

ISSN 1312-4897

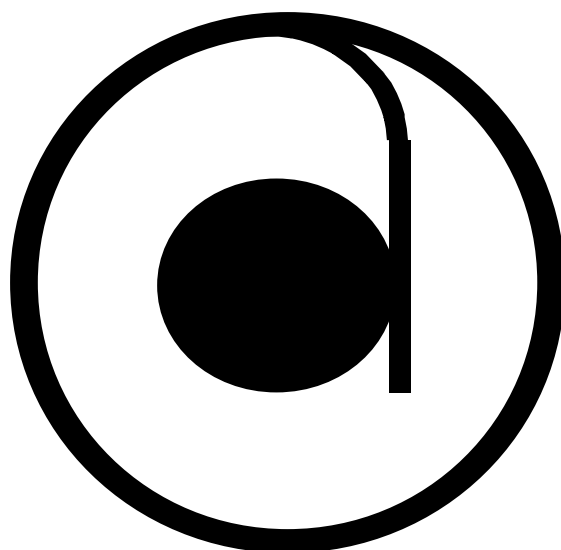
АКУСТИКА

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

Година XVII

□ Брой 17

Декември 2015 год.



НАЦИОНАЛНА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКА КОНФЕРЕНЦИЯ

АКУСТИКА 2015

*09-10.10.2015 г.
Варна*

*27-28.11.2015 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-н М. Миховски

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

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

Членове: проф. д-н В. Иванов, доц. д-р Г. Евстатиен, 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;**

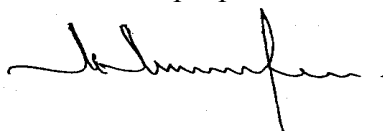
**Акустични и ултразвукови методи за изследване на материали и изделия
(безразрушителен контрол); Стратгически шумови карти, мерки и планов;
Непрекъснат вибрационен мониторинг на въртящи се машини и съоръжения;**

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

Въздействието на шум и вибрации върху човека.

В сп. Акустика, год. XVII, бр.17, 2015 г. са отпечатани
доклади, включени в научната програма на
Националната конференция “Акустика 2015”,
проведена във Варна на 09-10.10.2015 г. и
в София на 27-28.11.2015 г.

Председател на Програмния комитет:



(проф.д-н М. Миховски)

ISSN 1312-4897

Редакционна колегия: проф.д-н 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, 2015 г.

СЪДЪРЖАНИЕ

1	Михайлов Б. НОВОСТИ В ОБЛАСТТА НА ШУМА И ВИБРАЦИИТЕ ОТ СПЕКТРИ ЕООД	8 – 12
2	Георгиев М., Б. Михайлов ПРЕДСТАВЯНЕ НА ПРОЕКТИРАНА, ИНСТАЛИРАНА И ПУСНАТА В ЕКСПЛОАТАЦИЯ ОТ СПЕКТРИ ЕООД СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ НА ВИБРАЦИОННОТО ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ КОНСТРУКЦИЯ НА ПРОМИШЛЕНА СГРАДА-СИСТЕМА, БАЗИРАНА НА МОДУЛНО РШЕНИЕ РСН1420	13 – 16
3	Георгиев М., Б. Михайлов АКУСТИЧНО ОБСЛЕДВАНЕ И МЕРКИ ЗА НОРМАТИВНО ОБОСНОВАНА РЕДУКЦИЯ НА ШУМА НА СМСЕН ПРОМИШЛЕН И ОФИС ОБЕКТ С КЛИМАТИЧНИ ИНСТАЛАЦИИ И ДВИЖЕНИЕ НА АВТОМОБИЛИ	17 - 22
4	Михайлов Б. ЦЯЛОСТНО ОБНОВЯВАНЕ НА СИСТЕМАТА ЗА МОНИТОРИНГ НА ЛЕТИЩЕН ШУМ	23 – 26
5	Михайлов Б. WEBNOISE.EU СОБСТВЕНОТО РЕШЕНИЕ НА СПЕКТРИ ЕООД. (приложения в гр. Бургас, гр. Пловдив, Челопеч, Раднево, др.)	27 – 30
6	Данаилов А., Ст. Шилев СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ПРОМЯНАТА НА АКУСТИЧНОТО НАТОВАРВАНЕ ПРИ УЛИЧНИ РЕКОНСТРУКЦИИ В ГРАД ПЛОВДИВ.	31 – 33
7	Чушков М. НАЦИОНАЛЕН ЕТАЛОН ЗА ЗВУКОВО НАЛЯГАНЕ ВЪВ ВЪЗДУШНА СРЕДА. ОСИГУРЯВАНЕ НА ПРОСЛЕДИМОСТ. МЕЖДУНАРОДНИ СРАВНЕНИЯ.	34 - 38
8	Михайлов Б. КОМПЛЕКСЕН ПРОЕКТ ОПРЕДЕЛЯНЕ НА АКУСТИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ТРАНСФОРМАТОРИ И НА РЕЗУЛТАНТНАТА СТОЙНОСТ НА ЗВУКОВАТА МОЩНОСТ. ИЗМЕРВАНИЯ В ЗВУКОИЗОЛИРАНА КАМЕРА.	39 – 41
9	Михайлов Б. РЕАЛИЗАЦИЯ НА ИЗМЕРВАНЕ, ОБСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ЕСТЕСТВО НА ОПЛАКВАНЕ ОТ НИСКОЧЕСТОТЕН/ ТОНАЛЕН ШУМ. ПРАКТИЧЕСКИ ПРИМЕР.	42 – 44
10	Ковтун В., М. Миховски, В. Банний ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ОСНОВЕ МТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ.	45 – 49
11	Петров П., Б. Найденов ЕТАПИ ЗА ВНЕДРЯВАНЕ И ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ НА ТЕХНОЛОГИЯТА ЗА ВИСОКОСКОРОСТНО ПАКЕТНО ПРЕДАВАНЕ НА ДАННИ В НИЗХОДЯЩАТА ЛИНИЯ НА МОБИЛНА СИСТЕМА UMTS/HSPA	50 – 53
12	Синапов П. ФРИКЦИОННИ САМОВЪЗБУЖДАЩИ СЕ ТРЕПТЕНИЯ НА НЯКОИ МЕХАНИЧНИ СИСТЕМИ	54 – 57

13	Петров П., Б. Найденов ПРИЛОЖЕНИЕ НА ПРЕОБРАЗУВАНИЯТА НА ФУРИЕ ЗА РЕАЛИЗИРАНЕ НА OFDM-МОДУЛАЦИЯТА В МНОГОКАНАЛЕН SS-МС-МА – ПРЕДАВАТЕЛ. ЧАСТ 1	58 - 61
14	Петров П., Б. Найденов ПРИЛОЖЕНИЕ НА ПРЕОБРАЗУВАНИЯТА НА ФУРИЕ ЗА РЕАЛИЗИРАНЕ НА OFDM-МОДУЛАЦИЯТА В МНОГОКАНАЛЕН SS-МС-МА–ПРЕДАВАТЕЛ. ЧАСТ 2	62 – 65
15	Ганчев Т. МОРФОЛОГИЧНА ОБРАБОТКА НА АУДИО СПЕКТОГРАМИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ АКУСТИЧНОТО РАЗПОЗНАВАНЕ НА ПТИЦИ	66 – 69
16	Илиев И. ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕСТАЦИОНАРНИ АКУСТИЧНИ СИГНАЛИ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ВРЕМЕННО-ЧЕСТОТЕН АНАЛИЗ ПО МЕТОДА НА ПРОЗОРЕЧНО ФУРИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ	70 – 73
17	Kudina E., V.P. Sergienko, S. Bukharov, J. Malachowski, M. Mihovski, Y. Mirchev MATERIALS FOR PROTECTION OF OIL AND GAS PIPELINES FROM MECHANOCHEMICAL DAMAGE	74 – 81
18	Пировски Х.А. МЕТОДИКА ЗА ОЦЕНЯВАНЕ ИЗМЕНЕНИЕТО НА КОМФОРТА В ЖИЛИЩНИТЕ ТЕРИТОРИИ ОТ ВЪЗДЕЙСТВИЕТО НА ШУМ И ИНФРАЗВУК ИЗЛЪЧВАН ОТ КОМПРЕСОРНИ СТАНЦИИ	82 – 85
19	Пировски Х.А. ИЗСЛЕДВАНЕ ВЪЗДЕЙСТВИЕТО ВЪРХУ ОКОЛНАТА СРЕДА НА ИЗТОЧНИЦИТЕ НА ШУМ ОТ КОМПРЕСОРНИ СТАНЦИИ И ГАЗОРАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ ТЕРМИНАЛИ	86 – 89
20	Генов Б., Г. Генов, Й. Мирчев АКУСТИЧНИ ОСЦИЛАЦИИ ПРИ НЕСТАБИЛНО ГОРЕНЕ НА РАКЕТНИ ДВИГАТЕЛИ.	90 – 95
21	Стайков К., Д. Ганчев БЕЗРАЗРУШИТЕЛНО ИЗПИТВАНЕ НА СТОМАНЕНИ СЪЛБОВЕ ОТ ПЪТНАТА ИНФРАСТРУКТУРА ЧРЕЗ НОРМАЛНИ УЛТРАЗВУКОВИ ВЪЛНИ.	96 – 99
22	Колев Н., П. Иванов ИЗМЕРВАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКАТА НА НАСОЧЕНОСТ НА БУТАЛЕН ЛКТРОАКУСТИЧЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ В ХИДРОАКУСТИЧЕН БАСЕЙН.	100 – 103
23	Коларов И. ВИБРО-АКУСТИЧЕСКА ДИАГНОСТИКА НА КЛАПАНИ ОТ ДВИГАТЕЛИ С ВЪТРЕШНО ГОРЕНЕ – ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТТА ПРИ ДИАГНОСТИКА	104 – 109
24	Коларов И., П. Ташев УЛТРАЗВУКОВО ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАНО-МОДИФИЦИРАНИ С TIN СЛОЕВЕ ПОЛУЧЕНИ ЧРЕЗ НАВАРЯВАНЕ С ТРЪБЕН САМОЗАЩИТЕН ТЕЛ.	110 – 113
25	Иванов И., С. Колев, М. Лолов, В. Косев ВИЗУАЛИЗИРАНЕ НА ХИДРОАКУСТИЧНАТА ИНФОРМАЦИЯ ОТ	114 - 120

	СЕКТОРЕН ХИДРОЛОКАТОР С МНОГОЛЪЧЕВА ДИАГРАМА НА НАСОЧЕНОСТ.	
26	Коларов И. ВИБРО-АКУСТИЧЕСКО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЦИЛИНДРИЧНИ ОБРАЗЦИ С ТИПИЧНИ ОТКЛОНЕНИЯ НА ПРОФИЛА	121 – 126
27	Пировски Х.А., Х.С. Драганчев ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА СТАБИЛИЗАТОРИ НА НАЛЯГАНЕ В УРДБА ЗА КОМПРИМИРАНЕ И УТИЛИЗАЦИЯ НА ФАКЛНИ ГАЗОВЕ	127 – 130
28	Кожушко В., П. Сергеинко, Й. Мирчев, М. Миховски ЛАЗЕРНЫЙ УЛЬТРАЗВУК ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ	131 – 135
29	Кожушко В., Й. Мирчев, М. Миховски, П. Чукачев ОТРАЖЕНИЕ НА УЛТРАЗВУКОВО ПОЛЕ ОТ НЕРАВНА ПОВЪРХНИНА С ИЗПОЛЗВАНЕ НА ФИЗИРАЩ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ В ИМЕРСИОНЕН ВАРИАНТ	136 – 141
30	Желязов Т., S. Ólafsson, R. Sigbjörnsson МЕХАНИЧНО ПОВЕДЕНИЕ НА ЛАГЕРНО УСТРОЙСТВО ПРИ СЕИЗМИЧНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ.	142 – 144
31	Данаилов П. ЕДИН ПОГЛЕД (И УХО) КЪМ ШУМА НА ДЕТСКИТЕ ИГРАЧКИ	145 – 148
32	Георгива Л. ЗА НЯКОИ АСПЕКТИ НА ВЛИЯНИЕТО НА КУТИЯТА ВЪРХУ ШУМА И ВИБРАЦИИТЕ НА КОМПЮТЪРА	149 – 152
33	Чукачев П., М. Миховски, Й. Мирчев АВТОМАТИЗИРАНО УЛТРАЗВУКОВО ИЗПИТВАНЕ НА ЗАВАРЕНИ СЪЕДИНЕНИЯ НА ТРЪБОПРОВОДИ	153 – 155
34	Миховски М., Й. Мирчев, П. Чукачев, В. Сергеинко ОЦЕНКА НА МЕХАНИЧНО НАПРЕГНАТО СЪСТОЯНИЕ НА ТРЪБОПРОВОДИ НА ОСНОВАТА НА РУСКИ НОРМАТИВНИ ДОКУМЕНТИ	156 – 159
35	Иванов И. ХИДРОАКУСТИЧНА ЦИЛИНДРИЧНА АНТЕНА ЗА СЕКТОРЕН ХИДРОЛОКАТОР	160 – 163
36	Мирчев Й., П. Чукачев, М. Миховски СРАВНИТЕЛНИ ОБРАЗЦИ ЗА ОЦЕНКА НА МЕХАНИЧНОТО НАПРЕГНАТО СЪСТОЯНИЕ НА МАТЕРИАЛИ	164 – 166
37	Стайков К. НЯКОИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ИЗПИТВАНЕ НА ТРЪБОПРОВОДИ С НОРМАЛНИ ВЪЛНИ ЧРЕЗ ЕМАТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.	167 – 170
38	Николов Б., М. Шотова ИЗСЛЕДВАНЕ И СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ФОРМАТИТЕ ЗА ВИДЕО КОМПРЕСИЯ H.264/HEVC	171 – 174

39	Попов Ал. <u>УЛТРАЗВУКОВО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АХАТИ.</u>	175 – 178
40	Чириков В., Д. Димитров, Й. Бояджиев МЕТОДИ ЗА ПРЕСМЯТАНЕ НА УМОРНА ДЪЛГОТРАЙНОСТ ЗА МОРСКИ КОНСТРУКЦИИ	179 – 183
41	Георгиева Т. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОЧНОСТТА, КАЛИБРИРАНЕТО И ФУНКЦИОНАЛНОСТТА НА СРЕДСТВАТА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ШУМА В ОКОЛНАТА СРЕДА.	184 – 187
42	Георгиева Т. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОЧНОСТТА И ОЦЕНКА НА РЪЧНИТЕ ИЗМЕРВАТЕЛНИ СРЕДСТВА НА ВИБРАЦИИ С ОГЛЕД ПОСТИГАНЕ КАЧЕСТВО НА ИЗМЕРВАНЕ.	188 – 191
43	Чириков В., Д. Димитров ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ФОРМУЛЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТ ОТ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ СВОБОДНЫХ БАЛОК ИЗ АЛЮМИНИЯ	192 – 194

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



Adash Ltd.
www.adash.cz



PCH Engineering A/S
www.pch-engineering.dk



BEYOND MEASURE

Brüel & Kjær S&V A/S
www.bksv.com



Eesiflo • www.eesiflo.com



Odeon • www.odeon.dk



InstanTel • 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
www.spectri.bg • www.шумомер.eu • www.шум.eu • www.вибромер.eu • www.вибрации.eu • www.webnoise.eu



www.spectri.net

	АКУСТИКА Национална конференция "Акустика 2015"	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

НОВОСТИ В ОБЛАСТТА НА ШУМА И ВИБРАЦИИТЕ ОТ СПЕКТРИ ЕООД

Борис Михайлов ¹⁾

¹⁾ СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421, spectri@spectri.net, 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 произвеждани 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 произвеждани 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 произвежданите 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

сервера 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 pH, 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 & Kjaer 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 EOOD –Data Logger-SP1



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

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.

