъвършенства технологията за производство на пеностъкло [2,3] и разработва хоризонтален модел за производство на

композитни топлоизолационни материали от пеностъкло на база стъклени отпадъци [4]. Проектирани са необходимите съоръжения за производство на пеностъклени гранули по енергийно ефективна технология [5] и е реализирана пилотна производствена линия в промишлени условия (ИНХОМ ООД, гр. Белослав). Произведени са експериментални партиди пеностъклени гранули по разработената иновативна технология и след анализ на данните от проведените полупромишлени изследвания технологията е подобрена и заявена чрез патент [6]. На базата на пеностъклени гранули и свързващо вещество във вид на водна дисперсна колоидна система, включваща портландцимент и зеолит е създаден иновативен незапалим и негорим, дълготраен, екологичен, водоустойчив композиционен материал с ниска топлопроводност, устойчив на климатични цикли. Разработената технология за получаване на продукта е съобразена със съвременните тенденции за използване на чисти, безотпадни производства и развитие на технологии за ефективно оползотворяване на отпадъчни продукти (стъклени отпадъци от бита и други производства), които в настоящия момент не се рециклират в големи мащаби в България. Приложената технологична схема позволява изготвяне на разнообразни монолитни композитни блокове, от които при необходимост чрез разкрояване е възможно получаване на различни по размер образци. Разработеният композитен изолационен материал е представен в заявка за патент [7], а иновативността на продукта е потвърдена чрез извършено проучване за новост. Материалът отговаря на съществуващите изисквания за противопожарна безопасност разгледани в Наредба за пожарна безопасност [8] и всички изменения, направени и съгласувани с европейските изисквания [9].

С цел оптимално приложение на материала е проектиран панел тип сандвич, изграден от вътрешен слой от разработения композит и фронтална и тилна външни страни от водоустойчиви замазки. Прилагането на подходящи обмачки с характеристики, съобразени с

конкретното приложение на панелите, позволява да се повишат работните показатели на изделието. Разработените панели се разглеждат като потенциално приложими за изграждане на звуко и топлоизолационни неносещи вътрешни преградни стени и външна изолация на жилищни и промишлени сгради и биха разширили продуктовия обхват на вътрешен пазар за строителни материали и изделия.

Цел на настоящата работа е определяне на коефициенти на звукоотражение и звукоизолация на образци получени от разработения иновативен композитен материали.

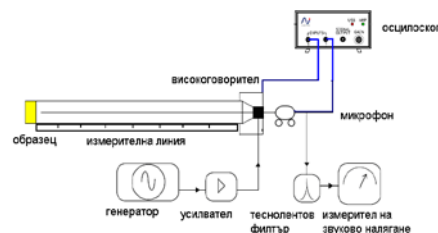
## Материали

Експерименталните образци са изготвени от пеностъклени гранули с диаметър от 5 до 20 мм (получени от битови стъклени отпадъци) и свързващо вещество във вид на водна дисперсна колоидна система на силикатна основа, включваща портланд цимент клас СЕМ 42.5N – 95 мас. % и зеолит (клиноптилолит) – 5 мас. % с размери на частиците, еквивалентна на тази на портланд цимента и вода в количество 50 % от масата на портланд цимента и зеолита. При лабораторни условия експериментално е установено оптималното количество на компонентите. Въвеждането на малки количества модифицираща добавка (зеолит) в състава на свързващата система съкращава времето за набиране на необходимата якост и повишаваща физико-механичните показатели на крайните образци. Проектирани са и са изготвени подходящи кофражни матрици необходими за формоване на пробни лабораторни образци (композитни панели) предвидени за настоящето изследване. Към предварително подготвена колоидна система (с вискозитет 3÷4 Поаза) при непрекъснато разбъркване са добавени пеностъклените гранули до пълно обмазване на тяхната повърхност и достигане на вискозитет на сместа от 7 до 8 Поаза. Получената смес е положена в изготвените кофражни форми с перфорирано дъно, което позволява (чрез вибриране) да се отдели излишната течна фаза на водната дисперсна колоидна система. В зависимост от приложеното време на вибриране и подреждането на гранулите обемната плътност на продукта варира от 240 до 380 kg/m<sup>3</sup>, преди изсушаване и свързване на остатъчната част от водната дисперсна колоидна система. Обемната плътност на композиционния материал в сурово и сухо състояние нараства с увеличаване на количеството на подребните пеностъклени гранули в изходната смес. Формите са декуфрирани след 24 часа и предстояват 10 денонощия при температура 15 до 28°C за постигане на необходимата якост на свързващото вещество на база портланд цимент и зеолит. Върху външните повърхности (фронтална и тилна) на изготвените композитни образци е положена водоустойчива замазка до оформяне на панел тип сандвич (външни слоеве – междинен слой).

## Определяне на коефициент на звукопоглъщане и звукоизолация

За определяне на звукопоглъщането се използва акустичен интерферометричен метод [10,11]. Апаратурата, с която се реализира измерването представлява интерферометрична цилиндрична тръба с акустично твърди стени в единия край, на която е поставен сравнителен образец или изпитван образец, а в другия край източник на звук – високоговорител, който създава в тръбата плоска звукова вълна [10]. В интерферометъра чрез подвижен

микрофон се измерва звуковото налягане и се намират областите на минимално и максимално налягане на образуваните в тръбата стоящи вълни. Изследванията се провеждат в честотния диапазон 100-2000 Hz. Схема на апаратурата е представена на фиг. 1.



Фиг.1. Схема на апаратура за измерване на звукопоглъщане и звукоотражение

Преди започване на изпитването се регистрират параметрите на средата – температура, влажност на въздуха и атмосферното налягане. За надморската височина 550 m, средни дневни температури 20°C и типично за сезона атмосферно налягане скоростта на звука е 331m/s. Пресметнатите резонансни честоти и дължините на вълните ( $\lambda$ ) се сравняват с експериментално определените. По измерените стойности на звуковото налягане на стоящите вълни се определят коефициентите на стоящата вълна ( $n$ ) и коефициентите на звукоотражение ( $\beta$ ) и поглъщане ( $\alpha$ ) на изследваните материали.

Коефициентите на стоящата вълна  $n$  се определят чрез (1)

$$(1) \quad n = (P_{max} / P_{min})$$

Коефициентът на отражение на звука  $\beta$  по звуково налягане се определя чрез

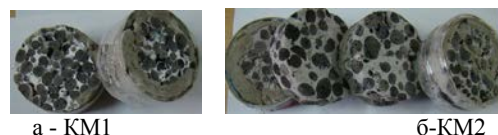
$$(2) \quad |\beta| = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}}$$

Коефициентът на поглъщане по интензивност  $\alpha^*$  се получава от връзката:

$$(3) \quad \alpha^* = 1 - \beta^* = 1 - |\beta|^2,$$

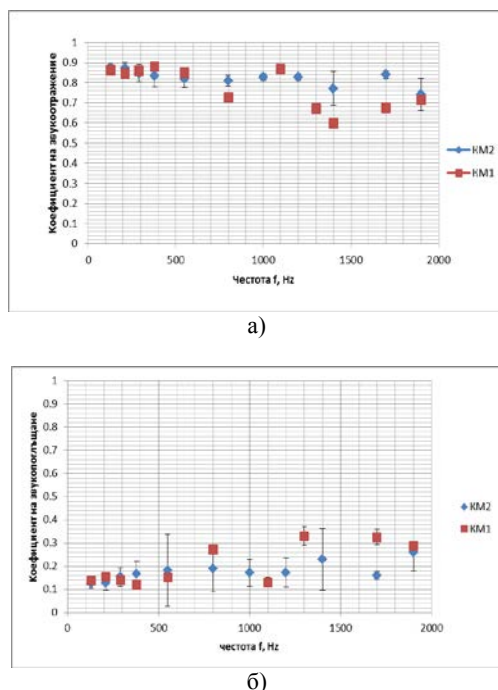
където  $\beta^*$  е коефициент на отражение по интензивност.

Външният вид на образците за лабораторното изследване е показан на фиг. 2.



Фиг.2.

На фиг. 3 са показани зависимости на коефициенти на звукоотражение и звукопоглъщане от честотата, получени при изследване на лабораторните образци. Стойностите са усреднени по типа на материала. Средните стойности на коефициентите на звукоотражение в целия честотен диапазон са 0.8 и 0.72 за композитни материали KM1 (тип 1) и KM2 (тип 2). Коефициентите на звукопоглъщане са 0,2 и 0,18 съответно за материали KM1 и KM2.



Фиг.3. Изменение на коефициентите на звукоотражение а) и звукопоглъщане б)

#### Определяне на коефициент на звукоизолация на прегради от композиционни материали

Обект на изпитване са плочи от два типа композитен материал. За сравнение е използван газобетон –итонг. Данни за плътността и външния вид на плочите са дадени в Таблица 1.

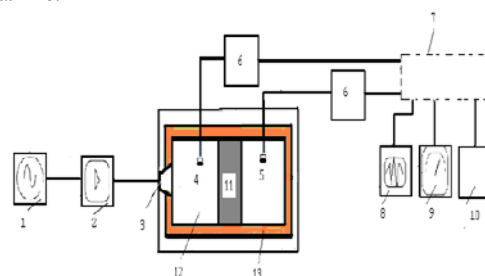
|   | Материал на изпитвания образец | Плътност              | Фигура                                                                              |
|---|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Итонг                          | 550 kg/m <sup>3</sup> |  |
| 2 | Композитен материал тип 1      | 500 kg/m <sup>3</sup> |  |
| 3 | Композитен материал тип 2      | 350 g/m <sup>3</sup>  |  |

За определяне на изолационната способност на преграда се използва коефициент на звукоизолация R, който представлява отношение на звуковото налягане P<sub>1</sub> на падащата звукова вълна към звуковото налягане P<sub>2</sub> на вълната, преминала през преграда [11-13]. Създаването звуково поле е еднородно и изотропно и предаването на звук извън изследвания панел е намалено до минимум. Режимът на работа е стационарен. Измерванията на звуковото налягане L (dB) в двете камери се провеждат при честоти в октавни ивици при честоти 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz. Коефициентът на звукоизолация се определя по зависимостта [11,12]:

$$(4) \quad R = L_1 - L_2 + 10 \lg(S/A)$$

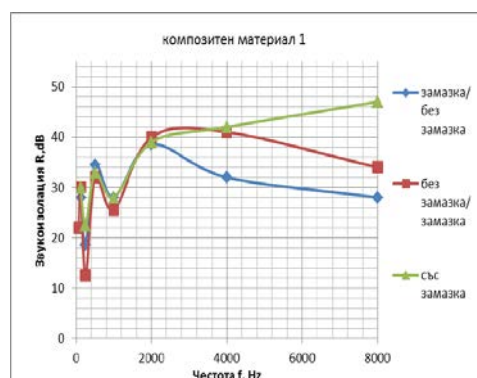
където L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub> са измерените нива на звуковото налягане съответно в камерата с източник на звук и приемната камера, S – площ на разделителната преграда между камерите, A- еквивалентната площ на звукопоглъщането.

На фиг.4 е представена схема на апаратурата чрез метода на двете камери, между които се поставя изпитваните образци (фиг.4). Високоговорителят 3 излъчва в камерата 12 плоски звукови вълни. Микрофонът 4 с измерителното устройство 9 измерва звуковото налягане L<sub>1</sub> на падащата звукова вълна. Микрофонът 5 и устройството 9 измерва налягането L<sub>2</sub> на вълната, преминала през образца за изследване. Камерите имат дебели стени и са облицовани със звукопоглъщащи материали. Измерванията са правени с шумомер и регистриране на нивото на звука в камерите и посредством записи с компютър и сравняване на спектрите на сигналите.

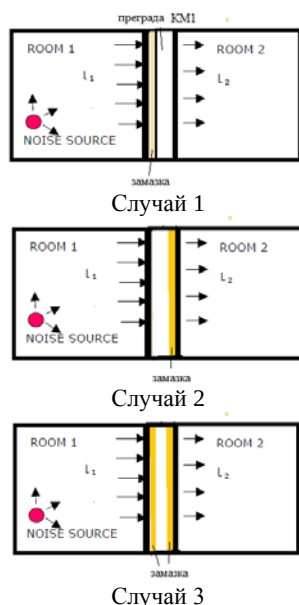


Фиг.4 Блок схема на апаратура за измерване на коефициент на звукоизолация [14]: 1- Звуков генератор, 2- Усилвател, 3-Високоговорител, 4-Измерителен микрофон, 5- Измерителен микрофон, 6-Микрофонни усилватели, 7-филтри 8 –Осцилоскоп, 9- Измерител на звуково налягане, 10- Волтметър, 11- Образец за изследване, 12- Камера, 13- звукопоглъщащи плоскости

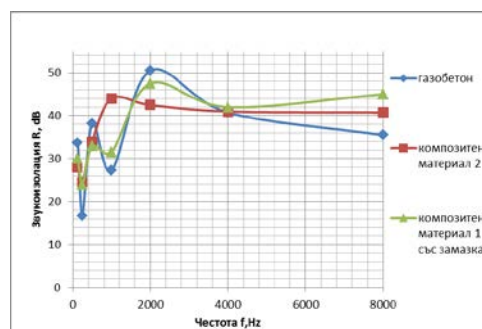
На фиг.5 са показани коефициенти на звукоизолация при изменение на честотата, получени от композитен материал тип 1. Изследвано е влиянието на замазката на преградата върху стойностите на звукоизолацията (фиг.6) . В случай 1 звуковата вълна пада върху панела със замазка. В случай 2 замазката е от страна на приемащата камера. Случай 3 преградата е със замазка от двете страни. Стойностите на звукоизолацията, получена за преграда със замазка от двете страни са по-големи в честотния диапазон 4000 – 8000 Hz.



Фиг. 5. Коефициент на звукоизолация от честотата за композитен материал KM1



Фиг. 6. Начин на измерване на композитна преграда КМ1



Фиг. 7. Изменение на коефициента на звукоизолация от честотата

На фиг.7 са показани коефициенти на звукоизолация за преградите от композитен материал и са сравнени с тези, получени от итонг.

Наблюдава се нарастване на стойностите при честоти от 1000 до 8000Hz. Средна стойност на звукоизолацията в целия честотен диапазон е  $R = 36$  dB за материал КМ1 и  $R = 34$  dB за КМ2 и  $R = 33$  dB за итонг.

## Заклучение

В работата са представени резултати от изследване на акустичните свойства (звукопоглъщане и звукоизолация) на иновативен панели тип сандвич от пеностъклени гранули с диаметър от 5 до 20 мм, слепени със самосвързваща се водна дисперсна колоидна система на силикатна основа и нанесена водоустойчива замазка на външните повърхности на пробните тела.

## Литература

1. RU 2515664.
2. Български патент № 65718/24.11.2004 г.
3. Български патент № 65745/26.05.2006 г.
4. Договор за финансова помощ BG161PO003-1.1.06-0094-S001/07.12.2012 г. с бенефициент „Промстройпроект”ООД и партньор ИМСТЦХА- БАН.
5. Заявка за патент № 111229/06.06.2012 г.
6. Заявка за патент № 111891/ 19.12.2014 г.
7. Заявка за патент № 112126 от 27.10.2015 г.
8. Наредба за пожарна безопасност Из-1971- 2009 г с всички изменения.
9. EU Regulation № 305/2011, с последните изменения от 2013 година
10. БДС EN ISO 10534 - 1 Акустика. Определяне на коефициенти на звукопоглъщане и акустичния импеданс в импедански тръби. Част 1: Метод на стоящата вълна.
11. Осипов Г.Л. и др. Звукоизолация и звукопоглъщане, Москва АСТ, 2004.
12. Иванов Н.И. Инженерная акустика, Теория и практика.Борьбы с шумом. Москва, 2008
13. Fahy F., Foundation of Engineering Acoustics, Elsevier Academic Press, San Diego, 2005.
14. Ivanova Y., V. Vassilev, P. Djondjorov, Str. Djoumaliski, Experimental-Theoretical Approach to the Identification of Effective Sound Attenuation Panels from Recycled Materials, Bulgarian Chemical Communications, Volume 42, pp. 1–8, 2015.

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                      |

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ОКАЗАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОМОЩИ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ РОТОРА ЦИЛИНДРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ К 1000 БЛОКОВ 5 И 6 АЭС «КОЗЛОДУЙ»

А.Н. Разыграев, Н.П. Разыграев, М.В. Цуканов, Б.Т. Абуталипов  
М. Миховски, Й. Мирчев, П.Цоков, А.Атанасов

### Аннотация

В 2015 году в рамках комплекса работ по продлению ресурса блоков 5 и 6 АЭС Козлодуй, между АО «НПО «ЦНИИТМАШ» и «АЕЦ Козлодуй» ЕАД был заключён договор на «Поставку методики и оказание технической помощи при проведении неразрушающего контроля ротора цилиндра низкого давления турбины К 1000 блоков 5 и 6».

Ранее специалистами АО «НПО «ЦНИИТМАШ» были разработаны методики УЗК сварных соединений роторов в процессе эксплуатации РД 27.28.05.004-2003 «Методика эксплуатационного ультразвукового контроля сварных соединений роторов низкого давления турбин типа К-220, К-500, К-1000». Анализ показал, что, несмотря на наличие РД 27.28.05.004-2003 и проведенную ранее работу, для выполнения УЗК сварных соединений роторов цилиндров низкого давления К-1000 АЭС «Козлодуй» необходимо разработать новую методику. АО «НПО «ЦНИИТМАШ» проведены ряд работ по исследованию реальной конструкции сварных соединений роторов цилиндров низкого давления, выбраны операции УЗ-контроля, с учетом конструктивных особенностей ротора, разработаны и изготовлены преобразователи и настроечный образец. Для каждого изготовленного преобразователя получены АРД-диаграммы, проведены исследования характеристик и построены зависимости, подтверждающие работоспособность преобразователей и методики. Исследована природа всех паразитных сигналов, которые возникают при контроле сварных соединений роторов ЦНД. Сформулированы основные правила контроля для дефектоскопистов. Проведено обучение и аттестацию персонала по разработанной методике.

Специалисты АО «НПО «ЦНИИТМАШ» и ИМех-БАН с АЭС Козлодуй выполнили работы по ультразвуковому контролю двух роторов ЦНД 5SA30 и 5SA40 турбины типа К-1000-60/1500-2 блока 5 АЭС.

### 1. Постановка задачи.

Специалистами АО «НПО «ЦНИИТМАШ» ранее на Курской и Кольской АЭС впервые выявлены повреждения в виде эксплуатационных трещин. С 1981 года ультразвуковой контроль сварных соединений роторов проводился на этапе изготовления на заводе «Турбоатом» г. Харьков по нормативному документу ОСТ 108.129.13-81 «Роторы сварные паровых и газовых стационарных турбин. Контроль ультразвуковой. Оценка качества сварных швов по результатам контроля». Документ предусматривает контроль прямыми и наклонными преобразователями по поверхности шва и околошовной зоны. Ограниченные размеры околошовных зон не позволяют в полной мере провести контроль указанных сварных соединений с двух сторон от шва.

Впоследствии, были разработаны методики УЗК сварных соединений роторов в процессе эксплуатации РД 27.28.05.004-2003. Основное отличие разработанной методики от УЗК по ОСТ 108.129.13-81 связано с введением контроля сварных соединений концевых дисков прямым преобразователем через диск V ступени и контрол раздельно-совмещенным преобразователем «корневой тандем».

Операция контроля прямым преобразователем через диск V ступени введена для увеличения надежности контроля крайних швов роторов, которые являются наиболее нагруженными и в которых имеется наибольшая вероятность образования эксплуатационной трещины. Контроль преобразователем «корневой тандем» необходим для выявления корневых трещин, а также для оценки высоты трещин в корневой зоне.

Анализ показал, что несмотря на наличие РД 27.28.05.004-2003, для УЗК сварных соединений роторов цилиндров низкого давления К-1000 АЭС «Козлодуй» необходимо разработать новую методику. Методика РД 27.28.05.004-2003 предназначена для контроля сварных соединений толщиной 60-80мм. Ротор ЦНД «АЭС Козлодуй» содержит 13 сварных соединений. Толщина сварных соединений ротора ЦНД турбины К-1000 на АЭС «Козлодуй» составляет 120 мм. Кроме того, каждое сварное соединение роторов турбины низкого давления К-1000 АЭС «Козлодуй» имеет специфические конструктивные особенности, которые напрямую влияют на контроледоступность и обуславливают появление паразитных сигналов, затеняющих полезные сигналы от отражателей в корне шва.

В связи с этим были поставлены следующие задачи:

- исследовать конструктивные особенности сварных соединений роторов цилиндров низкого давления, оценить контролепригодность и контроледоступность сварных швов;
- выбрать операции контроля указанных сварных швов, которые минимизируют негативные влияния ограниченных контролепригодности и контроледоступности;
- разработать и изготовить преобразователи для выполнения выбранных операций и настроечный образец для настройки и проверки параметров контроля;
- разработать методику ультразвукового контроля сварных швов роторов цилиндров низкого давления;
- провести испытание методики на объекте, аттестовать персонал АЭС «Козлодуй» по данной методике.

## 2. Описание объекта контроля

Ротор ЦНД состоит из 12 сваренных между собой дисков, на которых симметрично находятся 14 ступеней (два по семь). Диаметр ступеней последовательно увеличивается от центра к краям (от первой к седьмой, см. рисунок 1). Ротор ЦНД изготавливается, как сварнокованный из стали 25Х2НМФА.

Объектом ультразвукового контроля, выполняемого в процессе эксплуатации АЭС «Козлодуй» с энергоблоком ВВЭР-1000 являются кольцевые сварные швы №№1-13 роторов цилиндров низкого давления турбины К-1000-60/1500-2. Ширина сварного шва – 30 мм, разделка - U-образная. Сварной шов выполнен: корень шва - проволокой Св-08ГА, основной шов – проволокой Св-08ХН2ГМЮ. Сварное соединение выполнено с подкладным кольцом для обеспечения качества сборки дисков ротора под сварку.

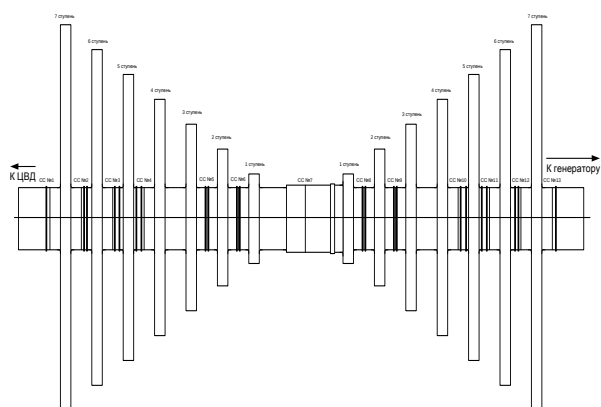


Рисунок 1

Схема ротора цилиндра низкого давления.



Рисунок 2

Ротор цилиндра низкого давления

Специальных детальных чертежей сварных соединений ротора на АЭС «Козлодуй» не имелось. В связи с этим для отработки методики контроля потребовались исследования конструкции сварных соединений роторов.

В конструкции сварных соединений ротора под сварным швом имеется выточка под подкладное кольцо. Выточка характеризуется сплаженными углами (галтелями), которые являются прекрасными отражателями ультразвука. Так же важным конструктивным элементом узла является замковая часть, обеспечивающая сборку дисков под сварку. Кроме того возможны паразитные сигналы от самого подкладного кольца и конструктивных непроваров. Некоторые примеры конструкций указанных сварных соединений, представлены на рисунках № 3-6.

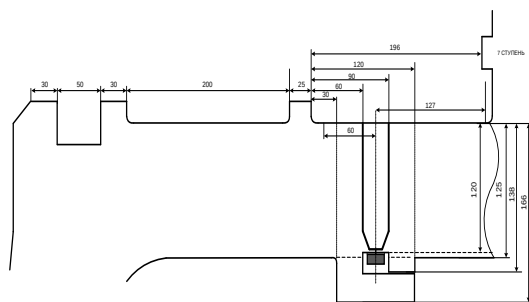


Рисунок 3

Конструкция сварных соединений №1 роторов турбин К-1000.

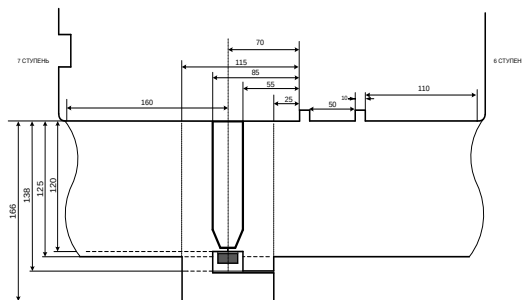


Рисунок 4

Конструкция сварных соединений №2 роторов турбин К-1000.

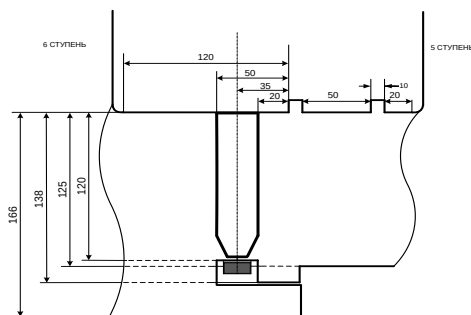


Рисунок 5

Конструкция сварных соединений №3 роторов турбин К-1000.

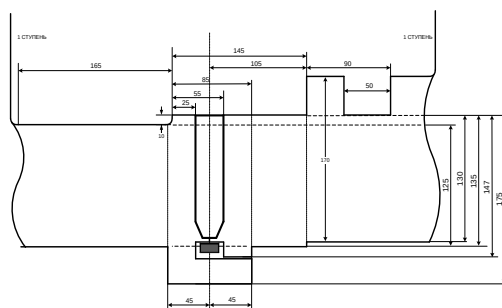


Рисунок 6

Конструкция сварного соединения №7 роторов турбин К-1000.

Анализ конструкций сварных соединений ротора показал, что:

- все сварные соединения выполнены с подкладным кольцом;
- все сварные соединения содержат галтели на выточке под подкладное кольцо с обеих сторон от корня шва;
- околошовная зона сварных соединений № 2-12 имеет размеры, не позволяющие в полной мере провести контроль сварных соединений с двух сторон от шва. Кроме того, на

поверхности контроля имеются выступы, также мешающие проведению контроля;

- сварные соединения симметричны относительно сварного соединения №7, имеют одинаковую конструкцию (за исключением элементов замковой части).

- сварные соединения №1 и №13 имеют на торце площадку для контроля прямым преобразователем.

- наиболее контроледоступными являются сварные соединения № 1, № 13, № 2, № 12 и № 7.

### 3. Выбор операций УЗК

Главными мешающими факторами при проведении УЗК сварных соединений роторов цилиндров низкого давления турбины К-1000 являются ограниченная контроледоступность и ограниченная контролепригодность. Ограниченная контроледоступность вызвана ограниченной длиной околошовной зоны и наличием выступов на ней. Это является причиной невозможности проведения качественного контроля с применением серийно выпускаемых ПЭП. Поставлена задача - выбрать операции ультразвукового контроля для каждого шва ротора, разработать и изготовить преобразователи обеспечивающие выполнение УЗК выбранными операциями. Выбранные операции УЗК должны обеспечивать попадание ультразвука в корень сварного соединения, и выявлять недопустимые отражатели при наличии паразитных (ложных) сигналов от конструктивных отражателей.

На основе анализа расчетно-графическим методом конструкций сварных швов для УЗК были выбраны следующие операции:

- ультразвуковой контроль эхо-методом продольными волнами прямым совмещенным преобразователем (операция 0°), для выявления несплошностей в сварном шве и в околошовной зоне;

- ультразвуковой контроль эхо-методом поперечными волнами наклонным совмещенным преобразователем с углом ввода 37°, направление прозвучивания перпендикулярно оси шва (операция 37°), для выявления несплошностей в сварном шве и околошовной зоне;

- ультразвуковой контроль эхо-методом поперечными волнами наклонным совмещенным преобразователем с углом ввода 45°(или 50°), направление прозвучивания перпендикулярно оси шва (операция 45°), для выявления несплошностей в сварном шве и околошовной зоне;

- ультразвуковой контроль методом «корневой тандем» поперечными волнами раздельно-совмещенным преобразователем корневой тандем с углом ввода 35° (операция КТ-35), для выявления вертикальных несплошностей в корневой части сварного соединения;

- ультразвуковой контроль методом «корневой тандем» поперечными волнами раздельно-совмещенным преобразователем корневой тандем с углом ввода 45° (операция КТ-45), для выявления вертикальных несплошностей в корневой части сварного соединения.

Для проведения контроля предложено использовать следующие поверхности узла:

- ступицы крайних дисков (Операция 0°);
- цилиндрическая поверхность сварного соединения (Операция 0°);
- цилиндрическая поверхность между дисками, включая сварной шов (Операция 0°, Операция 37°, Операция 45°, Операция КТ-35, Операция КТ-45).

На рисунках № 7-10 представлены выбранные с учетом конструктивных особенностей ротора ЦНД операции УЗК. Для сварных соединений №1 и №13 применены операции УЗК прямым преобразователем со стороны ступицы крайнего диска. При выборе операций наклонными преобразователями, если позволяет контроледоступность, приоритет отдан операции 45° и операции КТ-45. Это связано с тем, что при данном угле ввода (и близких к нему),

коэффициент прохождения через контактный слой и отражение ультразвука от несплошности и донной поверхности остаются постоянными величинами, что важно при обнаружении трещин, в том числе имеющих отклонение от нормали к поверхности. Такая возможность имеется при контроле сварных швов № 2, № 7 и № 12. При контроле сварных соединений №1 и №13 применены наклонные преобразователи по операции 37° и операции КТ-35. Контроледоступность сварных швов № 3-6 и № 8-11 такова, что возможно применить только операцию 37°, с одной стороны шва. Применить остальные операции не представляется возможным.

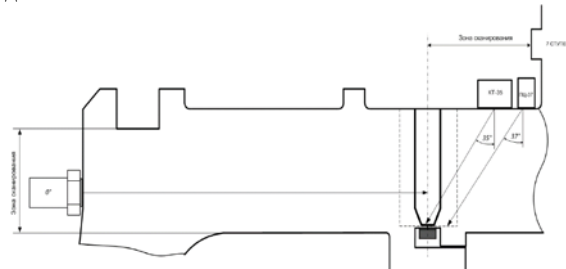


Рисунок 7  
Операции УЗК сварного соединения №1.

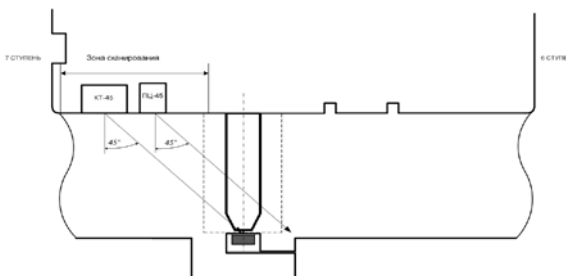


Рисунок 8  
Операции УЗК сварного соединения №2

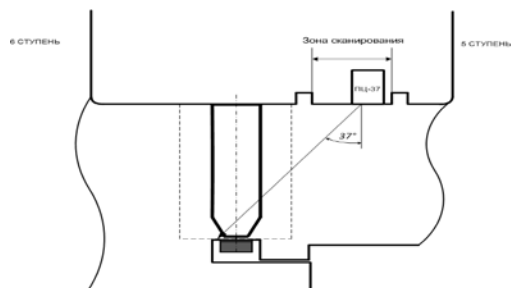


Рисунок 9  
Операции УЗК сварного соединения №3.

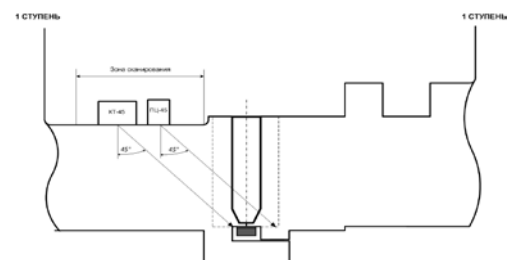


Рисунок 10  
Операции УЗК сварного соединения №7

### 4. Разработка преобразователей и НО

В рамках работы для обеспечения выполнения операций по настоящей методике, были разработаны, совместно с ООО «Энергоконтроль», следующие преобразователи: ПЦ-37-2,5р (операция 37°); ПЦ-45-2,5р

(операция 45°); ПЦ-50-2,5р(операция 45°); ПЦ-35-КТр (операция КТ-35); ПЦ-45-КТр (операция КТ-45).

Для минимизации влияния ограниченной контролепригодности на контроль сварных соединений контактная поверхность преобразователей имеет наименьшую площадь, а разъемы для присоединения кабеля изготовлены сбоку ПЭП. Для контроля по операции 0° был выбран серийный прямой совмещенный преобразователь В4SN (рис.11).

Изготовленные преобразователи и преобразователь В4SN представлены на рисунке 11.

НО-К1000 представляет из себя модель сварного соединения ротора с возможностью прозвучивания со стороны торца и содержит:

- вертикальный паз переменной высоты от 0 до 15 мм, а также вертикальный и горизонтальный сегментные пазы с максимальной глубиной 3 мм для настройки параметров контроля преобразователей «корневой тандем», а также наклонных и прямого преобразователей;
- плоскостонные отверстия диаметром 3 мм, выполненные на различной глубине под углом 45° для настройки чувствительности преобразователя с углом ввода поперечных волн 45° типа ПЦ-45-2.5р;
- плоскостонные отверстия диаметром 3 мм, выполненные на различной глубине под углом 37° для настройки чувствительности преобразователя с углом ввода поперечных волн 37° типа ПЦ-37-2.5р;
- имитация подкладного кольца и выточки под подкладное кольцо для получения сигналов от конструктивных элементов наклонными и прямым преобразователями;

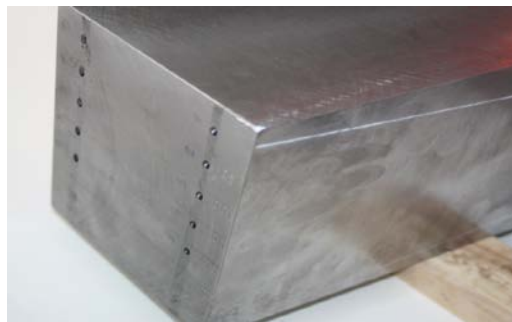


Рисунок 11  
Преобразователи ПЦ-37-2,5р, ПЦ-45-2,5р, ПЦ-50-2,5р, ПЦ-35-КТр, ПЦ-45-КТр и В4SN и настроечный образец НО-К1000. 1)-паз высотой  $h=3$ мм, 2)-паз переменной высоты.

## 5. Исследование характеристик преобразователей.

На образце НО-К1000Ц проведены исследования с использованием следующих преобразователей: ПЦ-37-2,5р (наклонный совмещенный преобразователь); ПЦ-45-2,5р (наклонный совмещенный преобразователь); ПЦ-35-КТр (наклонный раздельно-совмещенный преобразователь «корневой тандем»); ПЦ-45-КТр (наклонный раздельно-совмещенный преобразователь «корневой тандем»).

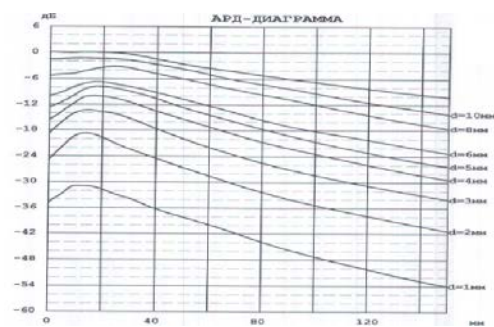
Для каждого наклонного совмещенного преобразователя были получены следующие характеристики и зависимости: точка выхода, определенная на мере СО-3; угол ввода, определенный на мере СО-2; АРД-диаграммы, построенные с использованием программы ARDKP12M (ЦНИИТМАШ) и меры СО-2; амплитуды эхо-сигналов от плоскостонных отверстий Ø3 в НО-К1000Ц, расположенных на глубинах  $H_1=40$ мм,  $H_2=60$ мм,  $H_3=80$ мм,  $H_4=100$ мм,  $H_5=120$ мм.

Для каждого наклонного преобразователя типа «корневой тандем» были получены следующие характеристики: огибающая величины амплитуд сигналов «корневой тандем» от сегментного паза  $h=3$ мм и паза переменной высоты в разных сечениях от расстояния  $X$  от эпитцентра отражателя на поверхность сканирования до передней грани ПЭП; диаграмма определения эквивалентной высоты корневой трещины при УЗК методом «корневой тандем».

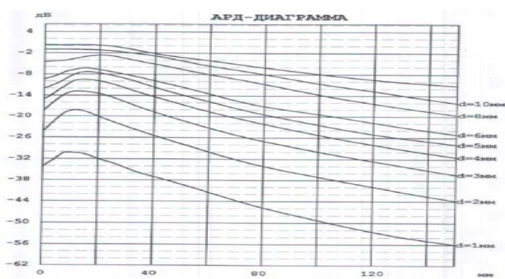
На рисунке 12 представлены АРД-диаграммы, построенные для преобразователей ПЦ-37-2,5р и ПЦ-45-2,5р с применением программы ARDKP12M.

На рисунке 13 представлены результаты исследования амплитуд сигналов «корневой тандем» от паза  $h=3$ мм и паза переменной высоты в разных сечениях (при разной высоте паза) в зависимости от расстояния  $X$  (от эпитцентра отражателя на поверхность сканирования до передней грани ПЭП) и при использовании преобразователя ПЦ-35-КТр и ПЦ-45-КТр.

Данные исследования показали:



а

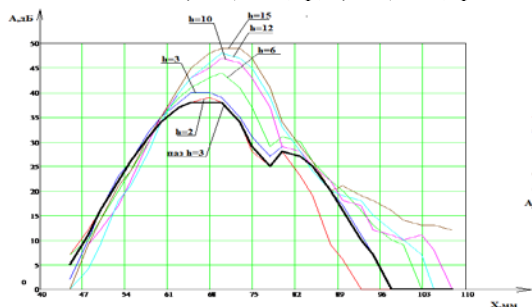


б

Рисунок 12

АРД-диаграммы для преобразователей

а) ПЦ-37-2,5р; б) ПЦ-45-2,5р



а

б

Рисунок 13

Огибающая величины амплитуд сигналов для

преобразователей

а) ПЦ-35-КТр; б) ПЦ-45-КТр

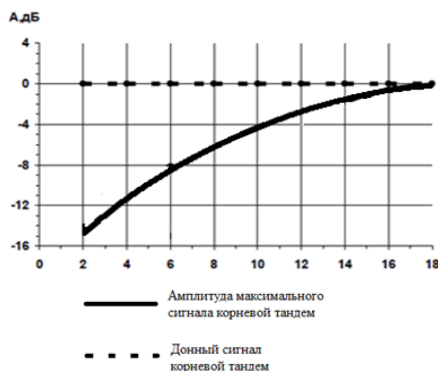
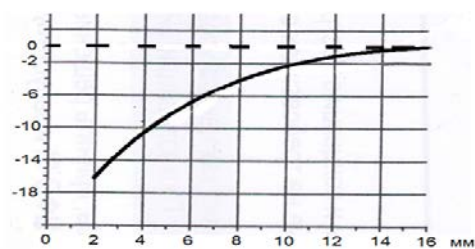


Рисунок 14

Зависимость амплитуды сигнала от эквивалентной высоты вертикального паза

а) ПЦ-35-2,5КТр; б) ПЦ-45-2,5КТр

- амплитуда сигнала «корневой тандем» от паза переменной высоты увеличивается с увеличением высоты паза;
- разница между сигналом от двугранного угла и сигналом от имитатора трещины высотой 2 мм составляет 15-16 дБ для обоих преобразователей;
- диапазон изменения амплитуды сигнала при изменении высоты трещины от 2 до 15 мм составляет 16 дБ;

На основе приведенных результатов исследований построены графики зависимости амплитуды сигнала корневой тандем при использовании преобразователей ПЦ-35-КТр, ПЦ-45-КТр от эквивалентной высоты вертикального паза (рисунок 14).

## 6. Исследование методики УЗК.

Ограниченная контролепригодность, связанная с большим количеством паразитных сигналов.

В проведении исследования на образце НО-K1000 по выявлению полезных сигналов от искусственного отражателя-имитатора трещины в корне шва на фоне паразитных сигналов. Для специализированных преобразователей были получены следующие зависимости:

- для наклонных совмещенных преобразователей изменение амплитуды эхо-сигналов от отражателей в виде двугранного угла, паза  $h=3$  мм и выточки под подкладное кольцо образце НО-K1000Ц в зависимости от положения ПЭП на поверхности образца: расстояния  $X$  от эпицентра отражателя на поверхности сканирования до передней грани ПЭП. Схема эксперимента представлена на рисунке 15.

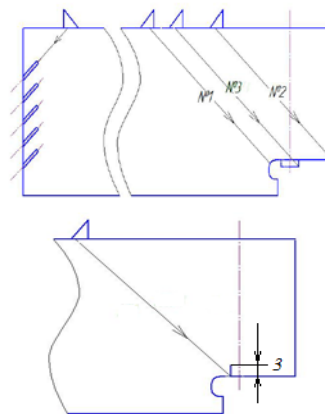


Рисунок 15

Схема эксперимента наклонными совмещенными преобразователями.

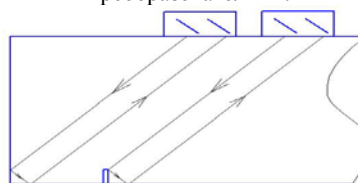


Рисунок 16

Схема эксперимента наклонными раздельно-совмещенными преобразователями «корневой тандем».

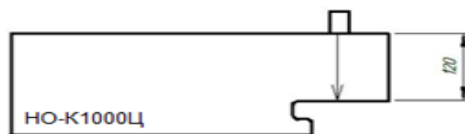


Рисунок 17 Схема эксперимента прямым преобразователем В45N.

- для наклонных преобразователей «корневой тандем» изменение амплитуды сигналов «корневой тандем» от отражателей в образце НО-K1000Ц (паза  $h=3$  мм, паза

переменной высоты) в зависимости от сечения и положения ПЭП на образце (расстояния  $X$  от эпицентра отражателя до передней грани ПЭП). Схема эксперимента представлена на рисунке 16.

Для прямого совмещенного преобразователя В4SN получены следующие характеристики:  $A_{\text{МАХ}}$  от торцевой поверхности (донный) на расстоянии 500 мм;  $A_{\text{МАХ}}$  от выточки под подкладное кольцо;  $A_{\text{МАХ}}$  от донной поверхности на глубине  $h=120\text{мм}$  (рисунок 17);  $A_{\text{МАХ}}$  от паза  $h=3\text{мм}$ ;  $A_{\text{МАХ}}$  от имитатора подкладного кольца (глубина 130 мм);  $A_{\text{МАХ}}$  от донной поверхности на глубине  $h=150\text{мм}$ ;

На рисунке 18 представлены результаты исследования амплитуд сигналов от двугранного угла, паза  $h=3\text{мм}$  и выточки под подкладное кольцо в зависимости от расстояния  $X$  от эпицентра отражателя на поверхность сканирования до передней грани ПЭП преобразователя ПЦ-37-2,5р. Эти исследования показали следующее:

- максимальная амплитуда эхо-сигнала от двугранного угла и паза  $h=3\text{мм}$  на 8 дБ выше браковочного уровня на глубине 120мм, установленного методикой;
- максимальная амплитуда эхо-сигнала от выточки под подкладное кольцо соответствует браковочному уровню на глубине 120мм, установленного методикой;
- расстояние от эпицентра отражателя до передней грани преобразователя в точке максимума эхо-сигнала составляет 88 мм.

С учетом конструкции и угла ввода преобразователя ширина околосшовной зоны, для эффективного выявления дефектов в корне шва, должна быть не менее 110 мм от центра шва.

На рисунке 19 представлены результаты исследования амплитуд сигналов от двугранного угла, паза  $h=3\text{мм}$  и выточки под подкладное кольцо в зависимости от расстояния  $X$  от проекции эпицентра отражателя на поверхность сканирования до передней грани ПЦ-45-2,5р. Эти исследования показали следующее:

- максимальная амплитуда эхо-сигнала от двугранного угла на 13 дБ выше браковочного уровня на глубине 120 мм, установленного методикой;
- максимальная амплитуда эхо-сигнала от двугранного угла на 8 дБ выше браковочного уровня на глубине 120 мм, установленного методикой;

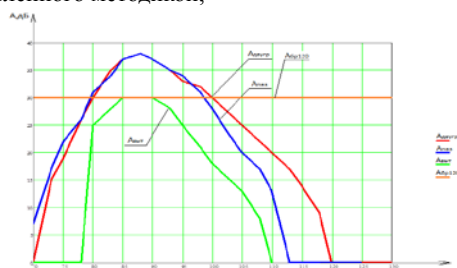


Рисунок 18

Зависимость амплитуды эхо-сигналов для преобразователя ПЦ-37-2,5р

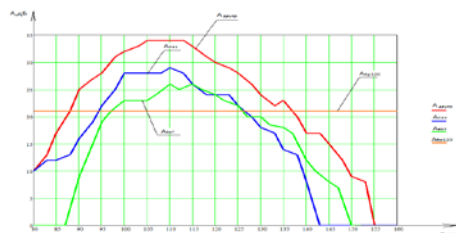


Рисунок 19

Зависимость амплитуды эхо-сигналов для преобразователя ПЦ-45-2,5р

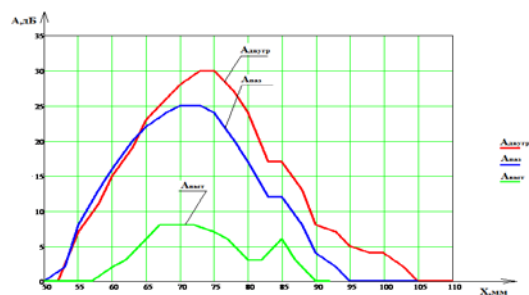


Рисунок 20

Зависимость амплитуды сигналов для преобразователя ПЦ-35-КТр.