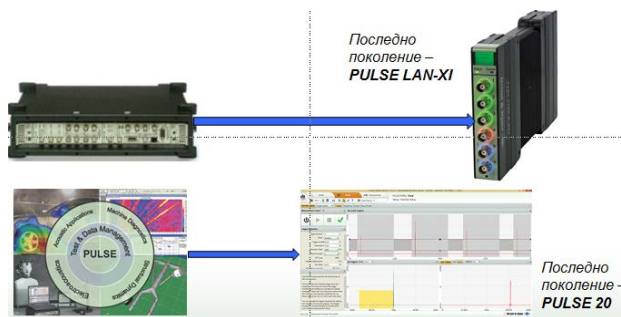
Шумът е един от факторите с неблагоприятно въздействие върху населението в големите градове. Породен от развитието на промишленото производство, на пътническите, товарните и водните транспортни средства и масовият градски транспорт. Дългогодишните изследвания показват, че нивото на шума в последните 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 компенсират 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 слеене 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



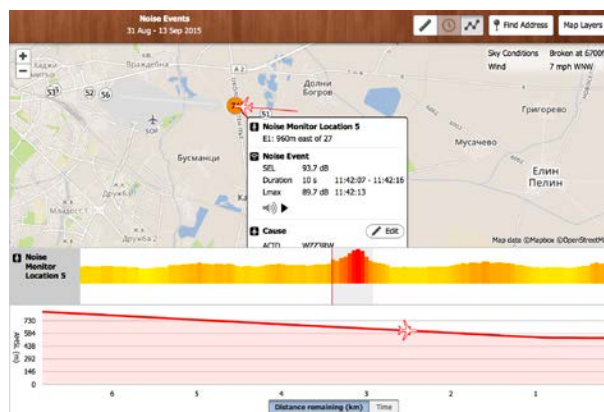
Фиг. 8 Система за измерване на акустични параметри

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: поддръжане 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 Mihaylov¹⁾

¹⁾ SPECTRI Ltd., 30, "St. T. Turnovski" Str., Sofia 1421, spectri@spectri.net, 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;
- [2] Интернет базирана информация: Вж. www.WEBNOISE.eu;
- [3] Интернет базирана информация: Вж. 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/>.

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2015”	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

ПРЕДСТАВЯНЕ НА ПРОЕКТИРАНА, ИНСТАЛИРАНА И ПУСНАТА В ЕКСПЛОАТАЦИЯ ОТ СПЕКТРИ ЕООД СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ НА ВИБРАЦИОННОТО ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ КОНСТРУКЦИЯ НА ПРОМИШЛЕНА СГРАДА - СИСТЕМА, БАЗИРАНА НА МОДУЛНО РЕШЕНИЕ PCH1420

PRESENTATION, CONFIGURATION, INSTALLATION AND PUT INTO USE IN SPECTRI Ltd. OF SYSTEM FOR CONTINUOUS VIBRATION MONITORING OF INDUSTRIAL BUILDING - SYSTEM BASED ON MODULAR SOLUTION AT PCH1420

Доц. д-р инж. Милчо Георгиев ¹⁾, инж. Борис Михайлов ²⁾

¹⁾ ТУ-София, МФ, mtge@tu-sofia.bg, www.tu-sofia.bg, България

²⁾ СПЕКТРИ ЕООД, София, spectri@spectri.net, www.spectri.net, България

Abstract: This paper presents the configuration of a system for continuous vibration monitoring of industrial buildings, systems and facilities, and practical system implementation based on the new product range Vibration control PCH1420 and PCH1120 in cooperation with partner for Spectri Ltd - Vibration monitoring PCH Engineering A/S. Concept is defined in configuration PCH1420 based system, selection and location of measuring points and configuration parameters. For working evaluate the accuracy of measurement in the control points is performed with the system PULSE Reflex 3560-B of Brüel & Kjær.

Key-Words: - Vibration, Noise, Vibration and Noise measurement, Monitoring, Vibration Control

Резюме: В този документ се представя конфигурация на изградена система за постоянен вибрационен мониторинг на индустриални сгради, системи и съоръжения в 12 точки, както и практическа системна реализация на базата на новата продуктова гама за виброконтрол PCH1420 в сътрудничество с партньора на СПЕКТРИ ЕООД за вибрационен мониторинг PCH Engineering A/S. Дефинира се концепция по конфигурация на PCH1420 базирана система, избор и местоположение на измервателни точки и конфигурационни параметри. Работната оценка на точността на измерване в контролните точки се извършва със системата PULSE Reflex 3560-B на Brüel & Kjær.

Ключови думи: - Вибрации, шум, измерване на вибрации и шум, мониторинг, виброконтрол.

Abstract: - Summary: This paper presents the configuration of a system for continuous vibration monitoring of industrial buildings, systems and facilities, and practical system implementation based on the new product range Vibration control PCH1420 and PCH1120 in cooperation with partner for Spectri Ltd - Vibration monitoring PCH Engineering A/S. Concept is defined in configuration PCH1420 based system, selection and location of measuring points and configuration parameters. For working evaluate the accuracy of measurement in the control points is performed with the system PULSE Reflex 3560-B of Brüel & Kjær.

Key-Words: - Vibration, Noise, Vibration and Noise measurement, Monitoring, Vibration Control

1. Въведение

Мониторингът на функционирането на индустриални машини и съоръжения е от съществено значение за работоспособността и дълготрайността им както по отношение на основните технически показатели така и по отношение на вибрационното им състояние.

Конфигурирането на зададена система за виброконтрол се базира на типа машина, и изискванията за нива на вибрациите – номинални, гранични и нива на превишение за предприемане на действия за изключване.

Конфигурираната система за постоянен вибрационен мониторинг на машини и конструкции, подложени на вибрации в резултат на тяхната работа (бутални, ротационни и винтови помпи и компресори, промишлени сгради подложени на вибрации) или в резултат на въздействие на околната среда, се базира на модула PCH1240 (4 бр.) и като опция модула SNB1120 (EtherBridge) за свързване на няколко модула тип PCH1240 по TCP/IP LAN.

Мониторинговият модул за контрол на вибрациите на машини PCH1420, включва 4 измервателни канала (със сигнализация на предния панел) в честотния обхват 0.7 Hz до 115 kHz, 4 изходящи сигнала 4-20 mA/10V и 2 релейни сигнала (4 конфигурационни аларми) за предприемане на действие. Запис на суров сигнал и последващ FFT анализ. Отговаря на функционалните изисквания за безопасност в съответствие с ISO 13849-1 и защита на обекта според API670 норми - време на реакция не повече от 100 ms.

Мониторинговият модул PCH1420 и комуникационният модул PCH1120 се конфигурират чрез специализираният софтуер PCH Vibration Studio. Мониторингов модул на вибрации (Фиг.1) PCH1240 се комплектува с широк спектър от акселерометри тип CTC от PCH Engineering A/S. Модулът е окомплектован със софтуер за връзка с PC - PCH Vibration Studio, чрез USB/RS-485 port – настройка на параметрите на измерваните величини, визуализация и генериране на аларми (4 бр.) за състоянието на процеса на измерване и контрол на вибрационното състояние.

2. Изложение

Реализация на конфигурация на 12 (3 x 4) канална система за постоянен вибрационен мониторинг на индустриални машини, съоръжения и промишлени сгради, на базата на 3 бр. мониторингови модули тип PCH1420 за контрол на вибрациите и комуникационният модул PCH1120. Визуализация на контролираните параметри: в PCH Vibration Studio на компютър по USB/RS-485 port; - възможна е визуализация на нивата на вибрациите към съществуваща контролираща или визуализационна система на други параметри на машините чрез 12 (3 x 4) аналогови сигнали 4-20mA/10V и 3 релейни сигнала за аларми (или опция - конвертиране на протокола чрез PCH EtherBridge®, type CHB1120 за свързване на няколко модула тип PCH1240 по RS-485 или по Ethernet – предлагат се комуникационните протоколи Modbus TCP и OPC UA за HMI устройства). Измерване на вибрационното състояние е чрез акселерометри тип CTC/M/AC102-1A. Свързващите кабели се присъединяват чрез куплунг с резбово съединение към акселерометрите. Акселерометрите са монтирани в кутия IP56, кабелите са в метални гофрети.



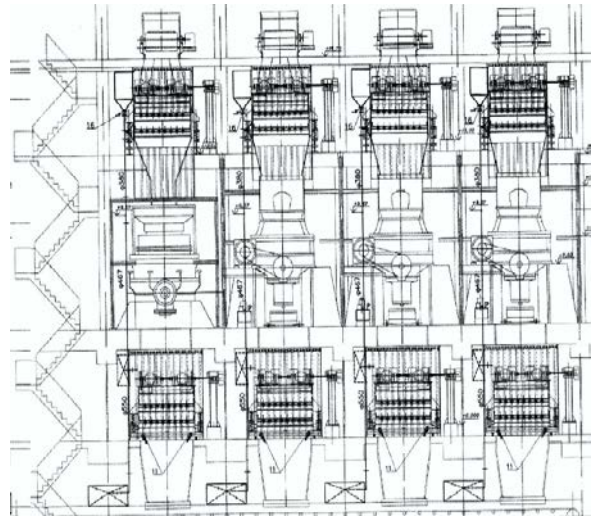
Фиг.1 Модули и акселерометри

Захранването на мониторинговите модули PCH1420 (4 бр.) и PCH 1120 е на 24V, 10W. В комплекта на конфигурираната система е включен захранващ модул TDK Lambda 24VDC/220-240V. Мониторинговите модули PCH1040 и комуникационния модул 1120, с захранващият модул TDK Lambda 24V/220V, се монтират в стандартно електротехническо табло CRN 250x200x150 (IP65) с 12 кабелни входа PG9. С посочените модули може да се конфигурира разширяема мониторингова система на контрол на вибрации на обекти.

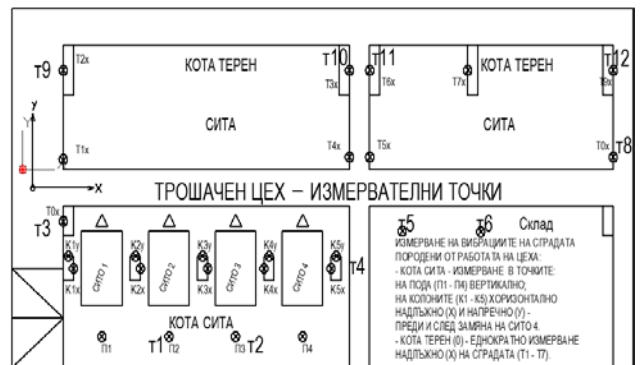
3. Базова конфигурация.

В случая, мониторинговата система е приложена на промишлена сграда подложена на вибрации от монтираните вибрационни машини с непрекъснат цикъл на работа.

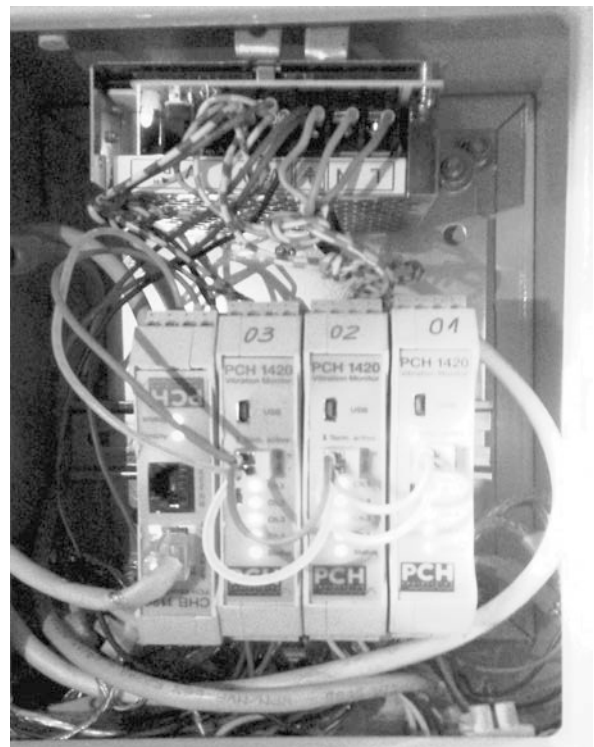
Акселерометрите тип CTC/M/AC102-1A се монтират чрез резбово съединение към анкерни монтажни планки на сградата, на крайните и междинните колони в хоризонтално и във вертикално направление и на средата на пода срещу всяка машина, общо 12 измервателни точки. Използваните типове кабели за свързване са: – Захранване, Гъвкав екраниран кабел LiYCY 3x0.75mm², външен диаметър 6.3mm -1 бр.; – Аналогови и релейни сигнали, Гъвкав екраниран кабел LiYCY 6x0.34mm², външен диаметър 7.2mm – 1 бр. с дължина 50 м; – Аналогови сигнални кабели 12 бр., 0.75 mm²; LAN кабел към информационната система е с дължина 150 m.