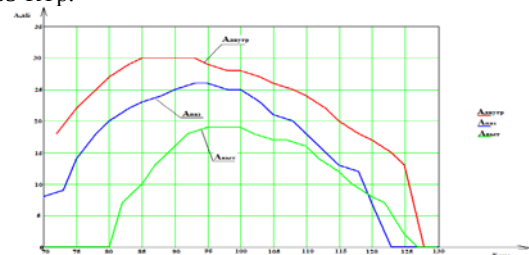


Рисунок 21

Зависимость амплитуды сигналов для преобразователя ПЦ-45-КТр.

- максимальная амплитуда эхо-сигнала от выточки под подкладное кольцо на 6 дБ выше браковочного уровня на глубине 120мм, установленного методикой;
- расстояние от эпицентра отражателя до передней грани преобразователя в точке максимума эхо-сигнала составляет 110 мм. С учетом конструкции преобразователя и его угла ввода, ширина контактной поверхности, для эффективного выявления дефектов в корне шва данным преобразователем, должна быть не менее 132 мм от центра шва.

На рисунках 20 и 21 представлены результаты исследования амплитуд сигналов от двугранного угла (Адвуг), паза  $h=3\text{мм}$  (Апаз) и выточки (Авыт) под подкладное кольцо в зависимости от расстояния  $X$  от проекции эпицентра отражателя на поверхность сканирования до передней грани преобразователей ПЦ-35-КТр и ПЦ-45-КТр. Эти исследования показали следующее:

- при использовании преобразователей ПЦ-35-КТр и ПЦ-45-КТр максимальная амплитуда сигнала «корневой тандем» от паза  $h=3\text{мм}$  на 4-5 дБ меньше аналогичного сигнала от двугранного угла;
- при использовании преобразователя ПЦ-35-КТр максимальная амплитуда сигнала от выточки под подкладное кольцо на 17 дБ меньше сигнала «корневой тандем». Для преобразователя ПЦ-45-КТр аналогичное соотношение будет составлять 7 дБ.
- расстояние от проекции эпицентра отражателя до передней грани преобразователя в точке максимума эхо-сигнала составляет для ПЦ-35-КТр 73 мм, а для ПЦ-45-КТр – 93мм. С учетом конструкции преобразователя ширина контактной поверхности, для эффективного выявления дефектов в корне шва, должна быть не менее 110 мм (для ПЦ-35-КТр) и 130 мм (для ПЦ-45-КТр) в обе стороны от центра шва.

В таблице 1 представлены результаты измерения амплитуд эхо-сигналов преобразователем В4SN от различных поверхностей.

Таблица 1

| S=500мм               | h=3мм | Выточка под подкладное кольцо | H=120мм | H=150мм |     |
|-----------------------|-------|-------------------------------|---------|---------|-----|
| $A_{\text{МАХ}}$ , дБ | 43    | 72                            | 51      | 33      | 29  |
| H, мм                 | 500   | 450                           | 435     | 120     | 150 |
| глубиномер            |       |                               |         |         |     |

Результаты исследований показали то, что паз  $h=3\text{мм}$ , удовлетворительно выявляется, несмотря на наличие сигналов от конструктивного отражателя типа выточки под подкладное кольцо. Это говорит о том, что для контроля сварных соединений №1 и №13 имеется технологическая возможность контроля со ступицы ротора.

На рисунке 22 представлены сигналы от конструктивных отражателей сварного соединения №13, полученных при использовании преобразователя В4SN при контроле с торцевой поверхности. Под номерами обозначены – сигнал от выточки под подкладное кольцо,  $S_a=427\text{ мм}$  (№1); сигнал от центрирующего пояса или дальнего от седьмой ступени технологического непровара,  $S_a=437\text{ мм}$  (№2); сигнал от ближнего к седьмой ступени технологического непровара,  $S_a=446\text{ мм}$  (№3). Данные сигналы образуются при положении прямого преобразователя на границе перехода цилиндрической части ступицы в коническую.

На рисунках № 23-25 представлены сигналы УЗК, полученные от конструктивных элементов ротора с помощью наклонного преобразователя ПЦ-35-КТ на цилиндрической поверхности. Под номерами обозначены – амплитуда от первого (относительно седьмой ступени) технологического непровара,  $D_a=120\text{ мм}$  (№1); амплитуда от второго (относительно седьмой ступени) технологического непровара (№2); амплитуда от внутренней поверхности подкладного кольца,  $D_a=130\text{ мм}$  (№3); амплитуда от поверхности центрирующего пояса,  $D_a=140\text{ мм}$  (№4).

На рисунках №№26-28 представлены сигналы УЗК от конструктивных элементов ротора, полученные при использовании преобразователя ПЦ-37-2,5р. Были приняты и идентифицированы сигналы от выточки под подкладное кольцо (рисунок 26), ближнего (относительно седьмой ступени) технологического непровара (рисунок 27), от внутренней поверхности подкладного кольца (рисунок 27), дальнего, относительно седьмой ступени, технологического непровара (рисунок 28), центрирующего пояса (рисунок 28).

Данные сигналы возникают на всем протяжении сварного шва. Известно, что большое количество паразитных сигналов помимо проблем с обнаружением отражателей, притупляет внимание дефектоскописта, что может привести к пропуску дефекта. Проведен анализ картины на экране дефектоскопа, которая возникнет при наличии трещиноподобных отражателей. Анализ проведен для сварных соединений №1 и №13 (рис. 29).

При контроле сварного соединения №13 при положении преобразователя 2 (рисунок 30), надежно выявляются трещины типа  $T_1$  в корне шва, образующие двугранный угол с поверхностью выточки под подкладное кольцо. Амплитуда эхо-сигнала будет соответствовать эквивалентному диаметру 4мм (согласно РД 27.28.05.004-2003). Кроме того, трещина, развитая по высоте будет экранировать эхо-сигнал от подкладного кольца и от технологического непровара  $H_2$ , дальнего от 7 ступени.

Трещины типа  $T_2$  обнаруживаются ненадежно, так как при положении преобразователя 4 (рисунок 31) сравнительно гладкая поверхность дает слабое отражение ультразвука в сторону преобразователя. В то же время наблюдается эхо-сигнал большой амплитуды от кольцевого технологического непровара  $H_2$ . В то же время трещина развитая по высоте (приблизительно 35мм) будет экранировать эхо-сигнал от конструктивного отражателя – поверхности центрирующего пояса, которая располагается на глубине  $D_a=140\text{мм}$ .

При контроле сварного соединения №1 картина аналогичная. Единственное отличие – развитая по высоте трещина  $T_2$  будет экранировать эхо-сигнал от другого конструктивного отражателя – галтели замка,

располагающегося на глубине  $D_a=140\text{ мм}$ .

Таким образом, при контроле сварных соединений №1 и №13 при движении преобразователя от ступени по направлению к оси шва при бездефектном соединении возникают паразитные сигналы от конструктивных отражателей в следующей последовательности (рисунок 29): 1- от выточки под подкладное кольцо  $D=123\text{мм}$  (только для ПЦ-37); 2- от ближнего конструктивного непровара  $H_1$   $D=120\text{мм}$ ; 3- от подкладного кольца  $D=130\text{мм}$ ; 4- от дальнего конструктивного непровара  $H_2$   $D=120\text{мм}$ ; 5- от галтели замка  $D=125\text{мм}$  (CC№1) или поверхности центрирующего пояса  $D=140\text{мм}$  (CC№13).

При наличии трещины  $T_1$  возникает следующая последовательность сигналов (рисунок 30): от выточки под подкладное кольцо  $D=123\text{мм}$  (только для ПЦ-37); от трещины  $T_1$ , образующей двугранный угол с технологическим непроваром  $H_1$   $D=120\text{мм}$ ; если трещина  $T_1$  невысокая - от дальнего конструктивного непровара  $H_2$   $D=120\text{мм}$ ; от галтели замка  $D=125\text{мм}$  (CC№1) или поверхности центрирующего пояса  $D=140\text{мм}$  (CC№13).

При наличии трещины  $T_2$  возникает следующая последовательность сигналов (рисунок 31):

- от выточки под подкладное кольцо  $D=123\text{мм}$  (только для ПЦ-37);
- от ближнего конструктивного непровара  $H_1$   $D=120\text{мм}$ ;
- от подкладного кольца  $D=130\text{мм}$ ;
- от трещины  $T_2$ , образующей двугранный угол с технологическим непроваром  $H_2$ .

Таким образом, ввиду ограниченной контролепригодности мы вынуждены судить о наличии отражателя не только по амплитудному признаку, а еще по косвенному признаку: по наличию и количеству паразитных сигналов.

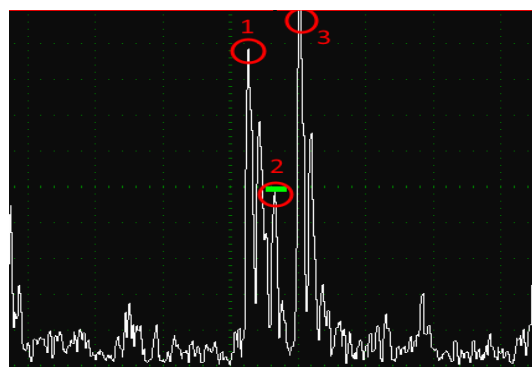


Рисунок 22

Сигналы, полученные преобразователем В4SN на сварном соединении №13.

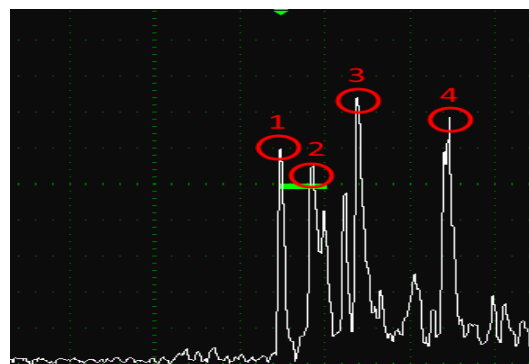


Рисунок 23

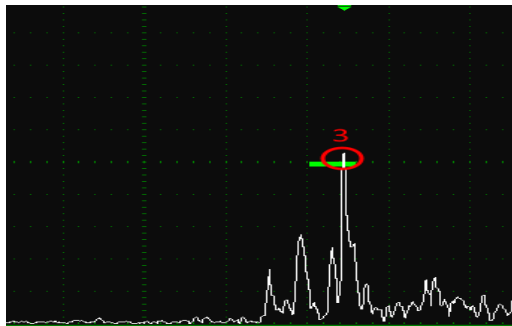
Сигналы, полученные преобразователем ПЦ-35-КТ



1

Рисунок №24

Сигнал, полученный преобразователем ПЦ-35-КТ.



2

Рисунок №24

Сигнал, полученный преобразователем ПЦ-35-КТ.



Рисунок 25

Сигнал, полученный преобразователем ПЦ-35-КТ на сварном соединении №13 от поверхности



Рисунок 26

Сигнал, полученный преобразователем ПЦ-37 на сварном соединении №13 от выточки под подкладное кольцо,  $D_a=125$  мм.

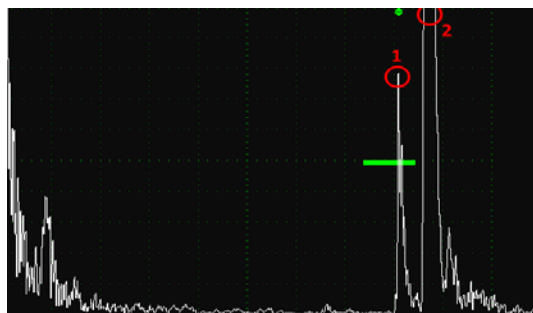


Рисунок 27

Сигналы, полученные преобразователем ПЦ-37 на сварном соединении №13: №1 – от технологического непровара, ближайшего к ступени,  $D_a=121$  мм; №2 от внутренней поверхности подкладного кольца,  $D_a=130$  мм.



Рисунок 28

Сигналы, полученные преобразователем ПЦ-37 на сварном соединении №13: №1 – дальнего от ступени технологического непровара,  $D_a=121$  мм; №2 – от центрирующего пояса,  $D_a=138$  мм.

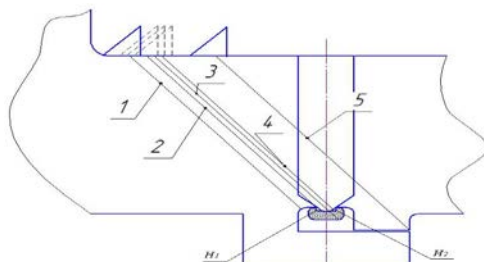


Рисунок 29

Последовательность сигналов при контроле СС№13 ротора ЦНД в случае отсутствия дефектов

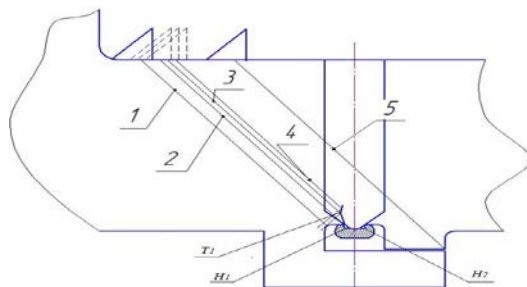


Рисунок 30

Последовательность сигналов при контроле СС№13 ротора ЦНД при наличии трещины  $T_1$

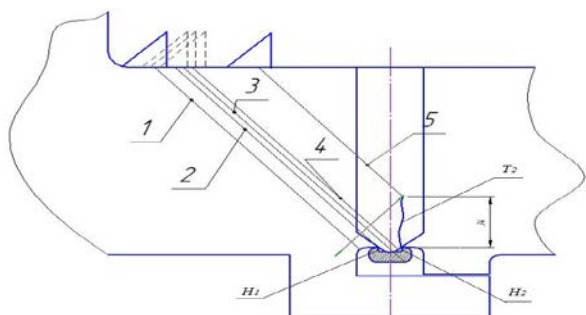


Рисунок 31

Последовательность сигналов при контроле ЦНД №13 ротора ЦНД при наличии трещины Т2

#### Основные результаты исследований преобразователей и методики:

- для преобразователей ПЦ-37-2,5р и ПЦ-45-2,5р построены АРД-диаграммы для определения уровня чувствительности для каждой глубины залегания. Проверка построенной АРД-диаграммы, путём получения эхо-сигналов от плоскодонных отверстий на глубине  $h=40,60,80,100$  и  $120$  мм в образце НО-К1000Ц, показала удовлетворительное совпадение расчетных и практических значений;

- трещиноподобные отражатели в виде паза  $h=3$  мм, заложенные в НО-К1000Ц, выявляются с большим запасом чувствительности. Конструктивный отражатель - выточка под подкладное кольцо так же выявляется с большим запасом чувствительности, при этом амплитуда сигнала менее браковочного уровня, а показания глубиномера  $H=123-124$  мм, что больше толщины сварного соединения. Конструктивный отражатель в виде приваренного подкладного кольца на образце НО-К1000Ц не выявляется, что говорит о неправильной приварке модели подкладного кольца к НО-К1000Ц;

- трещиноподобные отражатели в виде паза  $h=3$  мм и паза переменной высоты, также хорошо выявляются преобразователями ПЦ-35-КТр и ПЦ-45-КТр. Амплитуда сигнала «корневой тандем» от паза переменной высоты зависит от высоты паза в сечении, в котором проводится измерение. Чем больше значение высоты, тем больше амплитуда. На основании данных исследований построены графики зависимости амплитуды сигнала «корневой тандем» при использовании преобразователей ПЦ-35-2,5КТр и ПЦ-45-2,5КТр от эквивалентной высоты вертикального паза;

- определены значения расстояний  $X$  от передней грани преобразователей до проекции эллипса отражателя. Это позволяет оценить возможность использования каждого преобразователя в условиях ограниченной контролепригодности сварных соединений роторов цилиндров низкого давления.

- при УЗК прямым преобразователем В4SN паз  $h=3$  мм удовлетворительно выявляется на фоне сигнала от конструктивного отражателя (выточка под подкладное кольцо). Соответственно имеется технологическая возможность для контроля прямым совмещенным преобразователем сварных соединений №1 и №13 с торца узла. Это обстоятельство увеличивает прозвучиваемость вышеуказанных сварных соединений, которые имеют большую вероятность к образованию трещин эксплуатационного характера, чем остальные сварные соединения роторов цилиндров низкого давления турбины К 1000;

- исследована природа всех паразитных сигналов, которые возникают при контроле сварных соединений роторов ЦНД. Сформулированы основные правила контроля для дефектоскописта, описывающие основные моменты, на которые необходимо обращать внимание при контроле данных сварных соединений в условиях большого количества

паразитных сигналов. Этот аспект очень важен, потому что большое количество паразитных сигналов притупляет внимание дефектоскописта, что может привести к пропуску недопустимых отражателей.

#### 7. Разработка и испытание методики.

Разработанная «Методика ультразвукового контроля сварных соединений роторов цилиндров низкого давления турбины К-1000-60/1500-2 «АЕЦ Козлодуй» ЕАД» и, совместно со специалистами «АЕЦ Козлодуй» ЕАД и ИМех-БАН апробирована на блоке 5 АЭС Козлодуй. Были проконтролированы роторы 5SA30, 5SA40 и проведено обучение и аттестация дефектоскопистов АЭС «Козлодуй».

#### Заключение

В соответствии с техническим заданием АЭС, в полном объёме были выполнены следующие работы:

- разработана методика ультразвукового контроля сварных соединений роторов турбин К 1000-60/1500-2;
- разработаны и поставлены специализированные преобразователи и настроечные образцы;
- проведены обучение и аттестация персонала АЭС Козлодуй;
- оказана техническая помощь в выполнении ультразвукового контроля на 5SA30 (ЦНД-2) и 5SA40 (ЦНД-3).

Для обеспечения полной работоспособности и легитимности считаем необходимым и целесообразным провести аттестацию (сертификацию) новой методики УЗК роторов по методологии ENIQ с изготовлением и использованием испытательного образца с реальными (реалистичными) трещинами.

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p>Варна<br/>14 - 15.10.2016 г.<br/>София<br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                     |

## ВИБРО-АКУСТИЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА МОТОВИЛКА ОТ ДВГ. ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА КОНТРОЛ НА ТЕХНИЧЕСКОТО СЪСТОЯНИЕ

### ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ШАТУНА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ - ВОЗМОЖНОСТЬ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

### VIBRO-ACOUSTIC RESEARCH CONNECTING ROD OF ICE - CONTROL CAPABILITY OF TECHNICAL CONDITION

проф.д-р инж. Иван Коларов  
катедра „Машинни елементи, материалознание и химия”,  
Висше транспортно училище „Тодор Каблешков” – София, България

**Abstract:** Vibro-acoustic behavior of a sample of connecting rods of car ICE is researched in this paper. The investigation is carried out by 3D computer models and simulation of natural frequencies in computer environment and by experiments for resonances, obtained after impulse impact on the samples. The resonant frequencies are registered and the deformation modes are ascertained by comparison theoretical data. Very close data for resonance frequencies for the connecting rod's kit are measured and the uncertainty of frequencies are obtained.

Typical technical deviations as porosity of the material, shifting the center of gravity and one discontinuities in different sections of samples are created in the computer model and in some samples. The changes of natural frequencies are analyzed. The more important conclusions are:

- Uniform porosity greater than 1% can be determined by analyzing the change of 5, 6 and 7th modes. Their frequency deviation is 32-35 Hz, while the uncertainty of measurement is not more than 20 Hz. However 1% porosity gives about 4.7 g mass deviation and can be determined by weight measurement.
- There are data that about 1.7 g mass shift from end to end of the rod can be recognized by analyzing the first mode. For this shift is obtained 15 Hz deviation, while the uncertainty is 8 Hz. For the rest of modes (№ 2 to 7) the frequency deviation is less than the uncertainty.
- Discontinuities depth less than 1 mm can hardly be registered. For them the reported deviations of resonance frequencies are within the possible deviations of the resonance frequency due to other factors. There are theoretical data and experiments for registration of discontinuities with greater depth, let say 2 mm, by analyzing modes № 2, 3, 5, 6 and 7.
- Opportunities for registration of discontinuities with less depth can be improved by increasing the frequency resolution and reduction of uncertainty (improve the accuracy of processing). However first of all careful feasibility study to minimize the production costs.

**Keywords:** connecting rods *diagnostics by resonance frequency analyzing*

#### 1. Въведение

Мотовилките (срещат се и под наименованието „биели“) са едни от най-важните детайли от двигателя с вътрешно горене (ДВГ) и изискват голяма точност и прецизност при производство. За всеки двигател е необходимо осигуряване на процедури за контрол на размерите, маса, в т.ч. нейното разпределение по дължината на детайла, наличие на нецялостности в материала и др.

Технологичните операции за производство на мотовилките могат да бъдат различни и зависят от характеристиките на конкретната конструкция и технологичната екипировка и традициите на производителя. Контролът се извършва ръчно или автоматично, като се прилага [1]:

- междинен (след операционен) контрол за проверка на всяка производствена операция; в случай на отклонение се правят корекции на технологичните операции;
- краен контрол за гарантиране на съответствие на допуските на размерите с тези, указани на документацията и за разделяне на мотовилките на групи по зададени характеристики, напр. тегло (с точност 1 g), размери на присъединителните размери и др.

Изискванията към тези дейности са взаимно обвързани и зависят от конструкцията на мотовилката.

Чрез безразрушителен контрол се контролира състоянието на повърхнините. Използват се магнитно-прахов метод и визуален метод чрез използване на пенетранти. Следи се за наличие на смазка, боя, индикатори за пукнатини, нарушение на целостта на повърхнините (напр. гънки) измерва се теглото. Оценяват се: размерите на линейните индикатори, като тяхната дължина не трябва да по-голяма от утроената им широчина; нелинейни индикатори от вида на окръжност или елипса с дължина по-малка от утроената им дебелина; праволинейни индикатори – три или повече индикатора, разделени на разстояние 2 mm; повърхностни индикатори, забележими след премахване на намагнитените частици или чрез повърхностно нанесени пенетранти; подовърхностни индикатори.

Само индикатори с дължина по-голяма от 1.5 mm се считат за значими.

Има данни за използване и на ултразвуков имерсионен метод [2].

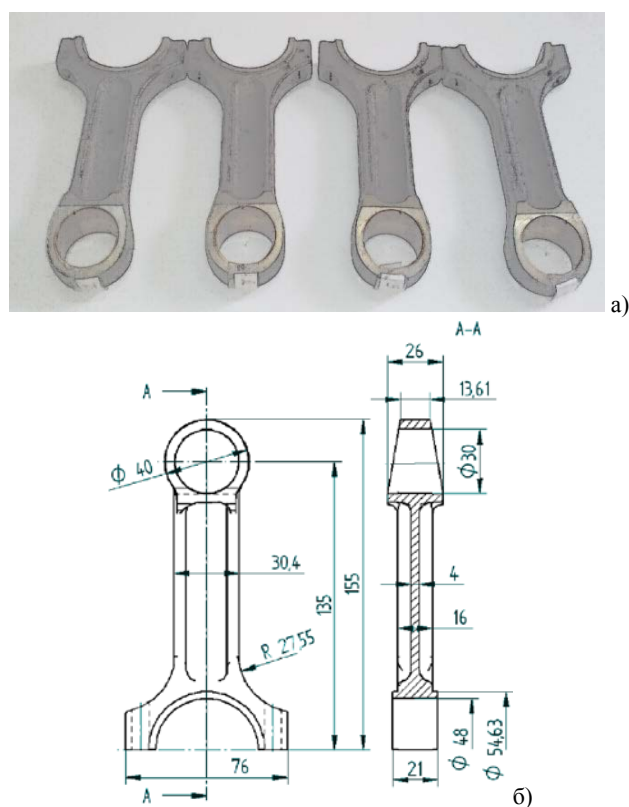
Вибро-акустическият метод позволява чрез оценяване на резонансните честоти да се правят обосновани заключения за техническото състояние на машинните елементи. Удобство при планиране на технологията за контрол предоставя

възможността за теоретично моделиране на образци с различни технически отклонения и определяне на собствените честоти чрез използване на специализирани софтуерни продукти. По този начин се спестява значителен ресурс, а експерименталните резултати се използват за потвърждаване на част теоретичните от резултатите.

Задача на настоящето изследване е да представи резултати от ускорено вибро-акустическо изследване на техническото състояние на мотовилка и да обоснове диагностични характеристики за оценка.

## 2. Подходи за реализиране на изследването

Направено е теоретично и експериментално изследване на четири идентични образци от мотовилка. Образците са предварително селектирани от производителя според изисквания за съответствие за вграждане в ДВГ и са експлоатирани до момент за направа на основен ремонт. Изследванията са проведени при разглобени черупки за плъзгащите лагери и пета. Изображение на опитните образци и скица са показани на фиг. 1 а) и б). Измерени са масите на образците с разделителна способност на измервателната система 0.5 g. Отчетените стойности са показани в табл. 1.



Фиг. 1. Изображение (а) и скица (б) на изследваните образци.

Табл. 1. Стойности на измерените маси на изследваните образци

| Образец № | 1   | 2   | 3     | 4     |
|-----------|-----|-----|-------|-------|
| Маса, g   | 467 | 468 | 467.5 | 467.5 |

### 2.1. Подготовка на теоретичното изследване

Теоретичното изследване е обектно насочено към изследваната конструкция мотовилка реална конструкция на мотовилка от ДВГ. Образците са обемно моделирани, зададен е материал «въглеродна стомана» с изотропна структура и усреднени физико-механични характеристики. Тъй като на практика са възможни отклонения в акустико-еластичните свойства на материала, специфични за всеки технологически процес [3], не е търсено целенасочено доближаване (нагаждане) на теоретичните към

експериментални данни чрез вариране на еластичните характеристики на материала. Установена е разлика в масата на виртуалния образец от тази на реалните образци в рамките на 30 g.

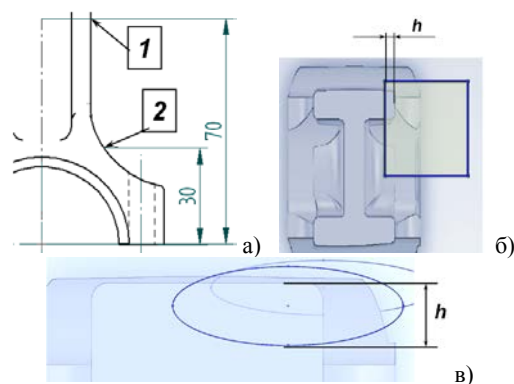
Образците са динамично анализирани в специализиран софтуерен продукт за определяне на собствените честоти.

Чрез създадения модел са изследвани изменение на собствените честоти в резултат на:

- наличие на обща порестост в материала в рамките до 3%;
- изменение на разпределението на масата по дължината на образците чрез преместване на обем с тегло от 0.87 до 3.5 g;
- наличие на нецялостности от тип «повърхностна пукнатина» с дълбочина от 2 до 4 (5) mm в различни участъци на централната част на мотовилката.

Порестостта на материала в диапазона 1 – 3% предизвиква намаляване на теглото на образца от 4 до 12 g. Обемното изместване е реализирано концентрирано отнемане и прибавяне на материал за участъците на присъединителните отвори на образците, където не се очакват значителни деформации в деформационните мода, заемани при резонанс. Нецялостностите са формирани чрез изрязване на обем с дебелина 0.1 mm в средната част (1) и в областта на големия присъединителен отвор (2) на образците на разстояние, съответно, 70 и 30 mm (фиг. 2 а), които са натоварени на натиск и на практика възниква разрушаване, както следва:

- нецялостност с правостенна форма с дълбочина  $h = 1; 2$  и 5 mm в част от I профила (фиг. 2 б);
- нецялостност със закръглена (елипсоидна) форма с дълбочина  $h = 2$  и 4 mm и с променлива дължина в преходния участък на стена от големия диаметър в образца (фиг. 2 в).



Фиг.2. Изображения на нецялостности, формирани в 3D модел на образците; а) -местоположение на нецялостността; б) и в) – изображение на нецялостност с правостенна и закръглена форма.

### 2.2. Експериментално изследване

Измерени са резонансните честоти  $f_{e,i,j}$  на образците 1-4 ( $j = 1 \div 4$ ) в диапазона 20 Hz-20 kHz чрез запис на звуковия спектър с помощта микрофон, хардуер за запис на сигналите в компютър и компютър. Резонансните честоти са определени чрез вградена функция за анализ по метода на Фурие, като образците са окачвани на идеално гъвкава и неразтеглива нишка върху универсална стойка. Образците са импулсно възбуджани чрез твърдо тяло с резонансни честоти над измервания спектър.

## 3. Резултати от изследването

### 3.1. Първоначални резултати от изследването

В табл. 2 са показани стойностите за теоретичните и експериментално получени честоти за модите в изследвания

честотен диапазон;  $f_t$  е теоретична стойност на резонансните честоти,  $f_e$  е измерената честота. Съответствието между теоретични и експериментални данни е определено чрез анализ на честотната разлика след статистическо потвърждаване на резонансните честоти за отделните образци. В изследвания честотен диапазон са теоретично получени 18 собствени честоти. Броят на регистрираните резонансни честоти е 14, т.е. 4 собствени честоти не са потвърдени експериментално. Възможните причини се отдават на значително по-малка амплитуда на вибрациите за тези деформационни моди, в резултат на което се създава незначително изменение на звуковото налягане; честотно доближаване и съвпадение на резонансните честоти и др. в т.ч. неточности при идентификацията за тези образци на резонансните честоти от по-висок порядък. Честотите на модите с номера 5-7, 8-12 и 13-17 се групират в относително по-тесни честотни диапазони и е възможно да не бъдат правилно идентифицирани при изменение на физико-механичните и геометрични характеристики на образците. По-малка е честотната разлика  $f_e - f_t$  за честоти от по-нисък порядък.

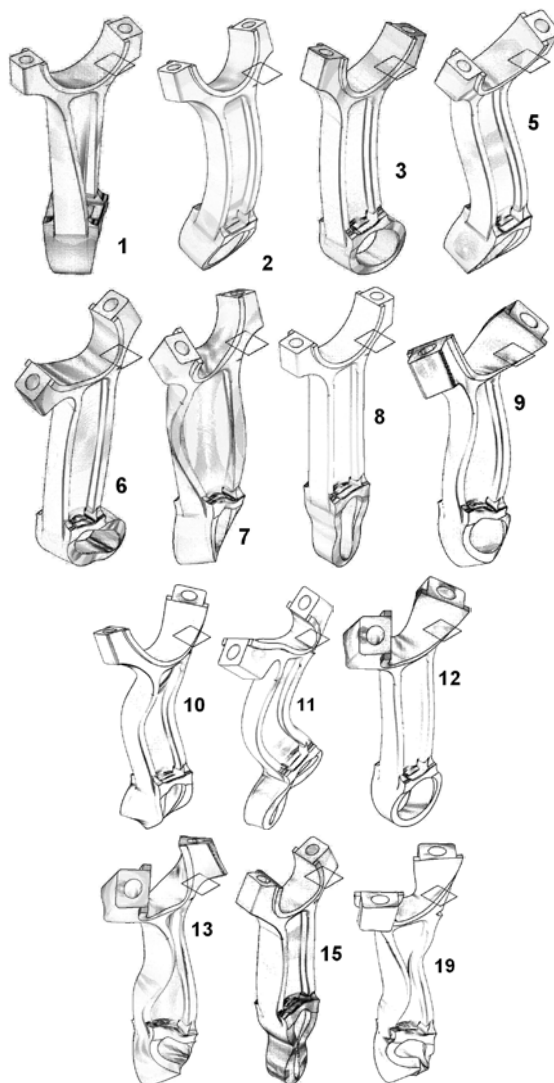
Табл. 2. Резултати, получени чрез теоретично и експериментално изследване на собствени честоти

| №              | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8     | 9     |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| $f_t$ , Hz     | 1987.9 | 2669.2 | 4319.4 | 5526.2 | 6795.3 | 6975.2 | 7131.3 | 10796 | 11467 |
| $f_e$ Hz       | 2295   | 2535   | 4495   | -      | 6935   | 6951   | 7711   | 8911  | 12430 |
| $f_e - f_t$ Hz | 307.1  | -134.2 | 175.6  | -      | 139.7  | -24.2  | 579.7  | -1885 | 963   |
| №              | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     | 17    | 18    |
| $f_t$ , Hz     | 11761  | 12235  | 12821  | 15555  | 15922  | 16115  | 16698  | 16989 | 19601 |
| $f_e$ Hz       | 12578  | 12818  | 14078  | 15618  | -      | 16930  | -      | -     | 20458 |
| $f_e - f_t$ Hz | 817    | 583    | 1257   | 63     | -      | 815    | -      | -     | 857   |

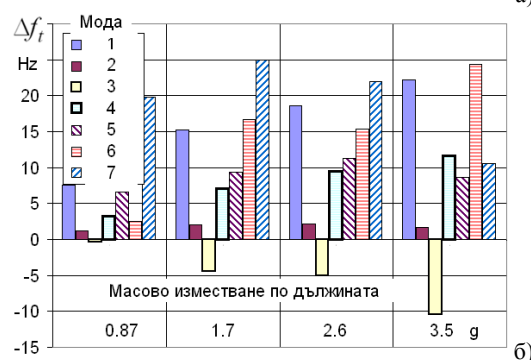
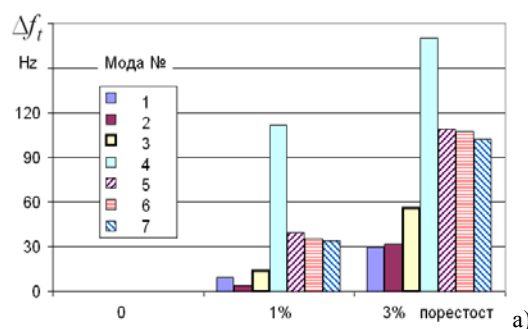
### 3.2. Теоретични резултати от вибро-акустическо изследване на технически отклоненията

Установени са деформациите в мотовилките за експериментално установените моди и те са показани на фиг. 3. Възможно е известно различие на деформациите резонансните честоти от по-висок порядък, поради относително близкото им честотно разположение.

Проведен е числов експеримент при наличие на порестост, изменение на масата по дължината, нецялостности в различни участъци. Изчислено е изменението на собствените честоти  $\Delta f_t$ ,  $\Delta f_t = f_{t,i} - f_{t,i}$ , тук  $f_{t,i}$  е собствената честота на деформационна мода  $i$  за образец с условно прието нормално състояние,  $f_{t,i}$  - честота на модата при наличие на техническо отклонение. Резултатите са показани на фиг. 4. Установено е неравномерно изменение на резонансните честоти. По-голямо е изменението на честотите при моди 5, 6, 7. Така например, за 1% порестост изменението на тези честоти е в рамките на около 30 Hz. Не е взето изменението на мода 4, която не е регистрирана чрез проведените експерименти.



Фиг. 4.4.3. Деформации, заемани от мотовилка при съответните по номер резонансни честоти.



Фиг. 4. Теоретични резултати за изменение на собствените честоти  $\Delta f_t$  от равномерна порестост на материала (а) и от изместване на масата по дължина на образца (б)

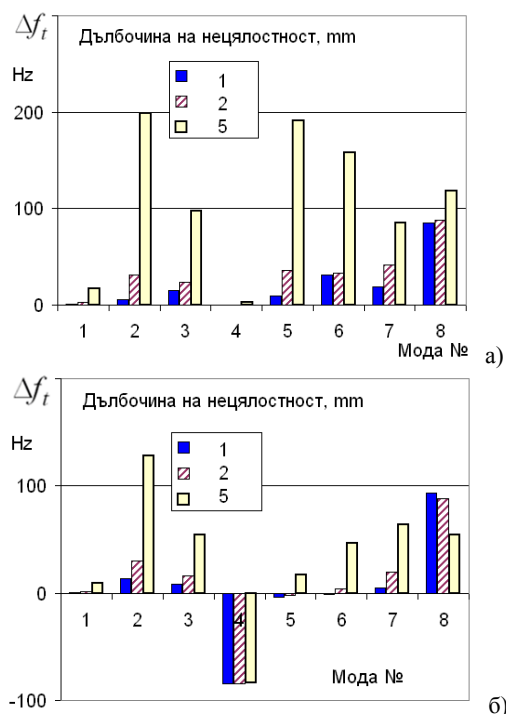
На базата на получените теоретични резултати са определени емпирични зависимости за изменението на честотата  $\Delta f_{t5}$  за мода 5 (която е регистрирана експериментално) от изследваните технически отклонения:

$$\Delta f_{t5} = -1.6167 \cdot x^2 + 41.217 \cdot x - 10^{-13} \text{ и} \quad (1)$$

$$\Delta f_{t5} = -0.101 \cdot \Delta m^2 + 10.304 \cdot \Delta m - 10^{-13} \text{ при } R^2 = 1.$$

Тук  $x$  е изменение на порестостта на материала в %,  $\Delta m$  е изменение на масата в g,  $R$  - коефициент на детерминация.

На фиг. 5 са показани резултати за изменение на резонансните честоти  $\Delta f_t$  вследствие наличието на нецялостност съгласно вариантите на технически отклонения, показани на фиг. 2 а) за вариант 1 – а) и за вариант 2 – б). При дълбочина на нецялостността 1 mm е отчетено изменение на мода 3 в рамките на 13 Hz и на модите 6 и 7 в рамките на 30 – 40 Hz за вариант 1 и изменение на честотата на мода 2 от 14 Hz. Тук и на двете графики се забелязва значително изменение на честотата на мода 8, но са възможни и грешки при изчислението.

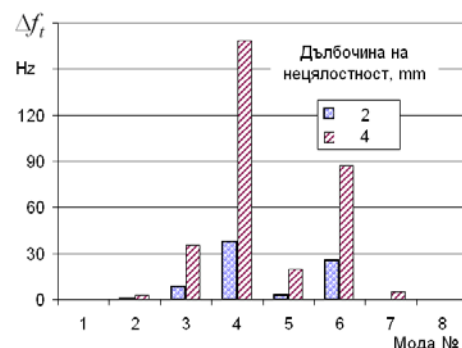


Фиг. 5. Резултати за  $\Delta f_t$  вследствие наличието на нецялостност съгласно техническите отклонения от фиг. 3.4.2 а) за вариант 1 – а) и за вариант 2 – б).

Чрез получените данни за изменението на честотата на втората мода  $\Delta f_{t2}$  може да се запише емпиричната зависимост от вида:

$$\Delta f_{t2} = 41.2 \cdot h^2 - 107.7 \cdot h + 80.3 \sqrt{b^2 - 4ac} \quad (2)$$

при коефициент на детерминация  $R^2 = 1$ . Тази зависимост е удобно да бъде използвана за определяне на условна дълбочина на нецялостността в този участък.

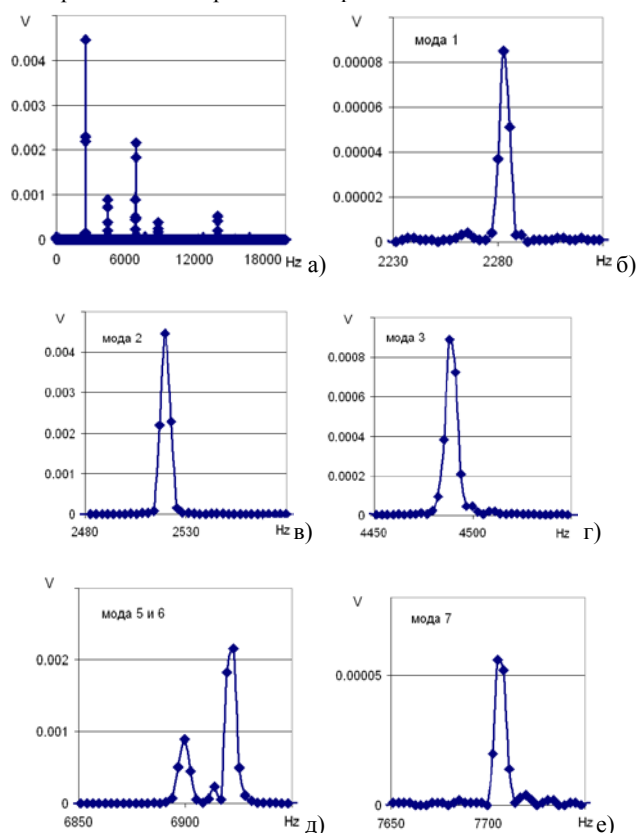


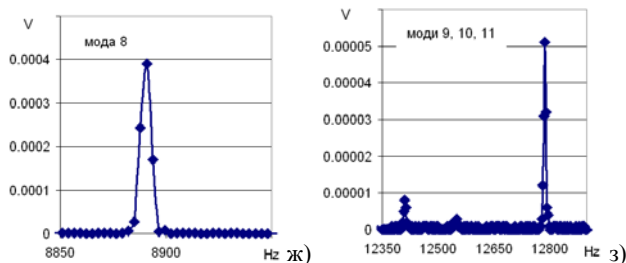
Фиг. 6. Теоретични резултати за изменението на собствените честоти  $\Delta f_t$  при наличие на нецялостност с елипсовидна форма от тип 2, показан на фиг. 3.4.2 в).

На фиг. 6 е показана графична зависимост с резултати за изменението на  $\Delta f_t$  при изменение на дълбочината на нецялостност с криволинейна (елипсовидна) форма (показана на фиг. 2 в). Отново модите 3 и 6 имат максимално изменение на честотата. За дълбочина на нецялостността 1 mm е отчетено незначително изменение на честотите. При моделиране на нецялостности от този вид с увеличаване на дълбочината нараства и дължината на нецялостността. Зависимостта между тях зависи от радиуса на кривата, която за момента не е известна. Това обезмисля практическата полза от извеждане на емпирична зависимост.

### 3.3. Експериментални резултати от изследването

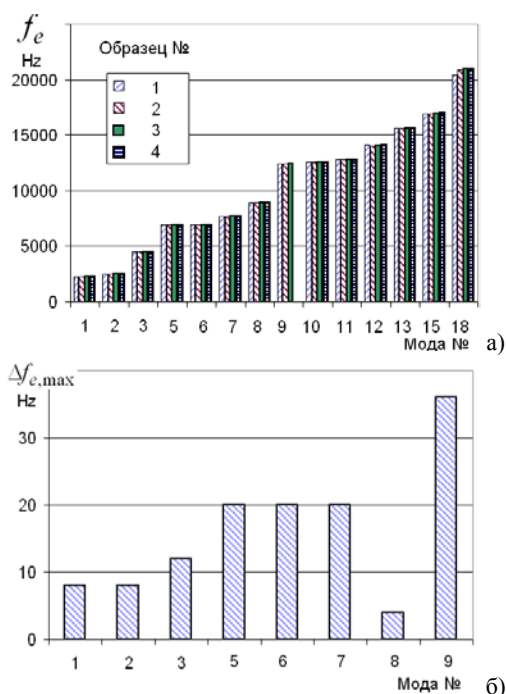
На фиг. 7 са показани типични резултати, получени при експериментално определяне на резонансните честоти.





Фиг. 7. Типични резултати от проведените експериментални изследвания

Сравнение на резултатите, получени за резонансните честоти  $\Delta f_e$  на изследваните образци и за тяхната максимална разлика  $\Delta f_{e,\max}$  са показани на фиг. 8 а) и б),  $\Delta f_{ei,\max} = f_{ei,\max} - f_{ei,\min}$ ,  $f_{ei,\max}$  е максималната, респективно,  $f_{ei,\min}$  е минималната измерени резонансна честота за деформационна мода  $i$  от всички експерименти при изследване на образците 1-4. Големината на  $\Delta f_{e,\max}$  е получена на базата анализ на резултатите, получени от 15 последователни измервания на резонансните честоти за всеки образец. Тя е определена за първите 9 деформационни моди. Тази стойност дават информация за неопределимостта на измерванията при охарактеризиране на различни технически отклонения. В процеса на обработка на резултатите са установени разсейване с диапазон 4 Hz, дължащо се на честотата на дискретизация на честотите в измервателната апаратура (комбинацията хардуер и софтуер), а така също и на известни разлики в размерите на образците [4]. Най-малко честотно разсейване (от 4 до 8 Hz) е установено за честотите на моди 1, 2 и 8. Значително по-голямо е разсейването (от 20 до 36 Hz) за честотите на модите 5, 6, 7 и 9.