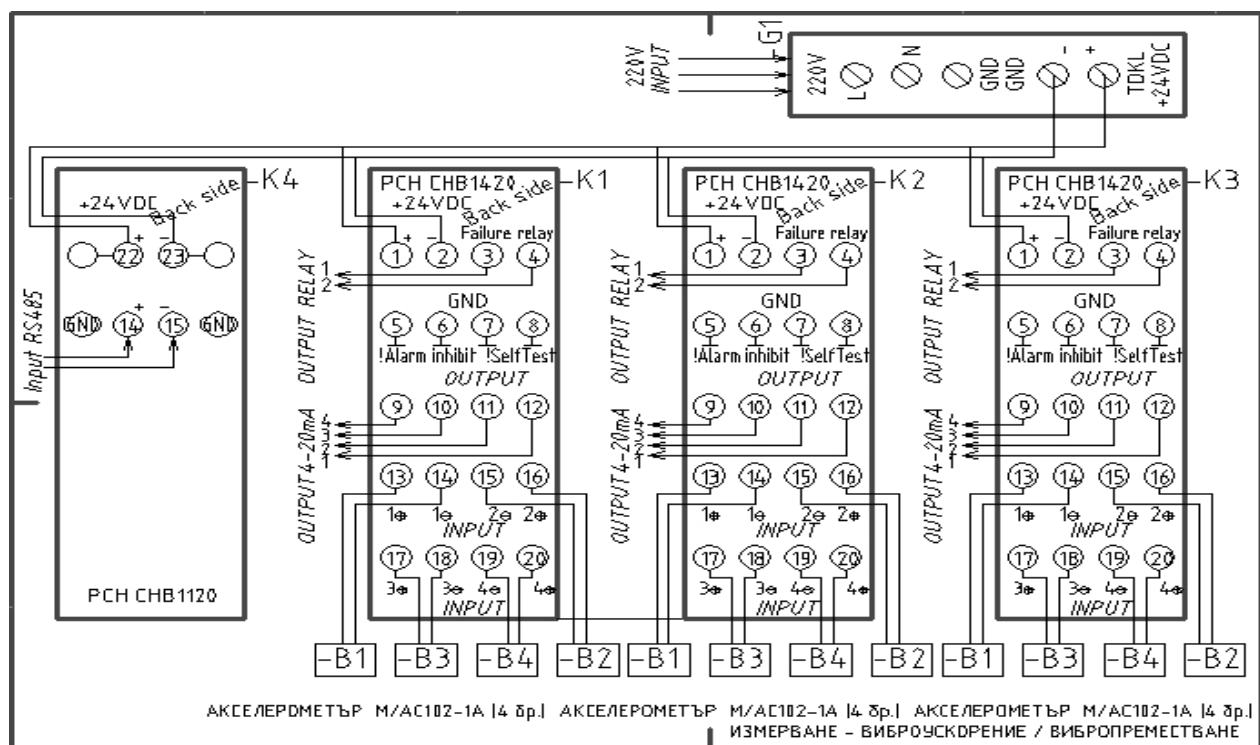
Фиг.2 Вертикална схема на сградата



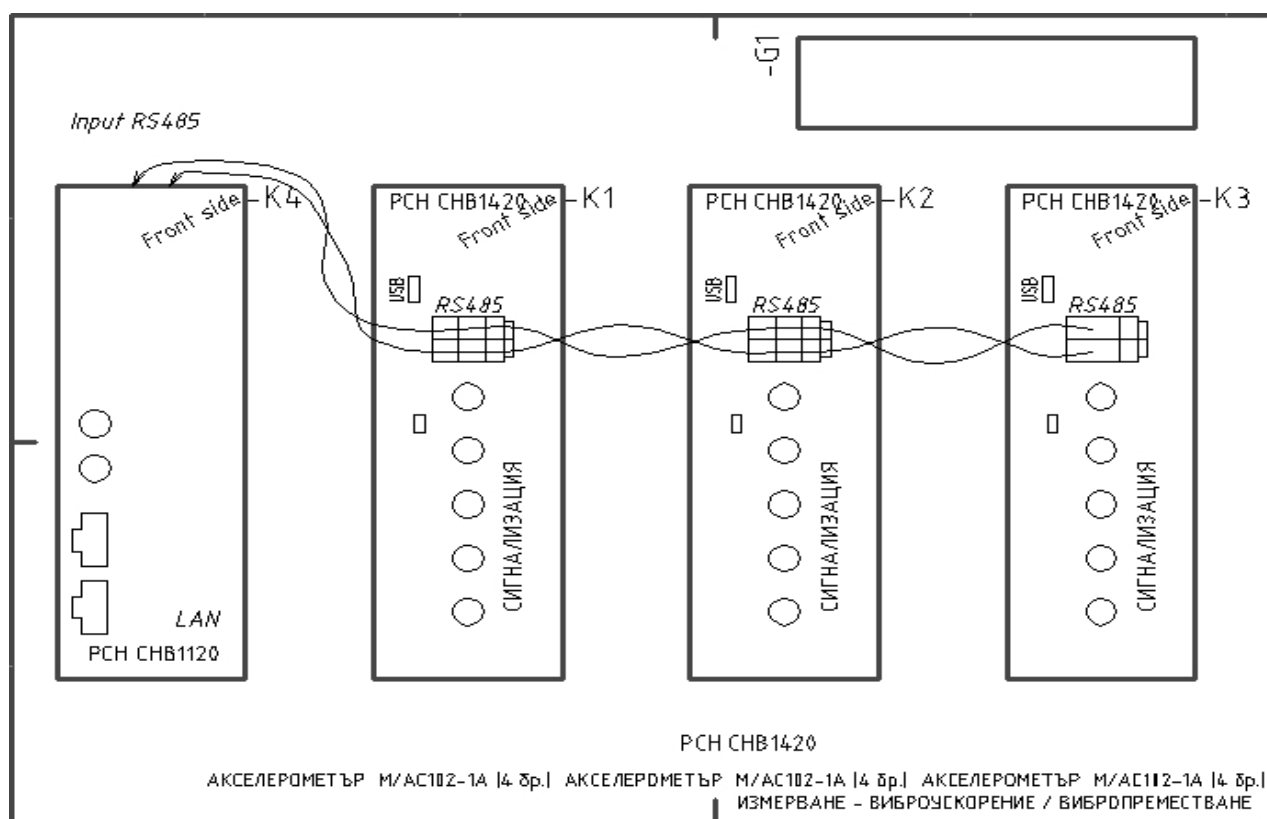
Фиг.3 Схема на разположение на точките на измерване: Т1-Т12 в надлъжно, напречно и вертикално направления.



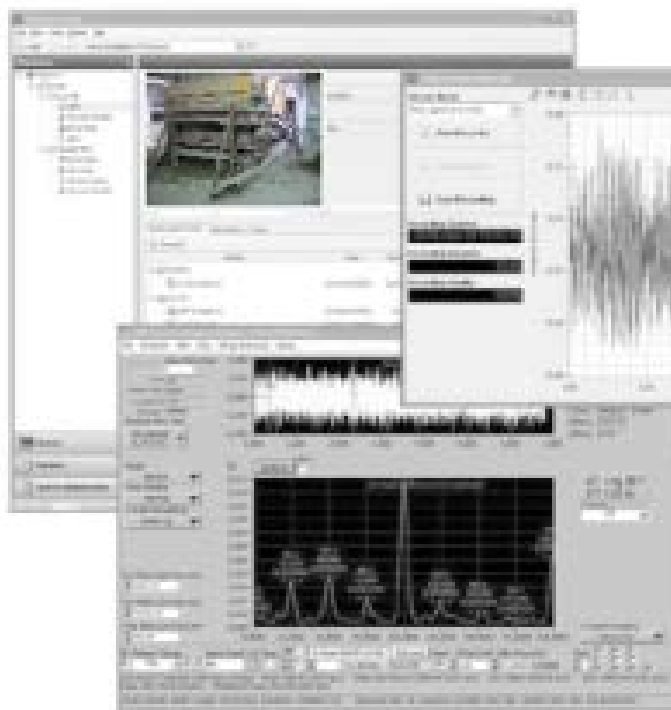
Фиг.4 Табло с вградени мониторингови модули PCH1420(3бр.) и PCH 1120 (EtherBridge).



Фиг. 5 Схема на свързване на PCH CHB1420 и CHB1120



Фиг. 6 Схема на свързване на PCH CHB1420 и CHB1120

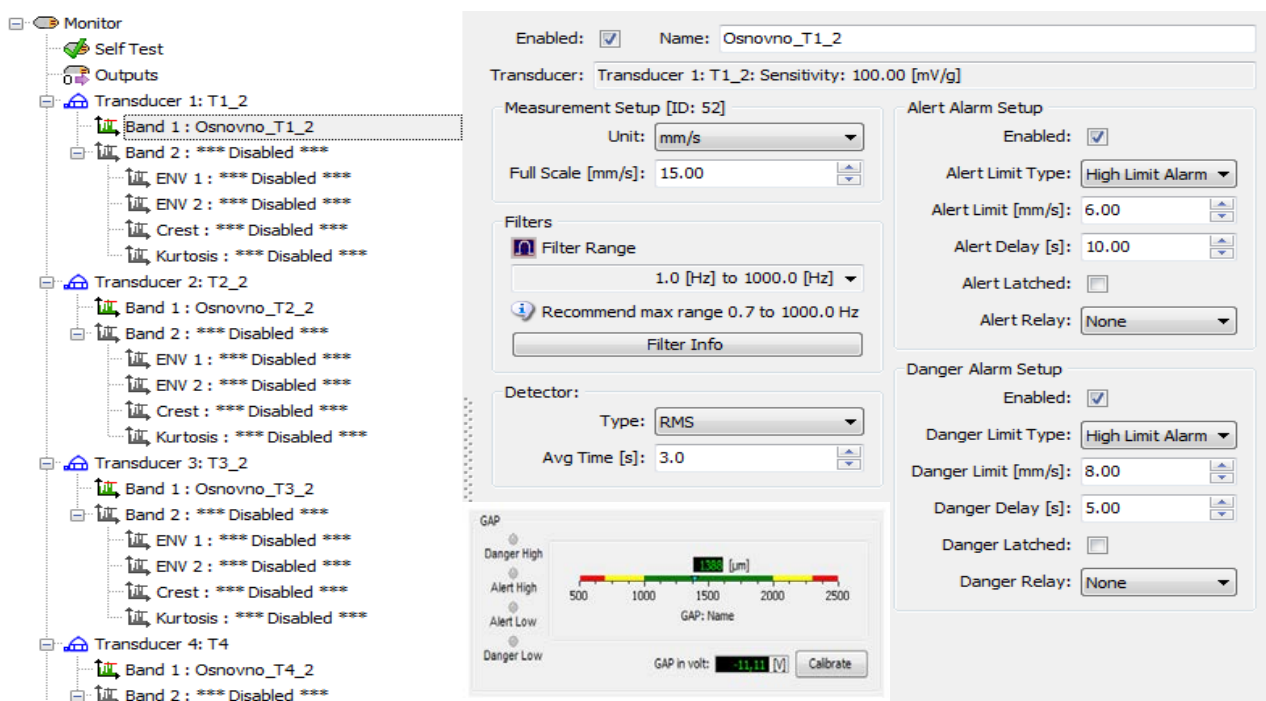


Настройки на системата за контрол:

Акселерометри с типична чувствителност 100mV/g;
Измервателен обхват – до 15mm/s; Честотен обхват –
от 1 Hz до 1000Hz; Аларми: ВНИМАНИЕ 6mm/s,
ОПАСНОСТ 8mm/s; последващо изключване.

Характеристики на PCH1420: EN/ISO 13849-1
функционална безопасност - допълнително може да бъдат
използвани като защита на изделията съгласно API670
норми за време за реакция на не повече от 100 мс. PCH
1420 Vibration Monitor включва: 4 вибрации входни
канали, 2 процесни входни канали; 4 конфигурируеми
изхода, сигнал 4-20 mA; Релеен сигнал за
предотвратяване на опасност; Потребителски
дефинирани филтри лентови от 0,7 Hz до 115 000 Hz;
Носещи детектори за грешки, Envelope, Crest и Kurtosis;
Задаване на алармени нива и времена на закъснение;
Времева форма на сигнала за запис на вибрации
последователност от 4 канала едновременно; Анализ
Offline FFT; Връзка с няколко монитора на системната
шина USB / RS 485 сериен порт; Ниво на безопасност
SIL-2 класиран и ГОСТ-Р сертификат.

Фиг.6 PCH Vibration Studio – основен екран, екран на
визуализация на вибрациите във времето и OF-Line FFT
анализ, визуализация на нивата на вибрациите на канал.



Фиг.7 PCH Vibration Studio - екран на настройка на измервателните канали
на нива на вибрациите: T1-2, T2-2, T3-2, T4-2, T4-2

ИЗВОДИ

Конфигурираната система за постоянен вибрационен мониторинг на индустриални машини и съоръжения на базата на базата на продуктова гама за виброконтрол PCH1420 на PCH Engineering A/S е компактна и има възможност за разширение, осигурява визуализация на нивата на вибрациите на локално PC чрез Vibration Monitor или чрез аналоговите изходи 4-20 mA/10V, на визуализационен контролер, а през релейния изход да подава сигнал за аларма с оглед на предприемане

на действия за принудително едновременно или последователно спиране на машините при превишаване на вибрационното въздействие на сградата под въздействие на машините предаващи вибрациите на сградата (трошачки и сита).

Контрол на измерените нива на вибрации е извършен със PULSE Reflex 3560-B (Brüel & Kjær).

6. Литература

- (1) www.bksv.com
- (2) www.pch-engineering.dk

АКУСТИЧНО ОБСЛЕДВАНЕ И МЕРКИ ЗА НОРМАТИВНО ОБОСНОВАНА РЕДУКЦИЯ НА ШУМА НА СМЕСЕН ПРОМИШЛЕН И ОФИС ОБЕКТ С КЛИМАТИЧНИ ИНСТАЛАЦИИ И ДВИЖЕНИЕ НА АВТОМОБИЛИ

Доц. д-р инж. Милчо Георгиев¹⁾, Инж. Борис Михайлов²⁾

¹⁾Технически университет - София, България, mtge@tu-sofia.bg, ²⁾СПЕКТРИ ЕООД, spectri@spectri.net

РЕЗЮМЕ: В публикацията е извършено акустично обследване и са предложени мерки за нормативно обоснована редукция на шума на сграда със смесена структура – промишлени складови и ремонтни помещения и офиси, климатизирани с климатични инсталации монтирани на покрива. На мястото има местно движение на автомобили и се обслужват и ремонтират автомобили и е в близост до главен път. Целта на проучването на акустиката е да се установят нивата на шума от вентилационните системи на място и местните движещи се автомобили на място, както и трафика на главния път по протежение на сайта и да предприемат мерки за намаляване на шумовото замърсяване.

SUMMARY: The publication was made acoustic survey and proposed measures to legally justified noise reduction of building a mixed structure - industrial warehouses and maintenance facilities and offices with air conditioning installations on the roof.

At the site has local movement of cars and serviced and repaired cars and is close to the main road.

The purpose of an acoustics survey is to establish noise levels from ventilation systems on site and local moving cars on site, and traffic on the main road along the site and take measures to reduction of noise pollution.

KeyWords: - Vibration, Noise, Vibration and Noise measurement, Monitoring, Vibration Control

1. Подход за решаване на проблема.