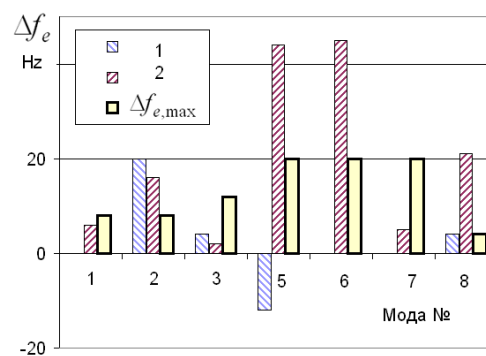


Фиг. 8. Експериментални резултати за регистрираните резонансни честоти  $\Delta f_e$  на деформационни моди 1-18 (а) и за тяхната максимална разлика  $\Delta f_{e,\max}$  (б).

### 3.4. Резултати от образци с формирани нецялостности

След първоначалните експерименти за разсейването на резонансните честоти в образците 1 и 2 са формирани

нецялостности със средна дълбочина 1 и 2 mm от типа „пукнатина“ в участък на реброто според фиг. 4.4.2 б), вариант 1 (на фиг. 3.4.2 а). Измерени са новите резонансни честоти и е определено тяхното изменение  $\Delta f_e$ , като стойностите за образец 1 са приети за еталон, т.е.  $\Delta f_e = f_{ei}(1) - f_{ei}$ . Тук  $f_{ei}(1)$  е експерименталната стойност, регистрирана за образец 1 за мода  $i$  преди създаване на нецялостността,  $f_{ei}$  - измерените честоти в образците след формиране на нецялостностите. Получените резултати за  $\Delta f_e$  са показани и за сравнение е показана стойността на  $\Delta f_{e,\max}$  ( $\Delta f_{e,\max}$  е максималната отчетена стойност за разсейването от фиг. 4.4.8 б).



Фиг. 9. Резултати за  $\Delta f_e$ , получени след формиране на плоски нецялостности с дълбочина 1 и 2 mm.

Резултатите показват, че нецялостността с дълбочина 1 mm с конкретното разположение се разпознава само чрез резонансната честота на мода 2. Нецялостност с дълбочина 2 mm се разпознава по-ясно чрез анализ на честотите на моди 2, 5, 6 и 8.

## 4. Изводи

На базата на получените теоретични и експериментални данни (от ограничения набор образци) могат да се направят следните по-важни изводи:

- Равномерна порестост на материала по-голяма от 1% може да се установи чрез регистриране на изменението на честотите на моди 5, 6, и 7. Те се изменят в рамките на 32 – 35 Hz, докато установената неопределимост на измерването за тях е до 20 Hz. В тегловни единици порестостта на материала може да се регистрира и чрез измерване на масата. В случая 1% порестост ще доведе до изменение на масата около 4.7 g, стойност която лесно може да се измери на универсални теглилки.

- Налице са данни, че масово изместване на центъра на тежестта с големина над 1.7 g може да се разпознае по изменението на първата резонансна честота. За това изместване е отчетеното изменение в рамките на 15 Hz, а неопределимостта на измерване при нея е 8 Hz. При останалите резонансни честоти (с номера от 2 до 7) изменението е в рамките на установената за тях допустимост на изменение.

- Нецялостности с дълбочина по-малка от 1 mm трудно могат да бъдат регистрирани. Отчетените отклонения на резонансните честоти е в рамките на възможните отклонения на резонансните честоти в резултат на въздействието на други фактори. Налице са данни за регистрация на нецялостности с по-голяма дълбочина, напр. 2 mm, чрез използване на моди 2, 3, 5, 6, 7. Проведеното експериментално определяне на изменението на резонансните честоти за едно конкретно местоположение на нецялостността потвърждава този извод. Забелязва се значително изменение на модите 2, 5, 6, което да бъде използвано за регистрация на нецялостността.

- Откриваемостта на нецялостности може да се подобри чрез повишаване на резолюцията при регистрация на резонансните честоти, а така също и чрез повишаване на точността на изработка на мотовилките. Това ще доведе до намаляване на допустимия честотен интервал на изменение на резонансните честоти, респективно, до намаляване на неопределеността за тяхното измерване. Но тази дейност преди всичко подлежи на внимателна технико-икономическа обосновка с оглед минимизиране на производствените разходи.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** *Този доклад е създаден в рамките на договор 1225/11.05.2016 г., проект „Вибро-акустическо охарактеризиране на технически отклонения в машинни елементи от транспортното машиностроене”, финансиран от Висшето транспортно училище „Тодор Каблешков”.*

## **5. Литература**

1. Bianco Gianfranco. Gears Technology & Mechanical part production. Control of connecting rods. <http://www.biancogianfranco.com>.
2. IMMERSION ULTRASONIC IMAGING OF CONNECTING ROD SMALL END BUSH INTERFACE. A DHVANI RESEARCH APPLICATION NOTE. Issue September 2013. INDIA. [www.dhvani-research.com](http://www.dhvani-research.com).
3. Коларов И. Вибро-акустическо изследване на стоманени цилиндрични образци с различна структура. Дни на безразрушителния контрол' Дефектоскопия 2016, Созопол, 2016.стр. 345 – 347. ISSN: 1310-3946.
4. Коларов И. Диагностика на повреди в машинни елементи чрез модален анализ. Стр. 138, София, 2015 г. ISBN 978-619-90083-4-8.

|                                                                                   |                                                                                                                         |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="text-align: center;">АКУСТИКА</h1> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                               | Декември 2016 г.                                                                   |

## ПРЕДИМСТВА НА ПРОСТРАНСТВЕНО ВРЕМЕННАТА ОБРАБОТКА ПРИ ОТКРИВАНЕ НА КОРАБНИ ХИДРОАКУСТИЧНИ ШУМОВЕ

д-р инж. Иван К. Иванов

Институт по металознание, системи и технологии „Акад. А.Балевски” с център по хидро и аеродинамика”,  
Българска Академия на Науките, e-mail: ivo1942@abv.bg

Разгледани са основните видове хидроакустични шумове в открития океан. Изчислени са дистанциите на откриване на хипотетичен обект при пространствено временна обработка в зависимост от вълнението при различни честотни ленти. Анализирани са възможните дистанции на откриване на корабни шумове в зависимост от използваната обработка на приеманите сигнали.

**Ключови думи:** хидроакустични шумове, пространствено временна обработка, откриване

Хидроакустични шумове се наблюдават във всички райони на световния океан. Тяхната природа е твърде разнообразна. Приета е следната им класификация [1]:

Динамични хидроакустични шумове, чието възникване е свързано с динамиката на морските вълни, турбулентните потоци във водата и атмосферата, шума от прибора, дъжда и други.

Подледни хидроакустични шумове, генерирането на които е свързано с образуването и динамиката на ледената покривка и взаимодействието на неравностите ѝ с вятъра и подводните течения.

Биологични хидроакустични шумове, създавани от различни представители на морската фауна.

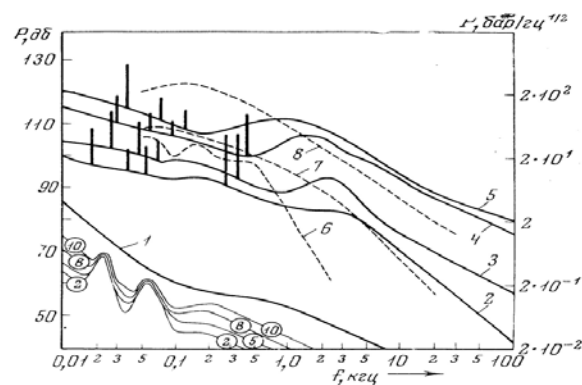
Сиезмични хидроакустични шумове, предизвикани от тектонична и вулканична дейност, а така също и от образуването на вълни цунами.

Технически хидроакустични шумове, създавани от дейността на човека, в това число шумовете от корабоплаването и шумовете на техническите съоръжения в пристанищата, по крайбрежието на морското дъно и други.

На фиг.1. са приведени спектрално-енергетически характеристики на някои хидроакустични шумове. По ординатната ос са нанесени значенията на звуковото налягане на шума, приведени в лента 1Hz и в децибел относно прага на чуване ( $20\mu\text{Pa}$ ). С увеличаване на честотата нивото на шумовете намалява. Общият динамичен диапазон на шумовете в честотната лента от 1 Hz до 100 kHz е около 120 децибела, като за всяка зададена честота динамичния диапазон може да се изменя в зависимост от условията в пределите от 40 до 60 децибела [1].

Кривата 1 определя максималните нива на наблюдаваните звукови налягания на подводните течения. Кривите 2, 3, 4 и 5 характеризират нивата на хидроакустичните шумове на надводен кораб при последователно нарастване на скоростта му. Кривите 6, 7 и 8 характеризират нивата на хидроакустичните шумове на подводница при последователно нарастване на скоростта ѝ [3]. Цифрите в кръгчетата показват скоростта на вятъра,

при която са извършвани измерванията на динамичните шумове.



Фиг.1.Спектри на хидроакустичните шумове от корабоплаването

Кривите 2, 3, 4 и 5 характеризират нивата на хидроакустичните шумове на надводен кораб при последователно нарастване на скоростта му. Кривите 6, 7 и 8 характеризират нивата на хидроакустичните шумове на подводница при последователно нарастване на скоростта ѝ. Цифрите в кръгчетата показват скоростта на вятъра, при която са извършвани измерванията.

За изпълнението на задачите по откриване, класификация е необходимо определено съотношение сигнал / шум, зависещо от вида на решаваната задача. При положение, че сигналът бавно нараства при неизменно смущение, то решението на поставената задача е възможно от момента, когато нивото на сигнала стане равно или по-голямо от нивото на маскиращото го смущение.

Резултатите от проведеното в [ 2 ] числено изследване на далечината на откриване на хипотетична подводница, чието интегрално шумово поле е  $0.6\text{Pa}/1\text{Hz}/1\text{m}$  доказват, че такава подводница при горните условия при вълнение по-голямо от 1 бал се открива на дистанции по-малки от 1 километър. Тези дистанции са недостатъчни за ефективно решаване на задачите на противоположната отбрана.

За увеличаване на дистанциите на откриване на подводниците е необходимо да се използва обработване на сигналите, което осигурява откриване им при съотношения сигнал/шум по-малки от единица.

Обект на изследване е приемно устройство, което формира изходно напрежение (коэффициент на корелация) от приетите морски шумове в две отдалечени на разстояние  $l$  точки, разположени на една вертикална права.

$$U_{\text{exit}} \sim \rho(\tau)$$

Приемаме, че сигналът постъпва синфазно в двете точки.

Напреженията получени след хидрофоните и усилвателите съдържат „сигнал“ и смущения съставени от некорелирани морски шумове и собствените шумове на усилвателите. Моментните им стойности са:

$$u_1(t) = u_s + u_{n1}, u_2(t) = u_s + u_{n2} \quad (1)$$

Коефициентът на корелация на тези две напрежения е:

$$\rho = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} u_1(t) u_2(t) dt}{\sigma_1 \sigma_2} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (2)$$

където:  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  са средноквадратичните стойности на напреженията  $U_1$  и  $U_2$ ,

а –  $\sigma_s$  - дисперсията на сигнала.

Можем да считаме, че средноквадратичните стойности на шумовете от двете точки са равни.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \quad (3)$$

Като изходим от (1) получаваме:

$$\sigma_1 = \sqrt{u_1(t)^2} = \sqrt{u_s^2 + u_n^2} = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_n^2}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{u_2(t)^2} = \sqrt{u_s^2 + u_n^2}$$

$$\sigma_1 \sigma_2 = \sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2 \quad (4)$$

От (2) и (4) се получава:

$$\rho = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2 + \sigma_n^2} \quad (5)$$

Формулата (5) се отнася както за средноквадратичните налягания, така и за средноквадратичните напрежения. Следователно за изходното напрежение от устройството можем да запишем:

$$u_{\text{exit}} = k \cdot \rho = k \cdot \frac{u_s^2}{u_s^2 + u_{na}^2 + u_{ns}^2} \quad (6)$$

където:  $K$  – общ коэффициент на преобразуване (чувствителност на хидрофоните);  $u_s$  – напрежение от сигнала;  $u_{ns}$  – напрежение от морския шум;  $u_{na}$  – собствен шум на усилвателите.

Интегрирането практически може да бъде реализирано само за краен интервал от време  $T$ . Следователно изходното напрежение на корелатора практически не може да бъде детерминирана величина, а има колебания (флуктуации). Това е една от причините да се въведе праг на изходното напрежение ( $U_{\text{thr}}$ ), който съответствува на някаква прагова стойност на коефициента на корелация ( $\rho_{\text{thr}}$ ).

Ако приемем дадена стойност с помощта на (6) можем да пресметнем теоретичната далечина на откриване

на подводница с известна шумност при даден закон на отслабване на звуковото налягане от разстоянието.

При сферичния закон на изменение на акустичното налягане от разстоянието  $r$  имаме:

$$p_s = \frac{p_0 r_0}{r} \quad (7)$$

Пренебрегнато е поглъщането на акустичните вълни, което е спектрално зависимо.

Условията, при които се реализира този закон ще наречем „нормални“.

Изследванията провеждаме под формата на числени примери.

В съответствие с (7) напрежението на сигнала е:

$$U_{\text{smin}} = \frac{U_{\text{sor0}}}{r_{\text{max}}} \quad (8)$$

където:  $U_{\text{so}}$  – напрежението на сигнала на разстояние  $r_0$  от подводницата;  $r_{\text{max}}$  – далечината на откриване;  $U_{\text{smin}}$  – напрежението на сигнала на дистанцията на откриване  $r_{\text{max}}$ .

В съответствие с (6) и (8) за праговата стойност на коефициента на корелация получаваме:

$$\rho_{\text{thr}} = \frac{u_{\text{smin}}^2}{u_{\text{smin}}^2 + u_{\text{ns}}^2 + u_{\text{na}}^2},$$

откъдето:

$$u_{\text{smin}} = \sqrt{u_{\text{ns}}^2 + u_{\text{na}}^2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{thr}}}{1 - \rho_{\text{thr}}}} = \frac{u_{\text{so}} \rho_0}{r_{\text{max}}} \quad (9)$$

$$r_{\text{max}} = u_{\text{so}} r_0 \sqrt{\frac{1 - \rho_{\text{thr}}}{\rho_{\text{thr}} (u_{\text{ns}}^2 + u_{\text{na}}^2)}} \quad (10)$$

Определяме напрежението на сигнала  $U_{\text{so}}$ , което се създава от шума на подводница на разстояние  $r_0 = 1\text{m}$  при чувствителност на хидрофоните  $K_h$  и на ширина на лентата на приемника от  $f_1$  –  $f_2$  (идеален филтър)

Спектралната плътност на шума от подводница (по мощност) удовлетворява следното уравнение:

$$I(f) = b/f^2, \quad (11)$$

където:  $b$  е константа, която зависи от шумността на подводницата и разстоянието  $r$ .

Интегралната мощност на шума от подводница в лента ( $f_1 \div f_2$ ) е:

$$J = \int_{f_1}^{f_2} \frac{b}{f^2} df = b \frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2} = b \frac{\Delta f}{f_{\text{mid}}^2} \quad (12)$$

Средноквадратичното налягане на шума от подводница е:

$$p_s = \sqrt{I} = \frac{\sqrt{b \Delta f}}{f_{\text{mid}}} \quad (13)$$

Определяме константата  $b$ . Нека е зададена шумността на подводница чрез акустичното налягане ( $p_0$ ), което се създава в лента равна на 1Hz на честота  $f_{\text{mid}} = 1\text{kHz}$ , на разстояние  $r_0 = 1\text{m}$ . От (7) и (13) получаваме:

$$\sqrt{b} = p_0 r_0 / r = f_{\text{mid}} / \sqrt{\Delta f} = p_0 / r \cdot 10^3 \quad (14)$$

Тогава:

$$p_s = 10^3 p_0 \frac{1}{r} \sqrt{\frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2}} \quad (15)$$

$$U_s = p_s K_h = 10^3 p_0 K_h \frac{1}{r} \sqrt{\frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2}} \quad (16)$$

В (15) и (16) разстоянието е в метри, а честотата в херци.

Напрежението получено от въздействието на шума от подводницата на разстояние  $r = r_0 = 1\text{m}$  ще бъде:

$$U_{s0} = 10^3 p_0 k_h \sqrt{\frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2}} \quad (17)$$

От (10), (16) и (17) получаваме:

$$r_{\max} \leq 10^3 p_0 / U_{\text{in.thr}} \sqrt{\frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2}} \quad (18a)$$

$$r_{\max} \leq 10^3 p_0 k_h \sqrt{\frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2}} \sqrt{\frac{1 - q_{\text{trh}}}{q_{\text{trh}}(U_{\text{sn}2} + U_{\text{na}2})}} \quad (18b)$$

Практически максималната далечина на откриване съответствува на по-малката от стойността за  $r_{\max}$  получена от изчисленията по (18a) и (18b).

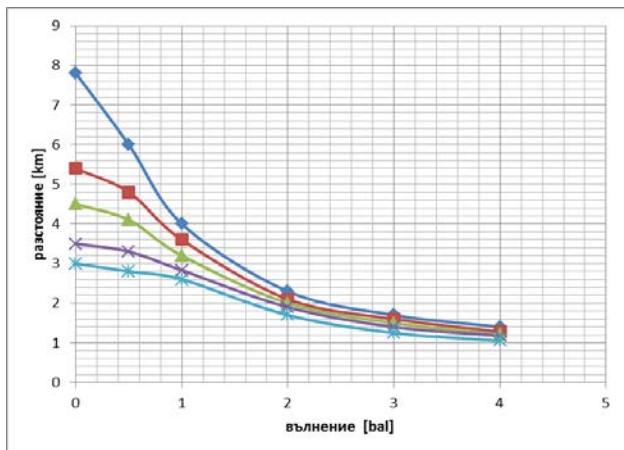
Изчисляваме  $r_{\max}$  по формула (18b) при следните стойности на:  $f_2 = 10\text{kHz}$ ,  $p_0 = 0,6\text{Pa/Hz}$ ,  $K_x = 50\mu\text{V/Pa}$ ,  $U_{\text{вх прг}} = 0,1\mu\text{V}$ ,  $q_{\text{прг}} = 0,1$  и  $U_y = 0,3\mu\text{V}$ . Получените резултати за  $r_{\max}$  в километри са приведени в Таблица 1 и фиг. 2.

Таблица 1

|     | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    |
|-----|-----|------|------|------|------|
| 0   | 7.8 | 5.4  | 4.5  | 3.5  | 3    |
| 0.5 | 6   | 4.8  | 4.2  | 3.3  | 2.8  |
| 1   | 4   | 3.6  | 3.2  | 2.83 | 2.6  |
| 2   | 2.3 | 2.1  | 2    | 1.9  | 1.7  |
| 3   | 1.7 | 1.6  | 1.5  | 1.4  | 1.35 |
| 4   | 1.4 | 1.28 | 1.21 | 1.18 | 1.05 |

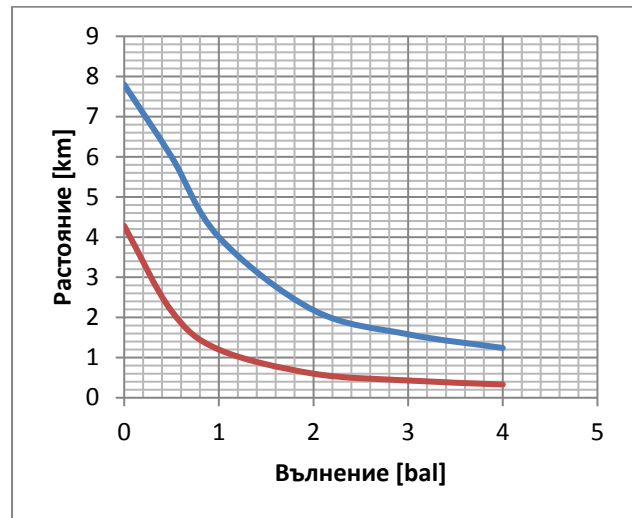
В настоящата статия се разглежда въпросът за генерирането на тестови сигнали с различна форма на обвиваща, използвани за акустични и аудио измервания. Показано е приложението на програмния продукт Matlab®, като са използвани възможностите предоставени от Signal Processing Toolbox [1] и Data Acquisition Toolbox [2]. Като изходно периферно устройство е показано използването на вградена или външна звукова карта (soundcard). Даден е общ алгоритъм за генериране на сигнали с Matlab®. Представени са сигнали с различна форма на обвиващата във времевата област.

Генерирането (синтезирането) на изпитателни (тестови) сигнали заема централно място в сферата на реализацията, практическите изследвания и измервания на веригите и системите (circuits and systems), както в областта на сигналите и системите (signals and systems) така и в областта на акустиката. Глобално погледнато въпросът се разпростира върху цели области от познанието: образна диагностика, геодезия, сеизмология, радио-, хидро- и аудио- локацията, архитектурна акустика, машиностроене, идентификацията на системи и редица други.



Фиг.2. Дистанции на откриване в зависимост от вълнението и  $F_1$

тъмно син –  $F_1 = 1\text{kHz}$ , червен –  $F_1 = 2\text{kHz}$ , зелен –  $F_1 = 3\text{kHz}$ ,  
виолет –  $F_1 = 4\text{kHz}$ , светло син –  $F_1 = 5\text{kHz}$ .



Фиг.3. Дистанции на откриване при:  
синьо - праг сигнал / шум по-голяма от 1;  
червено - коефициент на корелация по-голям от 0,1

На фиг.3 са показани теоретичните дистанции на откриване на хипотетична подводница, чието интегрално шумово поле е  $0.6\text{Pa/Hz/1m}$ , при съотношение сигнал/шум по-голямо от единица при стандартна обработка на приетия сигнал (червената крива) и при праг на корелация 0.1 при пространствено-временна обработка на приеманите сигнали (синята крива).

На фиг. 4 е показан специализиран хидроакустичен приемник, в който се реализира пространствено-временна обработка на сигналите от два хидроакустични приемника, разположени на една вертикална права на разстояние равно на радиуса на корелация на хидроакустичните шумове възникнали от морските вълни.



Фиг. 4. Специализиран хидроакустичен Приемник

С по-ранна версия на показания специализиран хидроакустичен приемник, в който се реализира пространствено временна обработка на сигналите, при изпитания в район с дълбочина около 200m източно от нос Калиакра са регистрирани корабни шумове на дистанция около 10km от генериращия ги обект.

3. Тюрин А.М., Сташкевич А.П., Таранов э.С., “Основы гидроакустики“, изд. Судостроение, Ленинград, 1966.

1. Бреховских Л.М. „Акустика океана“ стр. , изд. Наука, Москва, 1974.

2. Иванов И.К. „Откриване на обекти по излъчваните хидроакустични шумове, Акустика2015, София

## **ADVANTAGES OF SPATIAL-TEMPORAL PROCESSING IN HYDRO ACOUSTIC NOISE DETECTION OF SHIPS**

Dr. eng. Ivan K. Ivanov

The main types of acoustic noise in the open ocean are described. Detection distances of a hypothetical object are calculated with space temporary processing depending on the disturbance of water surface in different frequency bands. The possible detection distances of ship noises are analyzed depending on the processing method of the received signals.

**KEY WORDS:** hydro acoustic noise, spatial-temporary processing, detection of ships.

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                                   |

## ПРЕДСТАВЯНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ И ИЗВОДИТЕ ОТ РЕГУ

### TEST TANK ACOUSTIC CHARACTERIZATION OF UNDERWATER PANELS

#### ИЗМЕРВАНЕ НА АКУСТИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПОДВОДНИ ПАНЕЛИ В ХА БАСЕЙН

Assoc. professor N. Zh. KOLEV, Instructor P. V. IVANOV, Assoc. professor P. St. KALOYANCHEV, NIKOLA VAPTSAROV  
NAVAL ACADEMY, VARNA, Assistant G. I. Dimitrov, TECHNICAL UNIVERSITY VARNA

[n.kolev@naval-acad.bg](mailto:n.kolev@naval-acad.bg)

#### Abstract

*In this paper a methodology is presented for test tank flat sheet panel's acoustic characterization. The methodology is based on the pulse method. Experimental results for three acoustic materials are presented one of which is sandwich construction. A measured result is compared with theoretical result for insertion loss and echo reduction.*

**Keywords:** underwater measurements, acoustic anechoic materials, insertion loss, echo reduction, absorption rate, test tank pulse electroacoustic measurements.

### 1. INTRODUCTION

Anechoic acoustic materials play important role in the area of underwater measurements especially in the construction of measurement setups in closed spaces (test tanks, cavitation tubes etc.). One such setup is available at the cavitation tube of BSHC - Varna for measurement of acoustic noise of propeller models [1]. At this cavitation tube facility there was a need for reconstruction of one of the acoustic noise measurement metal chambers. This reconstruction perspective was the motive for doing acoustic characterization of underwater anechoic panels.

There is increased interest in this type of measurements worldwide in the last years [3, 4].

During the summer of 2016 at the sonar laboratory of the NV Naval Academy in Varna an investigation has been made of a range of commercially available acoustic materials in order to select one with optimal underwater anechoic properties. At the same time there was need to choose a sound transparent acoustic window for dividing the measurement acoustic chamber from the working volume of the cavitation tube.

### 2. CLASSIFICATION OF UNDERWATER ACOUSTIC MATERIALS, PARAMETERS AND MEASUREMENT METHODOLOGY

The word "acoustic material" is used to mean any one of or any combination of windows, reflectors, baffles, anechoic coatings, and bulk absorbing materials [2]. Windows, reflectors, baffles, and anechoic coatings constitute a complete set of materials insofar as their function is concerned. Ideal examples of the four materials will, respectively, transmit 100%, reflect 100%, transmit 0%, and reflect 0% of the sound intensity incident on them. Each of these four materials can be evaluated by measuring the percentage of sound intensity transmitted through and reflected from the material when a sample is immersed in water. These two measured characteristics are called the "insertion loss" and "echo reduction".

- *Insertion Loss*

Insertion loss is the reduction in acoustic intensity, in decibels, caused by inserting the material between the sound source and the receiver with diffraction and refraction effects absent. The insertion loss of a material is due to the combination of sound reflected from the material and sound absorbed in the material. In any practical window material and in most baffles, however, the absorption is negligible.

- *Echo reduction*

Echo reduction is an important parameter of reflectors and anechoic coatings. It is a measure of how much the incident sound pressure level is reduced after reflection. Echo reduction depends on the acoustical impedance mismatch at the reflecting boundary. The boundary acoustical impedance in turn depends on the material itself, its thickness, and usually on how the material is "backed up" [2].

For fitting an underwater anechoic chamber it is necessary to attach anechoic material to the metal base of the chamber with maximal echo reduction in broad frequency range. As an anechoic the material must be acoustically transparent or, first, the coating must have a good impedance match with the water so the sound energy will not be reflected. Second, after entering, the coating, the sound energy must be absorbed, otherwise the sound will be reflected at some subsequent boundary such as the wall of the chamber to which the coating is attached. Thus, both the echo reduction and the insertion loss should be high.

Anechoic coatings, unlike windows, baffles, and reflectors, sometimes are not made of a homogeneous material. Windows require only a good acoustical impedance match with water or mismatch as in the case of reflectors.

It is difficult to make thin homogeneous anechoic coatings with absorbing characteristics that are independent of frequency. Anechoic coatings usually consist of a layer of rubber or rubber like material mixed with either low acoustic impedance air voids or high-acoustic-impedance metal particles. The intent is to cause shear motions in the rubber rather than simple compression and elongation. The backing material is an integral part of the coating; for example, the thickness of the steel plate

to which a coating usually is attached and the medium (air or water) behind the steel affect the anechoic characteristics. Because the coating is heterogeneous, it may be and usually is resonant. This results in large vibration amplitudes and large echo reduction in a narrow band of frequencies.

Reflectors are made simply of either a material having a very low acoustical impedance (cork or an air sandwich) or a very high acoustical impedance (steel, nickel, tungsten).

From above analysis it is clear that the anechoic requirements will be satisfied if the material has acoustic impedance equal to the impedance of the water. If however it is this way only transparent there will be no sound isolation (the sound wave will be reflected from the metal base of the chamber and to imping back in the water). It will be desirable the material to represent damper or absorber for the acoustic wave.

The material subject to selection must satisfy above stated requirements and its acoustic parameters must be tested experimentally. Experimental measurements are made on samples in the form of plane sheets. The sample is large enough for the insertion loss to be essentially independent of the lateral dimensions, though still dependent on the thickness. That is, the sample is intended to simulate an infinitely long and wide sample. Data obtained from measurements on a sheet are subject to theoretical analysis and prediction. The reflection coefficient is defined:

$$(1) \quad R = \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{P_r}{P_i} \right)^2,$$

where  $I_r$  is the intensity of the reflected wave,  $I_i$  is the intensity of the incident acoustic wave,  $P_r$ ,  $P_i$  are respectively the sound pressures. If the sound speed  $C$  and the density  $\rho$  are known it is possible theoretical coefficients of reflection and transmission to be defined:

$$(2) \quad R = \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{P_r}{P_i} \right)^2 = \left( \frac{m-n}{m+n} \right)^2,$$

where  $m = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ ,  $n = \frac{c_1}{c_2}$ .

The coefficient of transmission is defined:

$$(3) \quad T = \frac{I_t}{I_i} = \left( \frac{P_t}{P_i} \right)^2$$

It must be taken into account that the echo reduction is inverse to reflection R:

$$(4) \quad R = \left( \frac{P_R}{P_i} \right)^2, ER = -20 \lg |R|$$

The insertion loss coefficient is inverse to transmission coefficient:

$$(5) \quad T = \left( \frac{P_T}{P_0} \right)^2, IL = -20 \lg |T|$$

The final expressions for the parameters  $ER$  and  $IL$  subject to measurement and estimation as a function of frequency in dB are as follows:

$$(6) \quad ER(f), dB = -20 \lg_{10} \left( \frac{P_r(f)}{P_i(f)} \right),$$

$$(7) \quad IL(f), dB = -20 \lg_{10} \left( \frac{P_t(f)}{P_i(f)} \right).$$

The last parameter subject to estimation is the "absorption loss" [1]. It may be computed from the insertion loss and echo reduction by assigning all missing sound energy to absorption. This is not a good procedure if the material is not an absorber, which usually is true of windows, reflectors, and baffles, because in practice more sound energy may be scattered, diffracted, or refracted than is absorbed. It may be assumed that the following equation is true according to the law of conservation of sound energy:

$$(8) \quad \alpha = 1 - \left( \frac{P_r}{P_i} \right)^2 - \left( \frac{P_t}{P_i} \right)^2$$

Where the absorbed sound intensity is the difference between incident intensity and the sum of reflected and transmitted intensities. In the investigation the absorption is estimated in percent.



Fig. 1 Naval Academy underwater acoustic laboratory

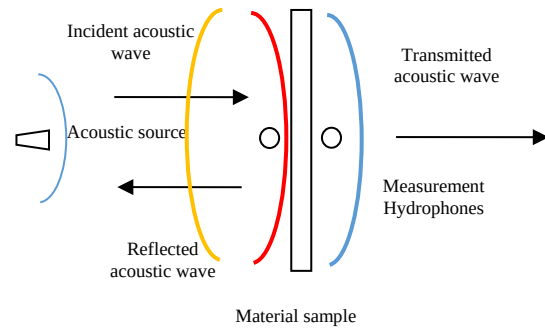


Fig. 2 Test tank experimental setup

For measurement of the echo reduction the hydrophone is positioned before the panel. This hydrophone measures the incident and reflected wave. The transmitted impulsive wave is measured by the hydrophone situated after the panel. Typical distances between the panel and the hydrophone are between 20 and 65 mm. The panel is with enough linear dimensions in

order diffracted and refracted waves to be minimized in the receiving points.

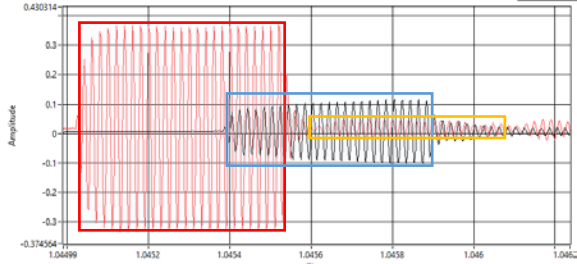


Fig. 3 Typical oscillogram of panel sample, incident (red), reflected (orange) and transmitted (blue) impulsive sound wave with length 0.5 mS for frequency 50 KHz

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS

Experimental results are presented for test tank, underwater panel samples, acoustic properties measurement [1].

- Polycarbonate



Fig. 4 Polycarbonate panel

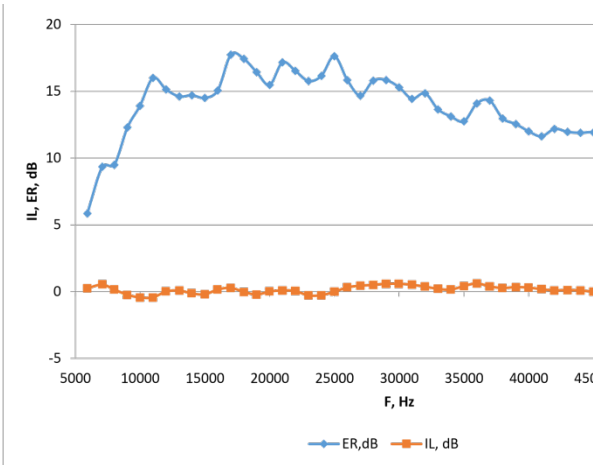


Fig. 5 Polycarbonate ER and IL

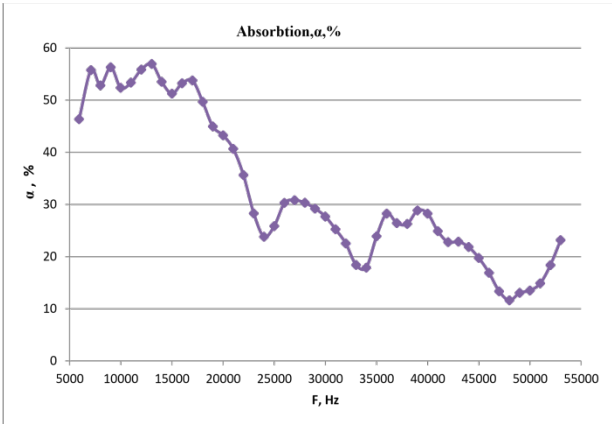


Fig. 6 Polycarbonate absorption



Fig. 7 Sandwich panel with metal backing

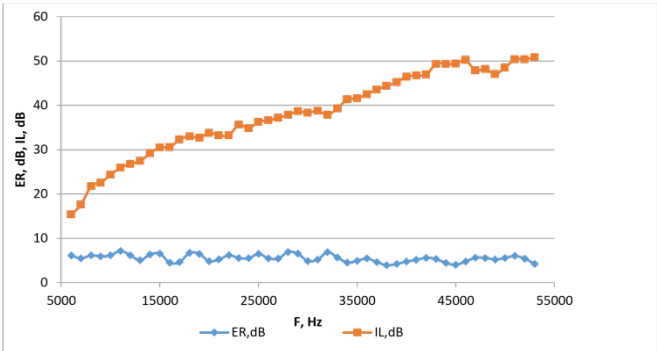


Fig. 8 Sandwich panel ER, IL

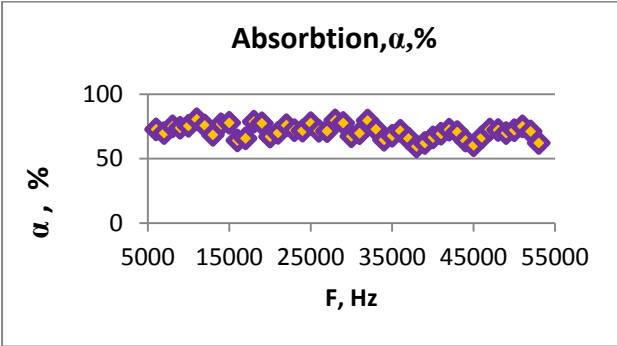


Fig. 9 Sandwich panel absorption

- Technical rubber



Fig. 10 Rubber panel

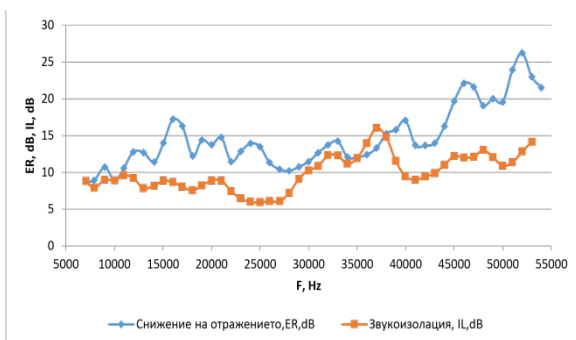


Fig. 11 Rubber panel ER, IL

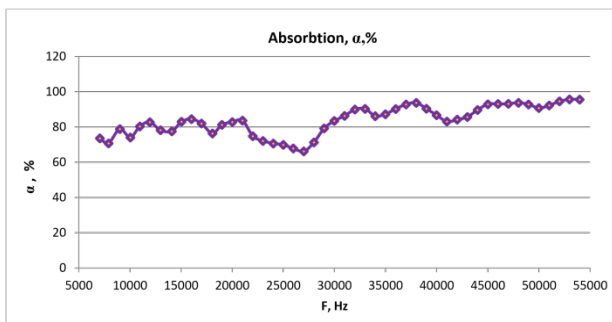


Fig. 12 Rubber panel absorption

Theoretical investigation of rubber panel with same thickness showed relevant IL which is consistent with the results from the measurements, while comparison for the ER is showed on the next figure.

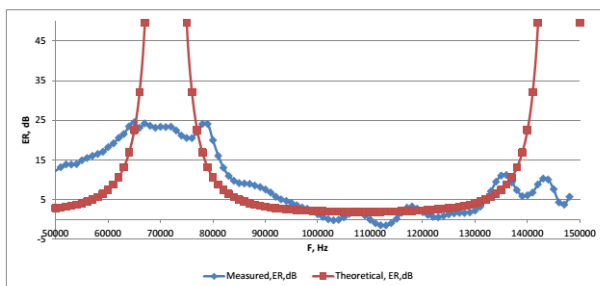


Fig. 13 Comparison between theoretical ER and measured ER for a rubber sample panel

Comparison between theoretical and measured ER in the frequency range 50KHz – 150 KHz has been made and shown

on fig. 13. There is similarity in the positions of the maximums and the minimums. The resonant behaviour is due to finite width of the sample acting as a mechanical resonator. During the theoretical calculation accurate impedance of the rubber sample was not available and was calculated from available approximate data. Theoretical model also does not include material damping and absorption.

Analysis of the experimental results shows that polycarbonate is underwater acoustic transparent material, because it's acoustic impedance is nearly equal to the impedance of the water. The other two materials show higher insertion loss and can be appropriate choice for underwater sound isolating materials with very good anechoic properties for the last material (high insertion loss and in the same time high echo reduction).

#### 4. CONCLUSION

A methodology for underwater acoustic material characterization was developed and experimentally tested. The methodology is applicable for test tank pulse sound measurements. The experimental setup was tested in the frequency range from 5 KHz – 140 KHz. Several commercially available acoustic materials were investigated and experimental results are presented and their properties estimated.

A measured result is compared with theoretical result for insertion loss and echo reduction and results are close in the upper frequency region.

The methodology is suitable for measurement and estimation of target strength of underwater objects and it was tested for estimation of target strength of insulating material coated metal panel. Target strength is in close relation with reflection coefficient, which is opposite to echo reduction.

The work should continue in establishing the accuracy of the measurement methodology through comparative study with measurement of samples with known acoustical parameters and finding corrective coefficients (or scaling methodology) when changing operative frequency, and there is a change in the wave dimensions of the samples.

#### 5. REFERENCES

- [1]. Report on contract between NV Naval Academy and BSHC - Institute of Metal Science, Facilities and Technologies "Acad. A. Balevski" with Hydro- and Aerodynamics Centre for project "Cavitation tube propeller noise measurements".
- [2]. Bobber R. J. Underwater Electroacoustic Measurements, Naval Research Laboratory, Washington D.C., July 1970.
- [3]. Audoly C., Perspectives of metamaterials for acoustic performances of submerged platforms and systems. Undersea technology conference, Oslo, 2016.
- [4]. Storheim E., Lohne K., Hergum T., Transmission and reflection from a layered medium in water. Simulations and measurements. Proceedings of the 38th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics, Geilo, Norway, 1 - 4 February, 2015

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година                                                                            | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                      |

## ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

### PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF ABSORBER OF ENERGY OF ELECTROMAGNETIC AND ACOUSTIC WAVES BASED ON METAL-POLYMER COMPOSITES

Проф., д.т.н. В. Ковтун<sup>1</sup>, проф., д.т.н. М. Миховски<sup>2</sup>, чл.-корр., д.т.н. Ю. Плескачевский<sup>3</sup>, доцент, д-р В. Банний<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Гомель, Беларусь

<sup>2</sup> Институт механики Болгарской академии наук, София, Болгария

<sup>3</sup> Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>4</sup> Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

Представлена схема взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона с полимерными композитами. Показано, что эффективность экранирования определяется суммой величины поглощения экраном энергии ЭМИ по механизмам магнитных, диэлектрических и джоулевых потерь, ее отражения на границе экрана с атмосферой и рассеяния вследствие многократных внутренних переотражений на межфазных поверхностях композита. Предложены новые составы и оригинальные технологии изготовления комбинированных поглотителей энергии электромагнитных и акустических волн на основе металлополимерных композитов. Среди них монолитные, а также одно- и многослойные волокнистые и комбинированные материалы градиентного типа, изготовленные, в частности, по технологии melt-blowing, обладающие низкой удельной массой, гибкостью, эластичностью, способностью принимать сложную форму. Расширение функциональных возможностей радиопоглощающих материалов (РПМ) связано с оптимизацией их конфигурации и структуры. Такие РПМ и электромагнитные экраны (ЭМЭ), изготовленные на их основе, сочетают в себе высокую эффективность экранирования ЭМИ наряду со звукоизолирующими характеристиками.

**Ключевые слова:** поглотители энергии, электромагнитная волна, акустическая волна, металлополимерные композиты, волокнистые и комбинированные материалы, радиопоглощающие материалы, электромагнитные экраны

**1. Введение.** Существование современной цивилизации невозможно без использования энергии электромагнитного излучения (ЭМИ), генерируемого искусственными источниками. В связи с интенсивным развитием радио- и электронной техники к естественному фоновому радиоизлучению добавились новые источники ЭМИ: системы навигации и радиолокации, радиоастрономия, спутниковая связь, радиотехнические установки, бытовая и медицинская радиотехника и ряд других. Во многих из этих технических систем используется энергия электромагнитных волн (ЭМВ) СВЧ-диапазона, охватывающая полосу радиочастот от 3 до 30 ГГц.

Массовая эксплуатация радиотехнических систем СВЧ-диапазона порождает проблемы электромагнитной безопасности [1-4]. Современные компактные и экономичные СВЧ генераторы обладают пиковой мощностью в десятки гигаватт. Также до конца не изучено влияние СВЧ-излучения нетепловой интенсивности на биологические объекты [5, 6]. В ряде исследований показано его отрицательное влияние на организм человека. Необходимым условием эффективного функционирования технических устройств СВЧ-диапазона является устранение паразитных переотражений и интерференции ЭМВ, которые могут быть серьезным источником помех. Обостряются проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и систем защиты информации. Также следует отметить, что мы живем в эпоху терроризма, когда мощным электромагнитным импульсом можно

вывести из строя любую электронную систему управления, в том числе систему управления атомной электростанции (АЭС). Обеспечение радиационной и электромагнитной безопасности при строительстве и эксплуатации АЭС является важной задачей.

Наряду с ЭМИ особую актуальность приобретает проблема воздействия на биологические объекты акустических волн. Звуковые механические колебания различной интенсивности и диапазона вызывают функциональные расстройства сердечно-сосудистой системы, оказывают вредное влияние на зрительный и вестибулярный анализаторы, снижают рефлекторную деятельность, что часто становится причиной несчастных случаев и травм.

Электромагнитные экраны (ЭМЭ), формируемые из композитных радиопоглощающих материалов (РПМ), являются эффективным средством обеспечения требований электромагнитной экологии, электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности. РПМ на основе наполненных термопластов, в частности полиэтилена (ПЭ), привлекают технологичностью и технико-экономическими достоинствами. Им присущи гибкость, легковесность, высокие звукопоглощающие и теплозащитные характеристики.