Акустично обследване и мерки за нормативно обоснована редукция на шума на смесена сграда с промишлени помещения за ремонт на автомобили и офис обекти, с климатични инсталации монтирани на покрива. Сградата е в близост до главен път с четири ленти на движение на леки и тежкотоварни автомобили. Целта е предприемане на мерки и действия с оглед намаляване на нивата на шум на територията на обекта. Приетият подход е да се създаде локален шумов GIS модел включващ терена, локацията на сградата, наличният локален и външен главен път, автомобилния трафик както и шумовото въздействие на климатичните системи върху сградата. Обследването се базира на следните нормативни документи:

- Закон за защита от шума в околната среда (Обн. ДВ, бр.74/2005 г.);
- Европейска шумова директива (END) 2002/49/ЕС;
- Ръководство за добра практика за изготвяне на стратегически шумови карти (разработена от работната група към ЕС-WG-AEN, 13.01.2006 г.);
- Наредба № 6 (от 26.06.2006 г.) за показателите за шум в околната среда, отчитаща степента на дискомфорт за отделните части на денонощието, граничните стойности на показателите на шум в околната среда, методи за оценка на стойностите на показателите за шум и на вредните ефекти от шума върху здравето на населението (Обн. ДВ, бр.58/2006 г.).



Фиг.1 Архитектурен изглед на обследвания обект

2. Локален геометричен модел.

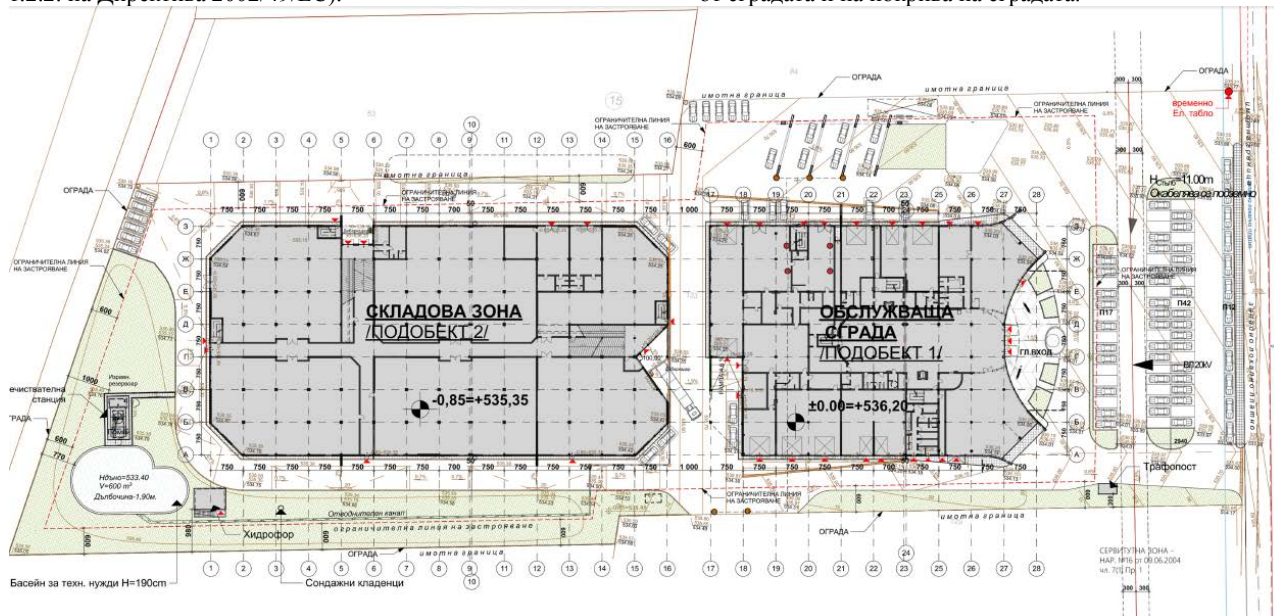
Създаден е локален GIS модел, включващ терена, сградата на обекта, телата на климатичните системи на сградата, локалния път около сградата, и главния път покрай обекта, бензиностанция в буфер.

3. Методи за измерване, които са използвани за валидиране на резултатите за шумовото въздействие.

За изчисляване и верификация на шумовото въздействие от експлоатацията на обекта, се използва

комбинация от национална и европейска изчислителни методики, както и реални верификационни измервания и изчисления в избрани точки на 1.5 м от фасадата на сградата. посредством инструментариум - акустични анализатори 2 бр. тип 2250, както и изчислителна платформа LimA на Brüel & Kjær. Използвани са следните методи за изчисление (съгласно Приложение II, т.2.2. на Директива 2002/49/ЕС):

Като входна информация за валидиране, калибриране и верификация на локалната карта за шум на обследвания обект са използвани както данните от проведените от СПЕКТРИ реални полеви измервания в 10 измервателни пункта (кратковременни 1 часови измервания). Дефинирани са измервателни точки на 1.5 метра от фасадата на сградата и по височина за всеки трите етажа от сградата и на покрива на сградата.



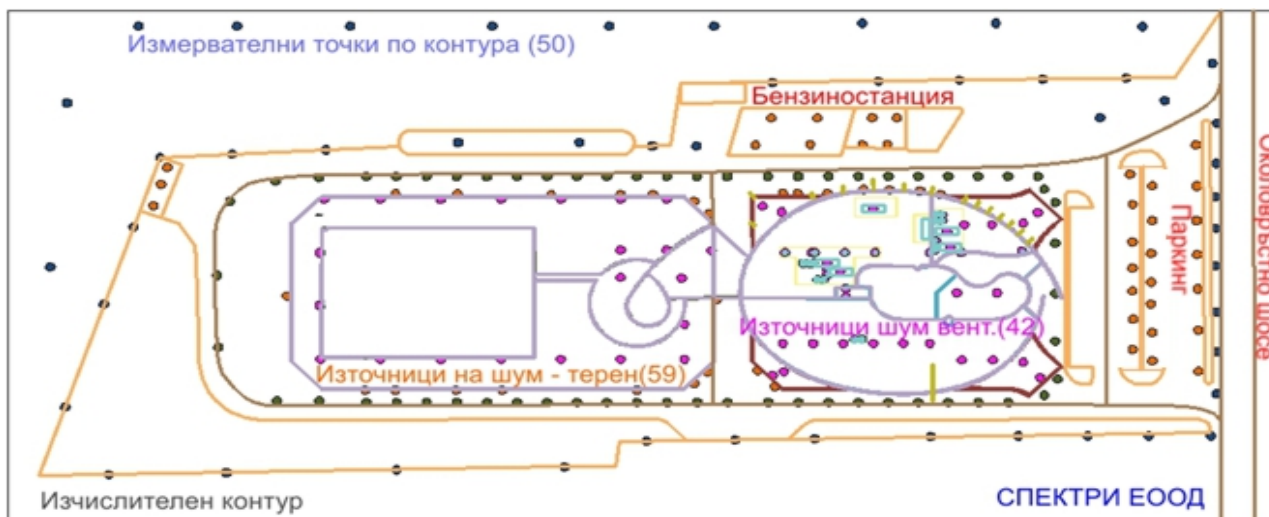
Фиг.2 Схема на разположение на обекта

3. Методи за измерване, които са използвани за валидиране на резултатите за шумовото въздействие.

За изчисляване и верификация на шумовото въздействие от експлоатацията на обекта, се използва комбинация от национална и европейска изчислителни методики, както и реални верификационни измервания и изчисления в избрани точки на 1.5 м от фасадата на сградата. посредством инструментариум - акустични анализатори 2 бр. тип 2250, както и изчислителна платформа LimA на Brüel & Kjær. Използвани са

следните методи за изчисление (съгласно Приложение II, т.2.2. на Директива 2002/49/ЕС):

Като входна информация за валидиране, калибриране и верификация на локалната карта за шум на обследвания обект са използвани както данните от проведените от СПЕКТРИ реални полеви измервания в 10 измервателни пункта (кратковременни 1 часови измервания).



Фиг.3 Схема на разположение на измервателните точки

Дефинирани са следните източници на шум: - точкови източници на шум терен (клетки ремонт на автомобили, паркинг автомобили), - точкови източници на шум покрив (вентилационни системи); - линейни източници на шум - локален автомобилен

трафик около сградата, външен автомобилен трафик от главния път покрай сградата.

Измерванията са извършени в съответствие с изискванията на:

ISO 1996-1/2005 „Акустика – Описание, измерване и оценка на шума в околната среда и ISO 1996-2/1987 „Акустика – Описание и измерване на шума в околната среда. Проведени са по две измервания във всеки пункт. Направена е съпоставка между средноаритметичното от двете измервания и изчислените чрез софтуер LIMA стойности на показателя L_{24} .

4. Методи за изчисление и моделиране

на шумовото замърсяване. Съгласно наредба №6 (от 26.06.2006 г.) МОСВ за показателите за шум в околната среда се дефинират източниците на шум: трафик – леки и тежки автомобили, и локални точкови източници – халета за ремонт, склад – товароразтоварни дейности, паркинг и климатични системи. Използван софтуер LimA (B&K) за шума в околната среда и шумово картиране:

- ❖ Влизане и излизане на леки и товарни автомобили: липсват прогнозни данни за очакваните

движения – дефинирани са на прогнозна база за подобни обекти (LimA-Traffic);

- ❖ Охладителни/отоплителни системи и вентилационни инсталации на сградата, (LimA-IND) представени – с точкови източници с приведена стойност на шумово въздействие (по предоставени каталожни данни);
- ❖ Източници на местно шумово въздействие – паркинг, автомобилен трафик, паркиране –143 паркоместа. Прието е 75% запълване на паркинга;
- ❖ Шумово въздействие от автомобилен трафик по Околовръстен път - Източник “Стратегическа Шумова Карта на агломерация София”. Данните са от 2009 - 2010 г. и са индикативни за външното акустично въздействие, като за завишени с 10% при проведените изчисления. Изчисленията са проведени за отделните части на денонощието – ден / вечер / нощ.



Фиг.4 Автомобилен трафик - шумови контури

5. Резултати от изчисленията

Дефиниран е изчислителен модел - за провеждане на изчисленията на шумовото натоварване върху сградата като са дефинирани следните слоеве:

- <> Шум от автомобилен трафик: Околовръстен път, локален път и вътрешен път около сградата –линеен слой (4 обекти);
- <> Шум от автомобилен трафик: Влизане и излизане на транспортни средства – линеен слой (7 обекта);
- <> Шум от клетките за ремонт на автомобили и товароразтоварни дейности – точков слой (59 обекта);
- <> Шум от вентилационните системи на сградата – точков слой (25 обекти);
- Измервателен точков слой на височина 1,5 м (50 точки). Измервателен точков слой на височини 7, 12, 16 м (56 точки).

Дефинираният пътен трафик за частите от денонощието – ден, вечер, нощ са дадени в горната таблица.

Изчисленията се провеждат при отсъствие на шумопоглъщащи прегради / бариери около сградата и особено от страна на околовръстен път. Дефинирани са следните трасета на движение на автомобили: част от Околовръстен път на София (140 m), локалния път за вход и изход към сградата и трасето за достъп до сградата и бензиностанцията.

6. Визуализация на нивата на шум от пътен трафик / Решение:

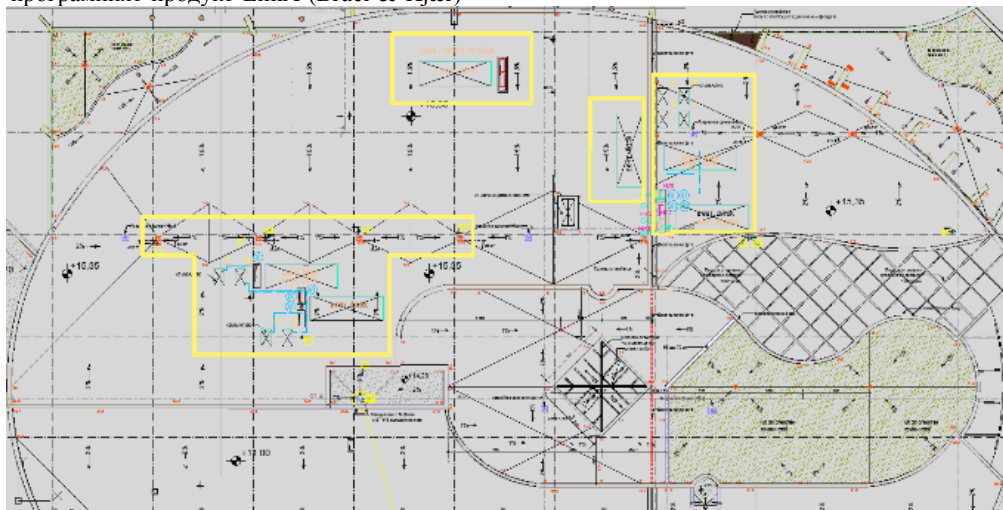
<> Необходимо е шумопоглъщаща преграда с височина не по-малка от 2.5 м. и дължина около 150 м. между Околовръстния път на гр. София и локалния път на достъп до обекта с оглед намаляване на шумовото натоварване на централния вход на сградата.

<> Въздействие на шума от вентилационните системи на покрива на сградата и от точковите източници на халетата за ремонт на лекотоварни и тежкотоварни автомобили до 3.5 т. и от точковите източници на паркиране на автомобили; Моделиране на сградата,

вентилационните тела на покрива на сградата, като примерен модел (shapefiles) с оглед провеждане на изчисления с програмният продукт LimA (Brüel & Kjær)

и задаване на показателите на терена и околната среда и нивата на звукова мощност на източниците на шум – вентилационните тела.

<> Изчисленията се провеждат в 2 варианта без / със шумопоглъщаща преградна бариера на телата с оглед оптимално шумопоглъщане от вентилационните тела на покрива на сградата и намаляване на шумовото въздействие върху помещението на покрива на сградата.



Фиг. 5 Схема на разположение на вентилационните тела
Предлагани 4 шумопоглъщащи бариери на покрива. Резултатите от моделирането и изчисленията на индустриален шум, от вентилационните системи се извършват с програмния продукт LimA – Brüel & Kjær, като включват изчисления на нива 2м, 5.5м, 8.5м и 14.5м.



А) Всички вентилационни и климатични сградни/фасадни тела + точкови източници на височина 2м, без предложена бариера на покрива: **IND2_ALL_NOBAR_LDEN.**



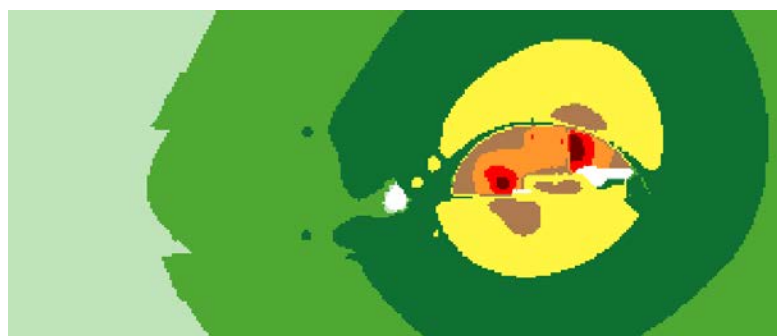
Б) Всички вентилационни и климатични сградни/фасадни тела + точкови източници на височина 5.5 м, без предложена бариера на покрива: **IND55_ALL_NOBAR_LDEN.**



В) Всички вентилационни и климатични сградни/фасадни тела + точкови източници на височина 8.5 м, без предложена бариера на покрива: **IND85_ALL_NOBAR_LDEN**.



Г) Всички вентилационни и климатични сградни/фасадни тела + точкови източници на височина 11.5 м, без предложена бариера на покрива: **IND115_ALL_NOBAR_LDEN**.



Д) Всички вентилационни и климатични сградни/фасадни тела + точкови източници на височина 14.5 м, без предложена бариера на покрива: **IND145_ALL_NOBAR_LDEN**.



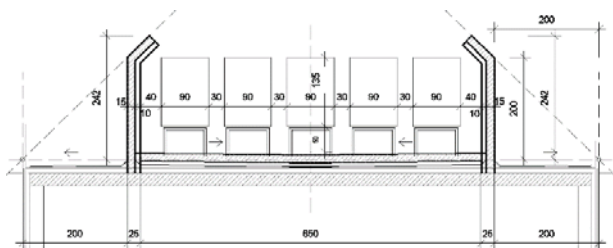
Е) Всички вентилационни и климатични сградни/фасадни тела + точкови източници на височина 14.5 м с предложена бариера на покрива: **IND145_ALL_BAR_LDEN**

Предвидени шумоизолиращи мерки и препоръки с оглед намаляване на шумовото натоварване на сградата:

Поради установена от проектния екип възможност за надгранично ошумяване в самия обект са предвидени активни противошумови мероприятия (мерки).

ПЪТЕН ТРАФИК – ОКОЛОВРЪСТЕН ПЪТ: Акустична сертифицирана шумоизолираща стена / бариера на кота 0.5 м, с височина 150 – 180 см.

Вентилационни системи на покрива: сертифицирана шумоизолираща стена / бариера на покрива – на кота 15.35 м, с височина на бариерите 220-240 см.



Литература:

1. Наредба №4 от 27.12.2006 г. за ограничаване на вредния шум чрез шумоизолиране на сградите при тяхното проектиране и правилата и нормите при изпълнение на строежите по отношение на шума, излъчван по време на строителството.
2. Наредба №4 от 26.06.2006 г. за показателите за шум в околната среда, отчитащи степента на дискомфорт през различните части на денонощието, граничните стойности на показателите за шум и на вредните ефекти от шума върху здравето на населението.
3. Noise Mapping, Prediction, Modeling and Calculation Software - Predictor-LimA Type 7810, www.bksv.com.
4. Михайлов, Б., М. Георгиев, Изработване на стратегически карти за шум и планове за действие към тях – за населени места с над 100 хил. жители Сборник доклади „Акустика“ 2012 г.

ЦЯЛОСТНО ОБНОВЯВАНЕ НА СИСТЕМАТА ЗА МОНИТОРИНГ НА ЛЕТИЩЕН ШУМ

Борис Михайлов¹⁾

¹⁾ СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421, spectri@spectri.net, www.spectri.net (URL)

Резюме: В този документ се разглежда комплексния проект на СПЕКТРИ ЕООД и Brüel & Kjær по цялостно обновяване на системата за мониторинг на авиационен шум на Летище София.

Беше реализиран преход към последно поколение най-съвременна автоматизирана система тип Noisedesk. Същевременно проектът включва пълното сервисно и метрологично поддържане на системата за мониторинг, а също така и регулярен годишен акустичен анализ на резултатите. Времевият диапазон на действие на проекта е 4 години.

Ключови думи: - Шум, СПЕКТРИ ЕООД, Brüel & Kjær, ANOMS NoiseDesk.

1. 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.

2. 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 подаваните от РВД данни**

- за полетните трасета и информация за полетните планове.

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

4. Описание на системата

Данните за шум и полетните трасета се импортират в базата данни на ANOMS NoiseDesk системата, през сигурен интернет. Потребителите на ANOMS NoiseDesk получават достъп до базата данни и всички визуализации – посредством използван интернет браузер на техните работни станции.



Фиг. 1 Системата ANOMS NoiseDesk

Системата ANOMS NoiseDesk използва облачен сървър за данни – ANOMS. Данните се съхраняват в осигурен център за данни (с непрекъсната защита и поддръжка).
Облачна услуга = гаранция за безотказна, надеждна и непрекъсната функционалност, без необходимост от ИТ ресурси и персонал.

5. Мониторинг на шум

- Използват се **мониторингови терминали на шум (МТШ)**, производство на световния лидер в производството на оборудване за шум и вибрации, Brüel & Kjær – Дания.
- Терминалите са разположени **около летището и в критични точки** на мониторинг в близки жилищни райони.
- Регистрираните от МТШ шумови събития и записи се предават към централната база данни на ANOMS NoiseDesk - за допълнителна обработка и корелация с радарните полетни трасета (с цел точна идентификация на самолетните шумови събития).



Фиг. 2

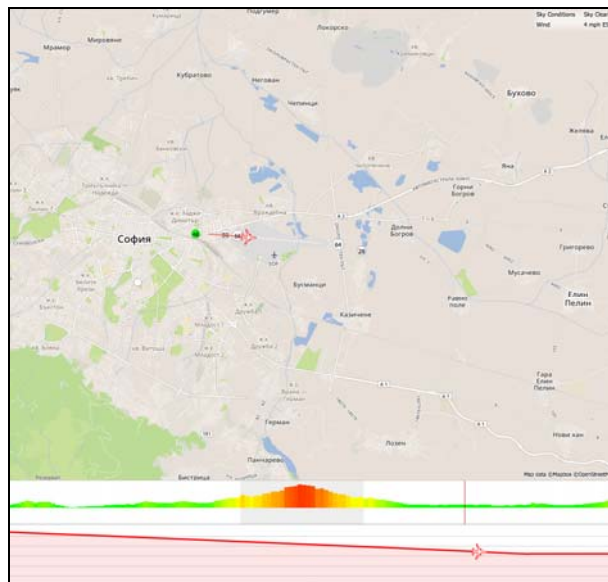


Фиг. 3

6. Метеорологични данни

През интернет се достъпва "METAR weather" (предоставено от NOAA) и се корелира по време към операциите и шума.

При наличен терминал за шум с метео сензори - към данните за шумовите събития се добавя и информация за скорост и посока на вятъра.

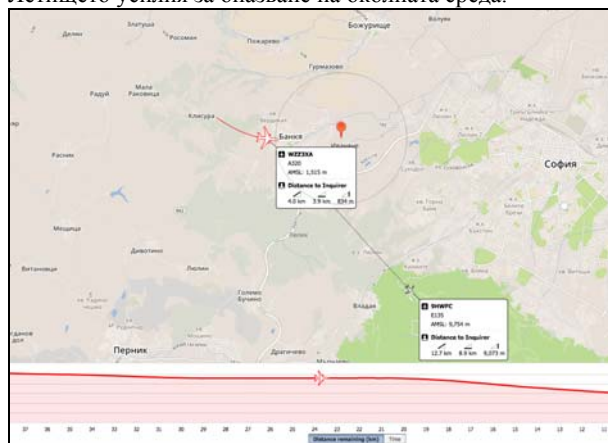


Фиг. 4

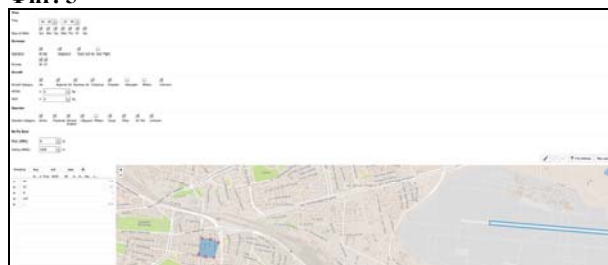
7. Програми за опазване на околната среда

Постоянният шум от излитания, кацания и обратна тяга оказва влияние върху близката до летището общност - нарастващ проблем за околната среда, със значителна обществена чувствителност.

Подходяща програма за мониторинг на шума и операциите = по-широка обществена подкрепа и разбиране за полаганите от Летището усилия за опазване на околната среда.



Фиг. 5



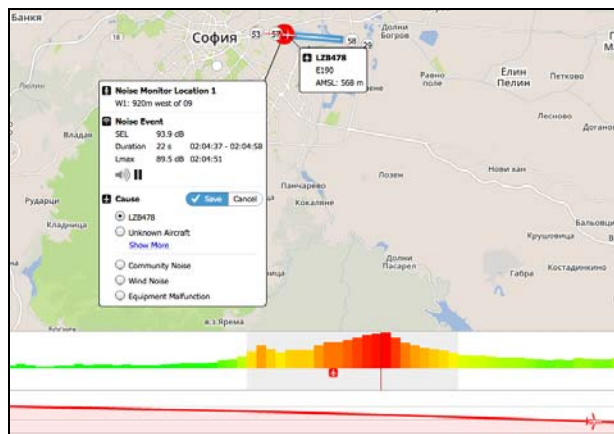
Фиг. 6

8. Корелационни възможности

ANOMS NoiseDesk използва сложен алгоритъм за корелиране на трасета и шумови събития, или за определяне на писта за даден полет.

С цел оценка на качеството на пристигащите данни или поради влияние на външни фактори (напр. буря), на потребителят може да му се наложи да провери резултатите.

Проверката на данните става посредством асистенция от NoiseDesk – чрез използването на статистически техники, които откриват необичайни корелации и връзки.

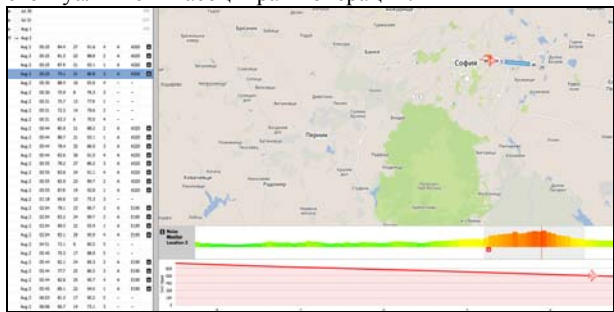


Фиг. 7

9. Работа с шумови събития

Браузърът за шумово събитие е списък от данни за шумови събития, организирани по дати.

Избраните събития се показват на картата, заедно с евентуалните им асоциирани операции.



Фиг. 9

Възможности за потребителя:

- Сортира и групира по дата, време, max SPL (L_{Amax}), SEL (L_{AE}), продължителност на събитието, идентификация на локация, корелирани тип операция и тип самолет
- Провери дали шумовото събитие има асоциирана операция
- Проиграе аудио записи
- Потребителят може да ре-класифицира причината за дадено събитие, като:
 - Премахне линка към самолет;
 - Промени линка към друг самолет;
 - Класифицира събитието, като събитие причинено от неизвестен самолет (т.е. такъв без трасе), или
 - Класифицира събитието, като събитие причинено от друг шумов източник, от вятър или породен от технически проблем.
- Потребителят може да генерира от браузера селективни доклади - формат Excel или Word.
- Word: визуализация от карта, както и други детайли за избраните шумови събития.
- Excel: детайли за събитието (SPL, SEL, EPNL, начало, край, класификация на събитието, др.), други налични метрични данни (като 1/3 октавни данни, $L_{ASmax,1s}$ или $L_{Aeq,1s}$).

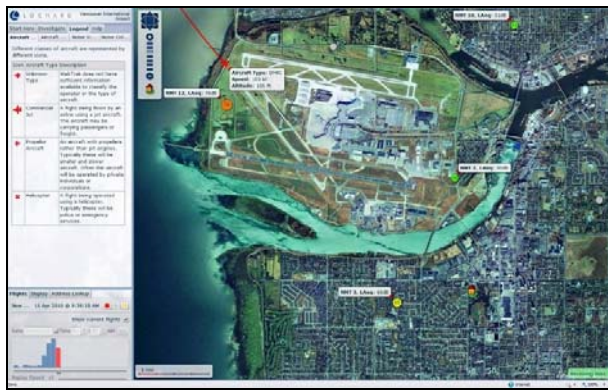
10. Интернет публичен достъп до мониторинговата система

Системата позволява интернет публичен достъп, под името WebTrak, демонстриран на сайта на производителя Brüel & Kjær, на следния линк: <http://webtrak5.bksv.com/ema>

- WebTrak

- интернет базиран продукт, който позволява на потребителите да осъществяват обследване на полетните трасета – от всеки един компютър с интернет достъп
- предоставя лесно достъпна и прозрачна информация за шума в околната среда от самолетна активност
- подсилва по-голямата ангажираност на обществеността

- е доказано най-ефективния за едно летище начин да подобри комуникационната си политика с обществеността.



Фиг. 10

Позволявайки публичен достъп и възможност за обследване на данните за полетите, летището:

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

Определяне на въглеродни емисии

- AirTrak въглероден мениджър

AirTrak - въглеродният мениджър

- облачен интернет базиран продукт

- използва данни от системата за мониторинг на шум и проследяване на полетните траектории.
- изчислява и представя въглеродните емисии за самолетите.
- Реферирайки към конкретен полет, AirTrak-въглеродният мениджър определя с висока точност емисията за всяка една фаза от полета, позволявайки по този начин демонстрацията на ефективността за всяка една фаза на различни инициативи на летището.
- автоматично изчислява основните емисии парникови газове за самолетите, включително CO₂, NO_x, както и водни пари.



Фиг. 11



Фиг. 12

Представят се парниковите газове, отпечатъкът на самолетите - по самолет/аеролиния, позволявайки определянето на основните причинители за различните операции на летището. Например представянето може да се ограничи до показване само за LTO цикъл, или на домашни полети.

11. Калибриране



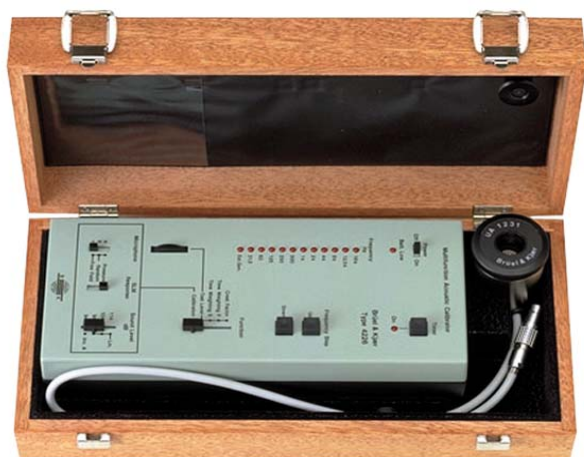
Фиг. 13

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. 14

Основни характеристики на 4226:

Стандарти ИЕС 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 ± 0.2 при 94 dB dB

Микрофонна мембрана 1/2-inch

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*.

ENTIRE UPGRADE OF AIRPORT NOISE MONITORING SYSTEM

Boris Mihaylov¹⁾

¹⁾ SPECTRI Ltd., 30, "St. T. Turnovski" Str., Sofia 1421, spectri@spectri.net, www.spectri.net (URL)

Abstract: In this paper is presented a complex project realised by SPECTRI Ltd. and Brüel & Kjær – for entire upgrade of Sofia Airport noise monitoring system to the latest top of the range system, type Noisedesk.