**Цель работы** – изучение закономерностей взаимодействия СВЧ-излучения и гетерогенных систем на основе конденсированных сред; исследование особенностей формирования листовых, профильных, нетканых и комбинированных ЭМЭ; создание новых

комбинированных поглотителей энергии электромагнитных и акустических волн на основе металлополимерных композитов.

## 2. Материалы и методы исследования.

Объектами исследования служили пленочные, листовые и волокнистые РПМ и ЭМЭ на основе ПЭ (ГОСТ 16337-77, ГОСТ 16803-070). В качестве функционального наполнителя (ФН) использованы дисперсный магнитно-мягкий марганец-цинковый феррит (ММФ), (ТУ 6-09-5111-84, марка 2500 НМС, размер частиц не превышает 200 мкм), никель (ГОСТ 9722-78), углеродные волокна, металлизированные стеклосферы и углеродные ткани.

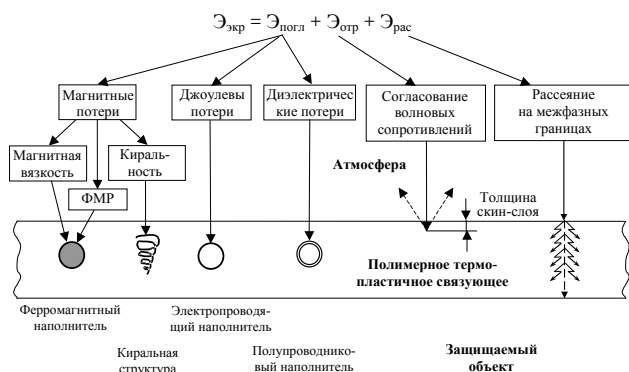
Пленочные и листовые монолитные РПМ формировали методами «горячего» прессования и литьем под давлением, волокнистые РПМ в виде нетканых полотен и конструктивных элементов – методом экструзии с пневматическим напылением полимерного расплава на формообразующую подложку (метод melt blowing).

Параметры ослабления (S) энергии СВЧ-излучения, проходящего через исследуемые РПМ и ЭМЭ, оценивали рефлектометрическим методом в диапазоне частот от 2 до 27 ГГц при нормальном падении ЭМВ – в волноводных трактах измерителей (P2-50; P2-60; P2-61; P2-65; P2-66) коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) и ослабления.

Электронно-микроскопические исследования выполнены с применением сканирующего электронного микроскопа Leo 982 (США).

## 3. Схема взаимодействия СВЧ-излучения с компонентами полимерного композитного ЭМЭ.

Анализ взаимодействия ЭМИ с компонентами полимерного композитного ЭМЭ и механизмов его функционирования [7, 8] позволил представить эффективность экранирования как степень ослабления электрической и магнитной составляющих поля падающей на экран ЭМВ. Эффективность экранирования  $\mathcal{E}_{\text{эк}} = \mathcal{E}_{\text{полг}} + \mathcal{E}_{\text{отр}} + \mathcal{E}_{\text{рас}}$ , где  $\mathcal{E}_{\text{полг}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{отр}}$  и  $\mathcal{E}_{\text{рас}}$  – величины поглощения экраном энергии ЭМИ по механизмам магнитных, диэлектрических и джоулевых потерь, ее отражения на границе экрана с атмосферой и рассеяния вследствие многократных внутренних переотражений на межфазных поверхностях композита (фиг. 1).



Фиг. 1. Схема взаимодействия ЭМИ с компонентами полимерного композитного ЭМЭ. ФМР – ферромагнитный резонанс.

Величина  $\mathcal{E}_{\text{эк}}$  и соотношение значений  $\mathcal{E}_{\text{полг}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{отр}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{рас}}$  зависят от частоты источника излучения, его пространственного расположения по отношению к экрану, а также от структуры и электрофизических свойств материала экрана. Для ЭМЭ главными являются составляющие  $\mathcal{E}_{\text{полг}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{рас}}$ , а величина  $\mathcal{E}_{\text{отр}}$  должна быть

минимальна, поскольку отраженные ЭМВ могут интерферировать при определенных условиях, вызывая паразитные переотражения, а также повышают уровень электромагнитного загрязнения окружающего пространства.

Энергия отраженной ЭМВ снижается вследствие рассеяния на структурных неоднородностях РПМ и гашения за счет интерференции при переотражениях на границах раздела сред. Однако основной вклад в эффективность экранирования вносит поглощение электромагнитной энергии вследствие присущих РПМ диэлектрических и магнитных потерь, а также перехода ее в другие виды энергии, в частности, в тепловую. Для того, чтобы ЭМЭ эффективно поглощал и мало отражал ЭМВ в широком диапазоне частот и углов их падения, необходимо выполнить два противоречивых условия:

- 1) волновое сопротивление РПМ должно быть согласовано со «свободным пространством» так, чтобы на границе раздела сред отражение было минимально и падающая волна максимально проходила внутрь экрана;
- 2) энергия волны, прошедшей в экран, должна поглотиться его материалом.

Метод согласования волновых сопротивлений оптимизирует связь входных импедансных характеристик ЭМЭ с его электромагнитными параметрами. Он обосновывает перспективность ЭМЭ с неоднородной структурой, обеспечивающей градиент электрических и магнитных потерь в направлении распространения ЭМВ.

Защита объектов от радиочастотных ЭМИ с использованием металлических экранов не во всех случаях является эффективной. Экранирование не бывает идеальным ввиду того, что не удастся избежать щелей, различного рода кабельных вводов и т.п. Это может привести к труднопредсказуемым результатам вследствие дифракционных и интерференционных явлений при облучении. Эффекты, имеющие место при облучении объекта, определяются физическими свойствами радиочастотного ЭМИ. Глубина проникновения ЭМИ в вещество (скин-эффект) зависит от электропроводности этого вещества и частоты радиоволн. Чем выше эти величины, тем меньше глубина проникновения. Так, для меди глубина проникновения ЭМИ СВЧ-диапазона не превышает единицы микрон. Однако, проникая в проводящее вещество, ЭМИ индуцирует в нем токи (токи Фуко), которые приводят к локальным падениям напряжения и могут стать причиной довольно мощных наводок даже в идеально (без щелей и отверстий) экранированных электронных схемах за счет емкостных связей их элементов с корпусом. Таким образом, для электромагнитной защиты целесообразно применять РПМ и ЭМЭ на их основе, которые поглощают энергию ЭМИ.

Схема на фиг. 1 показывает совокупность физических механизмов взаимодействия СВЧ-излучения с полимерным материалом, наполненным частицами ФН, различающимися по природе, форме, размерам и распределению в полимерном связующем. Оценка индивидуального вклада этих механизмов в эффективность экранирования полезна при разработке листовых монолитных, волокнистых и комбинированных ЭМЭ на основе композитных полимерных РПМ. Такой подход позволяет регулировать функциональные возможности полимерных РПМ путем варьирования их рецептурных, структурных и размерных параметров.

Схема взаимодействия ЭМИ с компонентами полимерного композитного ЭМЭ определяет комплекс экспериментальных исследований по оптимизации состава и технологии формирования ЭМЭ на основе ПЭ.

**4. Структурно-конфигурационные признаки ЭМЭ.** Значительное расширение функциональных возможностей ЭМЭ связано с оптимизацией их конфигурации и структуры по радиофизическим параметрам.

По структурно-конфигурационным признакам различают:

- 1) слоистые ЭМЭ с плоской или профилированной поверхностью, в том числе однослойные с изотропной или анизотропной структурой и многослойные;
- 2) конфигурационные ЭМЭ, отличающиеся определенной геометрией наружной и внутренней поверхностей (в виде выступающих шипов, пирамид, конусов, отверстий и прорезей различной формы), а также имеющие волокнистую, ячеистую или сотовую структуру.

Однослойные структурно-изотропные ЭМЭ не всегда могут обеспечить достаточно низкий коэффициент отражения ЭМВ в требуемом рабочем диапазоне частот. Например, при увеличении концентрации наполнителя, ответственного за электрические и магнитные потери, от 4 до 40–60 масс.% коэффициент отражения  $R$ , как правило, снижается. При дальнейшем повышении содержания наполнителя значения коэффициента отражения  $R$  возрастают. Причина, вероятно, заключается в том, что полимерные связующие композитных РПМ радиопрозрачны [1-3]. После наполнения их ферромагнетиками при взаимодействии с излучением возрастают электрические и магнитные потери в материале и снижается коэффициент отражения РПМ. Однако дальнейший рост степени наполнения приводит к повышению коэффициента отражения из-за рассогласования волновых сопротивлений экрана и «свободного пространства».

Указанного недостатка лишены одно- и многослойные ЭМЭ градиентного типа, задающие плавное, либо ступенчатое увеличение электрических и магнитных потерь в направлении распространения ЭМВ при сведении к минимуму разностей диэлектрических и магнитных проницаемостей воздуха и поглотителя на границе раздела сред.

В первом случае градиент потерь определяется увеличением степени наполнения по толщине композитного ЭМЭ. Для получения таких ЭМЭ разработаны оригинальные методы, в частности, связанные с седиментационными эффектами в расплавах полимеров. В слоисто-неоднородных структурах градиент электромагнитных свойств зависит от количества слоев некой толщины, типа и содержания ФН в каждом слое.

Влияние структурно-конфигурационных факторов на радиотехнические характеристики ЭМЭ обусловлено дифракционными и интерференционными явлениями при распространении ЭМВ в исследуемых композитных системах. Возможности минимизации коэффициента отражения  $R$  для ЭМЭ путем подбора оптимальных толщины (четвертьволновые поглощающие слои), геометрии наружной поверхности, а также формы и размеров макроструктурных неоднородностей материала экрана далеко не исчерпаны. В связи с этим теоретические и практические работы в этом направлении продолжаются [9, 10].

**5. Специфика формирования листовых, профильных, нетканых и комбинированных ЭМЭ.** Процесс изготовления конструктивных РПМ включает ряд технологических операций, начиная от смешения компонентов композита и заканчивая формированием изделий из него (фиг. 2).

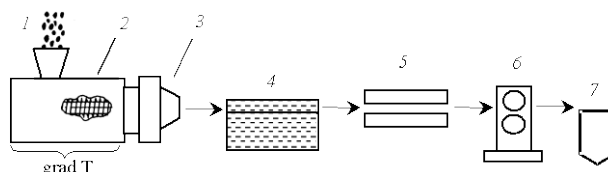


Фиг. 2. Схема технологических операций производства конструктивных РПМ.

При проведении технологических экспериментов полимерное связующее (ПЭ) механически смешивали с ФН и затем подвергали гранулированию (фиг. 3) на экструзионно-грануляционной линии, снабженной двухшнековым экструдером.

Распределение температур по зонам экструдера, распылительной головки и фильеры были следующие: I зона – 166 °С; II зона – 180 °С; III зона – 196 °С; IV зона – 201 °С; головка – 211 °С; фильера – 207 °С.

Гранулят перерабатывали в листовые конструктивные РПМ с использованием типовых технологий формирования изделий из термопластов: термопрессование листовых заготовок с последующим термоформованием, литье под давлением.



Фиг. 3. Схема экструзионно-грануляционной линии: 1 – смесь полимера и ФН; 2 – двухшнековый экструдер; 3 – многофильная головка; 4 – охладитель; 5 – сушильщик; 6 – измельчитель; 7 – емкость для сбора гранулята.

Для изготовления листовых композитных ЭМЭ размером 300×400 мм была разработана обогреваемая пресс-форма, которую размещали между плитами гидравлического пресса. Несмотря на то, что прессование – старейший метод переработки полимеров, он все еще остается востребованным и, в ряде случаев, не имеет альтернативы. Наиболее широко распространено «горячее» прессование. В этом случае, кроме давления, используют температурное воздействие на материал: композит помещают в нагретую форму и прикладывают давление. Полимерное связующее под действием тепла и давления переходит в вязкотекучее состояние и взаимодействует с наполнителями. Затем расплав охлаждают в форме и извлекают отвержденное изделие. Продолжительность нагрева, выдержки под давлением и отверждения зависит от природы материала, размеров и формы изделия.

Одним из перспективных направлений в создании поглощающих экранов ЭМИ является использование металлизированных компонентов, а для экранов гибкой конструкции – металлизированного трикотажа [3, 7, 11]. Тонкие пленки металлов на поверхности компонентов РПМ получали напылением в вакууме. Пленки формировали путем лазерного и электронно-лучевого испарения металлов. Экспериментальная установка была собрана на базе промышленной установки вакуумного напыления УВН-73П-2, имеющей два электронно-лучевых испарителя с кольцевым катодом и электростатической фокусировкой. Максимальная мощность электронного испарителя – 2 кВт, максимальная температура нагрева подложки с помощью ИК-нагревателей – 450 °С. Время нагрева подложек до температуры 200 °С – не более 7 мин. Температура

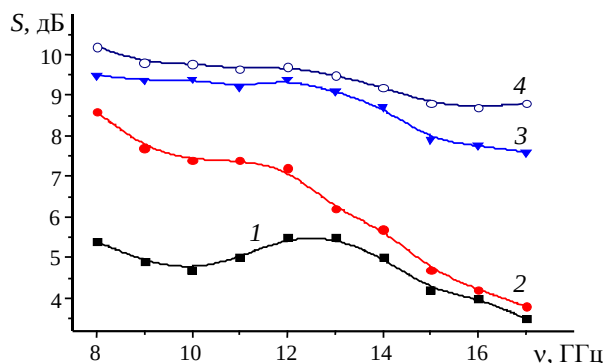
подложек в диапазоне от 100 до 200 °С стабилизировалась с точностью  $\pm 5$  °С.

Для формирования металлических покрытий использовали электронные испарители ИЭЛ-3. Один из них – для напыления подслоя (в случае необходимости), второй – для напыления основного металлического покрытия. Режимы напыления пленок – ручной или автоматический. Напыление проводили следующим образом. В вакуумную камеру в массивный медный тигель загружали металлические вещества в виде таблеток или гранул. Компоненты РПМ располагали в зоне распространения эрозийного факела.

Тигель является двухпозиционным – с помощью штока и рукоятки производили смену испаряемого вещества перемещением тигля. Запас хода такого перемещения составляет 85 мм, поэтому можно использовать 4-х позиционный тигель для поочередного испарения веществ. Червячный механизм служит для возвратно-поступательного перемещения тигля. Ввод вращательного движения в камеру осуществляется через уплотнение Вильсона. Удобство такой схемы заключается в том, что несложно реализовать независимое испарение веществ с помощью лазера или электронно-лучевых испарителей.

Для нанесения металлических покрытий на элементы РПМ применяли также метод ионно-плазменного магнетронного распыления (ИПМР). ИПМР – универсальный способ, позволяющий наносить покрытия из металлов, сплавов, композитов, химических соединений и керамики. Его сущность заключается в следующем. Материал, который необходимо нанести на поверхность образца, размещают на катоде специального устройства, откуда он распыляется на поверхность образца в результате бомбардировки катода в вакууме ионами аргона. Остаточное давление аргона составляет  $1\text{--}10^{-10}$  Па.

Листовые и профильные монолитные РПМ на основе ПЭ, наполненного ММФ и стеклосферами (в частности, металлизированными), изготавливали методом термического прессования. Установлено, что введение в ферритсодержащий композитный РПМ неметаллизированных стеклосфер приводит к увеличению значений параметра  $S$  СВЧ-излучения, проходящего через радиопоглощающий элемент. Формирование на поверхности стеклосфер никелевого покрытия толщиной 2–3 мкм вызывает дополнительное (до 20 %) возрастание величины  $S$  (фиг. 4). Это вызвано увеличением, во-первых, джоулевых потерь и, во-вторых, рассеянием ЭМВ на стеклосферах с последующим поглощением энергии излучения ферромагнитными частицами. Такой же эффект дает металлизация никелем частиц самого ММФ.

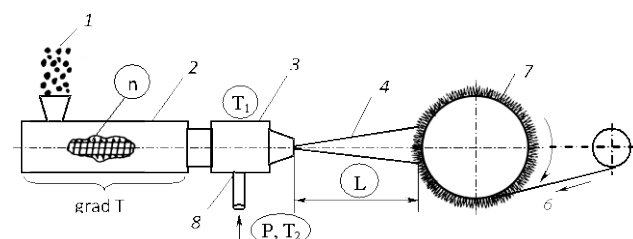


Фиг. 4. Частотные зависимости ослабления ( $S$ ) энергии ЭМИ, проходящего (в волноводе) через образцы РПМ: 1 – ПЭ + ММФ (50 % масс,  $d = 50\text{--}200$  мкм); 2 – ПЭ + ММФ (50 % масс,  $d = 50\text{--}200$  мкм) + стеклосферы (10 % масс,  $d = 200\text{--}500$  мкм); 3 – ПЭ + металлизированные Ni частицы ММФ (50 % масс,  $d = 50\text{--}200$  мкм); 4 – ПЭ + ММФ (50 % масс,  $d = 50\text{--}200$  мкм) + металлизированные Ni стеклосферы (10 % масс,  $d = 200\text{--}500$  мкм). Толщина образцов – 3 мм; толщина слоя Ni – 2–3 мкм.

Разработан оригинальный способ изготовления волокнистых РПМ на основе функционально-наполненных термопластов по технологии пневмораспыления композитного расплава (melt blowing) [7,12] (фиг. 5).

Он позволяет формировать полотна и формоустойчивые радиопоглощающие элементы. Способ состоит в экструзии гранулированной смеси полимера и радиопоглощающего наполнителя с последующей вытяжкой волокон газовым потоком и их осаждением на формообразующей подложке в виде нетканой волокнистой массы. В качестве ФН связующего при производстве волокнистого РПМ использовали порошок ММФ с размером частиц менее 50 мкм.

Процессом распыления управляли, регулируя температуру расплава в экструзионной головке и давление распыляющего газа. Формирование волокнистой структуры РПМ зависит от нескольких технологических факторов. Важнейший из них – расстояние  $L$  от сопла головки до формообразующей подложки.



формообразующей подложки.

Фиг. 5. Схема изготовления волокнистых композитных РПМ на базе технологии melt blowing. 1 – композитные полимерные гранулы; 2 – экструдер; 3 – распылительная головка; 4 – газо-полимерный поток; 5 – формообразующая подложка; 6 – углеродная нить; 7 – волокнистая масса; 8 – сжатый воздух.

При стандартных технологических режимах экструзионной переработки гранулята, с учетом высокой степени наполнения волокон ферритом и значительной теплопроводности РПМ (от 0,28 до 0,39 Вт/м·К), величину  $L$  изменяли в пределах от 18 до 25 см. При  $L < 18$  см не происходила достаточная вытяжка волокон и они приобретали технологические дефекты («бусинки»). Последние ухудшали качество материала, прежде всего, деформационно-прочностные характеристики и стабильность технологического процесса его переработки. При  $L > 25$  см ослаблялось когезионное связывание волокон вследствие их остывания при транспортировании в газовом потоке. Материал терял стабильность формы, приобретая структуру ваты, состоящей из отдельных волокон. При  $L = 18$  см достигалась объемная плотность РПМ  $\rho = 0,30 \pm 0,025$  г/см<sup>3</sup>, при  $L = 25$  см –  $\rho = 0,24 \pm 0,025$  г/см<sup>3</sup>.

По описанному способу были изготовлены волокнистые РПМ с постоянным содержанием, а также с градиентом концентрации ФН по толщине полотна. Градиентное распределение частиц наполнителя в РПМ обеспечивает хорошее согласование его волнового сопротивления с воздушным пространством. РПМ этого типа характеризуются повышенной эффективностью радиопоглощения в широком СВЧ-диапазоне при различных углах падения ЭМВ. Технология melt blowing позволяет вводить в полимерную матрицу в процессе производства волокнистых ЭМЭ армирующие элементы –

углеродные или металлические нити, углеродные ткани и металлические сетки различной структуры и электропроводности. Эти операции не требуют дополнительных приемов по скреплению волокон с армирующими элементами.

По данным электронно-микроскопических исследований нетканые melt-blown РПМ представляют собой совокупность наполненных полимерных волокон, когезионно связанных в местах контакта. Частицы наполнителя (ММФ с размером частиц не более 50 мкм или порошки металлов) закапсулированы внутри волокон.

Исследуемые волокнистые РПМ на основе наполненного ПЭ являются гетерогенными системами. Они состоят из трех фаз: волокнистой полимерной матрицы, наполняющей ее фазы частиц ММФ, и совокупности воздушных пустот – сквозных извилистых пор. Очевидно, что радиофизические, акустические и теплофизические характеристики волокнистых композитных РПМ определяются как природой и концентрацией ФН, так и параметрами волокнисто-пористой структуры материала. К последним относятся: распределение по диаметрам и средний диаметр волокон, объемная плотность и общая пористость материала, удельная поверхность волокон и т.п. Высокая степень наполнения волокон (38 % масс), большой размер частиц (до 50 мкм) ММФ и связанные с этим сложности формирования качественной волокнистой структуры по технологии melt blowing не позволили проанализировать взаимосвязь радиофизических характеристик ЭМЭ с параметрами его волокнисто-пористой структуры. Выяснилось, что частицы ферритов, обладающие развитой поверхностью и избыточной поверхностной энергией, склонны связываться в агрегаты. Агрегаты частиц, которые образуются в процессе транспортировки и хранения порошков ферритов, имеют высокую прочность. Они не всегда разрушаются при совместной экструзионной переработке с расплавами полимеров как на стадии гранулирования, так и последующего формирования РПМ. Все перечисленное затрудняло процесс изготовления наполненных волокнистых РПМ. Как указано выше, удовлетворительного качества волокнистых композитных РПМ добивались регулированием технологических режимов экструзионной переработки гранулята и варьированием температурных и газодинамических режимов распыления расплава полимера. Объемная плотность волокнистого РПМ на основе ПЭ, наполненного ММФ, составила 0,24–0,30 г/см<sup>3</sup>, диаметр волокон – от 23 до 349 мкм, средний диаметр волокон – 163 мкм, диаметр сечения пор – от 80 до 1400 мкм.

Композитные волокнистые полотна характеризуются невысокими радиофизическими параметрами, что связано с пространственным рассредоточением частиц ФН, закапсулированного в волокнах, в объеме полотна. Тем не менее, такие материалы могут успешно применяться для изготовления комбинированных экранов, выполняя роль наружного согласующего слоя.

**6. Заключение.** В совершенствовании техники радиопоглощения особая роль принадлежит композитным материалам на основе термопластов. Такие материалы не только сочетают свойства входящих в них ингредиентов, но и приобретают новые свойства, не присущие отдельным компонентам. Достоинство композитных РПМ и ЭМЭ на основе термопластов состоит в сочетании высокой химической стойкости, удовлетворительных механических свойств с технологичностью переработки и низкой стоимостью.

Предложена схема взаимодействия ЭМИ с полимерным композитным ЭМЭ, которая показывает, что практически

все механизмы отражения, поглощения и рассеяния излучения могут быть реализованы в полимерных композитных экранах. Это расширяет функциональные возможности РПМ на основе термопластов, наполненных ФН, различными по природе, форме, размерам и структуре.

К настоящему времени сформировалась широкая номенклатура РПМ и ЭМЭ многообразных конфигураций и структуры. В них используются различные типы связующего и ФН, отличающиеся по физико-химическим и структурным характеристикам. Тем не менее, до сих пор не существует универсального высокоэффективного поглотителя энергии ЭМИ в широкой полосе СВЧ при удовлетворительных размерных, физико-механических и других эксплуатационных характеристиках.

Среди многообразия РПМ и ЭМЭ перспективными являются нетканые волокнистые и комбинированные РПМ, обладающие низкой удельной массой, гибкостью, эластичностью, способностью принимать сложную форму. Такие РПМ сочетают в себе высокую эффективность экранирования ЭМИ наряду с звуко- и теплоизолирующими характеристиками.

*Работа представлена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта Т16-098 (2016-2018 гг.).*

## 7. Литература

1. Ковнеристый, Ю.К. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. Москва, Наука, 1982, 164 стр. (Ю.К. Ковнеристый, И.Ю. Лазарева, А.А. Раваев)
2. Алексеев, А.Г. Композиционные ферромагнетики и электромагнитная безопасность. Санкт-Петербург, НИИХ СПбГУ, 1998, 296 стр. (А.Г. Алексеев, О.М. Гусева, В.С. Семичев)
3. Макаревич, А.В. Радиопоглощающие полимерные композиционные материалы в технике СВЧ. – Материалы, технологии, инструменты, Т. 4, № 3, 1999, стр. 24-32 (А.В. Макаревич, В.А. Банный)
4. Банный, В.А. Поглотители энергии СВЧ-излучения на основе композиционных термопластов. – Чрезвычайные ситуации: образование и наука, Т. 10, № 2, 2015, стр. 14-24 (В.А. Банный, В.А. Ковтун)
5. Григорьев, Ю.Г. Электромагнитная безопасность человека. Справочно-информационное издание. Москва, Российский национальный комитет по защите от неионизирующего излучения, 1999, 152 стр. (Ю.Г. Григорьев, В.С. Степанов, О.А. Григорьев, А.В. Меркулов)
6. Банный, В.А. Применение полимерных радиопоглощающих материалов в решении проблемы электромагнитной безопасности. – Проблемы здоровья и экологии, № 3 (49), 2016, стр. 9-13 (В.А. Банный, В.А. Игнатенко)
7. Банный, В.А. Взаимодействие радиоволн СВЧ диапазона с полимерными гетерогенными системами и разработка электромагнитных экранов на основе полиэтилена: Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07 – ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси, 2005, Гомель, 132 стр. (В.А. Банный)
8. Банный, В.А. Взаимодействие СВЧ-излучения с полимерным композитным электромагнитным экраном: физические модели и эксперимент. – Материалы, технологии, инструменты, № 2, 2008, стр. 45-51 (В.А. Банный, В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук)
9. Ковтун, В.А. Исследование свойств комбинированных поглотителей энергии электромагнитных и акустических волн на основе металлополимерных композитов. – Национальная конференция «Акустика 2015», Технический университет, г. София, Болгария, 27-28 ноября 2015 г., стр. 45-49 (В.А. Ковтун, М. Миховски, В.А. Банный)
10. Ковтун, В.А. Особенности формирования гетерогенной структуры поглотителей энергии СВЧ-излучения на основе

полимерных композитов. – Научни известия на НТСМ, Т.24, № 1(187), 2016, стр. 60-64 (В.А. Ковтун, М. Миховски, В.А. Банний, Ю.М. Плскачевский)

11. Федосенко, Е.А. Регулирование радиофизических параметров листовых радиопоглощающих материалов вакуумной металлизацией функциональных наполнителей . – Известия Гомельского государственного университета

имени Ф. Скорины, №. 6 (39), ч. 2, 2006, 80-82 стр. (Е.А. Федосенко, В.А. Банний)

12. Гольдаде, В.А. Полимерные волокнистые melt-blown материалы. Гомель, ИММС НАНБ, 2000, 260 стр. (В.А. Гольдаде, А.В. Макаревич, Л.С. Пинчук, А.В. Сиканевич, А.И. Чернорубашкин)

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p style="margin: 0;"><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p style="margin: 0;"><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                                                            |

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАВИСИМОСТТА МЕЖДУ АКУСТИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СРОКА НА СЪХРАНЕНИЕ НА НИТРОЦЕЛУОЗНИ БАРУТИ

### STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE ACOUSTIC CHARACTERISTICS AND AGE OF STORAGE OF NITROCELLULOSE BASED PROPELLANTS

Доц. д-р Генев Б.<sup>1</sup>Доц. д-р Вълков Н.<sup>1</sup>Доц. д-р Грозев В.<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт по отбрана, София, България, [b.genov@di.mod.bg](mailto:b.genov@di.mod.bg)<sup>2</sup>Шуменски университет „Епископ Константин Преславски”, Шумен, България, [valgroz@abv.bg](mailto:valgroz@abv.bg)

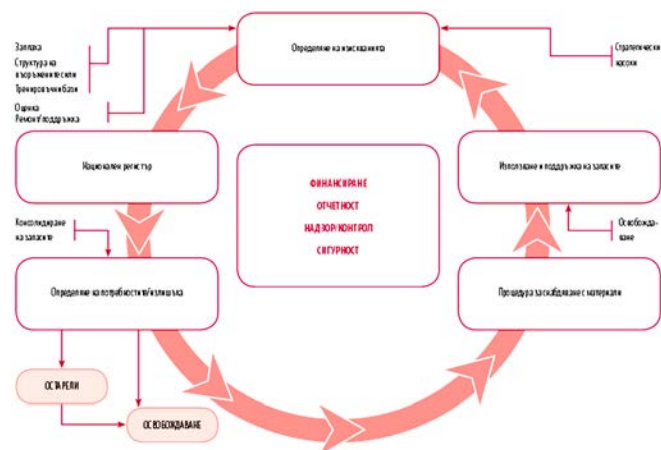
**Abstract.** It is a characteristic property of nitrocellulose-based propellants that the nitric ester constituents e.g. nitroglycerin, nitrocellulose, undergo a slow decomposition even at ambient temperatures. The degradation products formed, unless removed, can cause a reduction in chemical stability which can lead to cook-off / self-ignition due to the exothermic nature of the reactions involved. In addition they can lead to a loss of calorific value, changes in ballistic properties and cracking in large diameter charges. Several of these can occur during storage time. The chemical stability of propellants is normally assessed by observing their behavior at elevated temperatures. Many tests such as the Abel Heat Test, Taliani Test, Methyl Violet Test, Bergmann-Junk Test, Vacuum Stability Test, Weight Loss Tests, Time to Cook Off, Heat Flow Calorimetry, Stabilizer Depletion Rates, etc. have been used for this purpose. But all of them are destructive ones – the test sample is destroyed. Furthermore, these tests are related with complex equipment and the prices of the tests are not low.

**Keywords:** acoustic characteristics, velocity of the ultrasonic wave, artificial storage, stabilizer depletion.

#### 1. УВОД

По своята същност снабдяването с боеприпаси прилича на сключването на един вид застраховка за националната отбрана: голяма част от закупеното не се използва преди изтичането на срока му на годност [3]. Боеприпасите са стока със висока стойност, чието производство отнема дълго време и затова често се закупуват в големи количества, за да се изпревари потребността от тях.

Специфично за боеприпасите е, че те генерират разходи във всички етапи на жизнения си цикъл – от разработването до освобождаването от тях. Това означава, че трябва да се възприеме подход за „цялостно управление на жизнения цикъл“ на боеприпасите [3].



Фиг. 1. Управление на жизнения цикъл на боеприпасите (вариант) [5]

Този факт поражда две характерни особености: боеприпасите следва да могат продължително да се съхраняват и да има технологична възможност за тяхната демилитаризация<sup>1</sup>.

От своя страна дългосрочното съхранение на техните метателни заряди е свързано с протичане на процеси на стареене на барутите, които водят до промяна на техните характеристики.

При нитроцелуозните барути с течение на времето се наблюдава бавна декомпозиция на дори и при нормални климатични условия. Формираните деградационни процеси водят до редуция на стабилността и дори могат при определени условия да доведат до самозапалване на барутните елементи, предвид екзотермичния характер на реакциите.

При всички случаи тези процеси водят до промяна на калорийността, поява/разрастване на микрорукнатини в барутни заряди с големи диаметри и др.

С оглед на оценката на стабилността на нитроцелуозните барути са разработени множество тестове, обикновено базирани на предшествашо изкуствено стареене на съставите, като тест на Абел, тест на Талиани, тест на Бергман-Юнк, изследване чрез инфрачервена спектроскопия, рентгеноструктурен анализ и акустични методи и др. [2, 5-9, 11-15].

Акустичните методи, наред с другите методи за контрол без разрушаване се явяват сериозна алтернатива на останалите разрушителни методи предвид основно възможностите за мониторинг и възможността за последващо използване на контролираните образци.

<sup>1</sup> комплекс от дейности по премахването или неутрализирането на военния потенциал на боеприпаса [1], [6]

## 2. ПРЕДПОСТАВКИ И НАЧИНИ ЗА РЕШЕНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Акустичните характеристики на барутите се променят при стареене под въздействие на два фактора - сроковете за тяхното съхранение и влажността на въздуха. Подходящ метод за изследване на подобни двуфакторни процеси е Response Surface Methodology (RSM). Използваните статистически и математични процедури позволяват създаване на модели, описващи влиянието на независимите променливи върху изходните величини в изследваното факторно пространство. В комбинация с дисперсионен анализ е възможно да се открие индивидуалното въздействие на всеки от управляващите фактори, както и взаимното влияние между тях.

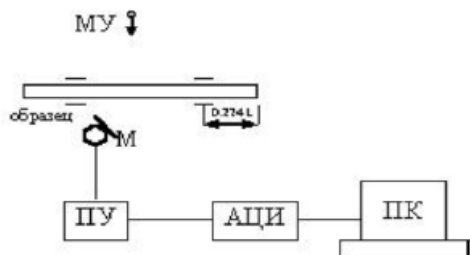
За оценка на еластичните характеристики в целия обем на изследваните образци се използва нискочестотен динамичен метод [15]. Чрез него може да се определи прътвата скорост на акустични вълни в образци нитроцелулозен барут с призматична форма. Измерването на прътвата скорост на акустичните вълни в барутите е един от подходите за изследване на процесите тяхното стареене. Затова целта на разработката е:

- създаване на математичен модел, който описва влиянието на независимите величини срок за съхранение и относителна влажност на въздуха върху прътвата скорост в двуосновни барути чрез използване на RSM (Response Surface Methodology);

- изследване на влиянието на двата фактора с помощта на дисперсионен анализ.

Обект на изпитване са стандартни образци от новопроизведен балистичен барут РНДСИ с дължина 100 mm и квадратно напречно сечение със страна 5 mm, ускорено състарени при режим, при който се имитира съхранение на барутните заряди при нормални температура и относителна влажност на въздуха в хранилища за бойни припаси [15].

Блоквата схема на използваната апаратура на нискочестотния динамичен метод е представена на фиг. 1.



Фиг. 1. Блоквата схема на апаратурата за определяне на прътвата скорост

Свободните трептения на образца се предизвикват чрез механичния ударник МУ и се регистрират посредством измервателния микрофон. Сигналите се усилват, дискретизират, обработват и записват. Чрез софтуера на АЦИ (или от файла с данни) се наблюдават регистрираните сигнали във времето и се отчитат съответните им амплитудно-честотни спектри.

Прътвата скорост на еластичните вълни  $C_r$  в изследваните образци балистичен барут се определя по следната зависимост:

$$(1) \quad C_r = \frac{2\pi f_1 L^2}{4,73^2} \sqrt{\frac{S}{J}}$$

където:

$f_1$  - регистрирана първа собствена честота, Hz;

$L$  - дължина на образците, mm;

$S$  - напречно сечение на образца, mm<sup>2</sup>;

$J$  - инерционен момент на образца, mm<sup>4</sup>.

## 3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

### 3.1. Математически модел

Търсеният математически модел описва зависимостта на прътвата скорост в образците барут от факторите време за

съхранение  $X_1$  и относителна влажност  $X_2$ , чийто стойности са представени в Таблица 1.

Таблица 1

| Независими променливи            | Ниво       |           |           |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|
|                                  | $X_i = -1$ | $X_i = 0$ | $X_i = 1$ |
| Време за съхранение $X_1$ , год. | 5          | 15        | 25        |
| Относителна влажност $X_2$ , %   | 30         | 50        | 70        |

В съответствие с предварителните изследвания търсената зависимост може да бъде представена чрез полином от втора степен от вида:

$$(2) \quad C_r = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2$$

където:

$C_r$  – прътвата скорост в изследваните проби; m/s;

$X_1, X_2$  – независими променливи време за съхранение в години и относителна влажност на въздуха в %;

$b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$  – регресионни коефициенти.

Експериментите са проведени съгласно оптимален композиционен план [14], представен заедно с получените резултати в Таблица 2 [14].

Таблица 2

| № | Кодирани стойности на факторите |       | Прътвата скорост, m/s |
|---|---------------------------------|-------|-----------------------|
|   | $X_1$                           | $X_2$ |                       |
| 1 | -1                              | -1    | 1302                  |
| 2 | 1                               | -1    | 1485                  |
| 3 | -1                              | 1     | 1318                  |
| 4 | 1                               | 1     | 1520                  |
| 5 | -1                              | 0     | 1325                  |
| 6 | 1                               | 0     | 1521                  |
| 7 | 0                               | -1    | 1488                  |
| 8 | 0                               | 1     | 1527                  |
| 9 | 0                               | 0     | 1510                  |

За оценка на значимостта на коефициентите  $b_1, b_2$  и  $b_{12}$  в центъра на плана ( $X_1 = 0$  и  $X_2 = 0$ ) са проведени десет допълнителни измервания. Съгласно изчислителната процедура [11] са определени стойностите на регресионните коефициенти, оценена е тяхната значимост и е направена оценка на адекватността на модела (Таблица 3).

Таблица 3

| Стойности на регресионните коефициенти |          | Значимост на регресионните коефициенти* | Дисперсионно отношение $F^{**}$ | $F_{\alpha}^{***}$ |
|----------------------------------------|----------|-----------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| $b_0$                                  | 1516,332 | —                                       | 1,48                            | 3,63               |
| $b_1$                                  | 96,833   | $(eS_e)^{2,3} t = 3,83$                 | $F ? F(\alpha, v_1, v_2)$       |                    |
| $b_2$                                  | 14,999   |                                         |                                 |                    |
| $b_{12}$                               | 4,7500   | $(gS_e)^{2,3} t = 4,69$                 |                                 |                    |
| $b_{11}$                               | -96,496  | —                                       | —                               | —                  |
| $b_{22}$                               | -11,996  | —                                       | —                               | —                  |

Коефициентите пред линейните членове  $b_1$  и  $b_2$  са значими, тъй като стойностите им са по – големи от 3,83. Стойността на коефициента на взаимодействието  $b_{12}$  е 4,75 и

\* Оценката на дисперсията на грешката е  $S_E^2 = 26,23$ ; ниво на значимост  $\alpha=0,05$ ,  $e=0,16$ ; степени на свобода  $v_E = 9$ ;  $t_{(\alpha/2, v_E)} = 1,83$ ;  $g=0,25$ .

\*\* Дисперсионно отношение е изчислено по формулата:

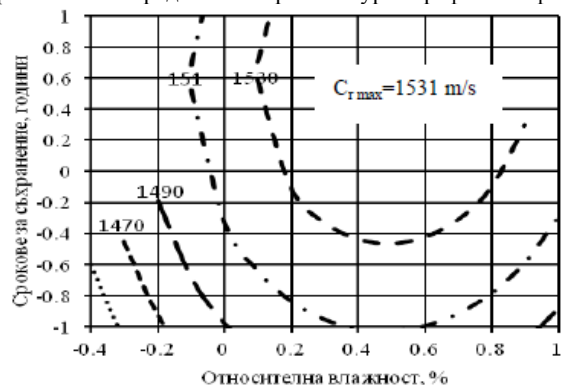
$$F = \frac{S_{\bar{m}_0}^2}{S_A^2} \quad \text{при} \quad S_{\bar{m}_0}^2 = 38,77$$

\*\*\* Табличната стойност на  $F(\alpha, v_{\text{ост.}}, v_E)$  се определя при ниво на значимост  $\alpha = 0,05$ ,  $v_{\text{ост.}} = 4$  и  $v_E = 9$ .

също се включва от модела. Математическият модел може да бъде представен чрез следния полином (3):

$$(3) C_r = 1516,33 + 6,83X_1 + 14X_2 + 4,75X_1X_2 - 96,5X_1^2 + 11X_2^2$$

Уравнение 3 е представено чрез контурна графика на фиг.2.



**Фиг. 2. Контурна диаграма на зависимостта на прътвата скорост  $C_r$  в барут РНДСИ от времето за съхранение  $X_1$  и относителната влажност  $X_2$**

### 3.2. Дисперсионен анализ

За определяне на влиянието на всеки от факторите поотделно, както и ефекта на взаимодействията между тях, беше проведен двуфакторен дисперсионен анализ с три нива на относителната влажност – фактор А и четири нива на времето за съхранение (фактор В). За определяне на ефекта на взаимодействията за всяка комбинация от нива на факторите се извършени четири наблюдения. Експерименталните данни за стойностите на нивата на факторите А и В, както и средните стойности за прътвата скорост в пробите, са представени в Таблица 4.

**Таблица 4**

| Относителна влажност, % (фактор А) | Време за съхранение, години (фактор В) |      |      |      |
|------------------------------------|----------------------------------------|------|------|------|
|                                    | 5                                      | 10   | 15   | 25   |
| 30                                 | 1302                                   | 1436 | 1488 | 1485 |
| 50                                 | 1325                                   | 1451 | 1510 | 1521 |
| 70                                 | 1318                                   | 1469 | 1527 | 1520 |

Получените резултати са обобщени в таблица 5.

**Таблица 5**

| Източник на разсейване - фактори | Суми на квадратите | Степени на свобода | F – съотношение | Степени на свобода |         | F – критично |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------|---------|--------------|
|                                  |                    |                    |                 | $\nu_1$            | $\nu_2$ |              |
| А                                | 2935,5             | 3                  | 174,2           | 3                  | 36      | 2,87         |
| В                                | 14721,             | 2                  | 416,9           | 2                  | 36      | 3,26         |
| АВ                               | 300,16             | 6                  | 9,57            | 6                  | 36      | 2,37         |

## 4. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО. НАСОКИ ЗА БЪДЕЩА ДЕЙНОСТ

Приложимостта на методиката [15] е под въпрос, предвид факта, че тя е „универсална“, още повече че тя е избрана измежду останалите такива процедури, най-вече поради възможността за отчитане на влажността.

Дисперсионният анализ показва, че времето за съхранение основен фактор, влияещ на изменението на прътвата скорост в изследвания барут, докато относителната влажност, при която се съхраняват барутните елементи остава на втори план.

Данните в таблица 5 показват слабо изразено взаимно влияние между двата фактора.

Предвид получените резултати (основно влияние на времето за съхранение) ще бъде проведено повторно изследване, където образците ще бъдат подложени на ускорено състаряване по реда на методиката в [2], базирана на двете валидирани процедури за ускорено стареене – при мулти-

температурен режим и режим на натоварване при постоянни температури.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от проведеното изследване могат да се обобщат по следния начин:

1. Стойността на прътвата скоростта в двуосновни барути при всички комбинации от факторите срок за съхранение и относителна влажност може да се изчисли с помощта на полиномен модел от втори ред, чийто коефициенти са изчислени с помощта на регресионен анализ.
2. Срокът за съхранение е основен фактор, който влияе върху прътвата скорост за разпространение на акустични вълни в изследваните барути.
3. Втори по важност фактор, определящ прътвата скорост, е относителната влажност на въздуха при която се съхраняват барутните елементи.
4. Наблюдавано е относително слабо положително взаимно влияние между факторите срок за съхранение и относителна влажност при определяне на прътвата скорост в изследвания барут.
5. Предвид основното влияние на времето за съхранение ще бъде проведено повторно изследване, където образците ще бъдат подложени на ускорено състаряване по реда на методиката в [2], базирана на двете валидирани процедури за ускорено стареене – т.нар. мулти-температурен режим на натоварване и т.нар. режим на натоварване при единични температури.

## ЛИТЕРАТУРА

1. AOP-38, ed. 5, Specialist glossary of terms and definitions on ammunition safety, NSA, 2009.
2. AOP-48, ed. 2, Explosives, Nitrocellulose-based propellants, Stability test procedures and requirements using stabilizer depletion, NSA, 2008.
3. Bevan J., Stockpile Management: Accounting, In Conventional Ammunition in Surplus: A Reference Guide, SAS, Geneva, Switzerland, 2008.
4. Buckley et al., Physical Security and Stockpile Management, First RASR workshop, Zagreb, 2009.
5. Ganev R., I. Glavchev, V. Grozev. Determination of Diphenylamine during Natural Ageing of Single-based Propellants. Journal of Explosives and Propellants, v. 17, No. 2, 2001, 69 -73.
6. Ganev R., I. Glavchev. Infrared Spectroscopy Characterization of Single-base Propellants during their Natural Aging. - Journal of Technical Physics, v. 45, No. 4, 2004, 301 -308.
7. Ganev R., I. Glavchev. X-ray Diffraction Study of Singlebased Propellants Ageing. - Journal of Energetic Materials, v. 9, No. 1, 2001, 28 - 30.
8. Grozev V., M. Mihovski, Z. Grozeva, R. Ganev, O. Orban. Ageing influence on some acoustic, ballistic and strength characteristics of prorellants. – Proc. of IVth International Armament Conference, Poland, 2002, 209-2014.
9. Jelisivac, L. Life-Time Prediction of Double-Base Propellants in Accordance with Serbian and NATO Standards. Scientific Technical Review, vol. 60, № 1, 2010, 12–18.
10. STANAG 4518 ed. 1., “Safe disposal of munitions, design principles and requirements, and safety assessment”, NSA, 2001.
11. Генов Б.Г., Приложение на радиационен метод за контрол без разрушаване за освидетелстване на ракетни двигатели, Дни на БК 2016, Созопол, 2016.
12. Грозев В. Дисертация, 1983.
13. Грозев В.Г., Генов Б.Г и др., Моделиране влиянието на условията за съхранение върху прътвата скорост на акустични вълни в нитроцелулозни барути, Дни на безразрушителния контрол 2014, Созопол, 2014.
14. Ковачев Б., Б. Генов, В. Грозев. Акустични изследвания на процеса стареене на нитроцеолулозни барути. – Научни известия на НТСМ, бр. 3 (98), год. XIV, юни 2007, 188-193.
15. Методика М1- 63 за изкуствено стареене.