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

12. 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 редуция 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.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Интернет базирана информация: Вж.

www.SPECTRI.net

[2] Интернет базирана информация: Вж.

<http://www.bksv.com/Products/EnvironmentManagementSolutions/AirportEnvironmentManagement/ANOMS%20NoiseDesk>

[3] Интернет базирана информация: Вж. www.BKSV.com;

WEBNOISE.EU

СОБСТВЕНОТО РЕШЕНИЕ НА СПЕКТРИ ЕООД (приложения в гр. Бургас, гр. Пловдив, Челопеч, Раднево, др.)

Борис Михайлов ¹⁾

¹⁾ СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421, spectri@spectri.net, www.spectri.net

Резюме: В този документ се дава обща информация и се проследяват междинни резултати на стартирания през 2012 г. като изграждане и развойна дейност от СПЕКТРИ ЕООД интегрален системен портален подход за непрекъснат мониторинг и интернет достъп на Brüel & Kjær инструментариум за мониторинг на шум в градска среда, както и за общ цялостен облачен мониторинг на параметри на околната и производствена среда. Измерване, мониторинг и изобразяване в реално време на параметри на околната среда.

Ключови думи: шум, вибрации, прах, метео данни, други, 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.

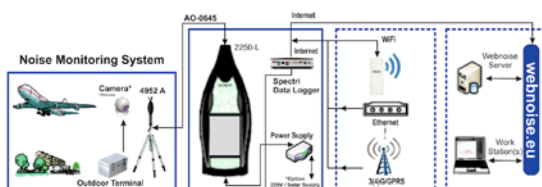


Фиг.1 Концептуална схема WEBNOISE

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.

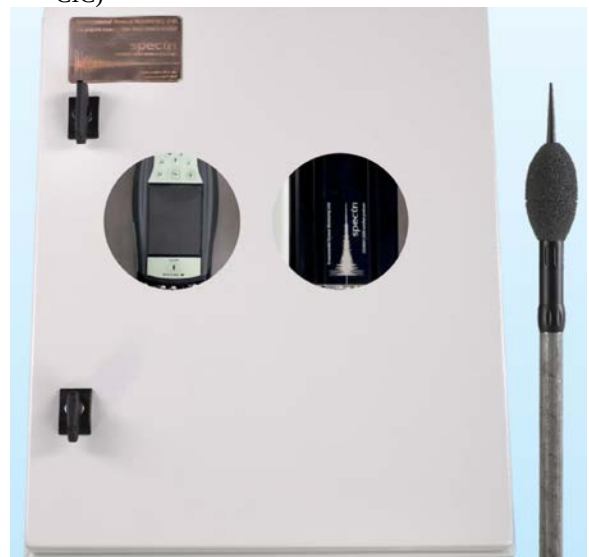
Цялостна проектна реализация е осъществена от фирма **СПЕКТРИ ЕООД**.



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-претеглен): 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 сеизмични 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

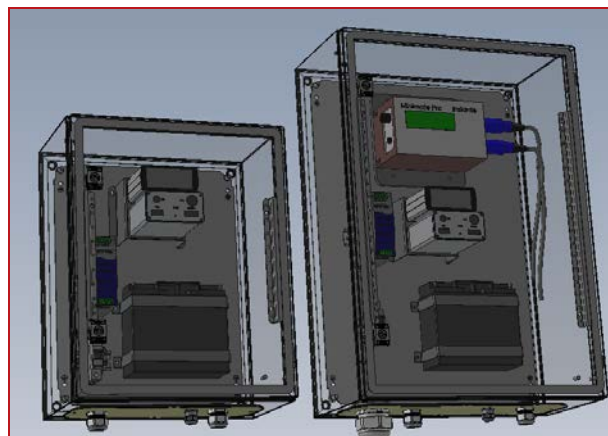
- **WS600-UMB** - смарт метео сензор за измерване на:
 - Относителната влажност - посредством кондензивен сензорен елемент.
 - Въздушна температура - прецизен NTC измервателен елемент
 - Валежи - измерват се чрез 24 GHz доплеров радар, който определя скоростта на капене на индивидуална валежна/снежна 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

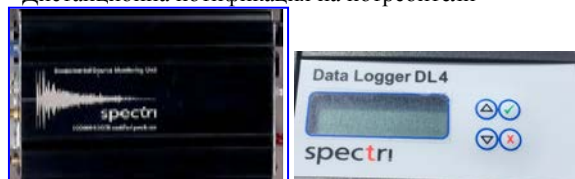
- Изчислителен и комуникационен СПЕКТРИ дейта логер с LED статус дисплей.
- AC/DC конверторно стъпало с поддържащ презаредим акумулатор.
- Альтернативни захранващи решения - соларно, вятърно захранване.
- Възможност за интегриране на допълнителни опционни компоненти:
- GPS приемник, видео рекордер, рутиращо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



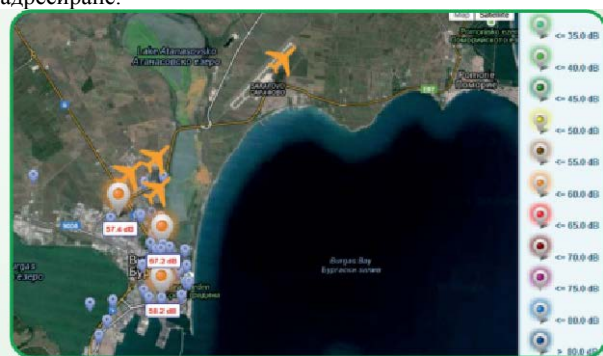
Фиг.8 Дейта логер

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”**

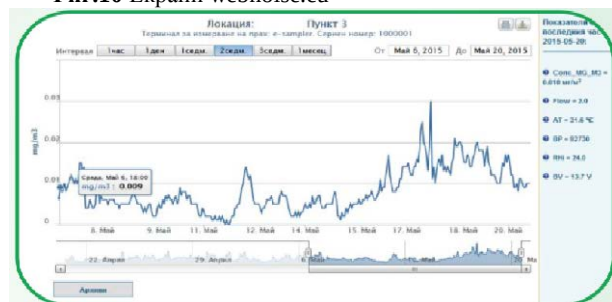
- Платформа от “облачен тип”
- съвременна надеждна не-Windows базирана система (Linux ОС в терминалните логери на данни и в дистанционния сървер)
- проектирана да осигурява непрекъснат мониторинг и измервания, както и да предотвратява загуба на измервателни данни.
- измерванията са базирани на непрекъснати 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”**.

Непрекъснати 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.

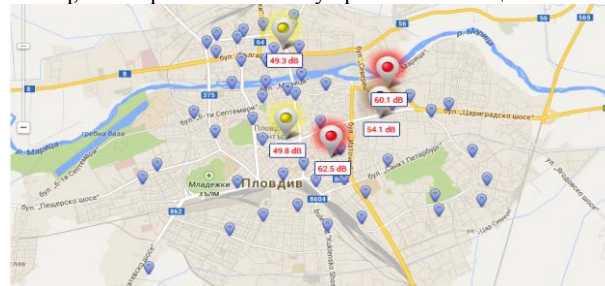


Фиг.12 Webnoise.eu

Потребителски адаптирано решение за всеки индивидуален клиент/проект

Основен екран

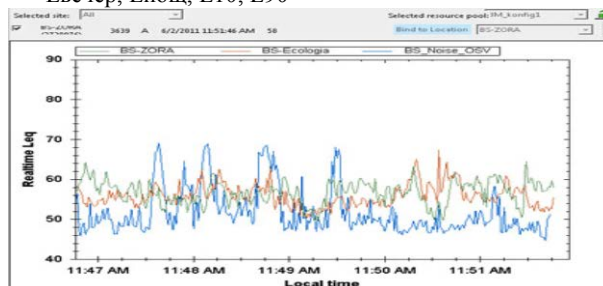
- с помощта на Google maps API v3.0 се показва разположението на точките на измерване, на реална карта.
- всяка точка носи информация за моментното състояние на LAeq, и изобразява нивото му чрез съответен цвят.



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 скалярни 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;

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] Интернет базирана информация: Вж. www.SPECTRI.net

[1] Интернет базирана информация: Вж. www.WEBNOISE.eu

[1] Директива 2002/49/ЕС на Европейския Парламент и на Съвета от 25.06.2002 г. относно оценка и управление на екологичния шум (END).

[2] Закон за защита от шума в околната среда (Обн. ДВ, бр.74/2005);

Данни за авторите:

- (1) Борис 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*.

FURTHER DEVELOPMENT OF SPECTRI CLOUD DATA ACCESS MONITORING PLATFORM - WEBNOISE.EU (FOR MONITORING OF ENVIRONMENT, OCCUPATIONAL HEALTH, AND INDUSTRIAL PARAMETERS)

Boris Mihaylov¹⁾

¹⁾ SPECTRI Ltd., 30, "St. T. Turnovski" Str., Sofia 1421, spectri@spectri.net, www.spectri.net

Abstract: In the recent paper is presented an overall information, and are highlighted intermittent results re. the started in 2012 research and development SPECTRI integrated portal approach for on-line monitoring and internet access to Brüel & Kjær environmental noise monitoring equipment, and as well to other environmental and process parameters. The on-line monitoring system is realized based on several Brüel & Kjær outdoor microphones' based terminals, and a further interfacing to the own Spectri hardware (Spectri data logger) and software development products, integrated in portal WEBNOISE.eu. The result is an ongoing self-actualizing and publically accessible data base, source for professional noise management policy. Realized projects.

The hardware and software tools are sourced both from SPECTRI Ltd., and its partner Brüel & Kjær - Denmark. The total project realization is realised by the leading Bulgarian company in the field of acoustical and vibration engineering.

Key words: Noise, noise behavior, noise measurements, noise monitoring, cloud solution. WEBNOISE, ESMU.

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2015”	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ПРОМЯНАТА НА АКУСТИЧНОТО НАТОВАРВАНЕ ПРИ УЛИЧНИ РЕКОНСТРУКЦИИ В ГРАД ПЛОВДИВ

COMPARATIVE ANALYSIS OF ACOUSTIC PRESSURE IN CASE OF STREET RECONSTRUCTIONS IN THE CITY OF PLOVDIV

маг. инж. А. Данаилова¹, доц. д-р Ст. Шилев²

¹ Община Пловдив, гр. Пловдив, пл. Стефан Стамболов 1, E-mail: tonidanailova81@abv.bg

² Аграрен университет – Пловдив, гр. Пловдив, бул. Менделеев 12, E-mail: stefan.shilev@au-plovdiv.bg

Abstract: Street reconstruction was carried out with replacement of pavement covering with asphalt of two streets of Plovdiv - Bogomil and Petko D. Petkov. In order to clarify the effect of replacing the stone paved road surface with asphalt on the noise level in residential urban area, measurements of noise levels for two periods - before and after reconstruction were carried out. Municipalities of Plovdiv own noise terminals Bruel & Kjaer Noise monitoring, type 3639 were used. It was found that replacement of pavement with asphalt reduces noise emitted into the environment. This effect was more pronounced in St. Bogomil. Along with that was reported doubling of light vehicles traffic, which further increases the value of acoustic load reduction.

Keywords: noise measurement, street reconstruction, pavement, asphalt, traffic noise, Bruel&Kjaer, Plovdiv Municipality

1. Увод

Шумът е един от основните фактори с неблагоприятно въздействие върху населението в големите градове. Той засяга хората, както физически, така и психически. „Едно от големите предизвикателства на XXI век ще бъде смекчаването на отрицателните последици от транспорта – парникови газове, замърсяване на атмосферния въздух и шума – като същевременно се осигуряват положителните аспекти на мобилността“, казва Джаклийн Макглейд, изпълнителен директор на ЕАОС в Доклад за състоянието на околната среда и транспорта (TERM).

Между 60 и 90 % от населението на Европа живее в градовете, а около 450 млн. жители (65 % от населението) са подложени на високи нива на шум (над 55 dB), предизвикващи раздразнение и безпокойство, докато около 10 млн. са под въздействието на непозволени нива (над 75 dB в продължение на 24 часа) [3]. Той е свързан с различни човешки дейности, но шумът от транспорта има най-голямо въздействие. Той представлява 80-85 % от общия шумов заряд в гъсто населените зони.

2. Предпоставки и начини за разрешаване на проблема.

Според експертите, интензивността на транспортните потоци зависи от няколко фактора: А) моторизация – пиковите стойности на насищане от транспортни единици са най-високи в Германия (670 коли на 1000 човека). В Пловдив, по данни на Генералния план за организация на движението (ГПОД) те са около 530 на 1000; Б) външни транспортни потоци – 83 000 МПСта влизат и излизат всеки ден в град Пловдив. Обслужва ги съществуващата първостепенна улична мрежа и така те се превръщат в първия фактор за високото шумово натоварване в града и във втория фактор за задръстванията [2].

Шумът от гумите/пътя е комплекс от различни механизми на генериране и усилване, зависещ от характеристиките, както на гумите, така и на пътя [4]: i) шум генериран от неравностите по пътя; ii) аеродинамичен шумов източник, състоящ се в избувване навън на въздуха от водещия ръб на гумата в контактната зона с пътя и шумът от засмукване на въздуха по протежение на задния ръб; iii) ефект на тръбата – увеличение на шума от контакта на гумата с пътя, поради геометрията на контакт и т.н. Кумулативният ефект от тези механизми има като резултат допълнително акустично натоварване в градската среда, в частност.

Икономическото развитие в Европа през последните десетилетия е придружено от ръст в трафика на автомобили. Една от негативните последици от това е увеличението на генерирания шум. Въпреки, че автомобилната индустрия е успяла да намали емисиите на шум, повърхностните характеристики на настилките са все повече от критично значение за общите шумови емисии от шофиране. Поради това, различни източници сочат, че в последните 15-20 години са

положени значителни усилия в развитието на различни видове нискоемисионни настилки по пътищата [4, 6]. Днес подборът на настилка осигурява един добър инструмент за намаляване на генерирането на шум и разпространението му, но също така и за неговото абсорбиране. Това е една от редицата функции, които трябва да изпълни пътната настилка, за да се осигури безопасно и комфортно шофиране.

Една от причините за завишените стойности на акустичното натоварване при движението на МПС по градските улици е естеството на пътната настилка. КРМГ (2005) [5] докладва, че асфалт с ниски емисии може да намали последващите инвестициите в мерки за намаляването на шума с до 80 %, сравнено с противощумните бариери. Намалението на разходите при градските улици е дори по-голямо поради редуция на необходимостта от градски бариери. Намаляването на емисиите на шум при източника, съответно намалява необходимостта от шумови бариери, както в качествен, така и в количествен аспект [1].

Паважът, като вид трайна настилка, въпреки че има предимства, може да доведе до шумови нива над разрешените от Наредба № 6 от 2006 г., но също така да допринесе за намаляване на качеството на въздуха благодарение на емитиране на фини прахови частици.

Целта на настоящето проучване беше да се изясни ефектът от подмяната на пътната паважна настилка с асфалтова върху шумовите стойности в жилищна градска зона на град Пловдив.

3. Методология на изследването.

Реконструкция на ул. „П.Д.Петков” в участъка от ул. „Богомил” до бул. „Княгиня Мария Луиза”.

Съществуващата паважна настилка беше подменена с нова пътна конструкция – асфалтобетонна с полимермодифициран битум с ниско ниво на шум (9600 m²). Подменена е съществуващата тротоарна настилка с нова (вибропресовани плочи, 4400 m²). Запазена е ширината на пътното платно от 9 м.

Реконструкция на ул. „Богомил” от ул. „П.Д.Петков” до бул. „Източен”.

Улица „Богомил” е част от първостепенната улична мрежа от ШБ клас. Преди реконструкцията беше изпълнена с паважна настилка. Протоарите бяха с шестоъгълни плочки. Съществуващите дървета са на около 20 – 40 см от съществуващ бордюр. Извършената реконструкция включваше подмяна на съществуващата паважна настилка с нова пътна конструкция – асфалтобетонна с полимермодифициран битум с ниско ниво на шум (23000 m²). Подменена беше и съществуващата тротоарна настилка с нова от вибропресовани плочи (1470 m²). Изградени бяха

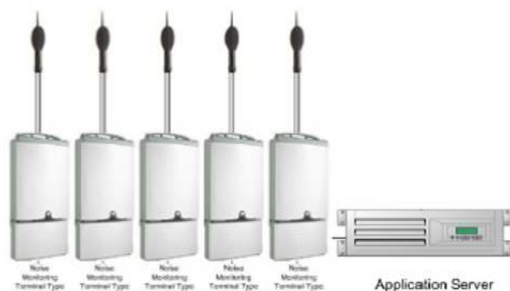
дъждоприемни шахти по нова технология, а капацитет на ревизионните шахти и решетките на уличните оттоци бяха подменени. С изпълнението на проекта се увеличи пропускателната способност на трасето, подобри се безопасността и се осигури достъпна среда по улицата. След изпълнение ул. Богомил придоби следния напречен профил: пътно платно, 9.00 м; тротоар север, 3.68-3.76 м; тротоар юг, 2.82-3.17 м.

Метод за измерване на шума и използвана апаратура.

Измерванията в двете разглеждани локации бяха извършвани в продължение на 12 месеца, обхващайки периоди преди реконструкция, по време на ремонтни дейности и след смяната на настилка от паваж към асфалт. Използвани са два от пет-компонентната собствена на Община Пловдив Система за постоянен мониторинг на шума в околната среда (измервателна техника на производителя Brüel&Kjaer Noise monitoring terminal Type 3639), специализирана за работа на открито (фиг. 1).

Контрола и управлението на системата се осъществява със софтуер, който позволява на шумовите терминали да измерват, записват, съхраняват и предават информацията. Компонентите на системата схематично представляват 5 бр. стационарни мониторингови терминали, 1 бр. сървър и клиент за постоянен мониторинг и натрупване на база данни. Системата е част от сайта за мониторинг на околната среда на община Пловдив, включващ и компонентите въздух и води [7].

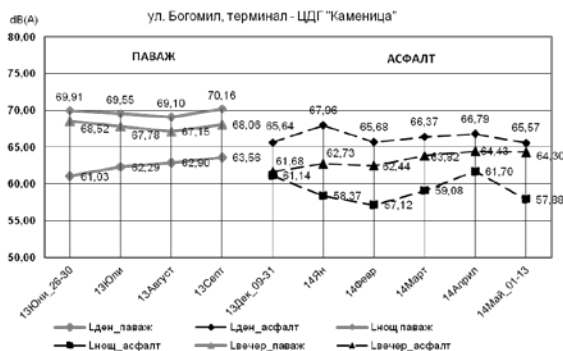
Измерените данни се осредняваха посредством стандартна софтуерна комплектация от най-големия световен производител на акустично измервателно оборудване Brüel & Kjær – Дания. Валидирането беше подсилено от патентованата Brüel & Kjær технология за ежедневно зарядно-инжекционно калибриране и проверка на измервателната верига (CIC technology). Цялата мониторингова система се поддържаха сервизно от фирма Спектри ЕООД.



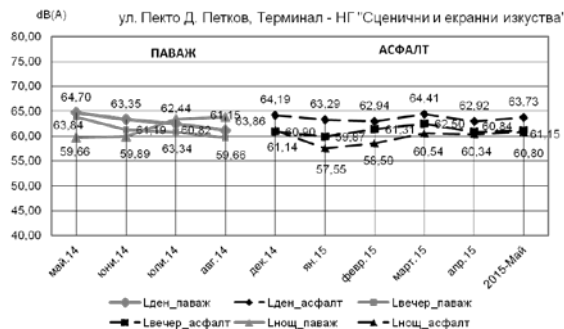
Фигура 1. Стационарни терминали и сървър, част от Системата за постоянен мониторинг на шума в околната среда на Община Пловдив.

4. Резултати и обсъждане.

Според Общия устройствен план на Пловдив проблемите с акустичното натоварване на средата от средствата на транспорта следва да се решават, в голяма степен, с предложената нова конфигурация на първостепенната улична мрежа. Предвижданията за развитие, оразмеряване, реконструкция и модернизация на елементите на техническата инфраструктура, в максимална степен носят белезите на екологосъобразно планиране. Изискванията, към транспортната система на града, поставени в ОУП са: ограничаване на замърсяването на атмосферния въздух и нивото на шума. [2].



Фигура 2. Стойности на L за периоди преди (паваж) и след (асфалт) реконструкцията на ул. Богомил.



Фигура 3. Стойности на L за периоди преди (паваж) и след (асфалт) реконструкцията на ул. Петко Д. Петков.

Нивото на шум от движението зависи от разстоянието, терен, тип на пътната настилка, атмосферните условия (сухо или влажно, температура и т.н.), интензивността на трафика, трафик състав, скорост на трафика и градиент на движението по пътищата. В тази връзка, ефектът, който се изследва е промяната на стойностите на шум в резултат от подмяната на пътната настилка от паваж към нискошумова асфалтобетонна настилка. Резултатите от обследване на шума преди реконструкцията и след нея са показани на фигури 2 и 3 и в таблици 1 и 2. Изследваните периоди от четири месеца преди реконструкцията и шест месеца след нея на ул. Богомил и на ул. Петко Д. Петков, съответно, са представени на фигурите. В таблиците са представени за сравнение конкретни месеци от тези периоди. Стойностите за сравнение от периода преди реконструкцията за ул. Богомил са за месец септември 2013 г., а след поставянето на асфалт са за месец май 2014 г. Данните показват ясна тенденция към намаляване на шумовото натоварване и през трите обследвани периода – ден, вечер и нощ. От една страна се наблюдава намаляване на стойностите от деня към нощта (70.16, 68.06, 63.06 dB) вероятно поради намаление на трафикопотока, а от друга, има съществено намаление на конкретните съставими стойности след реконструкцията. По този начин, $L_{ден}$ намалява с 6.54 %, $L_{вечер}$ с 5.52 %, а $L_{нощ}$ с 8.94 %. Въпреки съществените понижения на шума в жилищните зони, те все още са над граничните стойности определени с Наредба № 6 от 2006 г. Най-близко до изпълнение на изискванията са нощните стойности.

Таблица 1. Стойности на шума преди и след реконструкцията на ул. Богомил за различните индикатори L (дневен, вечерен и нощен). Данните показват средната стойност изчислена като десетичен логаритъм.

	Паваж	Асфалт	Гранична стойност
$L_{ден}$	70.16	65.57	60
$L_{вечер}$	68.06	64.30	55
$L_{нощ}$	63.56	57.88	55

Данните за шумовите стойности измерени на ул. Петко Д. Петков са показани в Табл. 2. Промяната на данните след реконструкцията не са в толкова съществен размер, както при ул. Богомил – 4 %, 4.25 % и 1.5 %, съответно за различните периоди на денонощието. Тези стойности са над граничните такива установени с Наредба № 6, като най-близка до тях е стойността за шум, емитиран през деня.

Таблица 2. Стойности на шума преди и след реконструкцията на ул. Петко Д. Петков за различните индикатори L (дневен, нощен и вечерен). Данните показват средната стойност изчислена като десетичен логаритъм.

	Паваж	Асфалт	Гранична стойност
$L_{ден}$	65.57	62.92	60
$L_{вечер}$	63.54	60.84	55
$L_{нощ}$	61.22	60.34	55

Когато се прави сравнение на данните преди и след реконструкцията, трябва да е ясно дали няма други фактори, които да оказват влияние върху сравняваните резултати. Такъв фактор в случая е генераторът на шум – броят на моторните превозни средства. Данните за трафикопотока по двете улици е показан в табл. 3.

Паважната настилка използвана преди реконструкцията имаше редица характеристики, които не предоставяха на водачите на МПС комфорт на движение, бързина и гладкост на придвижване, стабилност на пътя и ниско ниво на шум. От друга страна, при реконструкцията се направиха допълнителни модификации, които допълнително подобриха, както придвижването по пътната настилка и преминаването през кръстовищата, така и сигурността на пешеходците и водачите при пресичане през тях. Такива промени и удобства бяха създаване на повдигнато кръстовище на ул. Богомил и ул. Родопи, лента за ляв завой на кръстовището на ул. Петко Д. Петков и ул. Капитан Райчо, както и нов паркинг в локално платно.

В резултат от гореизброените предимства на реконструкцията на двете улици, трафикът изразен като брой преминали МПС в двете посоки по изследваните обекти се увеличи значително. По данни на ГПОД в град Пловдив и на Плана за действие към стратегическата карта за шум за агломерация Пловдив [8, 9], трафикът изразен като брой автомобили за един час по ул. Богомил преди реконструкцията през 2013 г. е бил 444 броя леки МПС и 20 броя тежки МПС (табл. 3). След цялостното обновяване на улицата потокът леки автомобили се е увеличи двойно и е достигнал 881 броя за час, докато при тежките не се установява промяна. Това съществено увеличение на броя на преминаващите автомобилите говори, че намалението на шума от трафика е по-високо от гореизложеното, тъй като въпреки двойното увеличение на леките МПС движещи се по ул. Богомил, нивата на шум са намалели с от 5.5 до 9 % (табл. 1).

Таблица 3. Данни за трафика на МПСта преди и след реконструкцията на ул. Богомил и ул. П. Д. Петков. Данните показват отчетения брой леки и тежкотоварни МПС.

(брой/час)	Леки МПС		Тежки МПС	
	Паваж	Асфалт	Паваж	Асфалт
Ул. Богомил	444	881	20	21
Ул. П.Д.Петков	н.д.	925	н.д.	14

Данни по отношение на трафикопотока по ул. Петко Д. Петков са налични само за периода след реконструкцията на улицата. Те показват, че преминаващите леки МПСта са дори повече от тези по ул. Богомил. Сравнително по-малкият брой тежкотоварни МПСта предполага по-малък брой единични пикови стойности през обследвания период.

5. Заключение.

Реконструкцията на улиците Богомил и Петко Д. Петков с подмяна на настилка от паваж към асфалт доведе до намаляване на шума емитиран в околната среда. Този ефект беше по-силно изразен при ул. Богомил. Заедно с това беше отчетено удвояване на трафикопотока от леки МПС, което още повече повишава стойността на намаляването на акустичното натоварване.

6. Литература.

1. Abatement of traffic noise...the arguments for asphalt (European Asphalt Pavement Association), June 2007.
2. Общ устройствен план на град Пловдив.
3. Урбанизация – къде живеят европейците.
http://education.rec.org/bg/urbanisation/seeing_a_city/05-01-02-00.shtml
4. EC, 2006. Noise classification of road pavements: Task 1: Technical background information, Draft report COWI Brussels: European Commission - DG Environment, 2006.
5. KPMG, J. Klooster. 2005 Cost effectiveness of road traffic noise measures The Hague : KPMG, 2005.
6. den Boer, L.C. and Schroten, A. 2007 Traffic noise reduction in Europe Health effects, social costs and technical and policy options to reduce road and rail traffic noise. CE Delft, March 2007.
7. Интернет сайт за Мониторинг на околната среда на община Пловдив: <http://ecomonitoring.plovdiv.bg/plovdiv/>.
8. Генерален план за организация на движението в град Пловдив, <http://www.plovdiv.bg/генерален-план-за-организация-на-движ/>
9. Плана за действие към стратегическата карта за шум за агломерация Пловдив, Спектри ЕООД, 2010 г. http://www.plovdiv.bg/wp-content/uploads/okolna-sreda/normativni-dokumenti/Plovdiv_AcPI_END_July_2010.pdf,

	АКУСТИКА Национална конференция "Акустика 2015"	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

НАЦИОНАЛЕН ЕТАЛОН ЗА ЗВУКОВО НАЛЯГАНЕ ВЪВ ВЪЗДУШНА СРЕДА. ОСИГУРЯВАНЕ НА ПРОСЛЕДИМОСТ. МЕЖДУНАРОДНИ СРАВНЕНИЯ.

Марин Ненов Чушков

БИМ – ГД НЦМ, бул. Г. М. Димитров 52 Б

Резюме: Кратка информация за Националния еталон на единицата за звуково налягане във въздушна среда, създаден в сегашния си вид през 2005 г., утвърден през 2009 г. и вече 10 г. осигурява проследимост, чрез успешни участия в международни сравнения. Определящи фактори за неопределеността при възпроизвеждане и разпространение на единицата. Резултати от двустранни сравнения с DPLA - Дания, PTB - Германия и от успешно участие през 2014 г. в ключовото международно сравнение „EURAMET AUV A-K5” с пилотен институт NPL - Англия.

Ключови думи: Национален еталон, звуково налягане, еталонен микрофон, реципрочно калибриране.

1. Национален еталон на единицата за звуково налягане във въздушна среда (Сн.1).

Националният еталон се използва за първично възпроизвеждане на единицата за звуково налягане във въздушна среда в честотен обхват от 20 Hz до 20 kHz. Той е утвърден с решение № 152 на МС от 14 март 2009 г. и се състои от:



Сн.1 Еталон на единицата за звуково налягане във въздушна среда в ГД НЦМ

- **Комплект еталонни микрофони LS1P и LS2P и съответните им малообемни камери (Сн.2).**

LS1P - нормирани по звуково налягане по метода на обратимост в малообемни камери (реципрочно калибриране) в честотен обхват от 20 Hz до 10 kHz с неопределеност от 0,03 до 0,08 dB:

- Тип 4160, №2452395;
- Тип 4160, №1083563;
- Тип 4160, №1734012.

LS2P - нормирани по звуково налягане по метода на обратимост в малообемни камери (реципрочно калибриране) в честотен обхват от 20 Hz до 20 kHz с неопределеност от 0,05 до 0,12 dB:

- Тип 4180, №2488290;
- Тип 4180, №2488293;
- Тип 4180, №2488294.