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p style="margin: 0;"><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                                      |

## ЕДНА ГЕОМЕТРИЧНА ОБРАТНА ЗАДАЧА В МЕХАНИКАТА НА ДЕФОРМИРУЕМОТО ТВЪРДО ТЯЛО И УЛТРАЗВУК

Доц. д-р Александър Попов

Институт по механика - БАН – София, България  
Направление «Механика на деформируемое твёрдое тело»

### Въведение

В [1] е дадена класификация на обратни задачи (ОЗ) в механика на деформируемое твърдо тяло (МДТТ):

1/ Коефициентни обратни задачи за вълновото уравнение:

$$\tilde{p}_{tt} - a(x)\tilde{p}_{x_1x_1} = 0; (a(x) = ?)$$

2/ Гранични обратни задачи:

$$\sigma_{ij}n_j|_{S_X} = p_i^n; (\text{Гр.усл. ?})$$

3/ Ретроспективни обратни задачи:

$$u_k = u_K(x_i, t_0); (\text{Нач.усл. ?})$$

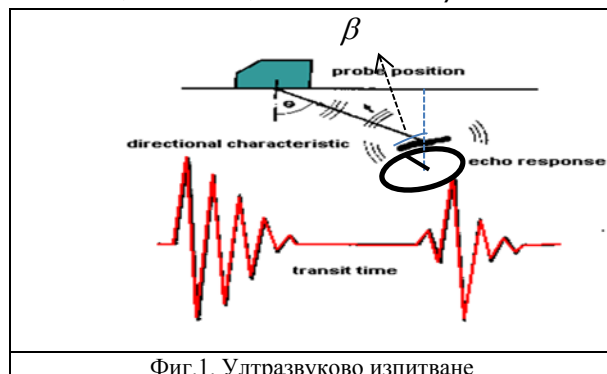
4/ Геометрични обратни задачи:

Отразяваща повърхнина ( $S_X = ?$ )

В настоящата статия, се разглежда следната геометрична обратна задача, при ултразвуковото изпитване [2,3,4,5,6]: „Да се определи площта на отразяващата повърхнина  $S_X$  по измерено отразеното поле от нея“. Тзи задача, в същност, представлява обратна формулировка на задачата за чувствителност при ултразвуковото изпитване [2,3,4,5,6].

### Ултразвуково изпитване

Разглежда се акустичен тракт на ъглов осезател (под ъгъл  $\vartheta$ ) за диск под ъгъл  $\beta$ , Фиг.1.



Аналитичният запис, в този случай, е [2,3,4,5,6]

$$(1) \left( \frac{P}{P_0} \right)_X = D_J(\beta) \left( \frac{\cos \vartheta}{\cos \beta} \right) \frac{S_{\text{ПП}} \cdot S_X}{\lambda \cdot (r + r_{\text{П}})} \Phi^2(\varphi)$$

където  $\left( \frac{P}{P_0} \right)_X$  - отношение на звуковото налягане,

$D_J$  - коефициент на пропускане по енергия,  $S_{\text{ПП}}; S_X$  - съответно площи на осезателя и на откритата нецялостност,  $\lambda$  - дължина на вълната,  $r; r_{\text{П}}$  - съответно пътища на ултразвука осезател-дефект и в презмата на осезателя,  $\Phi(\varphi)$  - диаграма на насоченост ( $\Phi(0) = 1$  при максимална амплитуда на отражение).

Зависимостите за отразяващата площ -  $S_X$ , за основните отражатели, използвани в ултразвуковото изпитване са дадени Таблица 1 [3]

Таблица 1.

| Тип на отражател                                                 | $S_X$                                                    |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Диск с диаметър $2b$<br>при $\vartheta = 0; \beta \approx 0$     | $\frac{\pi b^2}{\lambda r}$                              |
| Сфера с диаметър $2b$<br>при $\vartheta \neq 0; \beta \neq 0$    | $\frac{b}{2r}$                                           |
| Цилиндър с диаметър $2b$<br>при $\vartheta = 0; \beta \neq 0$    | $\sqrt{\frac{b}{2r}} \cos \beta$                         |
| Цилиндър с диаметър $2b$<br>при $\vartheta \neq 0; \beta \neq 0$ | $\sqrt{\frac{b \cos 2\vartheta}{2r \sin \beta}}$         |
| Плоскост с широчина $h$<br>при $\vartheta \neq 0; \beta \neq 0$  | $\frac{2h}{\lambda} \sqrt{\frac{\lambda}{r}} \cos \beta$ |

Ако в зависимост (1) положат

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)_X = \left(10^{-N_X^{dB}/20}\right), \quad \beta \sim 0, \quad D_J = 1 - R_A^2,$$

$$B(R_A; S_{\text{III}}; \mathcal{G}; \beta; \lambda; r; r_{\text{II}}) = \left( (1 - R_A) \frac{S_{\text{III}} \cdot \cos \mathcal{G}}{\lambda \cdot (r + r_{\text{II}})} \right),$$

$\Phi(\varphi) = 1$ , то тя се свежда до

$$(2) \quad \left(10^{-N_X^{dB}/20}\right) = B(R_A; S_{\text{III}}; \mathcal{G}; \beta; \lambda; r; r_{\text{II}}) \cdot S_X$$

Уравненията за характеристиките на основните отражатели, използвани в ултразвуковото изпитване [3,4,5,6], са дадени в Таблица 2.

Таблица 2.

| Тип на отражател                                                   | Уравнения относно $(b; b; b; b; h)$ съответно в (3);(4);(5);(6);(7)                                              |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Диск с диаметър $2b$ при $\mathcal{G} = 0; \beta \approx 0$        | (3) $\left(\frac{\pi \cdot B}{\lambda \cdot r}\right) \cdot b^2 - \left(\frac{P}{P_0}\right)_X = 0$              |
| Сфера с диаметър $2b$ при $\mathcal{G} \neq 0; \beta \neq 0$       | (4) $\left(\frac{B}{2 \cdot r}\right) \cdot b - \left(\frac{P}{P_0}\right)_X = 0$                                |
| Цилиндър с диаметър $2b$ при $\mathcal{G} = 0; \beta \neq 0$       | (5) $\sqrt{\frac{B^2}{2 \cdot r}} \cdot b - \left(\frac{P}{P_0}\right)_X = 0$                                    |
| Цилиндър с диаметър $2b$ при $\mathcal{G} \neq 0; \beta \approx 0$ | (6) $\sqrt{\frac{B^2}{2 \cdot r \sin \beta}} \cdot b - \left(\frac{P}{P_0}\right)_X = 0$                         |
| Плоскост с ширина $h$ при $\mathcal{G} \neq 0; \beta \neq 0$       | (7) $\left(\frac{2 \cdot B}{\lambda} \sqrt{\frac{\lambda}{r}}\right) \cdot h - \left(\frac{P}{P_0}\right)_X = 0$ |

където  $B = B(R_A; S_{\text{III}}; \mathcal{G}; \beta; \lambda; r; r_{\text{II}})$ .

За плоскодънен отражател – диск, с отразяваща площ -  $S_X$ , задачата се свежда до линейно уравнение

$$(8) \quad B(R_A; S_{\text{III}}; \mathcal{G}; \beta; \lambda; r; r_{\text{II}}) \cdot S_X - \left(10^{-N_X^{dB}/20}\right) = 0$$

Уравнението (8) се решава, относно  $S_X$  чрез процедурата

$$(9) \quad (N_X^{dB}) + (R_A; S_{\text{III}}; \mathcal{G}; \beta; \lambda; r; r_{\text{II}}) \rightarrow \rightarrow \text{Linear Solver} \rightarrow \text{Apps} \rightarrow (S_X)$$

вградена в HP PRIME - графичен калкулатор на Hewlett-Packard, USA, където се задават величините

$(N_X^{dB}); (R_A); (S_{\text{III}}; \mathcal{G}; \beta); (\lambda); (r; r_{\text{II}})$ , които са описани в обясненията към уравнение (1).

Величината  $S_X$ , от уравнение (8), в ултразвуковото изпитване [2,3,4,5,6], се интерпретира по следния начин „Откритата нецялостност има отразяваща площ -  $S_X^{HEЦ}$ , такава каквато би имал плоскодънен отражател с площ -  $S_X^{ПКО}$ “. Следователно, за оценяване на размера на откритата нецялостност се използва апроксимацията

$$(10) \quad S_X \sim S_X^{ПКО} \sim S_X^{HEЦ}.$$

### Заклучение

В статията е показано как обръщането на формулировката на класическата задача за чувствителност в ултразвуковото изпитване [2,3,4,5,6], довежда до формулировка на нова задача, а именно „Геометрична обратна задача в механика на деформируемост твърдо тяло“. Показано е нейното решение.

### Литература

1. Ватуляев, А.О., Обратные задачи в механика на деформируемом твёрдом, Физматлит, Москва, 2007.
2. Алешин Н.П., В.Е.Белый, А.Х. Вовилкин, А.К. Вошанов, И.Н. Ермолов, А.К. Гурвич, Методы акустического контроля металлов, Машиностроение, Москва, 1989.
3. Ермолов И.Н., Теория и практика ультразвукового контроля, Машиностроение, Москва, 1981.
4. Алешин Н.П., Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений, Машиностроение, Москва, 2013.
5. Воронков В.А., Основные принципы создания методик неразрушающего контроля на примере эхометода ультразвуковой дефектоскопии, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, 2010.
6. Бархатов В.А., Методические указания. Расчет эквивалентной площади и эквивалентных размеров отражателей в ультразвуковом контроле изделий, ИЦ Физприбор, Екатеринбург, 2009.

|                                                                                   |                                                                                                                         |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="text-align: center;">АКУСТИКА</h1> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>11 - 12.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>29 - 30.11.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                               | Декември 2016 г.                                                                   |

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ И КОРРОЗИОННЫХ ПОРАЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

### ANALYSIS OF EFFICIENCY OF DETECTION OF DEFECTS AND CORROSION OF WELDED PIPELINES BY NON DESTRUCTIVE TESTING METHODS

А.И. Бондаренко<sup>1</sup>, А.Л. Шекеро<sup>1</sup>, М., А. Алексиев<sup>2</sup>, М. Миховски<sup>2</sup>

1- Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

2- Институт механики Болгарской академии наук, София

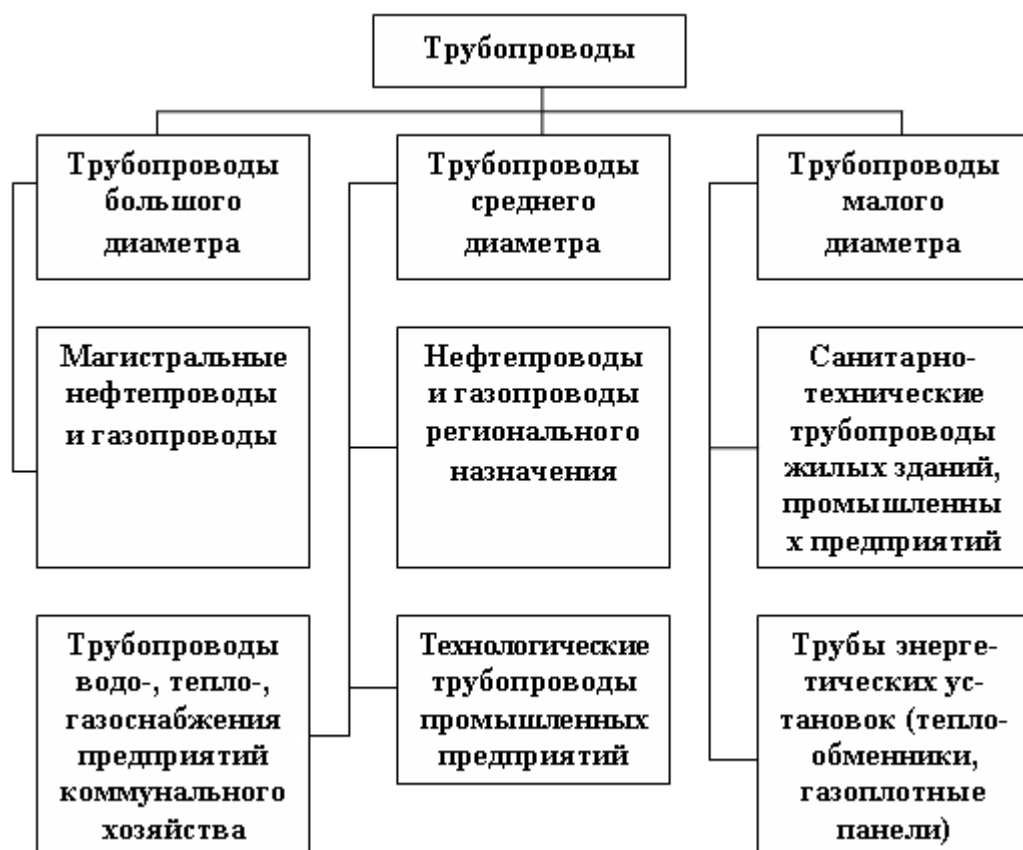
**Abstract:** Приведена классификация сварных трубопроводов различного назначения. Рассмотрен принцип возбуждения и отражения низкочастотных ультразвуковых направленных волн от различных видов отражателей в трубопроводах. Дан краткий анализ свойств продольной и крутильной мод направленных волн, которые чаще всего используются для диагностики технического состояния протяженных трубопроводов. Предложена общая схема комплекса методов диагностики и неразрушающего контроля для оценки технического состояния протяженных сварных трубопроводов.

**Keywords:** сварные трубопроводы, техническое состояние, диагностика, низкочастотный ультразвук, направленные волны, отражатели, технология контроля

Трубопроводы являются одним из самых распространенных видов сварных конструкций и находят широкое применение в различных отраслях промышленности разных стран мира. Они предназначены для транспортировки жидких, газообразных и сыпучих веществ (продуктов) при различных давлениях и температурах. Из-за различной пропускной способности размеры (диаметры) трубопроводов колеблются в большом диапазоне. Укрупнено трубопроводы можно классифицировать так: трубопроводы большого диаметра, трубопроводы среднего диаметра и трубопроводы малого диаметра. На рис. 1 приведена укрупненная классификация трубопроводов различного назначения.

Общим для всех видов трубопроводов является наличие

большого количества сварных соединений, с помощью которых осуществляется соединение отдельных секций труб. Большинство этих сварных швов является кольцевыми. Кроме этого трубопроводы характеризуются большим числом различных конструктивных элементов: фланцев, прокладок, контрольно-измерительных приборов, отводов и т.д. В процессе эксплуатации трубопроводов в них постепенно развиваются различные дефекты, обусловленные коррозионным поражением металла трубы, эрозийным износом стенки трубы в результате прохождения транспортируемых продуктов, что могут привести к появлению трещин и к разрушению трубопровода.



*Рис. 1. Укрупненная классификация трубопроводов различного назначения*

Поэтому важное значение для обеспечения работоспособности трубопроводов имеет постоянный мониторинг их технического состояния. Долгое время эффективных методов диагностики технического состояния и неразрушающего контроля трубопроводов не существовало. Это связано с тем, что трубопроводы находятся в изоляции под землей, некоторые секции труб подняты над землей, отдельные участки погружены в воду, находятся в рукавах под железнодорожными и другими переходами. Поэтому длительное время диагностика протяженных трубопроводов в основной своей массе вынуждено базировалась на понятиях и критериях дефектности металла, как сварного шва, так и трубы, чтобы иметь хоть какие-либо, пусть и косвенные, оценки текущего состояния трубопроводов в целом.

Существенным прогрессом в развитии методов контроля технического

состояния протяженных трубопроводов явилась разработка технологии и систем дистанционной дефектоскопии протяженных трубопроводов с использованием метода дальнедействующего низкочастотного ультразвукового контроля (НЧ УЗК) направленными волнами. Наибольшее развитие такая технология контроля трубопроводов различного назначения получила в середине 1990 годов в Англии [1], США [2], а затем в Японии [3]. Анализ особенностей распространения низкочастотных ультразвуковых направленных волн, систем диагностики трубопроводов различного назначения с использованием разных видов преобразователей для возбуждения направленных волн продольной и крутильной мод и приема отраженных сигналов от несплошностей в трубопроводах приведен в работе [4]. Значительным преимуществом этого метода перед традиционными методами УЗК является то, что он может быть

использован как при экспресс-контроле технического состояния трубопроводов различного назначения после их монтажа путем формирования первоначальной дефектограммы трубопровода, так и при последующем их мониторинге и создании информационной базы для расчета эксплуатационного ресурса трубопроводов.

Метод НЧ УЗК основан на возбуждении в контролируемом протяженном трубопроводе низкочастотных ультразвуковых колебаний с одной точки установки акустического блока на трубопроводе. Акустические блоки создаются на основе различных типов излучателей: пьезоэлектрических, магнитострикционных и электромагнитоакустических преобразователей. Чаще всего для диагностики трубопроводных систем используются акустические антенны на основе пьезоэлектрических преобразователей, которые используются как для возбуждения УЗ колебаний в трубопроводе, так и для приема отраженных эхосигналов. Принцип возбуждения НЧ УЗ волн и их отражения от несплошностей и конца трубы приведен на рис. 2.

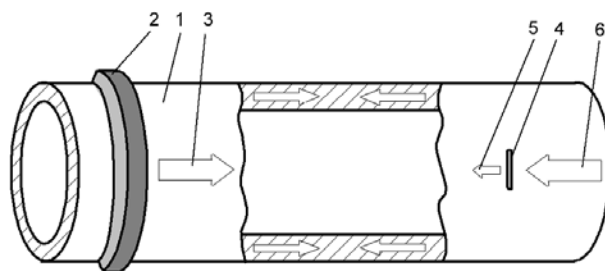


Рис. 2. Принцип возбуждения и отражения низкочастотных ультразвуковых волн от несплошностей и конца трубы

При проведении диагностики технического состояния трубопроводов НЧ УЗ направленными волнами на трубе 1 устанавливается акустическая антенна 2 в виде кольца пьезопреобразователей.

Преобразователи равномерно располагаются по эквидистанте к поверхности трубы с одинаковым шагом для создания по всему сечению трубы равномерной характеристики направленности возбуждаемой кольцевой волны 3 НЧ УЗ колебаний. При встрече направленной волной какого-либо отражателя 4, обусловленного, например, изменением поперечного сечения стенки трубы, часть акустической волны 5 отражается обратно к пьезопреобразователям. Остальная часть волны проходит по трубе, а затем прошедшая волна 6 полностью отражается от конца трубы.

Характерной особенностью длительно эксплуатируемых протяженных трубопроводов является то, что в процессе диагностики их технического состояния низкочастотными волнами все сварные соединения трубопровода, его конструктивные элементы и дефекты стенки трубы и сварных соединений являются отражателями направленной волны.

На рис. 3 приведена классификация видов отражателей в трубопроводе и схема их возможного размещения на трубе.

Все отражатели в трубопроводе можно разделить на два вида: симметричные и асимметричные. К симметричным отражателям относятся сварные швы, фланцы, опоры, патрубки и т.п., местоположение которых на трубопроводе известно согласно технической документации. Эхосигналы от симметричных отражателей являются важными метками для определения местоположения асимметричных отражателей. К асимметричным отражателям относятся дефектные участки трубы, обусловленные чаще всего повреждениями поперечного сечения стенки трубы из-за коррозии и эрозионного износа стенки трубы.



*Рис. 3. Классификация видов отражателей в трубопроводе (а) и схема их возможного размещения на трубе (б)*

Коррозионные поражения стенки трубы ориентированы как вдоль окружности трубы, так и вдоль продольной оси трубы. Они могут находиться на внутренних и наружных поверхностях, однако распознать, какая именно это поверхность с помощью дистанционного ультразвукового контроля невозможно. Повреждения, обусловленные эрозионным износом стенки трубы, чаще всего ориентированы вдоль продольной оси трубы и расположены со стороны внутренней поверхности. Асимметричные отражатели могут располагаться в различных местах трубы. Для идентификации их местоположения вдоль трубы служат эхосигналы от симметричных отражателей. При наличии дефектов в сварном шве, обусловленных деформацией формы шва и коррозионным поражением, они будут идентифицироваться синхронно со сварным швом.

Для контроля технического состояния трубопроводов НЧ УЗ направленными волнами используются, в основном, две моды волн: продольная и

крутильная. Существенной особенностью этих волн является минимальная дисперсия их групповых скоростей в определенных диапазонах частот ультразвуковых волн. Для реализации технологии контроля протяженных трубопроводов целесообразно использование симметричной продольной моды нулевого порядка  $L(0,1)$  или  $L(0,2)$  в области минимальной дисперсии скорости либо недисперсионной нулевой крутильной моды  $T(0,1)$ .

Визуально распространение направленных волн можно представить в виде кольцевой волны, которая проходит вдоль трубы по всему сечению и взаимодействует с поперечным сечением трубы в каждой точке. Наиболее приемлемой модой является быстродвижущаяся нулевая продольная мода  $L(0,2)$ , скорость которой не зависит от частоты в диапазоне частот выше 20 кГц.

Крутильные волны с модой  $T(0,1)$  нулевого порядка характеризуются равенством фазовой и групповой скоростей и не обладают дисперсностью.

Отсутствие дисперсии и низкая скорость крутильной волны позволяют уменьшить мертвую зону и улучшить разрешающую способность. Крутильная волна обязательно проявляется от нулевой частоты со скоростью поперечных волн, существует на любой частоте при постоянной скорости поперечных волн и является осесимметричной модой.

Основным параметром, положенным в основу создания систем НЧ УЗ контроля направленными волнами, является амплитуда отраженного эхосигнала. Амплитуда отраженных эхосигналов, по сути, соответствует степени изменения площади поперечного сечения трубы под действием коррозии, т.е. зависит от размера дефекта. При увеличении размера дефекта увеличивается также длительность (ширина) эхосигнала. Соответствие амплитуды отраженных сигналов степени изменения площади поперечного сечения трубы из-за действия коррозии является фундаментальной технологической особенностью дефектоскопии протяженных трубопроводов низкочастотными направленными волнами, которые распространяются по толщине стенки трубы вдоль ее продольной оси. Таким образом, достоверно подтвердить наличие (отсутствие) повреждений может только соответствующая форма принимаемых отраженных сигналов. Однако точно определить размеры повреждения, его тип, степень опасности и т.п. почти невозможно, даже если известно его местоположение по длине трубы. В то же время амплитуда отраженных эхосигналов от реального дефекта дает возможность в некоторой степени судить о глубине поражения стенки трубы в зависимости от изменения площади поперечного сечения трубы. Однако эта технология не обеспечивает такого разрешения как измеренная по месту

оставшаяся толщина стенки трубы, пораженная дефектом.

В то же время направленная волна в общем случае чувствительна к изменению площади поперечного сечения трубы в комбинации глубины поражения стенки и длины вдоль окружности трубы. Хотя глубокий дефект той же площади с малой длиной по окружности трубы может давать большее отражение, однако информацию о степени поражения площади поперечного сечения трубы амплитуда отраженного сигнала несет в целом и из этой информации невозможно обосновать информацию о глубине поражения стенки трубы. Такую информацию могут дать другие физические средства измерения стенки трубы, например, ультразвуковая толщинометрия.

Исходя из этого может быть предложена общая схема комплекса методов диагностики и неразрушающего контроля технического состояния трубопроводов различного назначения при использовании для обнаружения дефектов дальнего действия УЗК низкочастотными направленными волнами, которая приведена на рис. 4.

После полного контроля всей длины трубопровода участки, на которых была обнаружена коррозия, оцениваются путем измерения толщины ультразвуковым толщиномером или другими методами контроля (радиографическим, вихретоковым), после чего при необходимости определяют точки для постоянного наблюдения и мониторинга технического состояния трубопровода.

Применение технологии и техники дальнего действия УЗК направленными волнами требует полного понимания факторов, которые влияют на результаты контроля, практического опыта интерпретации результатов.

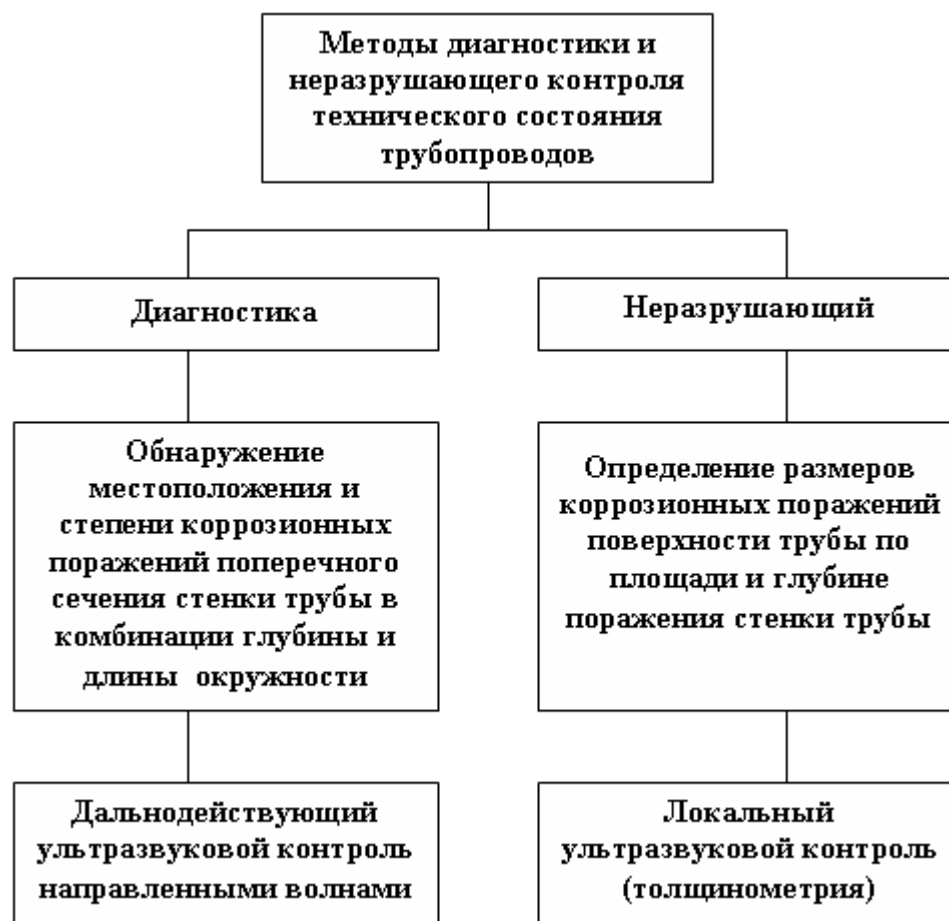


Рис. 4. Комплексные методы диагностики и контроля технического состояния трубопроводов

Работа выполнена по межакадемическому проекту научных исследований между БАН и НАНУ „Исследования в области повышения эффективности и достоверности технологии дальнодействующего ультразвукового контроля направленными волнами”.

#### Литература:

1. Mudge P.J., Lank A.M., Allyne D.N. A long range method of the detection of corrosion under insulation in process pipework. – Thempie Project: OG474/94, 5-th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg, 26-28 November, 1996.
2. Rose I.L. Ultrasonic waves in solid media //Camridge University Press. – New York. – 1999. – pp. 77-82.
3. Nagai T., Hyodo M., Takamyra K. Guided Ultrasonic Testing as a Practical Technology //Hihakai Kensa. – 2003. – 52, №12 – pp. 667-671.
4. Патон Б.Е., Троицкий В.А., Бондаренко А.И. Метод низкочастотного ультразвукового контроля протяженных объектов направленными волнами //Техн. диагностика и неразрушающий контроль. - 2008. – № 2. – с. 20-30.

|                                                                                   |                                                                                                                         |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="text-align: center;">АКУСТИКА</h1> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>11 - 12.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>29 - 30.11.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                               | Декември 2016 г.                                                                      |

## АРХЕОАКУСТИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА САКРАЛНИ ТРАКИЙСКИ ОБЕКТИ ОТ БЪЛГАРИЯ

### ARCHAEOACOUSTIC INVESTIGATION OF SACRAL THRACIAN SITES IN BULGARIA

**Трифонов Т.<sup>1</sup>, Г. Димков<sup>2</sup>, И. Симеонов<sup>3</sup>, Ал. Алексиев<sup>4</sup>, Г. Нехризов<sup>5</sup>**

1-Великотърновски университет "Св. Кирил и Методий", В. Търново и Национален военен университет "Васил Левски" – В. Търново, E-mail: [tihomirtrifonov55@gmail.com](mailto:tihomirtrifonov55@gmail.com);

2-Институт по математика и информатика – БАН, София, E-mail: [gdimkov@math.bas.bg](mailto:gdimkov@math.bas.bg);

3- Национален военен университет "Васил Левски" – В. Търново, E-mail: [ivanov\\_ivan@nvu.bg](mailto:ivanov_ivan@nvu.bg);

4-Институт по Механика – БАН, София, E-mail: [alexiev@imbm.bas.bg](mailto:alexiev@imbm.bas.bg);

5-Национален археологически институт с музей – БАН, София, E-mail: [nehrizov@gmail.com](mailto:nehrizov@gmail.com).

#### Abstract

В статията са представени част от резултатите от акустични изследвания на сакрални тракийски обекти, направени по общоакадемичния проект „Траките – генезис и развитие на етноса, културни идентичности, цивилизационни взаимодействия и наследство от древността“. Целта на изследванията е установяване на акустичните характеристики на вътрешното пространство на архитектурни обекти от времето на траките и на модели на антични музикални инструменти. Анализът на акустичните параметри на вътрешното пространство обхваща шумово поле, време на реверберация, спектрален и уейвлет анализ, характеристики и параметри на помещенията от гледна точка на музикалната акустика и др. Изследвани са камерите на тракийските гробници в могилиите „Грифони“, „Хелвеция“, „Сашова могила“, „Голяма Арсеналка“, „Крън 2“ в Казанлъшката котловина, тази в могилата Мал тепе край с. Мезек, както и Свещарска гробница и гробницата в Могила 13 в археологическия резерват Сбораново, Разградско. Акустични измервания са проведени и на скалния комплекс Глухите камъни в Източните Родопи.

**Keywords:** Thracian sacred sites, acoustic investigation, Deaf stones, anechoic chambers.

В настоящия доклад е обърнато особено внимание на акустичния феномен Глухите камъни. Както се вижда от наименованието на тази местност, отдавна местните хора са забелязали специфичната акустична обстановка, в която попада човек, намиращ се на това изключително живописно място в Източните Родопи.

#### 1. СКАЛЕН КОМПЛЕКС „ГЛУХИТЕ КАМЪНИ“

##### 1. Описание на обекта на изследване

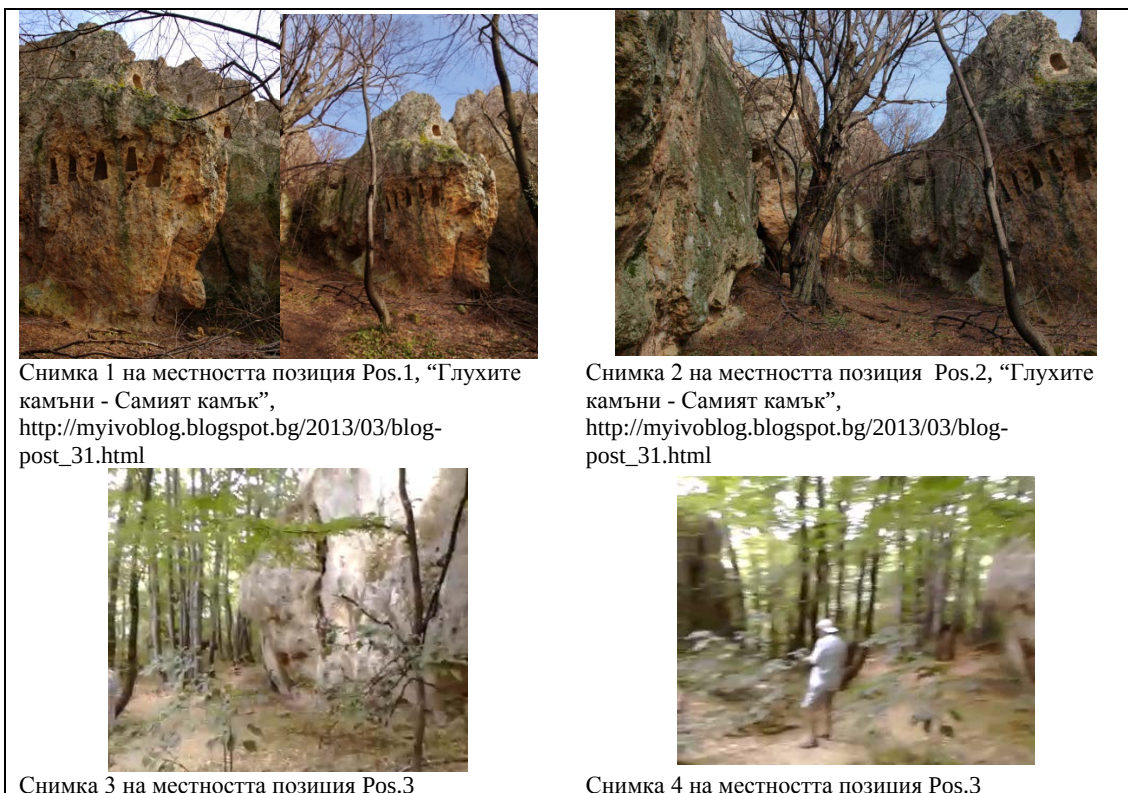
Скалният комплекс Глухите камъни е разположен в най-северозточните части на планината Родопи. Той се намира на хребет, спускащ се на изток от вр. Света Марина (708,6 m.) – най-високият връх на източнородопския рид Гората. На билото му има останки от средновековна крепост, която се идентифицира с познатата от хрониките на византийски и латински писатели крепост Ефраим.

Местността Глухите камъни носи това име поради изявените скали, които увенчават билото на хребета и поради това, че там няма ехо. Скалите са разположени на няколко групи, разделени от разломи, в посока северозапад – югоизток. В геоложко отношение те са палеогенски туфи и риолити.

Големият интерес към Глухите камъни се дължи основно на многобройните ниши, изсечени по отвесните страни на високите до 20 м скали. В резултат на системните

изследвания са регистрирани 81 групи, обхващащи общо 459 скални ниши. Най-многобройни са трапецовидните, но се срещат още правоъгълни, квадратни, овални, арковидни. Освен нишите в района са регистрирани и други скални изсичания като улеи и малки басейнчета. Най-впечатляващи обаче са изсичанията в най-западния и доминиращ над околните скален масив. Върху заравнения му връх е вкопана дълбока правоъгълна черна. До нея води добре оформена двураменна стълба. Южното лице на скалата, от където започва стълбата, е оформено отвесно. На това място е издълбано пещерообразно помещение с правоъгълен план и куполообразно покритие. Непосредствено южно под масива с тези изсичания се намира скална площадка, на която през V-VI в. е изградена църква.

Резултатите от археологическите проучвания позволиха да се изясни предназначението на обекта – сложен комплекс с култов характер с многовековна история. Центърът на култовата дейност изглежда е бил на най-високото място, където се намират останките от раннохристиянска и средновековна църква. Най-вероятно тук е функционирало тракийско светилище, върху руините на което по-късно е изградена църквата. Многобройни са следите от ритуални действия, провеждани от траките около най-високата скала. Те са оформили огнища-олтари от глина, върху които са изпълнявали обреди, свързани с



Снимка 1 на местността позиция Pos.1, “Глухите камъни - Самият камък”,  
[http://myivoblog.blogspot.bg/2013/03/blog-post\\_31.html](http://myivoblog.blogspot.bg/2013/03/blog-post_31.html)

Снимка 2 на местността позиция Pos.2, “Глухите камъни - Самият камък”,  
[http://myivoblog.blogspot.bg/2013/03/blog-post\\_31.html](http://myivoblog.blogspot.bg/2013/03/blog-post_31.html)

Снимка 3 на местността позиция Pos.3

Снимка 4 на местността позиция Pos.3

Фиг. 1 Характерни точки на Глухите камъни.

огън, поднасяли са различни дарове – керамични съдове с храна и напитки, накити, битови предмети, оръдия на труда и оръжия, а в по-късния период – и монети. Светилището продължава да функционира и след превръщането на тракийските земи в римски провинции. Доказателства за това са откритите римски монети и керамика, но най-важното е част от мраморна оброчна плочка. Върху руините на античното светилище, посветено на неизвестно за сега божество, през V-VI в. е изграден християнския храм – ясен белег за приемственост през вековете в почитането на това място. Тази базилика продължава съществуването си и през средновековието, като претърпява няколко преустройства. През 2012 г. на южния склон беше открита втора църква от същото време и от същия базиликален тип. Този факт потвърждава изключителното значение на Глухите камъни, като средищен култов център. Последните разкрития показаха, че през средновековието територията на обекта е била укрепена. В по-лесно достъпните западни и южни склонове са локализирани и проучени участъци от мощна каменна стена с дебелина 2.5 м.

Краят на живота на скалния комплекс в м. Глухите камъни е настъпил най-вероятно в началото XIII в. и може да се свърже с преминаването на рицарите от Четвъртия кръстоносен поход през тези земи [1].

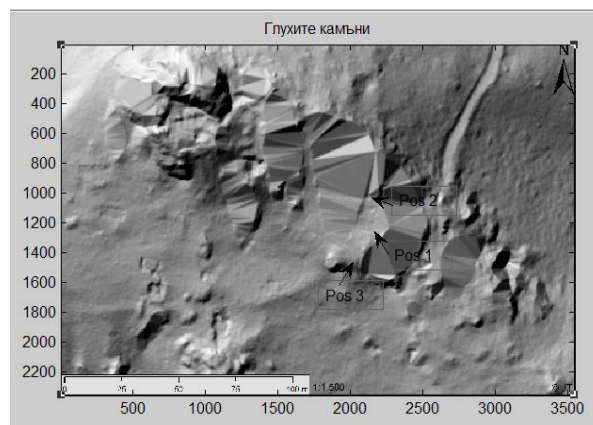
## 2. Качествена акустична характеристика на местността

Както се вижда от показаните по-долу снимки и схеми, Глухите камъни са комплекс от естествени скални образувания с многобройни човешки намеси. Той се характеризира с високи скални зъбери и скални стени с различна конфигурация, разделени от междускални пространства.

От акустична гледна точка може да се каже, че има поредица от вълноводи или полуоткрити помещения, обградени от звуконепропускащи бариери. В някои от

проломите са израстнали достатъчно големи широколистни дървета, които също влияят на акустичната обстановка.

Субективното усещане на посетителя, който идва отвън е, че изведнъж “оглушава”, тоест нормалният шум на гората изведнъж изчезва. Археолозите от проучвателския екип споделят, че винаги са се впечатлявали от липсата на чуваемост на обекта и отсъствието на ехо. На фиг. 3 е показано заснемане с LiDAR на Глухите камъни, подложено на допълнителна обработка.



Фиг. 3 Въздушно лазерно сканиране на Глухите камъни, отбелязани са точките на измерване (позиции) Pos.1-3.

Вижда се, че повечето от междускалните пространства имат в първо приближение клиновидна форма – фиг. 4.

В теоретичната акустика и електродинамика въпросът за дифракцията върху клиновидна повърхност и за полето във вътрешната област на клин е разработен подробно [2]. Именно на тези разработки се основават модерните „Стелт“ технологии.

Технологията „Стелт“ (от английски: stealth technology, от *by stealth* – крадешком, мълчешком) е набор от конструктивни решения и системи за намаляване на ефективната отразяваща повърхност на бойните машини (подводници, самолети, кораби, танкове и др.), тоест, за намаляване на тяхната откриваемост по време на бойните действия.

В акустиката първи използват такава технология немските въоръжени сили по време на Втората световна война, като поставят специално звукопоглъщащо покритие на подводните лодки на немския флот.

По-долу ще бъде показано, че някои от природните особености на местността Глухите камъни имат характеристиките на Стелт технологиите.

### 3. Експериментални изследвания

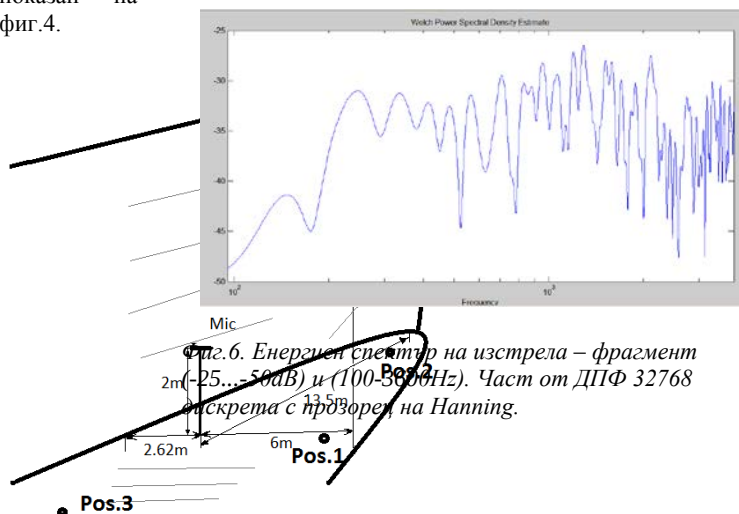
В периода 8 - 9 август 2016 г. екип от Института по механика на БАН, на Националния военен университет „Васил Левски“ и на Великотърновския университет „Св. Кирил и Методий“ проведе акустични измервания *in situ*.

Използван беше комплект от апаратура за акустични измервания на фирмата Брюл&Кер. Някои от характеристиките на тази апаратура са уникални към настоящия момент [3, 6].

## 2. ПОЛУЧЕНИ РЕЗУЛТАТИ

### 1. Модел на местността

Както беше казано по-горе, типичните за Глухите камъни междускални пространства могат да бъдат представени за акустичните изследвания чрез модела, показан на фиг.4.



Фиг. 4. Разположение на точките на измерване.

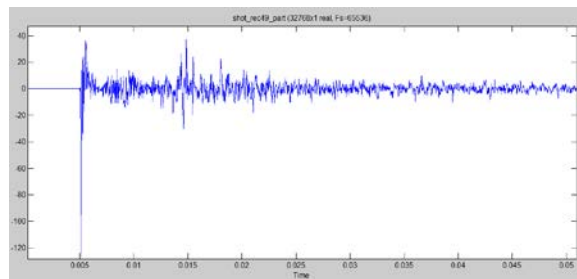
Този модел е широко застъпен в теоретичната акустика и електродинамика при изучаването на дифракционните задачи.

Чрез платформата PULSE 3560B на Bruel&Kjaer бяха направени записи на изстрели със сигналния пистолет за позициите Pos.1,2 и 3. Регистрираният сензор – измервателен микрофон 4193 на Bruel&Kjaer, бе разположен на височина 2 м над повърхността на показаното място.

### 2. Цифров спектрален анализ

Както е известно, спектралният анализ е мощен инструмент за изучаване на сигнали от различно естество (акустични, сеизмични, електрически и др.) [4]. В случая се използва нетрадиционен подход: изчислява се с помощта на MATLAB енергийният спектър на единичен изстрел и

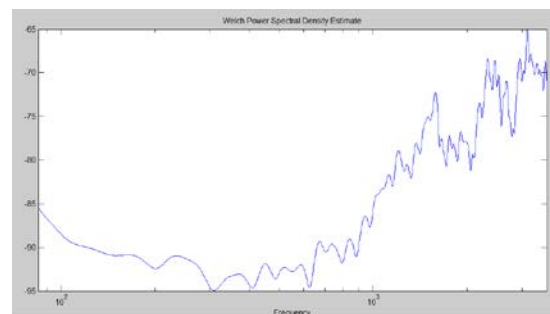
енергийният спектър на неговото отражение. Звуковият импулс, получен чрез изстрела, дава възможност за експресно изследване на спектъра в широка честотна лента. Видът на произведения изстрел (чрез сигналния пистолет) във времето е показан на фиг. 5.



Фиг. 5. Фрагмент от първите 0,047 сек. от изстрел от сигналния пистолет, линеен мащаб по ординатата и по абсцисата,  $F_s=65536\text{Hz}$ .

Фактически в записа от сигналния пистолет с обща продължителност 7,6 s се съдържа както директният шумов импулс, така и най-силното отражение на фона на шума на околната среда.

По-долу се анализира фрагмент от това отражение, в който се има информация за настъпилите промени в спектралния състав, породени от специфичната акустична обстановка.



Фиг. 7. Енергиен спектър на отражението – фрагмент (-65...-95dB) и (100-3600Hz). ДПФ с тегло прозорец на Hanning.

### 3. Сравнение на получените резултати с параметрите на заглушена камера

Заглушените камери (наречени още звукомерни или безехови) са помещения, оборудвани със средства за акустична защита от външни шумове и вибрации, както и със средства за поглъщане на звуковите вълни, падащи на вътрешните стени на помещението. Може да се каже, че това са помещения с „вътрешно стелт покритие“ и допълнителни мерки против вибрации и външни шумове.

Без да се навлиза в подробности, вътрешното стелт покритие обикновено е изпълнено чрез звукопоглъщащи клинове от специален материал и със специална форма [5].

Типична структура на покритието е показана на фиг.8.



Фиг. 8. Вътрешна повърхност на заглушена камера.

Значенията на собствените шумове на камерата се измерват в различни часове от денонощието. Друг важен параметър е звукопоглъщането на камерата. То се оценява по характера на изменението на звуковото налягане при отдалечаване от източник на сферична вълна. Отклонението от закона на разпространение на сферичната вълна не трябва да е по-голямо от 0,5 dB.

От показания релеф на местността Глухите камъни и от формата на междускалните пространства може да се направи извод, че нивата на “собствените шумове” би трябвало да са достатъчно ниски. Направените измервания потвърдиха това. Всъщност на това се дължи субективното усещане на посетителите на тази местност, а оттам и нейното наименование.

Освен това от енергийния спектър, показан на фиг. 6 и 7 се вижда, че затихването на спектралните компоненти в честотния диапазон 100 Hz – 3600Hz е твърде голямо. Това затихване е точно в областта на най-голямата чувствителност на човешкото слухово възприятие.

Явно това се дължи както на специфичната клиновидна форма на междускалните пространства, така и на големия брой нерегулярно разположени изкуствено създадени ниши, които изпълняват ролята на звукопоглъщащи клинове.

## 2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведените акустични измервания и анализи показват, че наименованието на местността Глухите камъни има сериозно научно обяснение. Както беше показано по-горе, то се дължи на съчетаването на множество фактори: уникалните шумоизолиращи свойства на скалните масиви от една страна, което води до много ниски нива на външните шумове в междускалните пространства, и на звукопоглъщащите свойства на самите пространства, обусловени от нерегулярно разположените изкуствено създадени скални ниши.

Беше показано, че акустичните параметри се доближават до тези на измервателните звукозаглушени (безехови) камери в честотния диапазон на най-голямата чувствителност на човешкото слухово възприятие.

Авторите считат, че е възможно една от причините Глухите камъни да са избрани за провеждане на сакрални дейности да са именно акустичните характеристики на местността.

*Екипът, работещ по проекта “Траките – генезис и развитие на етноса, културни идентичности, цивилизационни взаимодействия и наследство от древността”, благодари на дарителя Петър Манджуков.*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nekhrizov, G., L. E. Roller, M. Vassileva, J. Tzvetkova, N. Kecheva. The Gloukhite Kamani Site: Old

Questions and new Approaches. – Thracia, 20, 2012, 215-233.

- [2] Уфимцев, П.Я. “Теория дифракционных краевых волн в электродинамике Введение в физическую теорию дифракции”, М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2012.
- [3] Brüel & Kjær, Technical Review. 1–2002, <https://www.bksv.com/media/doc/bv0055.pdf>
- [4] Марпл С.Л. “Цифровой спектральный анализ и его приложения”, Москва, Мир, 1990.
- [5] Колесников А.Е., “Акустические измерения”, Ленинград, Судостроение, 1983.
- [6] Fol, V., G. Györök, T. Trifonov, A. Alexiev, I. S. Ivanov. “Acoustic Characteristics of Sacral Thracian Sites”. – In: 10th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas, Székesfehérvár, 17 Oct. 2016.

|                                                                                   |                                                                                                                         |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="text-align: center;">АКУСТИКА</h1> <p style="text-align: center;">Национална конференция "Акустика 2016"</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                               | Декември 2016 г.                                                                      |

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ОЦЕНКА НА ТЕХНИЧЕСКОТО СЪСТОЯНИЕ С УЛТРАЗВУКОВИ МЕТОДИ ЗА КОНТРОЛ БЕЗ РАЗРУШАВАНЕ

### CAPABILITIES EXAMINATION OF ULTRASOUND NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR CONTROL OF AMMUNITION ELEMENTS

Доц. д-р Генов Б.<sup>1</sup>Доц. д-р Вълков Н.<sup>1</sup>Доц. д-р Грозев В.<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт по отбрана, София, България, [b.genov@di.mod.bg](mailto:b.genov@di.mod.bg)<sup>2</sup>Шуменски университет „Епископ Константин Преславски“, Шумен, България, [valgroz@abv.bg](mailto:valgroz@abv.bg)

**Abstract.** In essence, procuring ammunition is similar to subscribing to a insurance policy: a large part of what is procured will never be used before its shelf life expires. Considering that the ammunition has high-value goods, and generate costs over their entire life cycle, it is necessary to look for ways to avoid the cost of demilitarization and to delay it in time. Modernization and extending the shelf life are ones of the answers. Inherent requirement in all cases the ammunition to be fit and safe for service. Non-destructive methods, particularly acoustic non-destructive methods, offer a range of solutions to ensure the safety and readiness to use of ammunition. In this article we investigate two applications of ultrasonic non-destructive methods (as a part of acoustic methods) for one very important element – artillery cartridge.

**Keywords:** ammunition life cycle, ultrasonic wave, artificial flaw, artillery cartridge.

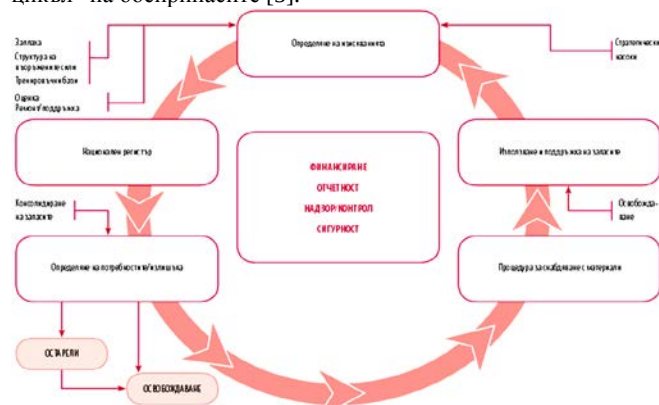
#### 1. УВОД

По своята същност снабдяването с боеприпаси прилича на сключването на един вид застраховка за националната отбрана: голяма част от закупеното не се използва преди изтичането на срока му на годност [4].

Този факт поражда две характерни особености: боеприпасите следва да могат продължително да се съхраняват и да има технологична възможност за тяхната демилитаризация<sup>1</sup>.

Боеприпасите са стока със висока стойност, чието производство отнема дълго време и затова често се закупуват в големи количества, за да се изпревари потребността от тях.

Специфично за боеприпасите е, че те генерират разходи във всички етапи на жизнения си цикъл – от разработването до освобождаването от тях. Това означава, че трябва да се възприеме подход за „цялостно управление на жизнения цикъл“ на боеприпасите [5].



Фиг. 1. Управление на жизнения цикъл на боеприпасите (вариант) [5]

Независимо от факта, че напоследък в нашата страна се обръща предимно внимание на демилитаризацията на боеприпасите са стока със висока стойност, са налице тотално грешни подходи към нея.

Липсата на прилагане на добри практики при определяне на излишъците, търговете и технологиите за демилитаризация прави цялостния процес неефективен.

Независимо от широко разпространената теза за интегриране на изискванията за демилитаризация в ранните фази на жизнения цикъл<sup>2</sup>, съществуват и по-удачни подходи като например поддръжка и модернизация на боеприпасите, което позволява да се отложи момента на демилитаризация във времето.

За да бъде оправдан този подход, е необходимо да се използват методи за контрол на техническото състояние на боеприпаса като цяло и на неговите елементи – гилза, метателен заряд, снаряд и др.

В настоящата разработка ще се изследва възможността за прилагане на ултразвукови методи, като част от акустичните методи, за контрол на техническото състояние на артилерийски гилзи.

#### 2. ПРЕДПОСТАВКИ И НАЧИНИ ЗА РЕШЕНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Артилерийските гилзи се произвеждат от високоякостна стомана или месинг с добавка на силиций като заготовката се подлага на неколкостепенно дълбоко изтегляне. Стреляните гилзи остават за скрап или подлежат на възстановяване.

Решението дали стреляна гилза да бъде използвана повторно

Опасните сечения са в дънната и преходната част на гилзата. Затова регламентиращите документи не допускат вътрешни и външни дефекти до 50 mm от венеца. В

<sup>1</sup> комплекс от дейности по премахването или неутрализирането на военния потенциал на боеприпаса [3], [8]

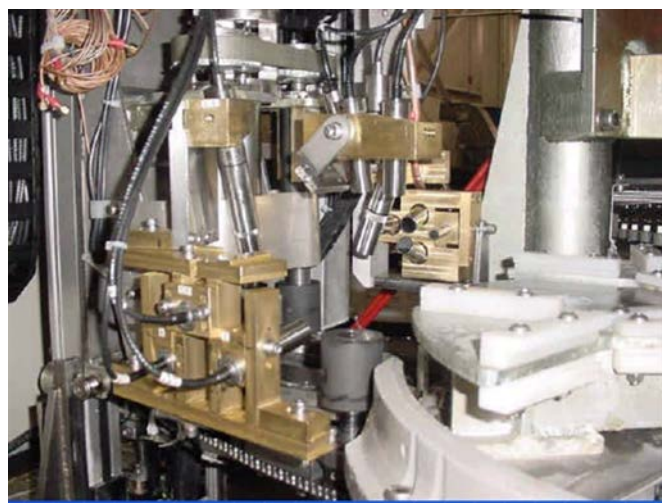
<sup>2</sup> Представлява следствие от възприетата теза, че логистичните разходи в жизнения цикъл трябва да се имат предвид още в ранните фази [5]

тънкостенната част на гилзите се допускат дефекти с дълбочина до една трета от дебелината на стената.

Ултразвукови технологии намират все по-широко приложение за дефектоскопия на различни елементи на артилерийските гилзи. В [7] се предлага ултразвукова система за контрол на дънната част на стоманена 120 mm артилерийска гилза M831A1 (фиг. 2). При процеса на контрол се сканират дъното и страничните стени с общо девет осезателя (фиг. 3).

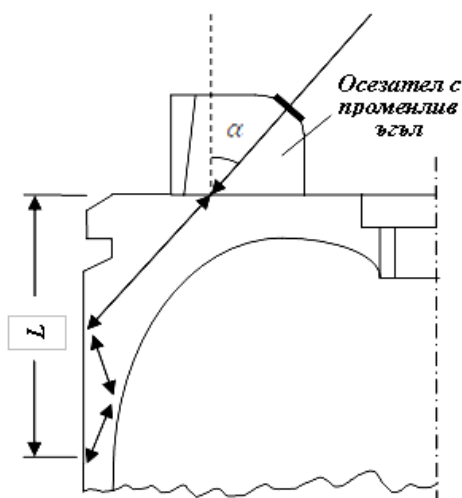


Фиг.2. 120 mm артилерийска гилза M831A1 [7]



Фиг.3. Автоматизирана ултразвукова система за контрол на 120 mm артилерийска гилза M831A1 [7]

Оригинален метод за ултразвуков контрол с напречна вълна е предложен от J. Knichala и др. [6] (фиг.4).

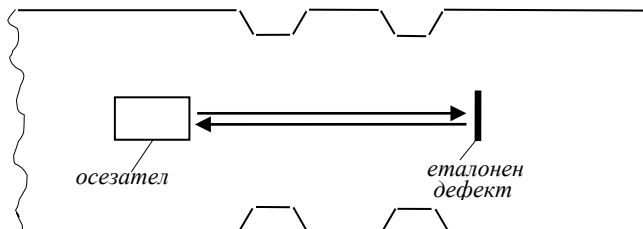


Фиг.4. Ултразвуков контрол на преходната част на артилерийски гилзи [6]

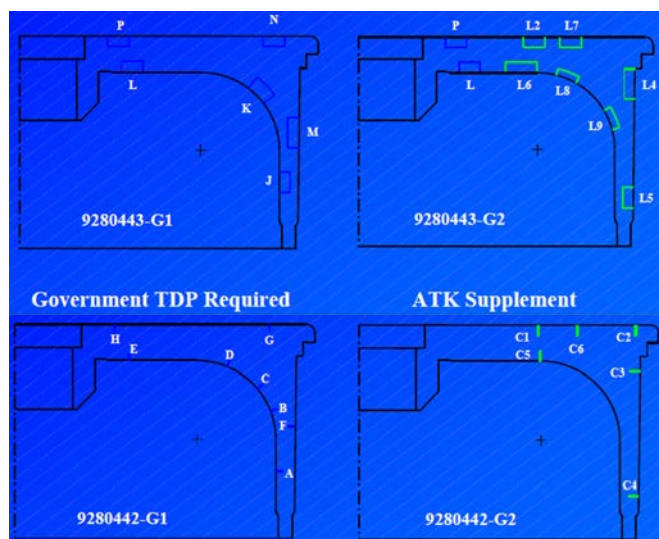
За създаване на методики за дефектоскопия за всеки типоразмер гилзи е необходимо да се изследва

разпространението на ултразвукови вълни в тях. Разпространението на ултразвуковите вълни в тънкостенната част на артилерийски гилзите е представено на фиг.5.

За еталониране на чувствителността при дефектоскопия на тънкостенни тръби се препоръчват резки и канали. Затова се използват резки с ъгъл при върха  $45^\circ$  с дължина по - голяма от ширината на осезателя и дълбоки 0,2 до 1 mm. За имитация на побитости и корозионни язви се използват непроходни отворстия с дълбочина до 1/3 от дебелината на стената.



Фиг.5. Разпространение на ултразвуковите вълни в тънкостенната част на гилзите при еталонен дефект резка, разположена перпендикулярно на оста на гилзата



Фиг.6. Разположение на еталонните дефекти за 120 mm артилерийска гилза M831A1 [7]

### 3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

Целта на настоящето изследване е да се определи зоната на контрол  $L$  (фиг.4) и оптималните ъгли на падане на ултразвуковите вълни, при които се получава максимално отражение от еталонни дефекти в преходната и тънкостенна части на артилерийски гилзи.

Поради особеностите в конструкцията и материала като обект на изследване избираме 57 mm месингова гилза (наличие на канавка в дънната част) и 122 mm стоманена гилза.

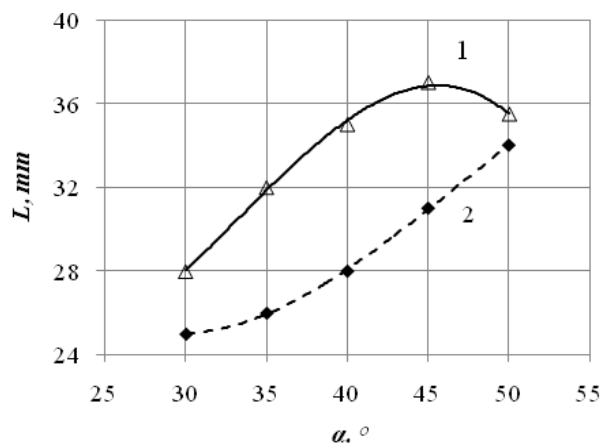
В преходната част се създават еталонни дефекти във вид на проходни и непроходни отворстия с диаметър 1,5 mm. Ултразвукови вълни се възбуждат с осезатели с променлив ъгъл при 2 и 4 MHz. Зоната на контрол  $L$  при различни ъгли на осезателя  $\alpha$  (фиг.4) се определя чрез съвпадане на ехото от страничната стена и сигнала от изкуствен дефект тип отворстие.

За определяне на оптималните ъгли на наклонените осезатели се измерва амплитудата на сигнала от контролен отражател при различни ъгли за въвеждане на ултразвуковите вълни в материала на гилзите.

#### 3.1. Разпространение на ултразвукови вълни в преходната част на гилзите

Зависимостта на зоната на контрол  $L$  от ъгъла на осезателите е представена на фиг.7.

Максималната зона на контрол при 57 mm месингови гилзи е 36 mm при ъгъл на падане на ултразвуковите вълни 45°, а при 122 mm стоманени гилзи същите характеристики са съответно 34 mm и 50°. Тези разстояния от дънния срез на гилзите удовлетворяват изискванията, тъй като цялата преходна част на двата вида изследваните гилзи попада в зоната на контрол.



Фиг.7. Зависимост на зоната на контрол в преходната част от ъгъла на осезателя за 57 mm месингови (1) и 122 mm стоманени (2) гилзи

На фиг.7. са нанесени данните за амплитудата на отразения от контролен отражател сигнал при различни ъгли на осезателя. На ординатната ос е разликата между амплитудите  $|A - A_c|$ , където:

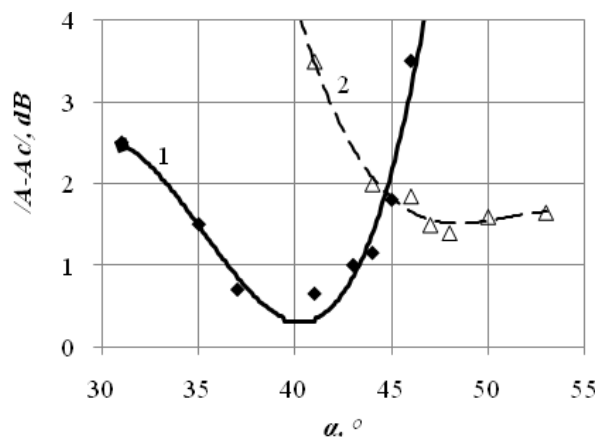
$A$  – амплитуда на отразения от еталонен дефект сигнал, [dB];

$A_c$  – амплитуда на отразения от стената на гилзата ултразвуков импулс, [dB] (ехо от стената).

Графиките показват, че за 57 mm гилза оптималният ъгъл за получаване на максимален сигнал от еталонния дефект е 39÷41°, а за 122 гилза 48 - 49°. Сравнението между данните на фигури 3 и 4 показва, че при оптималните ъгли се достигат максималните зони на контрол на преходната част. Канавката върху дънната част на 57 mm гилзи не води до паразитни сигнали върху екрана на дефектоскопа при контактен способ за въвеждане на ултразвуковите вълни.

### 3.2. Разпространение на ултразвукови вълни в тънкостенната част на гилзите

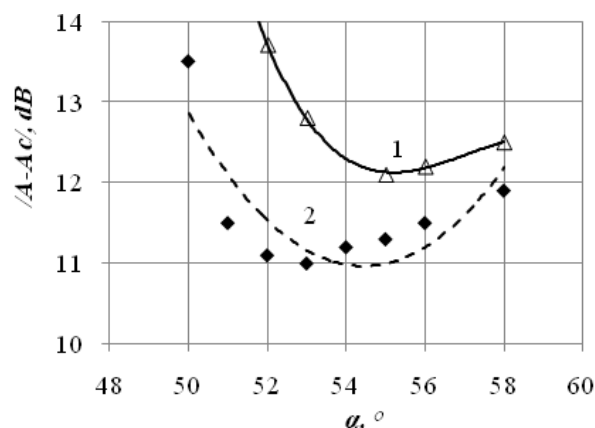
Влиянието на ъгъла на падане на ултразвуковата вълна върху степента на отражение от непроходни отвори е представено на фиг.8. Експерименталните данни, направени по схемата на фиг.5 показват, че при двата вида гилзи отразеният сигнал има максимална стойност при ъгъл на осезателя около 55°.



Фиг. 8. Зависимост на амплитудата на отразения сигнал от ъгъла на падане на ултразвуковата вълна в преходната част на 57 mm месингови (1) и 122 mm стоманени (2) гилзи

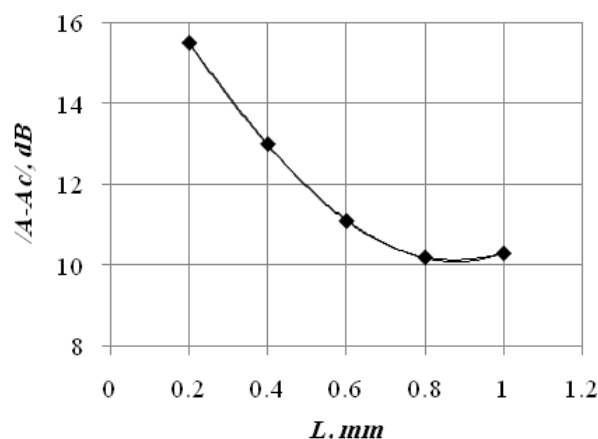
Резултатите за 122 mm стоманени гилзи показаха, че сигналите с дълбочина 0,2 mm трудно се различават на фона на шумовете. Като се има предвид изискването за дълбочина на дефектите 1/3 от дебелината на стената на гилзите може да се приеме като еталонен дефект резка с дълбочина 0,8 mm.

Откриването на пукнатини, разположени успоредно на оста на гилзата, извършваме чрез осезател с фигурна повърхност. Резултатите показаха, че оптималните ъгли за дефектоскопия в областта на канавките за 122 mm стоманени артилерийски гилзи е 45 - 46°, а в ската на 57 mm гилзи – около 45°.



Фиг.9. Зависимост на амплитудата на сигнала от ъгъла на падане на ултразвуковата вълна при еталонни дефекти непроходно отворствие при стоманени (1) и месингови гилзи (2) при 2 MHz

За определяне на чувствителността към дефекти тип пукнатини беше изследвано отражението от резки с различна дълбочина при оптимален ъгъл на осезателя (фиг.10) съгласно схемата на фиг.4.



Фиг.10. Зависимост на амплитудата на отразения сигнал от дълбочината на еталонен дефект тип резка за 122 mm стоманена гилза

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Експерименталните изследвания показват, че чрез ултразвукова дефектоскопия в областта на преходната и тънкостенна част могат да се откриват неизправности, което позволява определяне на качествено състояние на контролираните образци. Зоните на контрол и оптималните ъгли на осезателите зависят от материала и конструкцията на артилерийските гилзи.

Получените резултати позволяват използваните методи да се автоматизират, а от друга позволяват да се разшири

приложението им и за други елементи от боеприпасите – основно корпуси на снаряди.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Генов Б., Логистични аспекти на системата за придобиване на отбранителни продукти, 2009.
2. Грозев В. Дисертация, 1983.
3. AOP-38, ed. 5, Specialist glossary of terms and definitions on ammunition safety, NSA, 2009.
4. Bevan J., Stockpile Management: Accounting, In Conventional Ammunition in Surplus: A Reference Guide, SAS, Geneva, Switzerland, 2008.
5. Buckley et al., Physical Security and Stockpile Management, First RASR workshop, Zagreb, 2009.
6. Knihala J., J. Kowalczyk, R. Lapinski. Dziesita Krajowa Konferencia Badan Nieniszczacych, Jadwisin, 1980.
7. Skeates Art, Development of an Ultrasonic Inspection System for 120 mm Case Base, 38<sup>th</sup> Annual Gun Ammunition and Missiles Symposium, 2003.
8. STANAG 4518 ed. 1., “Safe disposal of munitions, design principles and requirements, and safety assessment”, NSA, 2001.
9. Sun Q., Z. Ma. An Automatic Strength Inspection System for Halved Joint cartridges. – Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007.

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p>Варна<br/>14 - 15.10.2016 г.<br/>София<br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                     |

## АНАЛИЗ НА АКУСТИЧНАТА ОБСТАНОВКА В КОМПРЕСОРНА СТАНЦИЯ С ВИНТОВИ КОМПРЕСОРИ

### ANALYSIS OF THE ACOUSTIC ENVIRONMENT IN COMPRESSOR STATIONS WITH SCREW COMPRESSORS

доц. д-р инж. Пировски Х. А., доц. д-р инж. Драганчев Х. С.

Технически Университет – Варна, България, christo.pirovsky@tu-varna.bg

#### **Abstract:**

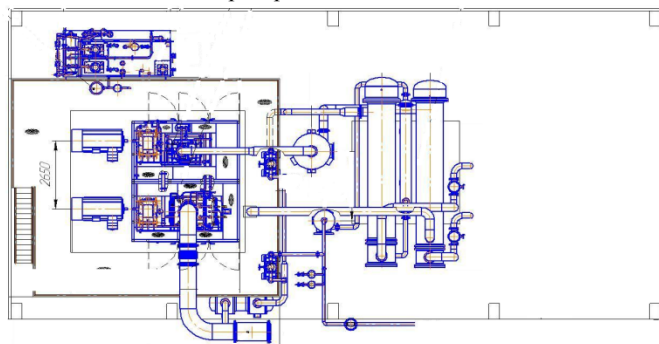
This article submit experimentally and numerically study of the acoustic environment in a screw compressor station for flare gases compressing. The major noise sources in the compressor workshop have been experimentally established. This paper examines the noise field in the workshop and diffuse nature of its spreading has been established. Technical solutions to reduce the noise are proposed in order to achieve acceptable noise levels for industrial enterprises.

**Keywords:** noise sources, gas screw compressors, noise analysis, sound insulation

#### **1. Въведение**

Изграждането на съвременни инсталации в предприятията от нефтопреработвателната промишленост е свързано с оценка на екологичното въздействие. Много от технологичните процеси на обработка и съхранение на горивата са съпътствани с отделяне на факелни газове. С цел те да не се изгарят в атмосферата, през последните години нефтопреработващите предприятия изграждат абсорбционни газофракциониращи инсталации, в които факелните газове се компримират и утилизират. Процесът компримиране представлява технология за промишлена обработка на факелните газове чрез съгъстяване, осъществявано посредством високопродуктивни мощни винтови компресори. Изграждането на подобни инсталации в нефтопреработвателните предприятия има значителен екологически и икономически ефект.

Обектът на настоящото изследване е компресорната уредба за компримиране и утилизация на факелни газове. Уредбата включва два винтови компресора - I-ва и II-ра степен, задвижвани от електродвигатели с честота на въртене  $1200 \div 3000 \text{ min}^{-1}$ , регулирана в зависимост от налягането на газовете на входа на всеки от компресорите. Честотата на въртене на компресорите се повишава с помощта на мултипликатори. На изхода от всеки компресор са монтирани вертикално разположени триамерни стабилизатори на налягане. На фиг. 1 е показана схема компресорната инсталация.



Фиг.1. Схема на компресорната инсталация за компримиране на газове

С цел гарантиране надеждната работа на компресорите, факелните газове преди втора степен се охлаждат и сепарират. Това изисква развито технологично оборудване за транспортиране и обработка на газа: тръбопроводи, охладители, сепаратори и др.

Установено е, че технологичното оборудване в компресорните станции излъчва значителен шум, който се характеризира като инфразвук, нискочестотен, средночестотен и високочестотен шум в честотния диапазон основно до 8kHz [3].

На територията на промишленото предприятие такива компресорни цехове трябва да се изграждат достатъчно отдалечени от постове за управление и административни сгради с цел постигане на определени норми на показателите на шумово въздействие [1].

#### **2. Цели**

Настоящото изследване е проведено с цел идентифициране на основните източници на шум в компресорната зала на инсталация за компримиране на факелни газове на територията на предприятие от нефтопреработвателната промишленост и разработване на мерки за намаляване на шума в компресорния цех и на територията на предприятието.

Реализирането на поставените цели е осъществено чрез:

- анализ на акустичната обстановка вътре и извън компресорния цех при различни режими на работа на компресорната уредба;
- установяване на характера на акустичното поле в рамките на постройката на компресорната уредба;
- оценка на нивото на излъчвания шум на разстояние 1 m от сградата;
- оценка на приноса на отделните източници на шум от работата на компресорната уредба;
- разработване на технически решения за намаляване на излъчвания от компресорния цех шум.

### 3. Обследване на акустичната обстановка в района на компресорен цех

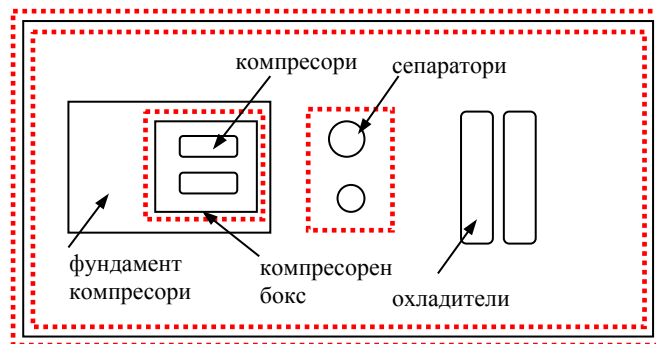
#### 3.1.Методика на изследването.

Обследването на акустичната обстановка вътре и извън сградата на компресорния цех е извършено при различни режими на работа на компресорната уредба от 8700 до 14800 nm<sup>3</sup>. Измерванията са проведени на разстояние 1 м от стените на цеха. Аналогични измервания са проведени около и в компресорния бокс, както и около сепараторите за I-ва и II-ра степен на компресорите. Обследването е извършено с помощта на прецизен анализатор на шум Brüel&Kær 2250.

С цел потвърждаване на твърдението, че шумовото поле в сградата на компресорната уредба, предвид ниското шумопоглъщане на обшивката на стените и покрива на сградата, е дифузно, е проведено измерване на нивото на шум по периферията на сградата от външната и вътрешната страна на височина 6 m.

#### 3.2.Анализ на получените резултати. Определяне на основните източници на шум

На фиг. 3.1 са показани с пунктир позициите на измерване на шума извън и вътре в сградата на компресорния цех, около компресорния бокс и сепараторите.



Фиг. 3.1. Позиции на измерване на шума извън и вътре в сградата на компресорния цех

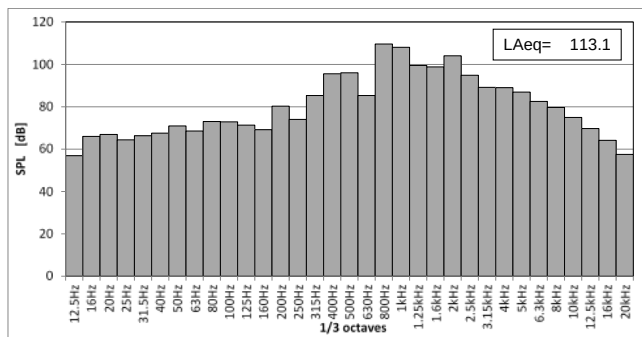
В резултат на проведените изследвания могат да се обособят две групи източници:

- тръбопроводи, глушители и сепаратори;
- компресорни агрегати на I-ва и II-ра степен.

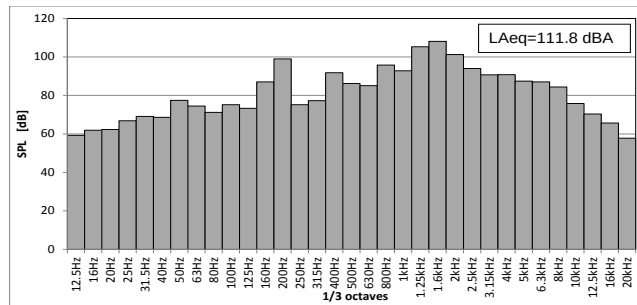
На фиг. 3.2 и 3.3 са представени 1/3 октавни спектри на шума измерени съответно в близост до сепаратор на газа преди II-ра степен и компресор II-ра степен.

Максималните нива на шум, измерени от втората група източници на шум, монтирани в бокс с шумопоглъщащо покритие на стените, са както следва:

- компресор 1-ва степен - 108.3 dBA;
- компресор 2-ра степен – 111.8 dBA



Фиг. 3.2. Терцоктавен спектр на шума от сепаратор II-ра ст.



Фиг. 3.3. Терцоктавен спектр на шума от компресор №2.

Представените нива на шума са измерени като максимални при изследване шумоизлъчването от компресорите при различен дебит на компресорната уредба.

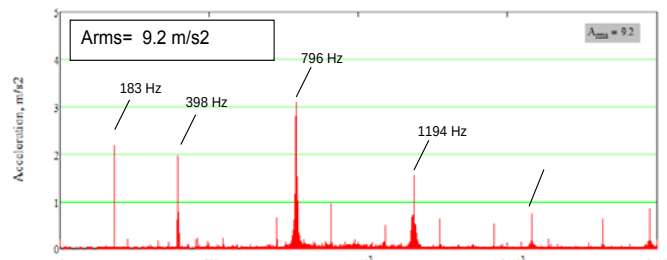
Терцоктавните спектри на шума, измерени над компресор 1-ва степен (фиг. 3.2), са с преобладаващи хармоници в следните терцоктавни ленти 200 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1,25 kHz, 1,6 kHz, съответстващи на 1-ви, 2-ри, 3-ти и 4-ти винтови хармоници на компресора. Аналогичен е терцоктавният спектр на шума, измерен в близост до сепаратора след 1-ва степен. Причината за повишените нива на шум в зоната на сепаратор след 1-ва степен са пулсациите на налягане, възбуждащи повишени вибрации на цилиндричната черупка на съда под налягане.

Терцоктавните спектри на шума, измерени над компресор 2-ра степен (фиг. 3.3), са с преобладаващи хармоници в следните терцоктавни ленти 200 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1,25 kHz, 1,6 kHz, 2kHz, съответстващи на 1-ви, 2-ри, 3-ти, 4-ти и 5-ти винтови хармоници на компресора. Аналогичен е терцоктавният спектр на шума, измерен в близост до сепаратора след 1-ва степен. Причината за повишените нива на шум в зоната на сепаратор след 2-ра степен са пулсациите на налягане, възбуждащи повишени вибрации на цилиндричната черупка на съда под налягане.

Анализът на диаграмите на шумоизлъчване от бокса на винтовите компресори, показва, че ефектът от реализираните проектни решения за шумоизолация на винтовите компресори е минимален, тъй като максималното ниво на шум от компресор 2-ра степен е 111.8 dBA, а нивото на шум извън бокса е 107 dBA, т.е. шумоизолацията е само 3 dBA.

Анализът на диаграмите на разпространение на шума в сградата на компресорната уредба, показва, че нивата на шум, измерени на разстояние 1 m от стените на сградата и около бокса на компресорите се намират в диапазона 101 dBA ÷ 107 dBA. Следователно звуковото поле в целия обем на сградата може да се счита, че е дифузно. Причината за това е ниското звукопоглъщане на стените и покрива на сградата;

Измерените вибрации в различни точки на стените на сградата и анализът на амплитудночестотните им спектри показват, че звуковото поле, генерирано от източниците на шум от компресорната уредба, възбужда резонансни трептения на обшивката (гофрираната ламарина) с амплитуда на виброускорението между 8 и 9 m/s<sup>2</sup>. В резултат на тези вибрации се увеличава шумоизлъчването от сградата на компресорната инсталация, (фиг.3.4).

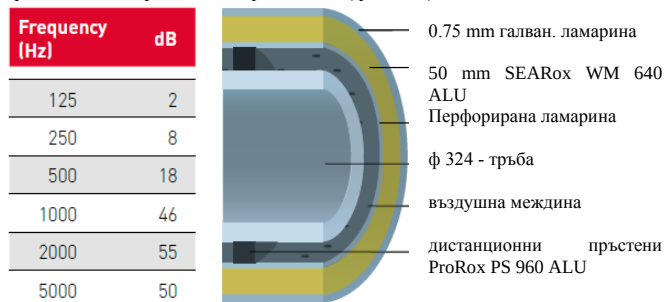


Фиг. 3.4. Виброускорение на стените на компресорния цех.

#### 4. Технически решения за намаляване на нивото на излъчвания шум в КС

##### 4.1. Технически решения за намаляване на нивото на излъчвания шум от тръбопроводи, сепаратори на газ и шумоглушители.

За намаляване на шумоизлъчването от глушителите на шум след 1-ва и 2-ра степени на компресорната уредба и на тръбопроводите, транспортиращи газ с температура  $\leq 150^{\circ}\text{C}$  е предложено принципно решение (фиг.4.1).



Фиг.4.1 Принципно решение за намаляване на шумоизлъчването от глушителите на шум и тръбопроводите, транспортиращи компресиран газ с температура  $\leq 150^{\circ}\text{C}$

Елементите на предложената звукоизолация на глушителите и тръбопроводите включва:

- въздушна междина от 50 mm, между стоманената тръба и шумопоглътящия материал, която се осигурява чрез сегменти от изолационния материал ProRoxPS960ALU или от дистанционни втулки с дължина 100 mm, върху които са монтирани сектори с перфорирана ламарина с дебелина 0.75 mm;
- минерална вата тип SeaRox SL – 340 с дебелина 50 mm;
- обшивка на минералната вата с галванизирани ламарина с дебелина 0.75 mm.

На фиг. 4.1 е показана звукоизолацията по октавни ленти от 125 Hz до 4 kHz на предложената звукоизолираща конструкция [5].

В таблица 4.1 са показани прогнозните резултати от пресмятането на изменението на звуковата мощност, излъчвана от тръба с дължина 1 m и Ду 324 mm, по октавни ленти и по А-претеглено еквивалентно ниво на шума. Прогнозното ниво за намаляване на звуковата енергия, излъчвана от тръба с Ду 324mm, е 33 dB [5].

Таблица 4.1

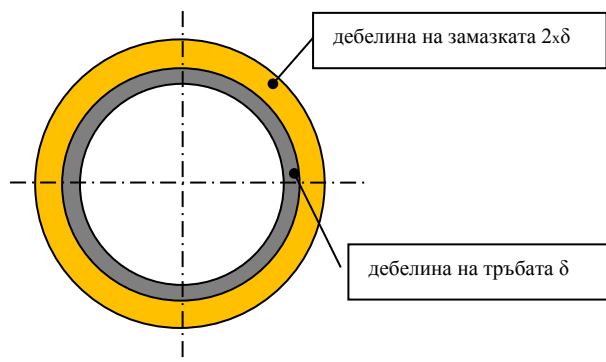
| 1/1 Hz        | Терцоктавни ленти в октавата dB |       |       | 1/1 ниво dB | Филтър А корекция | Звуко-изолация корекция | L при звукоизолация, dBA |
|---------------|---------------------------------|-------|-------|-------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|
| 125           | 67.8                            | 67.0  | 76.9  | 77.8        | -16.1             | -2                      | 59.7                     |
| 250           | 89.7                            | 72.7  | 81.6  | 90.4        | -8.8              | -8                      | 73.6                     |
| 500           | 91.9                            | 88.9  | 88.6  | 94.8        | -3.2              | -18                     | 73.6                     |
| 1k            | 105.8                           | 101.3 | 104.1 | 108.8       | 0.0               | -46                     | 62.8                     |
| 2k            | 98.6                            | 98.2  | 95.0  | 102.3       | +1.2              | -55                     | 48.5                     |
| 4k            | 91.3                            | 88.1  | 85.6  | 93.7        | +1.0              | -50                     | 44.7                     |
| $L_{A\Sigma}$ |                                 |       |       | 110.0       |                   |                         | 76.8                     |

За намаляване на шумоизлъчването от сепараторите след 1-ва и 2-ра степени на компресорната уредба и на тръбопроводите, транспортиращи газ с температура  $\leq 40^{\circ}\text{C}$  са предложени следните технически решения:

- решение 1 – показаното на фиг 4.1 техническо решение;
- решение 2 – показаното на фиг. 4.2 и включващо:
  - вибропоглътящо покритие по повърхността на тръбопроводите и цилиндричната повърхност на сепараторите с дебелина 2 пъти дебелината на стената на тръбопроводите и сепараторите;

- минерална вата тип SeaRox SL – 340 с дебелина 2x50 mm;
- обшивка на минералната вата с галванизирани ламарина с дебелина 0.75 mm.

Вибропоглътящото покритие към техническо решение №2 за стените на тръбопроводите и сепараторите след 1-ва и 2-ра степени на компресора могат да бъдат изпълнени от замазка вибропоглътяща ВПМ-1, производство на фирма Ергос, Русия. Едновременно с намаляване на нивото на излъчвания от тръбопроводите и апаратите шум чрез покритието с вибропоглътяща замазка се постига и значително намаляване на вибрациите им, т.е. се повишава ресурсът им.

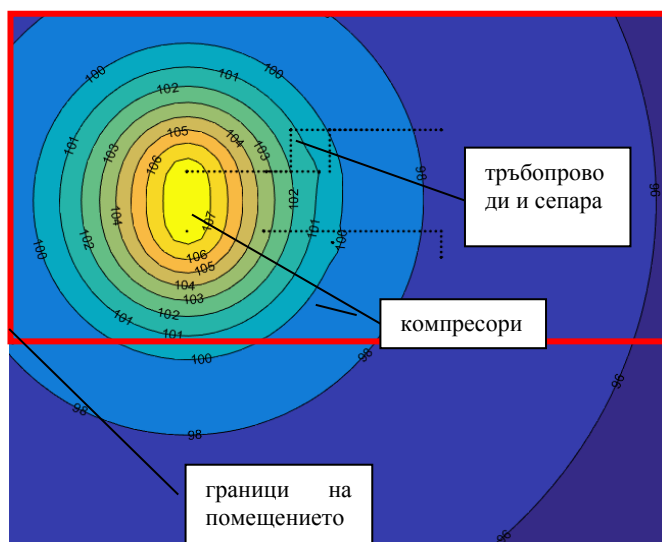


Фиг.4.2 Принципно решение №2 за намаляване на шумоизлъчването от сепараторите след 1-ва и 2-ра степен на компресорната уредба и тръбопроводите, транспортиращи компресиран газ с температура  $\leq 40^{\circ}\text{C}$

Изчисленото прогнозно ниво на намаляване на звуковата енергия, излъчвана от тръба или цилиндричен съд под налягане с дължина 1 m, при реализация на решение №2 е 34 dB.

На фиг. 4.3 е показано прогнозно звуковото поле [4] в машинното помещение на компресорната уредба и разпространението на шума пред помещението предвид отвор на сградата след реализация на решение 1 или решение 2, показани на фиг.4.1 и 4.2.

С червена линия са означени габаритите на сградата, с пунктирна линия моделираните тръбопроводи и като точкови източници компресор 1-ва степен и компресор 2-ра степен. Тъй като диаграмата на разпространение на шума е показана за сечение, разположено на височина 1.5 m от пода на помещението, вертикалните сепаратори на фигурата са показани като точкови източници. На фигурата през 1 dB са очертани изолиниите с еднакво ниво на шум.



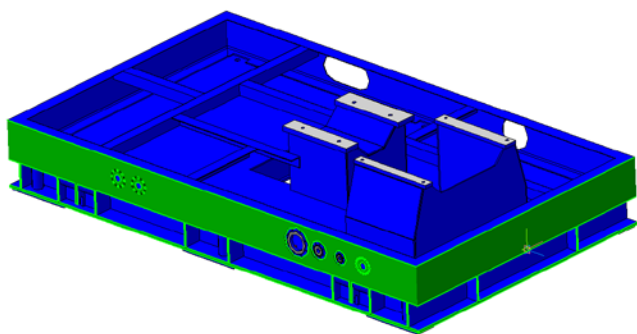
Фиг.4.3 Прогнозно звуково поле в машинна зала и пред сградата на компресорната уредба при реализация на решение 1 или решение 2

предложените решения за намаляване на шумоизлъчването от глушителите на шум, сепараторите и тръбопроводите

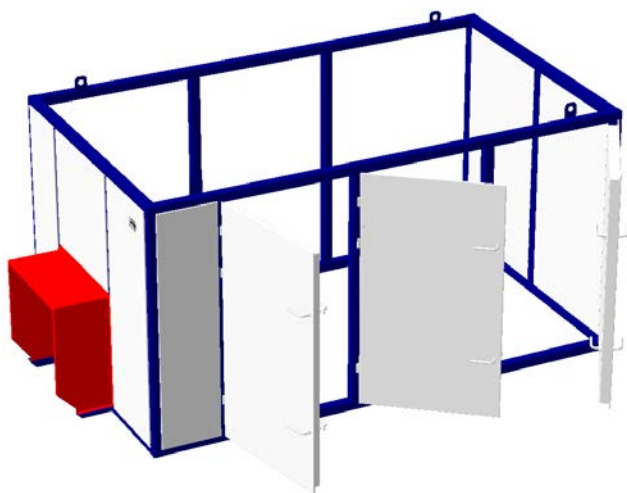
Анализът на представената на фиг. 4.3 диаграма на разпространение на шума в машинна зала и пред сградата на компресорната уредба при реализация само на предложените решения за намаляване на шумоизлъчването от глушителите на шум, сепараторите и напорните тръбопроводите показва, че тяхното прилагане не води до изпълнение на изискванията за намаляване на шума от компресорната уредба съгласно техническите изисквания към проекта. Необходимо е разработването на мерки за намаляване на нивото на шум и от другия основен източник – винтовите компресори.

#### 4.2. Технически решения за намаляване на нивото на излъчвания шум от винтовите компресори

Компресорите са монтирани върху масивен бетонен фундамент на отделни метални конструкции с кутиеобразна форма, показани на фиг. 4.4, в страниците на които са изрязани отвори за преминаване на маслени и охлаждащи тръбопроводите. Върху страничните стени на двата фундамента са монтирани звукоизолираните стени на бокса на компресора (фиг. 4.5). Звукоизолираните стени са изградени от следните елементи: метална обшивка, звукопоглъщащ материал от минерална вата с дебелина 100 mm и перфорирана ламарина с отвори с диаметър 10 mm.



Фиг. 4.4 Фундамент на винтов компресор

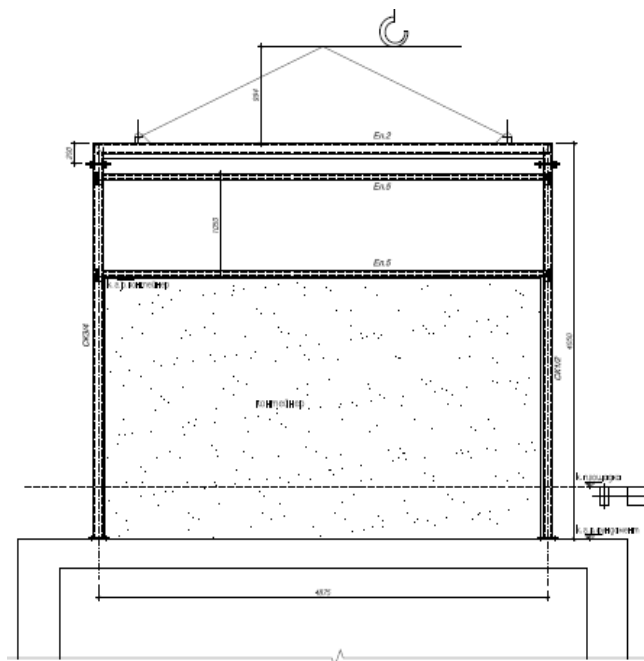


Фиг.4.5 Общ вид на стените на звукоизолирания бокс за компресорите

Звукоизолацията на стените на бокса при използване на минерална вата с дебелина 100 mm е 40 dB. Звукоизолацията на помещението на бокса на компресорите като цяло е 5.4 dB при отчитане на отвора над компресорите с площ 21.37 m<sup>2</sup> и коефициент на звукопредаване 1, както и стени с обща площ 53.7 m<sup>2</sup> и коефициент на звукопредаване 10<sup>-4</sup>), т.е. ефектът от

звукоизолацията на бокса на компресора така, както е предвидено от производителя е нищожен.

За повишаване на звукоизолацията на бокса на компресорите е предложено надграждане на стените на бокса с 1 m върху колони, монтирани на бетонния фундамент в непосредствена близост до стените на бокса и затваряне на бокса отгоре с таванен звукоизолиращ панел със звукоизолация R = 40 dB (таванният панел е звукоизолиран с минерална вата тип SeaRox SL – 340 с дебелина 2x50 mm) На фиг. 4.6 е показан общият вид на бокса с надградените стени и таванния звукоизолиращ панел. Таванният панел е закрепен към носещите колони с болтове, което позволява по време на ремонт помещението на бокса да се отвори и таванният панел да се премести с крана, така че да не пречи на ремонтната дейност.



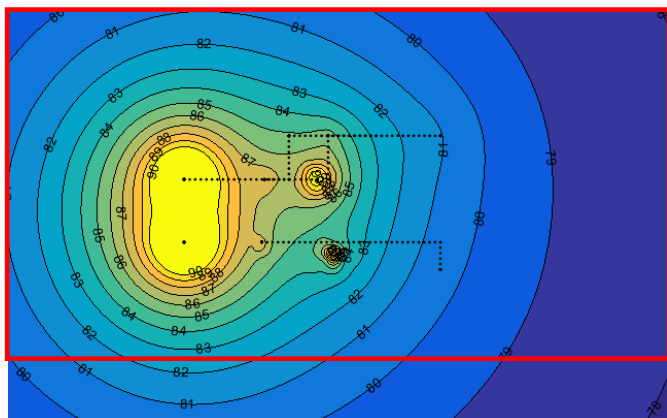
Фиг. 4.6 Общ вид на бокса с надградени стени с височина 1050 mm и таванен звукоизолиран панел

Надграждането на стените на бокса се налага поради наличието на тръбопроводите, подаващи факелен газ към компресор 1-ва степен и компресиран газ към компресор 2-ра степен, както и тръбопроводите за подаване на вода и пара за охлаждане на газа на изход от компресор 2-ра степен. Височината на горния ръб на входящия в компресор 1-ва степен тръбопровод е приблизително 800 mm над горния ръб на стените на бокса. Отворите около проходите в стените за тръбопровод вход в 1-ва степен, тръбопровод вход във 2-ра степен и тръбопроводите за впръскване на вода и пара в компресор 2-ра степен е предвидено да се уплътнят със звукопоглъщащи възглавници /общита със минерална вата с дебелина 50 mm/. В този случай звукоизолацията на бокса ще бъде 28.4 dB.

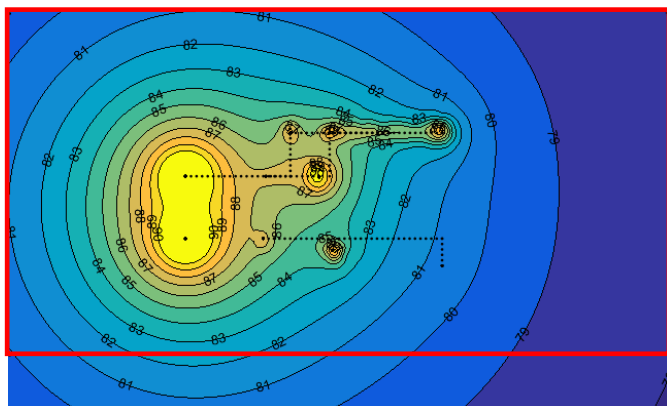
Звукоизолацията на стените на металните фундаменти с дебелина на стената 12 mm за октавни ленти 500 Hz, 1kHz, 2 kHz и 4 kHz е 39.7 dB. При изследваната компресорна уредба обаче предвид високочестотния характер на вибрациите, възбудени от мултипликаторите и от компресори 1-ва и 2-ра степени, тези стени се явяват допълнителен вибрационен източник на шум в машинното помещение. За намаляване на този ефект се предлага обмазване на страничните стени на фундаментите на винтовите компресори с вибропоглъщаща замазка тип Terophon 112 DB или ВПМ-1 с дебелина 24 mm.

На фиг. 4.7 е представено прогнозното акустично поле в машинното помещение на компресорната уредба и

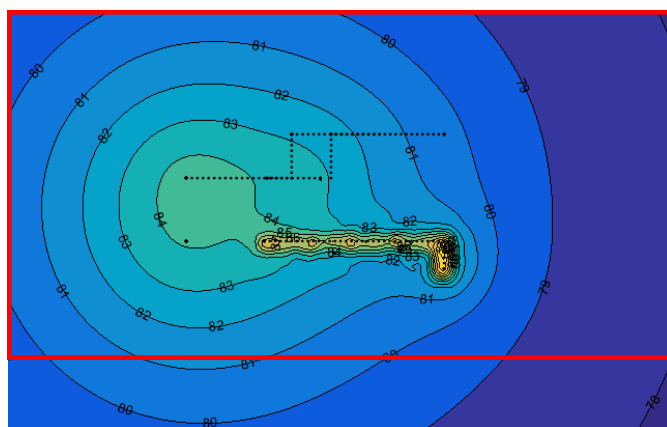
разпространението на шума пред помещението предвид отвората на сградата. Представените прогнозни резултати след реализация на предположенията за намаляване на нивата на шум на глушителите, сепараторите и свързващите ги тръбопроводи, както и след реализация на предложението за намаляване на шумоизлъчването от винтовите компресори. С червена линия са означени габаритите на сградата, с пунктирна линия моделираните тръбопроводи и като точкови източници компресор 1-ва степен и компресор 2-ра степен. Тъй като диаграмата на разпространение на шума е показана за 3 сечения (фиг. 4.7 а, б, в), разположени съответно на височина 1.5 m, 3 m и 6 m от пода на помещението, вертикалните сепаратори на фигурата са показани като точкови източници, независимо че в разчетния модел са моделирани като линейни източници на шум. На фигурите през 1 dB са очертани изолиниите с еднакво ниво на шум.



Фиг. 4.7а Прогнозно акустично поле на височина 1.5m



Фиг. 4.7б Прогнозно акустично поле на височина 3m



Фиг. 4.7в Прогнозно акустично поле на височина 6m

В таблица 4.3 са показани стойностите на измереното еквивалентно А-претеглено ниво на шум в точки А1 ÷ А10, разположени по отворената стена на сградата на компресорната уредба и прогнозните нива на шум в същите точки при реализиране на разработените мерки за намаляване на нивото на шума от изследваната инсталация.

Таблица 4.3

|                       | A1   | A2    | A3    | A4    | A5    | A6    | A7    | A8    | A9    | A10   |
|-----------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $L_{A \text{ изм.}}$  | 97.8 | 100.6 | 102.5 | 102.9 | 104.0 | 102.6 | 102.4 | 101.8 | 100.6 | 100.5 |
| $L_{A \text{ прог.}}$ | 79.9 | 81.2  | 82.3  | 81.9  | 80.8  | 80.3  | 79.8  | 79.2  | 78.7  | 78.3  |
| $\Delta L$            | 17.9 | 19.4  | 20.2  | 21    | 23.2  | 22.3  | 22.6  | 22.6  | 21.9  | 22.2  |

С предложените мерки за намаляване на нивото на шума в сградата на компресорната уредба се постига изпълнение на изискванията нивото на шум, измерено на разстояние 1 m от периметъра на сградата да бъде по-ниско от 85 dBA. Максималните прогнозни нива на шум по дължина на отворената стена на сградата на компресорната уредба (точки А1 ÷ А11) са по-ниски от 83 dBA и удовлетворяват изискванията. Едновременно с това значително се понижава нивото на шум по територията на промишленото предприятие, с което се изпълняват нормите на шум [1] за промишлени територии.

## 6. Изводи

Извършеното експериментално и числено изследване на акустичната обстановка в КС и предложените технически решения за намаляване нивото на излъчения шум позволяват да бъдат направени следните по-важни изводи:

- компресорите за компримиране на газа трябва да бъдат разположени в закрит звукоизолиран бокс;
- всички тръбопроводи, глушители и сепаратори в зависимост от работната им температура трябва да бъдат надлежно шумоизолирани;

В резултат на проведените изследвания, разкриващи причините за влошената акустичната обстановка в компресорната станция и разработените технически решения за намаляване на излъчвания от основните източници на шум са постигнати следните резултати:

- прогнозните нива на шум до сградата на поста за управление на КС превишават с 1 ÷ 3 dBA граничните;
- прогнозните нива на шум на територията на съседните производствени сгради са по-ниски от граничните;
- прогнозните нива на шум на територията на административните сгради са по-ниски от граничните.

## Литература

1. Наредба №6 от 26 юни 2006 г. за показателите на шум в околната среда, отчитащи степента на дискомфорт през различните части на денонощието...
2. ISO 9613 – 2; 1996, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation.
3. СТО Газпром 2-3.5-041-2005, Каталог шумовых характеристик газотранспортного оборудования.
4. Пировски Х. А. , Драганчев Х.С. "Изследване на ефективността на стабилизатори на налягане в уредба за компримиране и утилизация на факелни газове", "Акустика" 2015, бр. 17, год. XVII, 2015, ISSN 1312-4897
5. ROCKWOOL, Technical Insulation, The Acoustic Manual

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p style="margin: 0;"><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p style="margin: 0;"><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                                                            |

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИНФРАЗВУКОВАТА И НИСКОЧЕСТОТНАТА ШУМОВА ЕКСПОЗИЦИЯ НА ЕКИПАЖИТЕ НА ТЪРГОВСКИТЕ КОРАБИ

### STUDY OF INFRA AND LOW FREQUENCY NOISE EXPOSURE OF CREWS OF MERCHANT SHIPS

доц. д-р инж. Драганчев Х. С. , доц. д-р инж. Пировски Х. А.

Технически Университет – Варна, България, christo.pirovsky@tu-varna.bg

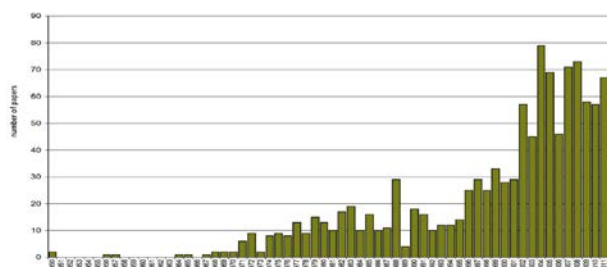
#### **Abstract:**

The study was conducted to assess the exposure of infrasound and low frequency noise in the premises of merchant vessels. As a result of experimental studies of 10 series merchant ships it found that levels of infrasound and low frequency noise in ship premises greatly exceed the standards of infrasound and low frequency noise for industrial premises, i.e. working conditions and rest of the crew members have a moderate risk to their health. It is recommended to include regulations for infrasound and low frequency noise in the next update of the noise regulations for the ships.

**Keywords:** *infranoise, low-frequency noise, crew exposure, merchant ships, noise regulations*

#### **1. Въведение**

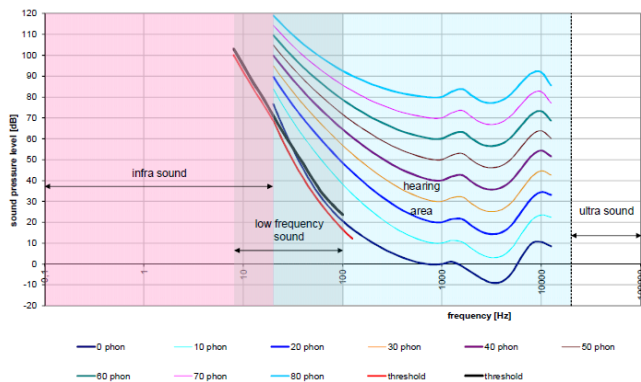
Една от целите на Морската трудова конвенция (MLC,2006) [1], приета от Международната организация на труда (ILO) на 07.02.2006 г. и ратифицирана от НС на Р. България през 2013 г. [2], е определяне на условията на труд, почивка и сън на екипажите на търговските кораби, плаващите платформи и други офшорни съоръжения. Относно осигуряването на нормални условия на труд и почивка на корабите и морските съоръжения от гледна точка на параметъра шум на работните места, откритите площи, общите помещения за хранене и рекреация и кабините MLC,2006 приема като критерии за допустимите нива на шум в корабните помещения разработените от международната морска асоциация (ИМО) норми за шум [3,4]. Морските класификационни организации, наблюдаващи проектирането, строителството и експлоатацията на корабите, за корабните помещения на търговските кораби обикновено приемат нормите на MLC,2006 [6], а за пътническите кораби както и за платформите на офшорните съоръжения разработват норми за комфорт [5, 7, 8]. Граничните нива на шум в корабните помещения се нормират по А- претеглено еквивалентно ниво на шум, dBA, т.е. разгледаните по-горе документи пренебрегват нискочестотното и инфразвуковото въздействие върху членовете на екипажа. Анализът на публикациите, посветени на изследване влиянието на нискочестотното и инфразвуковото въздействие върху здравословното състояние на човека показва, че през последните 15 години значително се е повишил интересът на изследователите към тези проблеми. На фиг. 1 е показано изменението на броя публикации в световен мащаб по години, посветени на изследване влиянието на инфразвуковото и нискочестотното шумово натоварване върху човека [9], през последните 65 години.



Фиг. 1. Изменение на броя публикации в световен мащаб по години, посветени на изследване влиянието на инфразвуковото и нискочестотното шумово натоварване върху човека [9]

На фиг. 2 са показани кривите на еднаква сила на чуване, границите на инфразвуково и нискочестотно шумово натоварване и долната граница на възприемане от човека на нискочестотен шум съгласно DIN 45660,2011. Необходимо е да се отбележи, че горната гранична честота на нискочестотното звуково поле според различните изследователи варира от 100 Hz до 200 Hz. Изследванията показват, че по начин на възприемане от човека и по начин на разпространение в околната среда нискочестотният шум е по-близо до инфразвука отколкото до средночестотния и високочестотния шум. Основните разлики между нискочестотния и средно и високочестотния шум са:

- отслабване на възприемането за тонов шум при честота по-ниска от 60Hz;
- възприемане на звуците като пулсации на налягане;
- по-бързо нарастване на силата на чуване и нарастване на дразнещото въздействие върху човека с повишаване на звуковото налягане при ниските честоти по сравнение със средните и високите честоти;
- усещане на нискочестотния шум като повишени пулсации на налягане;
- по-малки загуби при разпространение на нискочестотния шум във въздуха и при преминаване през прегради.



Фиг. 2 Криви на еднаква сила на чуване, границите на инфразвуковото и ниско-честотно шумово натоварване и долна граница на възприемане от човека на нискочестотен шум съгласно DIN 45660,2011

Практиката на проектиране, строителство и изпитване на корабите показва, че в настоящият момент независимо от наличието на корабите на източници на инфразвук и нискочестотен шум, както и наличието на високо инфразвуково натоварване при плаване в неблагоприятни атмосферни условия, нискочестотното и инфразвуковото натоварване на екипажите на търговските кораби се подценява и не се контролира.

## 2.Цели

Целите на настоящото изследване са:

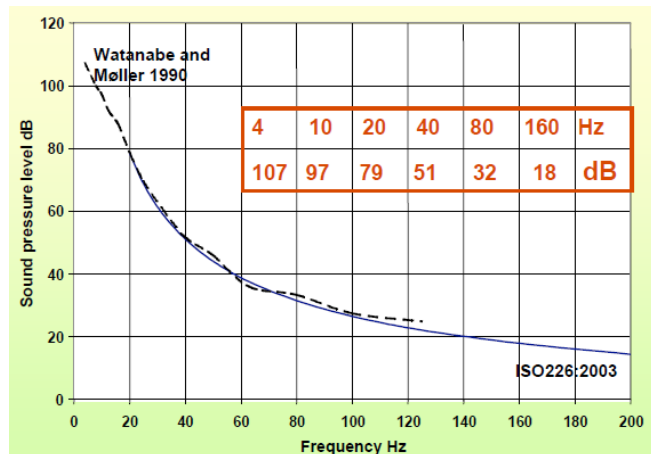
- изследване на инфразвуковото и нискочестотното натоварване на екипажите на две групи търговски кораби със съответно нискооборотен и среднооборотен главен дизелов двигател;
- оценяване на инфразвуковото и нискочестотното шумово натоварване на екипажа на изследваните кораби съгласно санитарните норми за промишлен шум.

Реализацията на поставените цели се постига чрез :

- анализ на нормите за инфразвук и нискочестотен шум на жилищни и промишлени територии;
- измерване на инфразвука и нискочестотния шум на две групи търговски кораби със съответно нискооборотен и среднооборотен главен дизелов двигател;
- изследване на източниците на инфразвук и нискочестотен шум на корабите;
- предложения за нормиране на нискочестотния шум и инфразвука на корабите.

## 3. Анализ на нормите на инфразвук и нискочестотен шум.

При нормиране на допустимите нива на нискочестотен шум и инфразвук като базови се използва нормалният праг на чуване (на субективно възприемане) на нискочестотния шум и прагът на субективно възприемане на инфразвук от човека, определени от Watanabe и Miller през 1990 г. На фиг. 3 за показани долният праг на чуване съгласно ISO 226.2003 и прагът на субективно възприемане на инфразвук от човека, определени от Watanabe и Miller [10]. Праговата линия, показана на фиг. 3, е определена като средна стойност на границата на чуване от доброволци на възраст между 18 и 25 години. Около 6% от тях са с повишена чувствителност > 6 dB от показаният на фиг. 3 праг на чуване, а 2% - с повишена чувствителност > 12 dB [10]

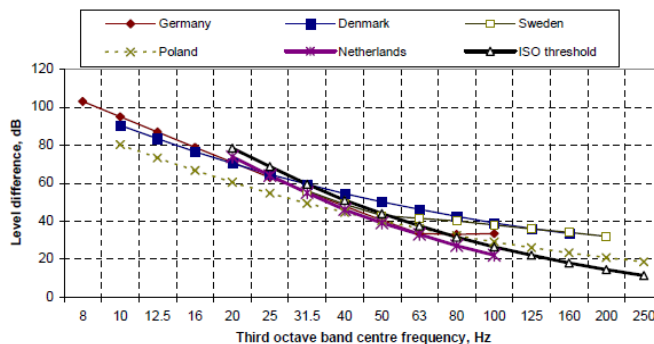


Фиг. 3. Долен праг на чуване съгласно ISO 226.2003 и прагът на субективно възприемане на инфразвук от човека, съгласно Watanabe и Miller, 1990 [10]

В таблица 1 и на фиг.4 са показани референтните криви на стандартите на Германия, Швеция, Дания, Полша и Великобритания и долния праг на чуване на нискочестотен шум съгласно ISO 226.2003[11].

Таблица 1. Референтни криви на стандартите на Германия, Швеция, Дания, Полша и Великобритания и долен праг на чуване съгласно ISO 226.2003 за нискочестотен шум [11]

| 1/3 окт. | ISO226 | Германия | Велико-британия | Швеция | Дания               | Полша               |
|----------|--------|----------|-----------------|--------|---------------------|---------------------|
| Hz       | dB     | dB       | dB              | dB     | L <sub>A20</sub> dB | L <sub>A10</sub> dB |
| 8        |        | 103      |                 |        |                     |                     |
| 10       |        | 95       | 92              |        | 90.4                | 80.4                |
| 12.5     |        | 87       | 87              |        | 93.4                | 83.4                |
| 16       |        | 79       | 83              |        | 76.7                | 66.7                |
| 20       | 74.3   | 71       | 74              |        | 70.5                | 60.5                |
| 25       | 65     | 63       | 64              |        | 64.7                | 54.7                |
| 31.5     | 56.3   | 55.5     | 56              | 56     | 59.4                | 49.3                |
| 40       | 48.4   | 48       | 49              | 49     | 54.6                | 44.6                |
| 50       | 41.7   | 40.5     | 43              | 43     | 50.2                | 40.2                |
| 63       | 35.5   | 33.5     | 41.3            | 41.5   | 46.2                | 36.2                |
| 80       | 29.8   | 28       | 40              | 40     | 42.5                | 32.5                |
| 100      | 25.1   | 23.5     | 38              | 38     | 39.1                | 29.1                |
| 125      | 20.7   |          | 36              | 36     | 36.1                | 26.1                |
| 160      | 16.8   |          | 34              | 34     | 33.4                | 23.4                |
| 200      | 13.8   |          |                 | 32     |                     | 20.9                |
| 250      | 11.2   |          |                 |        |                     | 18.6                |



Фиг.4. . Референтни криви на стандартите на Германия, Швеция, Дания, Полша и Великобритания и долен праг на чуване съгласно ISO 226.2003 за нискочестотен шум [11]

Нормите на Дания за инфразвук и нискочестотен шум в жилищни помещения, класни стаи и офиси са показани в таблица 2. Инфразвукът се нормира чрез измерване на G-

претегленото еквивалентно ниво на звуково налягане  $L_{pG}$ , нискочестотният шум се нормира чрез измерване на А-претегленото еквивалентно ниво на шум в честотната лента 10 Hz ÷ 160 Hz  $L_{pA,LF}$ , а нормалният шум – чрез измерване на А-претегленото ниво на звуково налягане,  $L_{pA}$ , При наличие на импулсен шум се назначават пеналти от 5 dB.

**Таблица 2.** Норми на Дания за инфра звук и нискочестотен шум

| Предназначение на помещенията | Инфразвук, $L_{pG}$ , dB | Нискочестотен шум 10Hz ÷ 160 Hz, $L_{pA,LF}$ , dB | Нормален шум, $L_{pA}$ , dB |
|-------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|
| Жилищни, вечер и нощ          | 85                       | 20                                                | 30; 25                      |
| Жилищни, ден                  | 85                       | 20                                                | 30 /ден и вечер/            |
| Класни стаи                   | 85                       | 30                                                | 40                          |
| Други стаи в предприятия      | 90                       | 35                                                | 50                          |

Санитарните норми на Руската федерация [12] нормират инфразвук в октавните ленти 2 Hz, 4Hz, 8 Hz и 16 Hz .

В случай, че колебанията на звуковото налягане обхващат както инфразвуковия честотен диапазон  $\leq 20$ Hz така и звуковия диапазон 20Hz ÷ 20kHz, измерването и оценката на звуковото налягане на инфразвук се явява допълнителна към измерването и оценката на шума в съответствие със „Санитарните норми на шум на работните места, помещенията в жилищните и обществени сгради и на жилищните територии“ и ГОСТ 12.1.003 “Шум. Общи изисквания за безопасност“.

В санитарните норми за шум се нормират както А-претеглените ефективни нива на шум така и нивата на шум в октавните ленти от 31.5 Hz до 8 kHz, т.е. по този начин се нормира и нискочестотният шум. В таблица 3 са показани Санитарните норми на Руската федерация „Инфразвук на работните места, в жилищните и обществените помещения и на жилищните територии“.

**Таблица 3.** Санитарни норми на Руската Федерация

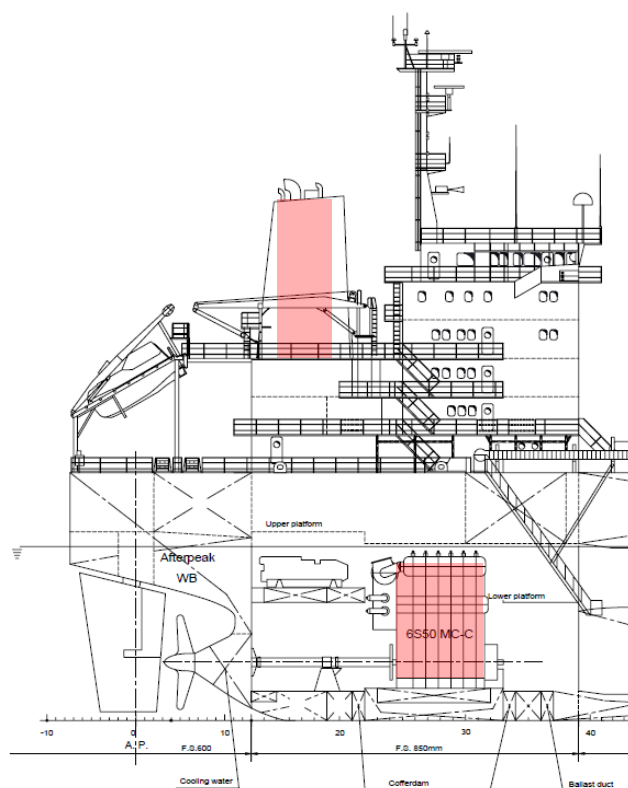
| № | Предназначение на помещението                                                                                                 | Ниво на звуково налягане, $f_{oct}=2$ Hz, dB | Ниво на звуково налягане, $f_{oct}=4$ Hz, dB | Ниво на звуково налягане, $f_{oct}=8$ Hz, dB | Ниво на звуково налягане, $f_{oct}=16$ Hz, dB | Общо ниво на звуково налягане, LIN, dB |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 | Работа в производствени помещения и на територията на предприятия с различна степен на интензивност                           | 100                                          | 95                                           | 90                                           | 85                                            | 100                                    |
| 2 | Работа в производствени помещения и на територията на предприятия с различна степен на интелектуална-емоционална интензивност | 95                                           | 90                                           | 85                                           | 80                                            | 95                                     |
| 3 | Жилищни територии                                                                                                             | 90                                           | 85                                           | 75                                           | 70                                            | 90                                     |
| 4 | Помещения в жилищни и обществени сгради                                                                                       | 75                                           | 70                                           | 65                                           | 60                                            | 75                                     |

#### 4. Източници на инфразвук и нискочестотен шум на корабите.

Основните източници на инфразвук и нискочестотен шум на кораба са :

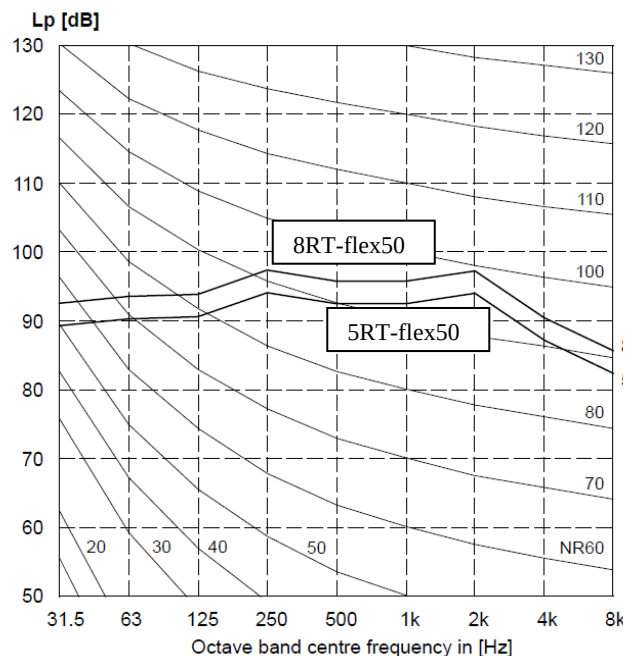
- главните и спомагателните дизелови двигатели;
- главните и спомагателните котли;
- вентилационните уредби на машинното и помпеното отделения и вентилацията на товарите хамбари;
- компресорните уредби;
- тръбопроводите за пара, вода и нефтопродукти;
- газоизпускателните тръбопроводи;
- вятърът и вълнението;
- излъчвания от кораба нискочестотен подводен шум.

Основен вътрешен източник на инфразвук и нискочестотен шум са главните корабни дизелови двигатели. Те се явяват като вътрешен източник на инфразвук и нискочестотен шум в машинното отделение на кораба и разпространяващ се в корабните помещения, разположени на по-горните палуби в надстройката (виж фиг. 5) и външен източник на шум, излъчван от газоизпускателния тръбопровод, определящ нивото на инфразвук и нискочестотен шум на откритите палуби на надстройката и помещенията, разположени на горните и палуби.

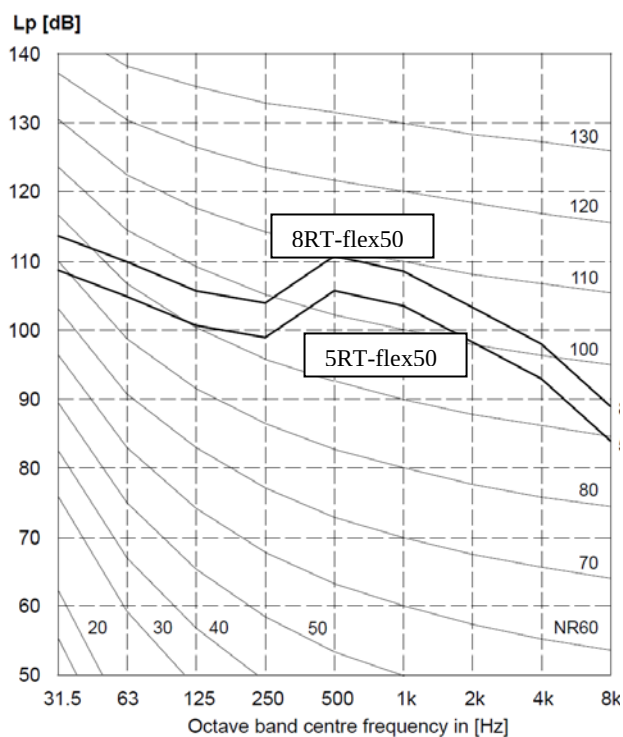


**Фиг.5.** Източници на инфразвук и нискочестотен шум на кораба

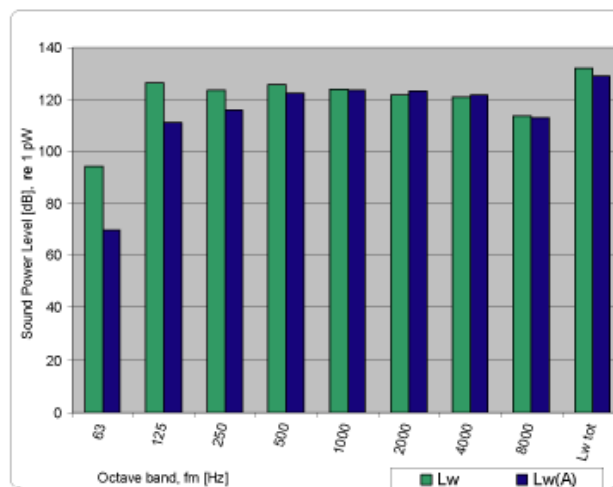
На фиг. 6,а и б са показани спектрограми по октави на излъчвания в машинното отделение и от газоизпускателния му колектор шум от нискооборотен дизелов двигател RT 50 – flex, , а на фиг.7,а и б – излъчвания в машинното отделение и от газоизпускателния му колектор шум от нискооборотен дизелов двигател WV 46 F.



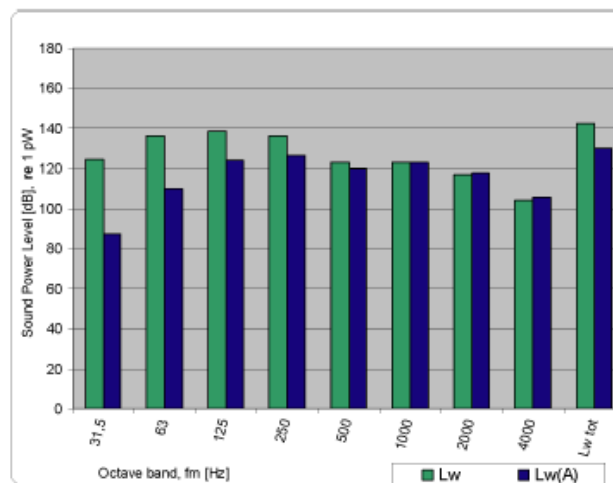
Фиг. 6.а. Спектрограма по октави на излъчвания в машинното отделение от нискооборотен дизелов двигател RT 50 – flex



Фиг.6.б. Спектрограма по октави на излъчвания от газоизпускателния колектор шум на нискооборотен дизелов двигател RT 50 – flex



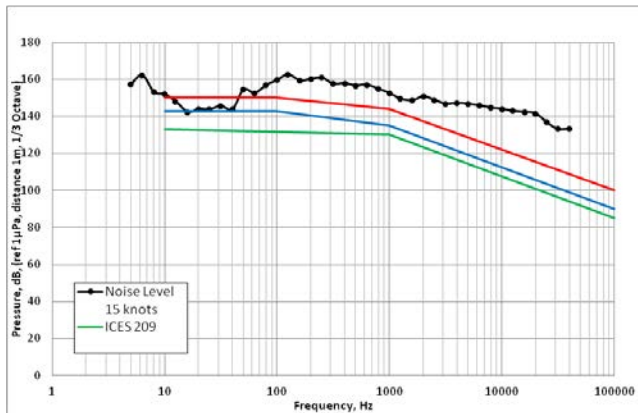
Фиг. 7.а Спектрограма на излъчвания шум от среднооборотен дизелов двигател WV46F



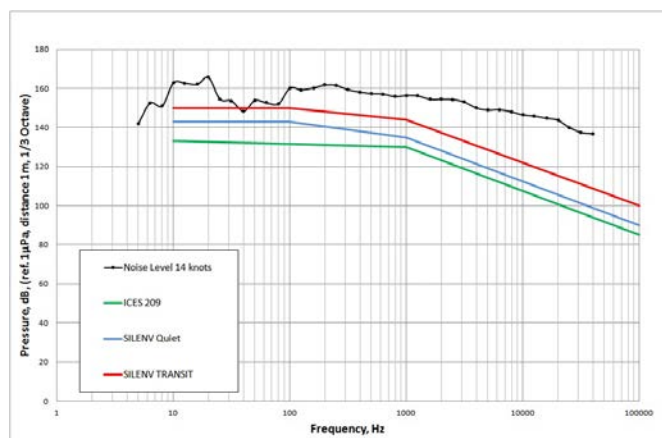
Фиг. 7.б. Спектрограма на излъчвания от среднооборотен дизелов двигател WV46F шум от газоизпускателния колектор

Анализът на спектрограмите на излъчвания от нискооборотните двигатели шум показва, че в инфразвуковата област се очаква значително повишаване на звуковото налягане. Тази прогноза се потвърждава от проведените измервания на инфразвука и нискочестотния шум на 3 серии кораби за насипни товари с нискооборотни дизелови главни двигатели.

Друг източник на инфразвук и нискочестотен шум на кораба се явява подводният шум, генериран от работата на гребните винтове, вълнообразуването при обтичане на кораба от морската вода, турбулизацията на потока при обтичане настърчащите части на корпуса и вибрациите на подводната част на корпуса. На фиг. 8 и фиг. 9 са показани измерените на 8000 tdw многоцелеви кораб и 4500 tdw танкер-асфалтовоз терцоктавни нива на подводен шум. И за двата кораба се наблюдават две зони на повишено звуково налягане - инфразвукова с честота 7-16 Hz и нискочестотна в диапазона 100-250 Hz.



Фиг.8. Преизчислените към разстояние 1 m от 8000 t многоцелеви кораб терцоктавни нива на подводен шум



Фиг.9. Преизчислените към разстояние 1 m от 4500 t асфалтовоз терцоктавни нива на подводен шум.

### 5. Експериментално изследване на инфразвуковата и нискочестотната шумова експозиция на екипажите на търговски кораби.

През периода 2007 ÷ 2012 година от колектива на НПЛ "ВДМС" към ТУ-Варна са проведени измервания на акустичната експозиция в корабните помещения на 33 кораба. Изпитанията са проведени по време на ходовите изпитания на корабите. В таблица 4 са показани основните характеристики на изследваните кораби, а в таблица 5 – основните характеристики на главните им енергетични уредби. Измерването на шума в корабните помещения е извършено с анализатор на шум B&K тип 2250 и микрофон 4189. За всяко помещение са измерени А-претеглените еквивалентни нива на шум и терцоктавните нива на звуково налягане в диапазона 12.5 Hz ÷ 20 kHz. Предмет на настоящото изследване са резултатите от измерване в инфразвуковите честоти 12,5 Hz, 16 Hz, 20 Hz и нискочестотните терцоктавни честоти в диапазона 20 Hz ÷ 125 Hz. Очевидна е липсата на данни от анализа на инфразвуковата експозиция при терцоктавните честоти 2 Hz, 4 Hz, 6.3 Hz, 8 Hz и 10 Hz. Това се дължи на липсата на оборудване за провеждане на измерванията в този честотен диапазон.

Необходимо е да се отбележи, че всички измервания са проведени при благоприятни условия на околната среда:

- скорост на вятъра < 2 b;
- вълнение < 2 b;

- дълбочина > 60 m;
- скорост на кораба – експлоатационна,

т.е. инфразвуковата и нискочестотната шумова експозиция е само от източниците на инфразвук и нискочестотен шум на кораба. При тези условия на околната среда излъчването на инфразвук от морето е минимално.

Таблица 4. Технически характеристики на изследваните кораби.

| No | Дисплей, tdw | Тип                | Година на проектиране | Година на ходови изпитания | Брой кораби | Основни размери, m |                |        | L <sub>min</sub> /L <sub>max</sub> | P <sub>max</sub> DW [kW/tdw] |
|----|--------------|--------------------|-----------------------|----------------------------|-------------|--------------------|----------------|--------|------------------------------------|------------------------------|
|    |              |                    |                       |                            |             | Дължина (Lpp)      | Корабна ширина | Газане |                                    |                              |
| 1  | 4650 tdw     | Сухотоварен кораб  | 1995                  | 2005-2007                  | 6           | 92.5               | 13.8           | 5.74   | 0.134                              | 0.619                        |
| 2  | 4850 tdw     | Многоцелеви кораб  | 2004                  | 2006-2007                  | 3           | 84.8               | 15.2           | 5.64   | 0.138                              | 0.495                        |
| 3  | 4450 tdw     | Многоцелеви кораб  | 2004                  | 2005-2008                  | 6           | 95.2               | 15.2           | 5.625  | 0.123                              | 0.539                        |
| 4  | 4999 tdw     | Танкер-химикаловоз | 2003                  | 2005-2008                  | 4           | 82                 | 14.6           | 5.4    | 0.135                              | 0.384                        |
| 5  | 8000 tdw     | Многоцелеви кораб  | 2005                  | 2010-2011                  | 4           | 123                | 15.87          | 6.8    | 0.125                              | 0.375                        |
| 6  | 4999 tdw     | Танкер-асфалтовоз  | 2001                  | 2008-2010                  | 2           | 100.5              | 15.5           | 6.25   | 0.200                              | 0.576                        |
| 7  | 9800 tdw     | Многоцелеви кораб  | 2008*                 | 2009                       | 2           | 113.75             | 20             | 8.29   | 0.172                              | 0.551                        |
| 8  | 21100 tdw    | Bulk Carrier       | 2009*                 | 2010                       | 2           | 159                | 25             | 8.51   | 0.145                              | 0.277                        |
| 9  | 43000 tdw    | Bulk Carrier       | 2004*                 | 2007                       | 1           | 177                | 30             | 11.79  | 0.125                              | 0.193                        |
| 10 | 56000 tdw    | Bulk Carrier       | 2007*                 | 2012                       | 3           | 185                | 32.2           | 12.7   | 0.090                              | 0.159                        |

Таблица 5. Основни данни на енергетичните уредби на изследваните кораби

| No | Главен Двигател |                             |         |                            | Винт |     |         |                            | Спомагателни двигатели |                        |             |                            | Cargo Holds Fans |
|----|-----------------|-----------------------------|---------|----------------------------|------|-----|---------|----------------------------|------------------------|------------------------|-------------|----------------------------|------------------|
|    | Брой            | Тип                         | MCR, kW | Обороти, min <sup>-1</sup> | Брой | Тип | Лопатки | Обороти, min <sup>-1</sup> | Брой                   | Тип                    | Мощност, kW | Обороти, min <sup>-1</sup> |                  |
| 1  | 1               | MAK 6M32                    | 2880    | 600                        | 1    | CPP | 4       | 231                        | 2                      | Caterpillar 3406       | 245         | 1500                       | yes              |
| 2  | 1               | MAK 8M25                    | 2400    | 750                        | 1    | CPP | 4       | 185                        | 2                      | UJiankPula D2866 LXE30 | 270         | 1500                       | yes              |
| 3  | 1               | MAK 8L25                    | 2400    | 750                        | 1    | CPP | 4       | 185                        | 2                      | M.A.N. D2866 LXE30     | 216         | 1500                       | yes              |
| 4  | 2               | MAN B&W 6L23                | 2x 960  | 900                        | 2    | CPP | 4       | 206                        | 2                      | DEMP D2866 LXE30       | 269         | 1800                       | no               |
| 5  | 1               | MAK 6M32C                   | 3000    | 600                        | 1    | CPP | 4       | 154                        | 2                      | MAN D2876 LE301        | 345         | 1500                       | yes              |
| 6  | 1               | 6M32C                       | 2880    | 600                        | 1    | CPP | 4       | 176.5                      | 2                      | 6D16MG                 | 450         | 1500                       | Yes              |
| 7  | 1               | 6M43C                       | 5400    | 500                        | 1    | CPP | 4       | 187.5                      | 2                      | ZJMD MAN B&W 6L16/24   | 506         | 750                        | No               |
| 8  | 1               | BMZ 8L42MC                  | 5844    | 154                        | 1    | FPP | 4       | 154                        | 2                      | MAN 5L16/24 Cegielsky  | 500         | 1000                       | Yes              |
| 9  | 1               | MAN B&W 6S50MC              | 8340    | 117                        | 1    | FPP | 4       | 117                        | 3                      | 6N 18AL - EV           | 660         | 1000                       | Yes              |
| 10 | 1               | DU Wartsila Japan 6RTflex50 | 8890    | 116                        | 1    | FPP | 5       | 116                        | 3                      | Daihatsu 5DC-17A       | 430         | 900                        | No               |

Резултатите от измерване на инфразвуковото и нискочестотното шумово експониране на екипажите на 2 от изследваните серии кораби са показани в табличен вид както следва:

- таблица 6 – Резултати от измерване на инфразвуковото и нискочестотното експониране на екипажа на 56000 tdw кораб за насипни товари;
- таблица 7 – резултати от измерване на инфразвуковото и нискочестотното експониране на екипажа на 4500 tdw танкер-асфалтовоз.

Таблица 6. Резултати от измерване на инфразвуковото и нискочестотното експониране на екипажа на 56000 tdw кораб за насипни товари.

|       | L <sub>aeq</sub> | 12.5Hz | 16Hz  | 20Hz  | 25Hz  | 31.5Hz | 40Hz  | 50Hz  | 63Hz  | 80Hz  | 100Hz | 125Hz |
|-------|------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| N001  | 66.8             | 86.44  | 82.02 | 82.90 | 81.96 | 89.16  | 98.92 | 81.51 | 75.84 | 69.44 | 66.70 | 66.94 |
| N004  | 61.3             | 101.33 | 81.60 | 84.37 | 89.62 | 90.64  | 82.41 | 74.70 | 68.79 | 65.19 | 61.64 | 57.14 |
| C12   | 51.7             | 93.90  | 73.60 | 80.80 | 80.55 | 86.33  | 70.34 | 65.50 | 61.83 | 58.96 | 56.42 | 52.95 |
| C13   | 53.0             | 73.34  | 78.51 | 76.12 | 79.35 | 88.26  | 73.91 | 67.15 | 64.76 | 61.56 | 57.31 | 53.26 |
| B025  | 52.5             | 89.32  | 76.40 | 86.27 | 76.47 | 81.03  | 77.02 | 69.67 | 64.48 | 61.04 | 53.39 | 52.63 |
| A34   | 53.7             | 85.33  | 77.13 | 82.69 | 80.67 | 78.71  | 76.44 | 72.48 | 59.40 | 61.34 | 59.61 | 55.57 |
| U038  | 64.2             | 92.72  | 86.34 | 88.04 | 81.32 | 83.07  | 73.69 | 71.73 | 67.24 | 67.56 | 66.83 | 64.04 |
| ECR46 | 98.0             | 86.20  | 85.09 | 95.24 | 92.84 | 95.84  | 91.32 | 91.24 | 90.09 | 92.14 | 93.47 | 97.81 |
| ER 48 | 100.2            | 103.52 | 92.62 | 93.45 | 90.89 | 96.17  | 90.33 | 90.54 | 92.65 | 90.57 | 90.90 | 90.97 |

**Таблица 7** – резултати от измерване на инфразвуковото и нискочестотното експониране на екипажа на 4500 tdw танкер-асфалтовоз.

|           | L <sub>aeq</sub> | 12.5Hz | 16Hz  | 20Hz  | 25Hz  | 31.5Hz | 40Hz  | 50Hz  | 63Hz  | 80Hz  | 100Hz | 125Hz  |
|-----------|------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| N 1       | 55               | 88.42  | 79.23 | 68.78 | 77.27 | 79.81  | 76.78 | 75.02 | 71.83 | 62.64 | 59.35 | 55.06  |
| N 3       | 66.7             | 81.21  | 78.09 | 75.98 | 80.77 | 93.08  | 89.87 | 78.92 | 80.86 | 72.11 | 77.07 | 64.74  |
| N 4       | 65.7             | 73.89  | 72.13 | 70.38 | 78.59 | 90.02  | 87.23 | 78.8  | 74.48 | 71.65 | 76.26 | 63.4   |
| 3Pop.d.11 | 50.7             | 70.91  | 73.47 | 71.43 | 78.53 | 74.69  | 71.89 | 70.83 | 66.46 | 63.16 | 55.84 | 53.56  |
| 2Pop.d.23 | 51.2             | 72.75  | 68.91 | 71.55 | 81.15 | 75.33  | 77.15 | 77.19 | 67.04 | 59.8  | 56.09 | 54.11  |
| ER004     | 107.4            | 71.53  | 77.6  | 85.26 | 91.78 | 89.94  | 88.36 | 92.09 | 99.78 | 95.93 | 98.6  | 101.98 |

Анализът на резултатите от проведените измервания на инфразвуковата и нискочестотната експозиция на екипажите на 10 серии търговски кораби показва:

- за търговските кораби с главни нискооборотни дизелови двигатели

- инфразвуковата експозиция в машинното отделение превишава нормите за инфразвук в промишлени предприятия с 20 dB;
- инфразвуковата експозиция в разположените на палубите над машинно отделение кабин и офиси превишават нормите за инфразвук с 25÷30dB;
- нискочестотната експозиция в машинните отделения превишават нормите за нискочестотен шум на промишлени предприятия с 25÷30dB;
- нискочестотната експозиция в кабините и офисите, разположени на първите две палуби над машинно отделение превишават нормите за нискочестотен шум на промишлени предприятия с 15÷25 dB;
- с намаляване на диаметрите на буталата на главните двигатели пикът на нискочестотната експозиция се премества към по-високите честоти;
- инфразвуковата експозиция в разположените на навигационната палуба и под нея помещения се отределя от излъчвания от комина на главния двигател инфразвук и за откритите площадки превъзхожда нормите за инфразвук в промишлени предприятия с 15÷20dB, а за кабините и офисите превишава нормите за инфразвук в жилищните помещения с 20÷30dB;
- нискочестотната експозиция в разположените на навигационната палуба и под нея помещения се отределя от излъчвания от комина на главния двигател инфразвук и за откритите площадки превъзхожда нормите за нискочестотен шум в промишлени предприятия с 15÷30dB, а за кабините и офисите превишава нормите за инфразвук в жилищните помещения с 10÷20dB;

-за търговските кораби с главни среднооборотни дизелови двигатели:

- инфразвуковата експозиция в машинното отделение не превишава нормите за инфразвук в промишлени предприятия;
- нискочестотната експозиция в машинните отделения превишава нормите за нискочестотен шум на промишлени предприятия с 25÷30dB в терцоктавните ленти, съответстващи на главните хармоници на среднооборотните двигатели;
- нискочестотната експозиция в помещенията на навигационната палуба и под нея превишава нормите за

нискочестотен шум с 30÷40dB в терцоктавните ленти, съответстващи на главните хармоници на среднооборотните двигатели.

## 6. Изводи

- Инфразвуковата и нискочестотната звукова експозиция в машинните отделения, навигационните рубки и помещенията разположени в близост до тях за търговските кораби с главни дизелови двигатели превишават нормите за инфразвук и нискочестотен шум в промишлени помещения като за уредбите с нискооборотни дизелови двигатели тези помещения се класифицират като зони с умерен риск за здравето на екипажите им;

- Изследванията показват, че е наложително на следващия етап на коригиране нормите за шумова експозиция на помещенията в търговските кораби да се разработят и норми за инфразвукова и нискочестотна звукова експозиция;

- Разработването на ефективни средства за намаляване на инфразвуковото и нискочестотното излъчване на главните двигатели се явява основна задача пред специалистите по корабна акустика.

## Литература

- 1.Maritime Labour Convention, ILO, 2006.
- 2.Морска трудова конвенция на международната организация на труда, ДВ бр. 76 от 30 август 2013г.
- 3.IMO IMO (1981)Resolution A.468(XII): Code on Noise Levels on Board Ships.
- 4.IMO (2009). Document DE 53/10 Proposal for the development of amendments to SOLAS regulation II-1/36 and a revision of the Code on noise levels on board ships.
- 5.American Bureau of Shipping, Guide for Crew Habitability on Offshore Installations, March 2013.
- 6.Germanische Lloyd, Rules for Classification and Construction, Guidelines for Compliance with MLC 2006 Noise and Vibration, 2013.
- 7.Germanische Lloyd, Rules for Classification and Construction, Harmony Class- Rules on Rating Noise and Vibration for Comfort Cruise Ships, 2013.
- 8.Standards of Norway, Norsok Standard S – 002, Working environment, August 2003.
- 9.Moehler Ulrich, Eulitz Christian, Huth Cristine, Effect of Infrasound and Low-frequency noise with regard to loudness estimation, Inter Noise 2015.
- 10.Geof Leventall, Assessment and Regulation of Low Frequency Noise.
- 11.Andy Moorhouse, Dr. David Waddington, Dr. Mags Adams, Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance, University of Salford, 2005.
- 12.CH 2.2.4/2.1.8.583-96, Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки.
- 13.CH 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий и на территории жилой застройки.

|                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <h1 style="margin: 0;">АКУСТИКА</h1> <p style="margin: 0;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.</p> <p><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                             | Декември 2016 г.                                                                      |

## СИСТЕМЕН ДИЗАЙН НА СОФТУЕРНО ДЕФИНИРАН 16QAM МОДЕМ

### SYSTEM DESIGN SOFTWARE DEFINED 16QAM MODEM

доц. д-р Илиян Илиев

ВВВМУ „Н. Й. Вапцаров”- Варна, България, ilieviliyan@ymail.com

**Abstract:** The report gives an overview of underwater communication systems using acoustic modems to transmit messages in the water by digital modulation signal. Examines the characteristics of acoustic modems using digitally modulated signals with extended range underwater communications. Based on the block diagram of a modem with 16QAM modulation are shown software modules for transmitting and receiving digitally modulated signals in an environment of LabView. By developing a software platform under LabView is tested quality of transmission and reception of such signals in terms of Gaussian noise.

**Keywords:** underwater communication, 16QAM signal, QAM modulator, QAM demodulator digital communication model of a digital communication system, LabView.

#### 1. Въведение.

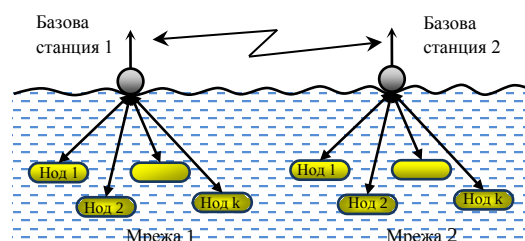
Използването на цифрово модулирани сигнали с разширен спектър за подводна комуникация обхваща приложения в сферите на изследване и наблюдение на океана, развитие на морските аквакултури, нефтената индустрия, и специфични военни дейности. Подводният безжичен информационен канал се използва за събиране на данни от отдалечени сензори за открити подводни обекти, степента на замърсяване в океана, изменение на климатичните условия и др. Друго направление на приложение на подводните модеми е за мониторинг, отдалечен контрол и комуникация с роботи, и автономни подводни апарати работещи както самостоятелно така и като част от подводна сензорна мрежа.

В автономните подводни системи акустичните модеми се използват както за изграждане на самостоятелен безжичен канал, така и за безжичен канал като разширение на основен кабелен канал за предаване, и телеуправление. В първия вариант се изгражда безжичен подводен канал за обмен на данни между дънни инструменти като сеизмични датчици и надводен буй. [1] Във втория вариант безжична подводна връзка се използва за свързване на отдалечен сензор с телеуправляем подводен апарат. [2] Модемите, които се използват за осигуряване на подводния информационен канал се разделят на два основни вида в зависимост от начина на детектиране на сигнала, некохерентни и кохерентни. Некохерентните модеми, разработени 80'те. години използват цифрова честотна модулация (Frequency Shift Keying - FSK), която осигурява добра устойчивост на въздействията на канала, но честотната лента не се усвоява ефективно. През 90'те. години са разработени кохерентни подводни модеми на базата на цифрова фазова модулация (Phase Shift Keying - PSK) и квадратурно амплитудна модулация (Quadrature Amplitude Modulation - QAM), които предоставят висока скорост на предаване на данните на единица честотна лента, но изискват приемник компенсиращ временните изменения от многолъчевото разпространение и фазовите изкривявания в канала.

Технологичните достижения в производството на подводни модеми, подводни апарати и сензори позволява

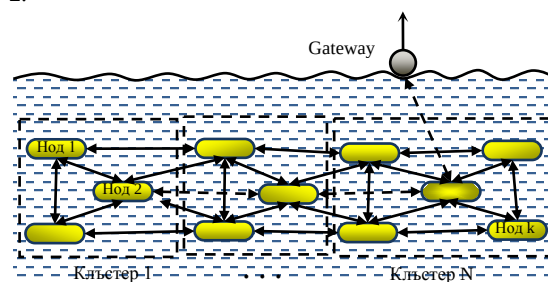
да се реализира концепцията за подводна мрежа от разпределени сензорни нодове. [3] Мрежовата топология и свързаната с нея архитектура се разработва в различни форми.

При централизираните мрежи от клетъчен тип, фигура 1, нодовите комуникират чрез единичен независим канал с базовата станция, а базовите станции имат собствена комуникационна инфраструктура.



Фиг. 1. Архитектура на централизирана подводна мрежа.

При децентрализираните мрежи нодовите комуникират помежду си чрез многоканална връзка, фигура 2.



Фиг.2. Архитектура на децентрализирана подводна мрежа.

## 2. Системен дизайн на модем за сигнал с 16QAM модулация.

Системният дизайн на софтуерно дефиниран подводен информационен канал изисква да се разполага с програмна среда, която да предоставя реалистични модели за кодиране на данните, въздействието по канал, декодиране на данните с компенсиране на изкривяванията, изобразяване и отчитане на качеството на подводния информационен канал. Далечината и качеството на подводната комуникация се ограничават от влиянието на канала, изразяващо се в:

- ▶ Честотно зависимо затихване: ограничават използвания диапазон от носещи честоти и предизвикват намаляване на честотната лента на канала с увеличаване на разстоянието. Подходящите честоти за подводна комуникация лежат в диапазона от 1 kHz до 100 kHz;

- ▶ Разширение на фронта на вълната и многогълчево разпространение: предизвикват ограничаване на разпространяването на звуковата енергия на голямо разстояние, и амплитудни и фазови изкривявания на приетите данни.

- ▶ Вълнение и течения: ветровите вълни и подводните течения силно влияят на подводните комуникационни трасета предизвиквайки Доплерова дисперсия на сигнала по честота. Доплерово изместване на сигнала се предизвиква и от собственото движение на платформите.

- ▶ Пространствено-временният характер на вертикалното разпределение на скоростта на звука по дълбочина: води до изменение на рефракционната картина. Известно е, че звуковите вълни се изкривяват към слоеве с по-ниска скорост, което в този случай придобива случаен характер. В дълбоко море това е основния фактор ограничаващ комуникацията между две платформи поради нерегулярно възникване на зони на сянка.

- ▶ Околният шум в честотната лента на комуникационния канал: намалява отношението сигнал/шум на входа на декодера, което води до увеличаване на грешките при декодиране в приемания канал.

В заключение влиянието на канала води до следните зависимости:

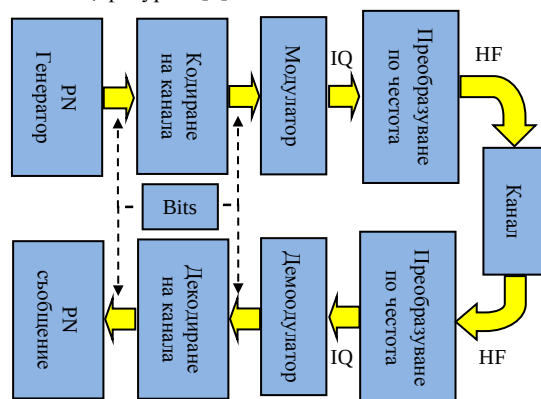
- ако честотната лента на бейсбанд сигнала е  $B/2$  то далечината на свързка трябва да бъде така подбрана, че да осигурява пропускателна способност на канала  $R = B$  бит/сек.
- честотата на носещия сигнал трябва да се съобрази с желаната далечината на свързка;
- типа на модулацията определя шумозащитеността на канала. Използването на сигнали с разширен спектър значително намалява влиянието на канала върху предаваните данни.

В таблица 1 на базата на тестови резултати, [4] са показаните зависимости за подводен акустичен канал плитководен район.

Таблица 1.

| Некохерентни модеми |          |         |        |
|---------------------|----------|---------|--------|
| Тип                 | R [kbps] | B [kHz] | D [km] |
| M-FSK               | 1,2      | 5       | 3      |
| M-FSK               | 2,4      | 5       | 5      |
| Кохерентни модеми   |          |         |        |
| Тип                 | R [kbps] | B [kHz] | D [km] |
| M-PSK               | 0,5      | 0,3-1   | 90     |
| M-PSK               | 0,02     | 20      | 0,9    |
| M-PSK               | 6,7      | 2-10    | 2      |
| 16QAM               | 40       | 10      | 0,3    |

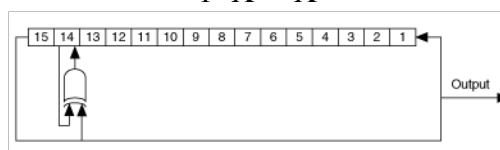
За разработване на подводен комуникационен канал чрез 16QAM модулиран сигнал е използван моделът на цифрова комуникационна система на LabView, фигура 3.[5]



Фиг. 4. Модел на подводен комуникационен канал с 16QAM модулация.

В модела е използван методът на Галос за генериране на псевдослучайни (PN) битови последователности в качеството на защитен и синхронизиращ сигнали, и сигнал съобщение. PN генераторът на битове, фигура 4 представлява 15 стъпален линеен преместващ регистър с обратна връзка, чийто основен полином е:

$$1 + X^{14} + X^{15}$$



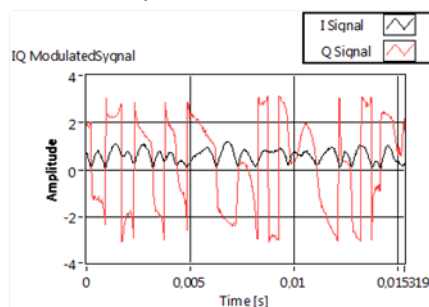
Фиг. 4. Схема на PN генератор по метода на Галос.

В блокът за кодиране на канала чрез енкодер на Хаминг се реализира разширяване на спектъра на цифровия сигнал осигуряващо по-голяма устойчивост на влиянието на подводния канал.

Модулаторът конвертира информационния сигнал в комплексна последователност от символи използвайки кодиране с четири бита и намалява междусимволната интерференция чрез 'Raised-cosine' FIR филтър. На изхода на модулаторът се получава комплексен IQ сигнал в основната честотна лента, фигура 5, който се описва с израза:

$$s^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k g(t - kT)$$

където,  $c_k$  е комплексното съобщение, състоящо се от две реални съобщения,  $a_k$  и  $b_k$ .



Фиг. 5. IQ сигнал на изхода на 'Raised-cosine' FIR филтър.

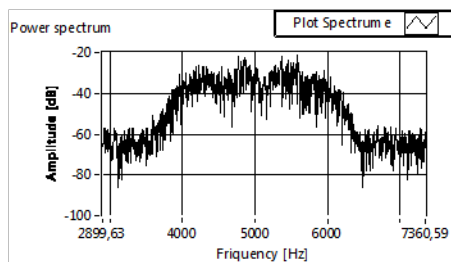
От основният IQ сигнал след преобразуване по честота и отделяне на реалната част се получава високочестотния сигнал, който се излъчва в подводния звуков канал. Комплексният високочестотен сигнал се описва чрез израза:

$$s_{\text{ВЧ}}^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k g(t - kT) e^{j\omega_c t}$$

Излъченият сигнал се описва чрез израза:

$$s(t) = a(t) \cos(\omega_c t) - b(t) \sin(\omega_c t)$$

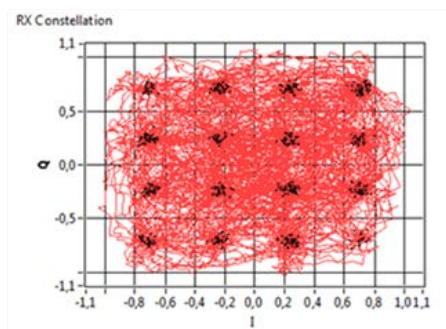
За целите на анализа носещата честота на сигнала е избрана 5 kHz, а скоростта на предаване 2 kbps. Спектр на високочестотния сигнал е показан на фигура 6.



Фиг. 6. Спектр на 16QAM модулиран високочестотен сигнал с честото 5 kHz.

Въздействието на подводния канал се моделира чрез добавяне на Гаусов шум в излъчения ВЧ сигнал. Констелационна диаграма на 16QAM сигнала при S/N= 40 dB е показана на фигура 7.

Блоковете на цифровия приемник са показани в долната част на фигура 4.

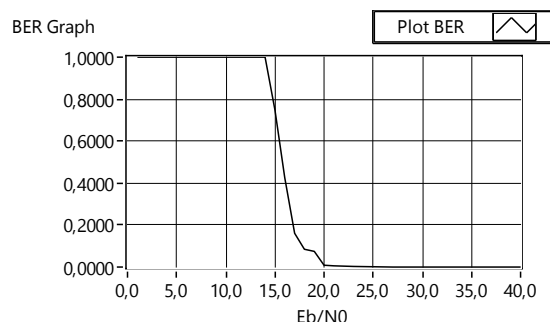


Фиг. 7. Диаграма на съвкупностите на 16QAM сигнал при S/N= 40 dB

В блокът за преобразуване по честота след дигитализиране чрез амплитудна квадратурна демодулация се отделя комплексния IQ сигнал в основната честотна лента. В 16QAM демодулатора комплексният IQ сигнал се преобразува в последователност от битове постъпващи в блока за декодиране на канала. В него чрез Hamming декодер се възстановява битовата последователност на съобщението, като се коригират битовете приети с грешка поради шум или увреждане на канала.

### 3. Експериментални резултати и изводи.

Описаният модел на подводен цифров комуникационен канал на базата на 16QAM модулация на сигнала е синтезиран в среда на LabView и чрез него е изследвана зависимостта на грешките при приемане (Bit Error –BER) като функция от отношението сигнал/шум ( $E_b/N_0$ ). За целта в блокът на канала е програмиран модул, който изменя средноквадратичната стойност на Гаусовия шум изменяйки по този начин  $E_b/N_0$  на входа на приемника в границите от 5 до 40 dB. На изхода на приемника е програмиран модул за изчисляване и модул за изобразяване на BER като функция на  $E_b/N_0$ . На фигура 8 е показана графика на BER в резултат от работата на софтуерно моделирания модем с 16QAM модулация в условия на Гаусов шум.



Фиг. 8. Графика на BER на 16QAM модем в зависимост от нивото на Гаусовия шум в канала.

От анализа на графиката може да се направи извода, че за достоверно предаване на съобщения е необходимо да се осигури отношение  $E_b/N_0 > 15$  dB.

В заключение, трябва да се отбележи, че вградените в средата на LabView комуникационен модул осигурява инженерите в тази област с мощен инструмент за имитационно моделиране и изследване на комуникационни устройства с аналогова или цифрова модулация на етапа на разработка.

#### Литература:

1. L. Freitag, M. Johnson, and D. Frye, "High-rate acoustic communications for ocean observatories-performance testing over a 3000 m vertical path," in *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, vol. 2, 2000, pp. 1443 –1448 vol.2.
2. Lee Freitag, Keenan Ball, Peter Koski, Sandipa Singh; Eric Gallimore, "Acoustic communications for deep-ocean observatories: Results of initial testing at the MBARI MARS node", *OCEANS 2010 IEEE-Sydney*, pp. 1-6;
3. T. Curtin, J. Bellingham, J. Catipovic, and D. Webb, "Autonomous oceanographic sampling networks," *Oceanography*, vol. 6, no. 3, pp. 86 –94, 1993.
4. Dr. Stefania Giodini, Bas Binnerts, Dr. Koen Blom, "Can-i-communicate-with-my-auv", <https://www.hydro-international.com/content/article/>
5. RF & Communications Handbook, Page 84

Copyright © 2007 National Instruments Corporation

|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>АКУСТИКА</b></p> <p style="text-align: center;">Национална конференция “Акустика 2016”</p> | <p><b>Варна</b><br/>14 - 15.10.2016 г.<br/><b>София</b><br/>02 - 03.12.2016 г.</p> |
| Година XVIII                                                                      | □ Брой 18                                                                                                                    | Декември 2016 г.                                                                   |

## THE AIM OF THE STUDY IS MODELING THE SPREAD OF NOISE FROM TRAFFIC ON THE FACADE OF A MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDING IN CLOSE PROXIMITY TO URBAN BOULEVARD WITH A VIEW TO TAKING MEASURES TO REDUCE THE NOISE IMPACT.

Assoc.Prof.PhD.eng. Milcho Georgiev  
TU-Sofia, 8, “Kl. Ohridski” blv, Sofia 1700, [mtge@tu-sofia.bg](mailto:mtge@tu-sofia.bg)

### Abstract

The aim of this publication is to define the approach to local evaluation of noise pollution of land and the buildings on it by road, rail and air transport in order to reduce the noise in the environment using graphical typified calculations in points based on the new methodology to the directive for environmental noise (2002/49 /EC) to determine the exposure to noise in the environment as a result of the modeling and definition of strategic noise map and action plan for the reduction of noise pollution

The new unified methodology (CNOSOS-EU) will be applied to assess the overall noise for the next stage of development of strategic noise mapping in the European Union in 2017

For the methodology and approach for determining noise levels in the environment at hand, calculations are defined and used in the period 2002/2015. The existing regulations in Bulgaria is Regulation 6 of 26 June 2006 on the indicators for environmental noise, taking into account the degree of discomfort in different parts of the day, limit values of noise indicators' environment, methods of assessing the values of noise indicators and the harmful effects of noise on human health. For the next stage of assessment of noise exposure in the environment it is necessary to update the existing methodologies. Calculations are made in EXCEL.

**Keywords:** Standardization, assessment of noise pollution in the environment, graphical modeling and calculation of noise.

### 1. Introduction

Noise calculations shall be defined in the frequency range from 63 Hz to 8 kHz. Calculations are performed in octave bands for road traffic. All input values affecting the emission level of a source shall be determined with at least the accuracy corresponding to an uncertainty of  $\pm 2\text{dB(A)}$  in the emission level of the source (leaving all other parameters unchanged). The road traffic noise source shall be determined by combining the noise emission of each individual vehicle forming the traffic flow into five separate categories:

- (1) Light motor vehicles;
- (2) Medium heavy vehicles;
- (3) Heavy vehicles;
- (4) Powered two-wheelers

Table 1. Defining the types of vehicles

| TRAFFIC TABLE                         | COMMON NOISE ASSESSMENT METHODS                                                           |       |                                                                                                  |                                           |       |                                                                   |     |       |        |  |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------|-----|-------|--------|--|
|                                       | - Vehicle category in EC -                                                                |       |                                                                                                  |                                           |       | Road traffic (Category, Name)                                     |     |       |        |  |
| ENTRE                                 | 1. Light motor                                                                            |       | 2. Medium heavy                                                                                  |                                           |       | 3. Heavy vehicles                                                 |     |       |        |  |
| source is 0.05 m above the road surf. | Passenger cars, delivery vans $\leq 3.5$ tons, SUVs, MPVs including trailers and caravans |       | delivery vans $> 3.5$ tons, buses, motorhomes, etc. with two axes and twin tyre mounting on rear |                                           |       | Heavy duty vehicles, touring cars, buses, with three or more axes |     |       |        |  |
| ROAD (A)                              | M1 and N1                                                                                 |       | M2, M3 and N2, N3                                                                                |                                           |       | M2, N2 with trailer, M3, N3                                       |     |       |        |  |
| CAR/h                                 | DAY                                                                                       | NIGHT | EVNING                                                                                           | DAY                                       | NIGHT | EVNING                                                            | DAY | NIGHT | EVNING |  |
| traffic flow                          | 500                                                                                       | 50    | 350                                                                                              | 200                                       | 20    | 35                                                                | 100 | 10    | 15     |  |
| Speed                                 | 50                                                                                        | 40    | 30                                                                                               | 45                                        | 35    | 30                                                                | 40  | 30    | 25     |  |
| source is 0.05 m                      | 4a. Two-, Three- and Four-wheel Mopeds                                                    |       |                                                                                                  | without sidecars, Tri- and Quadri- cycles |       |                                                                   | DEN |       |        |  |
| ROAD (A)                              | L1, L2, L6                                                                                |       |                                                                                                  | L3, L4, L5, L7                            |       |                                                                   | DAY | NIGHT | EVNING |  |
| CAR/h                                 | DAY                                                                                       | NIGHT | EVNING                                                                                           | DAY                                       | NIGHT | EVNING                                                            | 8 h | 12 h  | 4 h    |  |
| traffic flow                          | 50                                                                                        | 10    | 20                                                                                               | 30                                        | 5     | 15                                                                |     |       |        |  |
| Speed                                 | 35                                                                                        | 30    | 25                                                                                               | 30                                        | 25    | 20                                                                |     |       |        |  |

Table 2. Common Noise Assessment Methods (Appendix F)

| Coeff. $A_{R,L,M}$ and $B_{R,L,M}$ for rolling noise, and $A_{P,L,M}$ and $B_{P,L,M}$ for propulsion noise |                        |             |        |        |        |        |       |       |       |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--|
| Coeff. Category                                                                                            | $A_R/B_R$<br>$A_P/B_P$ | OCTAVE BAND |        |        |        |        |       |       |       |  |
|                                                                                                            |                        | 63          | 125    | 250    | 500    | 1000   | 2000  | 4000  | 8000  |  |
| 1. Light motor vehicles - M1, N1                                                                           | $A_R$                  | 79.70       | 85.70  | 84.50  | 90.20  | 97.30  | 93.90 | 84.10 | 74.30 |  |
|                                                                                                            | $B_R$                  | 30.00       | 41.50  | 38.90  | 25.70  | 32.50  | 37.20 | 39.00 | 40.00 |  |
|                                                                                                            | $A_P$                  | 94.50       | 89.20  | 88.00  | 85.90  | 84.20  | 86.90 | 83.30 | 76.10 |  |
|                                                                                                            | $B_P$                  | -1.30       | 7.20   | 7.70   | 8.00   | 8.00   | 8.00  | 8.00  | 8.00  |  |
| 2. Medium heavy vehicles M2, M3, N2, N3                                                                    | $A_R$                  | 84.00       | 88.70  | 91.50  | 96.70  | 97.40  | 90.90 | 83.80 | 80.50 |  |
|                                                                                                            | $B_R$                  | 30.00       | 35.80  | 32.60  | 23.80  | 30.10  | 36.20 | 38.30 | 40.10 |  |
|                                                                                                            | $A_P$                  | 101.00      | 96.50  | 98.80  | 96.80  | 98.60  | 95.20 | 88.80 | 82.70 |  |
|                                                                                                            | $B_P$                  | -1.90       | 4.70   | 6.40   | 6.50   | 6.50   | 6.50  | 6.50  | 6.50  |  |
| 3. Heavy vehicles M2, N2 with trailer, M3, N3                                                              | $A_R$                  | 87.00       | 91.70  | 94.10  | 100.70 | 100.80 | 94.30 | 87.10 | 82.50 |  |
|                                                                                                            | $B_R$                  | 30.00       | 33.50  | 31.30  | 25.40  | 31.80  | 37.10 | 38.60 | 40.60 |  |
|                                                                                                            | $A_P$                  | 104.40      | 100.60 | 101.70 | 101.00 | 100.10 | 95.90 | 91.30 | 85.30 |  |
|                                                                                                            | $B_P$                  | 0.00        | 3.00   | 4.60   | 5.00   | 5.00   | 5.00  | 5.00  | 5.00  |  |

|                                       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| 4a. Powered 2-wheelers L1, L2, L6     | $A_R$ | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |  |
|                                       | $B_R$ | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |  |
|                                       | $A_P$ | 88.00 | 87.50 | 89.50 | 93.70 | 96.60 | 98.80 | 93.90 | 88.70 |  |
|                                       | $B_P$ | 4.20  | 7.40  | 9.80  | 11.60 | 15.70 | 18.90 | 20.30 | 20.60 |  |
| 4b. Powered 2-wheelers L3, L4, L5, L7 | $A_R$ | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |  |
|                                       | $B_R$ | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |  |
|                                       | $A_P$ | 95.00 | 97.20 | 92.70 | 92.90 | 94.70 | 93.20 | 90.10 | 86.50 |  |
|                                       | $B_P$ | 3.20  | 5.90  | 11.90 | 11.60 | 11.50 | 12.60 | 11.10 | 12.00 |  |

## 2. ROLLING NOISE SOUND POWER LEVEL

$$(1) LWR,i,m(v) = AR,i,m + BR,i,m * \log(V_m/V_{ref}) + \Delta LWR,i,m;$$

Tablo 3a. Calc. Rolling noise power level  $L_{WR}$

| Category | Coeff.<br>$A_R/B_R$<br>Speed | $L_{WR,i,m}$ for rolling noise |        |        |        |        |        |       |
|----------|------------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
|          |                              | 63                             | 125    | 250    | 500    | 1000   | 2000   | 4000  |
|          |                              | OCTAVE BAND                    |        |        |        |        |        |       |
| 1        | 50                           | 94.69                          | 90.14  | 88.85  | 86.73  | 84.94  | 96.61  | 94.34 |
| 2        | 50                           | 101.28                         | 97.25  | 99.71  | 97.80  | 99.54  | 96.19  | 96.10 |
| 3        | 45                           | 104.40                         | 104.40 | 102.50 | 100.93 | 100.89 | 96.09  | 91.99 |
| 4a       | 40                           | 86.98                          | 88.20  | 90.48  | 94.99  | 98.68  | 101.62 | 97.19 |
| 4b       | 35                           | 94.04                          | 98.73  | 94.34  | 93.40  | 96.14  | 94.94  | 91.57 |

## 3. PROPULSION NOISE SOUND POWER LEVEL $L_{WP}$

$$(2) L_{WP,i,m}(v) = A_{Pi,m} + B_{Pi,m} * (V_m - V_{ref})/V_{ref} + \Delta L_{WP,i,m};$$

Tablo 3b. Calc. Propulsion noise power level

| Category | Coeff.<br>$A_P/B_P$<br>Speed | $L_{WP,i,m}$ for propulsion noise |       |        |        |        |        |        |
|----------|------------------------------|-----------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          |                              | 63                                | 125   | 250    | 500    | 1000   | 2000   | 4000   |
|          |                              | OCTAVE BAND                       |       |        |        |        |        |        |
| 1        | 50                           | 71.13                             | 86.37 | 93.60  | 98.86  | 87.50  | 103.20 | 93.27  |
| 2        | 50                           | 75.43                             | 91.48 | 101.50 | 107.41 | 143.59 | 128.95 | 116.06 |
| 3        | 45                           | 76.29                             | 94.71 | 105.15 | 113.45 | 120.54 | 121.09 | 115.27 |
| 4a       | 40                           | 0.00                              | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| 4b       | 35                           | 0.00                              | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |

## 4. CORRECTIONS: ROAD SURFACE, ACCELERATE, TEMPERATURE.

$$\Delta L_{WR,i,m} = \Delta L_{WR,road,i,m} + \Delta L_{WR,acc,i,m} + \Delta L_{W,temp};$$

$$\Delta L_{WP,i,m} = \Delta L_{WP,road,i,m} + \Delta L_{WP,acc,i,m} + \Delta L_{WP,grad,i,m};$$

$$\text{Cor. Acc.} = C_{R,P,m,k} * \text{MAX}(1 - |\text{dist}|/100, 0);$$

$|\text{dist}| \geq 100 \text{ m}$ ,  $\Delta L_{WR,acc,m,k} = \Delta L_{WP,acc,m,k} = 0$ , for crossing and roundabout.

Tablo 3c. Correction Noise Level  $\Delta L_{WR,i,m}$  and  $\Delta L_{WP,i,m}$

| Category            | 1. Light motor                                                          |      |         | 2. Medium heavy |      |         | 3. Heavy vehicles |      |         |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------|------|---------|-----------------|------|---------|-------------------|------|---------|
|                     | DAY                                                                     | NIGT | EVENING | DAY             | NIGT | EVENING | DAY               | NIGT | EVENING |
| Parameter           | 24                                                                      | 16   | 20      | 24              | 16   | 20      | 24                | 16   | 20      |
| Temp 20°C           | -0.32                                                                   | 0.32 | 0       | -0.32           | 0.32 | 0       | -0.32             | 0.32 | 0       |
| Corr t°C            | -0.32                                                                   | 0.32 | 0       | -0.32           | 0.32 | 0       | -0.32             | 0.32 | 0       |
| Parameter           | IF(C98 <= -6, (MIN(12, -C98) - 6), IF(C98 > 2, (MIN(12, C98) - 2)/1.5)) |      |         |                 |      |         |                   |      |         |
| Category            | Coeff.                                                                  | K1   | K2      | Coeff.          | K1   | K2      | Coeff.            | K1   | K2      |
| Accelerate          | $C_{R,m,k}$                                                             | -4.5 | -4.4    | $C_{R,m,k}$     | -4   | -2.3    | $C_{R,m,k}$       | -4   | -2.3    |
| Correct %           | $C_{P,m,k}$                                                             | 5.5  | 3.1     | $C_{P,m,k}$     | 9    | 6.7     | $C_{P,m,k}$       | 9    | 6.7     |
| $\Delta L_{WR,acc}$ | 20                                                                      | -3.6 | -3.52   | 20              | -3.2 | -1.84   | 20                | -3.2 | -1.84   |
| $\Delta L_{WP,acc}$ | 20                                                                      | 4.4  | 2.96    | 20              | 7.2  | 6.22    | 20                | 7.2  | 6.22    |

The coefficients are given in octave bands for each vehicle category.

Tablo 3d. Correction effect of the type of road surface

$\Delta L_{WR,road,i,m}$  (Table F4);

| Category  | Coeff.<br>Speed                                         | Coefficients $\alpha_{i,m}$ and $\beta_m$ for road surface |      |      |       |       |       |       |
|-----------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|           |                                                         | 63                                                         | 125  | 250  | 500   | 1000  | 2000  | 4000  |
|           |                                                         | OCTAVE BAND                                                |      |      |       |       |       |       |
| Reference | 0.00                                                    | 0.00                                                       | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| 1-layer   | -6.50                                                   | 0.50                                                       | 3.30 | 2.40 | 3.20  | -1.30 | -3.50 | -2.60 |
| ZOAB      | 0.20                                                    | 0.90                                                       | 1.40 | 1.80 | -0.40 | -5.20 | -4.60 | -3.00 |
| for 1,2,3 | 0.20                                                    | 9.00                                                       | 1.40 | 1.80 | -4.00 | -5.20 | -4.60 | -3.00 |
| Category  | Result: Corection of Effect of the type of road surface |                                                            |      |      |       |       |       |       |
| 1         | 50                                                      | 0.00                                                       | 0.00 | 0.00 | 0.00  | -0.35 | -2.55 | -1.65 |
| 2         | 50                                                      | 0.00                                                       | 0.00 | 0.00 | -0.66 | -5.23 | -4.63 | -2.33 |
| 3         | 45                                                      | 0.00                                                       | 0.00 | 0.00 | -4.04 | -5.24 | -4.64 | -2.12 |

(2-layer ZOAB, 2-layer ZOAB (fine), Brushed down concrete).

## 5. TOTAL SOUND POWER LEVEL OF THE SOURCE LINES

$$L_{w(v)} = 10 * \text{LOG}(\text{POWER}(10, L_{WR(v)}/10) + (\text{POWER}(10, L_{WP(v)}/10)))$$

Tablo 4a. Level for rolling noise and propulsion noise -

$$L_{w,i,m}(v)$$

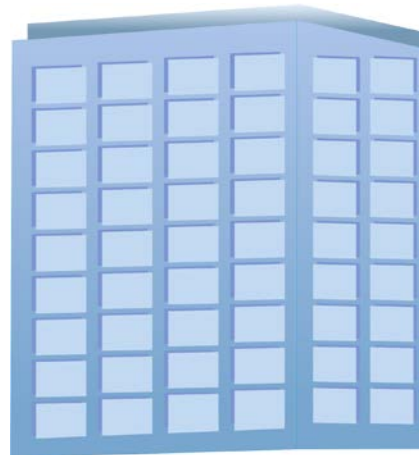
| Category           | Speed<br>Band<br>km/h | $L_{w,i,m}(v)$ Level for rolling noise and propulsion noise |        |        |        |        |        |        |
|--------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    |                       | 63                                                          | 125    | 250    | 500    | 1000   | 2000   | 4000   |
|                    |                       | OCTAVE BAND                                                 |        |        |        |        |        |        |
| 1. M1, N1          | 50                    | 104.40                                                      | 100.76 | 102.32 | 103.07 | 100.33 | 103.94 | 95.41  |
| 2. M2, M3, N2, N3  | 50                    | 75.43                                                       | 91.48  | 101.50 | 107.41 | 143.59 | 128.95 | 116.06 |
| 3. M2, N2, M3, N3  | 45                    | 76.29                                                       | 94.71  | 105.15 | 113.45 | 120.54 | 121.09 | 115.27 |
| 4a. L1, L2, L6     | 40                    | 3.01                                                        | 3.01   | 3.01   | 3.01   | 3.01   | 3.01   | 3.01   |
| 4b. L3, L4, L5, L7 | 35                    | 0.00                                                        | 0.00   | 0.00   | 93.70  | 96.60  | 98.80  | 93.90  |

## 6. TRAFFIC FLOW $Q_m$

$$L_{w',eq,line,i,m}(v) = L_{w,i,m} + 10 * \log(Q_m/(1000 * V_m));$$

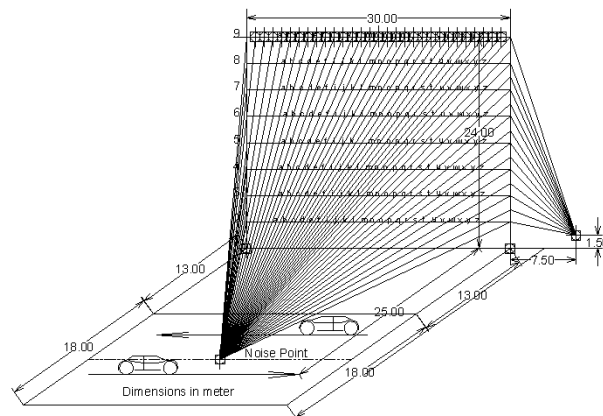
where  $L_{w,i,m}$  is the directional sound power of a single vehicle.

$L_{w',m}$  is expressed in dB. These sound power levels are calculated for each octave band i from 125 Hz to 4 kHz



## 7. Schematic setup of the measuring points of the noise generated by traffic on the building.

Are defined lines of distribution of midpoint - the source of distance on the field 0.6m and 104 measuring points on the facade of the building in dB.



## 8. Result of measurement of noise for building.

| 9 | a    | c    | e    | i    | k    | m    |
|---|------|------|------|------|------|------|
| 8 | 54.6 | 53.5 | 57.6 | 58.1 | 58.9 | 59.4 |
| 7 | 56.8 | 55.1 | 56.1 | 57.8 | 58.7 | 59.2 |
| 6 | 57.1 | 57.5 | 56.6 | 58.4 | 62.4 | 63.6 |
| 5 | 57.6 | 58.3 | 59.4 | 60.2 | 64.3 | 65.5 |
| 4 | 58.1 | 58.4 | 62.7 | 64.3 | 65.1 | 66.3 |
| 3 | 59.2 | 60.1 | 61.3 | 65.4 | 69.4 | 71.4 |
| 2 | 60.2 | 65.3 | 69.4 | 70.6 | 71.5 | 72.6 |
| 1 | 69.4 | 71.5 | 72.6 | 73.3 | 75.3 | 78.1 |

| 9 | o    | p    | r    | t    | v    | x    | z    |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| 8 | 59.9 | 62.8 | 56.1 | 55.6 | 54.4 | 49.1 | 48.1 |
| 7 | 58.1 | 57.9 | 56.9 | 58.1 | 52.2 | 49.2 | 48.4 |
| 6 | 63.3 | 62.1 | 61.8 | 59.2 | 55.3 | 55.1 | 53.2 |
| 5 | 64.2 | 63.3 | 62.4 | 61.1 | 54.2 | 54.1 | 54.1 |
| 4 | 70.5 | 69.6 | 68.3 | 67.5 | 56.3 | 56.8 | 52.5 |
| 3 | 72.2 | 69.7 | 69.5 | 68.7 | 59.1 | 58.4 | 56.2 |
| 2 | 75.1 | 73.3 | 72.4 | 70.2 | 65.4 | 60.3 | 58.1 |
| 1 | 78.6 | 77.4 | 73.5 | 72.3 | 70.1 | 68.3 | 62.2 |

9. *Conclusion from the simulation:* There is a uniform distribution of noise on the building. Conducted noise measurements of the levels of the floors of the building points corresponds with the results of the calculations. It has been found that the level of noise in the presence of wind of the above 7 to 9 floors.

#### 10. References

1. Cnossos-eujrc reference report\_final\_on line version\_10 august 2012.
2. ASSESSMENT METHODS FOR THE NOISE INDICATORS, REFERRED TO IN ARTICLE 6 OF DIRECTIVE 2002/49/EC, EUROPEAN COMMISSION, 2015.

## МОДЕЛИРАНЕ НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО НА ШУМА ОТ АВТОМОБИЛЕН ТРАФИК ВЪРХУ ФАСАДАТА НА МНОГОЕТАЖНА ЖИЛИЩНА СГРАДА

Доц. д-р инж. Милчо Георгиев

ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, София 1700, [mtge@tu-sofia.bg](mailto:mtge@tu-sofia.bg)

**Резюме:** Целта на изследването е моделиране на разпространението на шума от автомобилен трафик върху фасадата на многоетажна жилищна сграда в непосредствена близост до градски булевард с оглед предприемане на мерки за намаляване на шумовото въздействие върху сградата

**Ключови думи:** моделиране на шумовото състояние, измерване на шум, мерки за намаляване на шумовото състояние в околната среда