Сн.2 Комплект еталонни микрофони LS1P и LS2P и съответните им малообемни камери

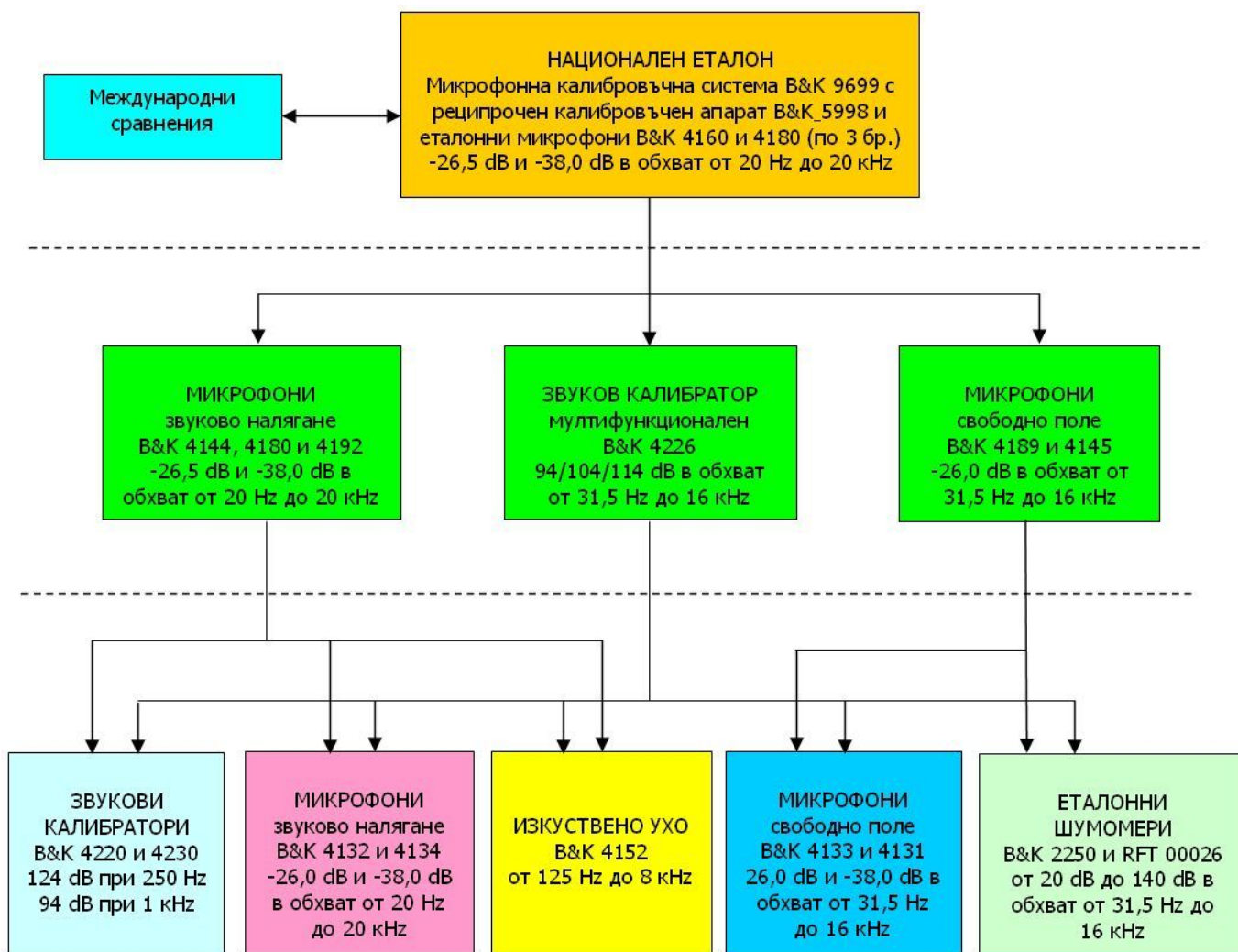
- **Реципрочен калибровъчен апарат тип 5998, №2396562 с набор от сапфирени малообемни камери**

Калибровъчният апарат изпълнява изискванията на новите европейски и международни стандарти (EN 61094-1,2) за калибриране на еталонни микрофони LS1P; LS2P, с които се провеждат международните сравнения. Може да работи с ръчно или автоматично управление, чрез компютърна многофункционална система с модерен софтуер и висока стабилност на еталонните характеристики. В комплекта има набор от сапфирени малообемни камери за различните типове микрофони. Същият тип реципрочен калибровъчен апарат е основна част от акустичните еталони в метрологичните институти и на много други страни (Дания, Германия, Англия, Франция, Австрия, Италия, Испания, Швеция, Швейцария, Холандия, Чехия, Полша, Румъния, Турция, Финландия, Русия, САЩ, Япония, Китай, Сърбия и др.).

- **Мултифункционална компютърна система "PULSE" тип 3560-C, №2501098 (Сн.1)**

Част от системата е и съответния измервателен / изчислителен софтуер с лиценз за неограничен срок на работа. Софтуерът е архивиран в два комплекта на CD/DVD.

Схема на проследимост на единиците за звуково налягане във въздушна среда



2. Изчисляване на неопределеността на еталона

Бюджета на неопределеността при възпроизвеждане и разпространение на единиците за звуково налягане във въздушна среда в честотен обхват от 20 Hz до 20 kHz е в електронен вид (Excel) и е свързан със зависимостите от програмата за реципрочно калибриране. При промяна на входните величини, автоматично се изчислява и промяната в общата неопределеност.

Източници на неопределеност, които имат основно влияние при измерването с еталона са следните:

- Температура на въздуха;
- Прецизност при отчитане на атмосферното налягане;
- Относителна влажност на въздуха (влиянието на влажността при измерванията в нормални условия е много малко и обикновено не се прилага корекция към резултата);
- Параметрите на малообемните камери: дължина, диаметър, обем, прецизност на куплиране с микрофона;
- Параметрите на микрофоните: фронтален обем, еквивалентен обем, резонансна честота, дмпинг фактор;
- Електрическите параметри на измервателната система (подробно са отразени към бюджета на неопределеност);
- Повторяемост на измерванията.
- Неопределеност при въвеждане на корекциите за привеждане на резултата към стандартните условия (основно корекциите за атмосферното налягане и температура на въздуха);

За анализ и оценка на източниците на неопределеност от повторяемост, възпроизводимост и стабилност на параметрите в различни условия на околната среда са извършени

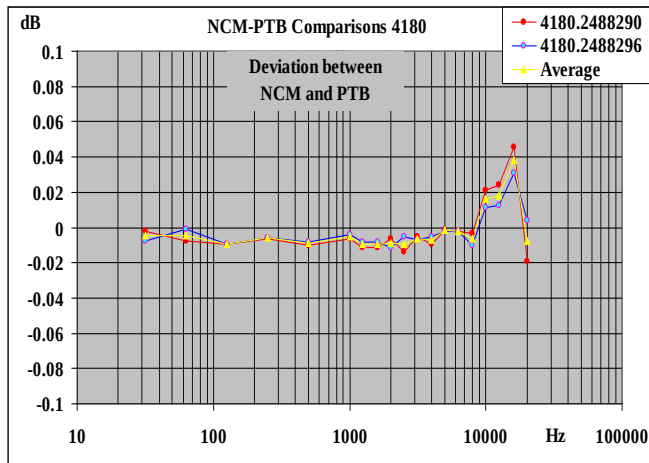
многократни изследвания през 2006 - 2014 г. и отразени в годишните доклади.

3. Осигуряване на проследимост

Проследимостта на еталона се потвърждава, чрез участие в международни сравнения или двустранни сравнения с метрологичен институт на друга държава участвала в международни сравнения.

Разпространяването на единиците се извършва в съответствие със схемата на проследимост, като се калибрират следващите по нива еталони.

През 2006 г. беше организирано двустранно сравнение между два национални метрологични института – Български институт по метрология (БИМ), България и *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB), Германия. Сравнението е регистрирано като Проект 908 на EURAMET – AUV, и е прието като успешно от НЦМ и РТВ. Резултатите (фиг.1) показаха, че НЦМ може да предоставя надеждни услуги по калибриране. Опитът, натрупан чрез това сравнение е ценен и за двете лаборатории при тяхното бъдещо участие в подобни международни сравнения.



Фиг.1

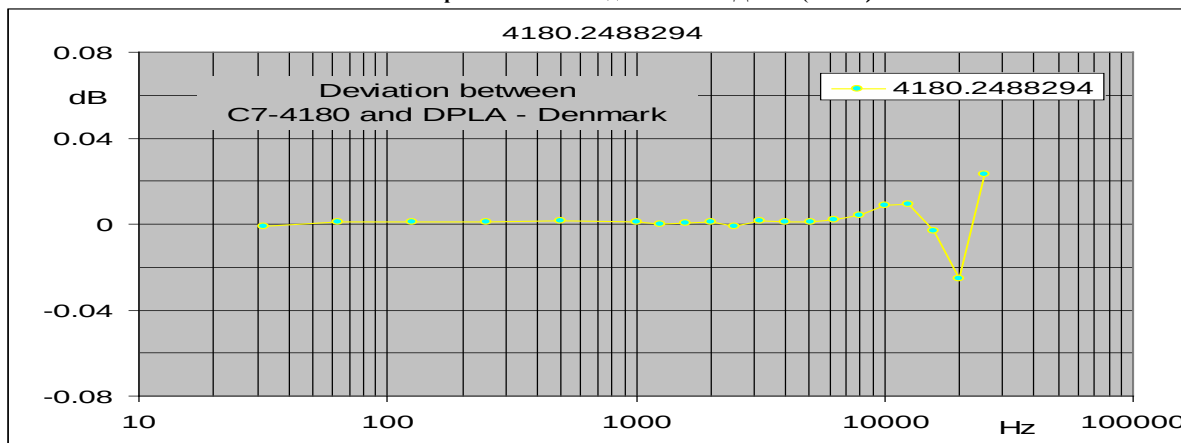
Неопределеност за РТВ и НЦМ ($k=2$)

Пример за първично възпроизвеждане на единицата за звуково налягане във въздушна среда с еталонни микрофони LS2P

Честота (Hz)	Неопределеност - РТВ u_{PTB} (dB)	Неопределеност - НЦМ u_{NCM} (dB)
31.50	0.04	0.08
63.00	0.04	0.05
125.00	0.04	0.05
250.00	0.04	0.05
500.00	0.04	0.05
1000.00	0.04	0.05
1250.00	0.04	0.05
1600.00	0.04	0.05
2000.00	0.04	0.05
2500.00	0.04	0.05
3150.00	0.04	0.05
4000.00	0.04	0.05
5000.00	0.04	0.05
6300.00	0.04	0.05
8000.00	0.04	0.05
10000.00	0.06	0.06
12500.00	0.08	0.08
16000.00	0.12	0.10
20000.00	0.12	0.16

Frequency Hz	4180 no 2488294		4180 no 2488290		4180 no 2488296	
	Sensitivity Meas. Cond.	Sensitivity Std. Cond.	Sensitivity Meas. Cond.	Sensitivity Std. Cond.	Sensitivity Meas. Cond.	Sensitivity Std. Cond.
31.62	-37.347	-37.381	-36.978	-37.012	-37.623	-37.657
63.10	-37.361	-37.395	-36.994	-37.028	-37.637	-37.671
125.89	-37.372	-37.406	-37.005	-37.039	-37.645	-37.680
251.19	-37.379	-37.413	-37.012	-37.046	-37.651	-37.686
501.19	-37.381	-37.416	-37.015	-37.050	-37.654	-37.688
1000.00	-37.377	-37.412	-37.011	-37.046	-37.649	-37.684
1258.92	-37.373	-37.407	-37.007	-37.041	-37.643	-37.678
1584.89	-37.364	-37.397	-36.998	-37.031	-37.635	-37.668
1995.26	-37.352	-37.383	-36.985	-37.017	-37.620	-37.652
2511.89	-37.332	-37.361	-36.966	-36.994	-37.597	-37.625
3162.28	-37.298	-37.323	-36.931	-36.955	-37.563	-37.587
3981.07	-37.248	-37.267	-36.880	-36.899	-37.506	-37.525
5011.87	-37.170	-37.181	-36.800	-36.811	-37.421	-37.432
6309.57	-37.054	-37.053	-36.684	-36.682	-37.293	-37.292
7943.28	-36.897	-36.875	-36.526	-36.503	-37.112	-37.090
10000.00	-36.714	-36.662	-36.341	-36.289	-36.890	-36.838
12589.25	-36.620	-36.548	-36.248	-36.176	-36.730	-36.658
15848.92	-36.968	-36.936	-36.607	-36.575	-36.991	-36.959
19952.63	-38.447	-38.571	-38.075	-38.199	-38.392	-38.516
25118.87	-41.162	-41.478	-40.762	-41.078	-41.120	-41.436
Ambient Conditions:						
Pressure	94.60	kPa				
Temperature	24.4	C				
Humidity	40.3	%RH				
Microphone Parameters:						
Front Volume		34.7 mm ³		34.8 mm ³		34.9 mm ³
Cavity Depth		0.500 mm		0.500 mm		0.500 mm
Equivalent Volume		10.8 mm ³		10.9 mm ³		10.9 mm ³
Resonance Frequency		22.0 kHz		22.0 kHz		22.0 kHz
Loss Factor		1.05		1.05		1.05
Total Length		11.9 mm		11.9 mm		11.9 mm
Effective Diameter		8.9 mm		8.9 mm		8.9 mm
Ps Correction		-0.0055 dB/kPa		-0.0055 dB/kPa		-0.0055 dB/kPa
Temperature Correction		-0.002		-0.002		-0.002
RH Correction		UNK		UNK		UNK

Сравнение на резултатите от примера за еталонен микрофон LS2P тип 4180 с оригиналното свидетелство от Дания (DPLA)



Reciprocity Calibration Result from National Centre of Metrology

Frequency Hz	4160 no 0811014		4160 no 2036126		4160 no 2452395	
	Sensitivity	Sensitivity	Sensitivity	Sensitivity	Sensitivity	Sensitivity
	Meas. Cond.	Std. Cond.	Meas. Cond.	Std. Cond.	Meas. Cond.	Std. Cond.
15.85	-26.004	-26.111	-27.226	-27.333	-27.172	-27.278
19.95	-26.049	-26.156	-27.260	-27.367	-27.208	-27.314
25.12	-26.076	-26.182	-27.283	-27.390	-27.224	-27.330
31.62	-26.100	-26.207	-27.293	-27.400	-27.234	-27.340
39.81	-26.122	-26.228	-27.311	-27.418	-27.258	-27.364
50.12	-26.138	-26.245	-27.324	-27.431	-27.271	-27.378
63.10	-26.150	-26.257	-27.332	-27.439	-27.275	-27.382
79.43	-26.167	-26.274	-27.346	-27.453	-27.291	-27.397
100.00	-26.180	-26.287	-27.355	-27.462	-27.296	-27.402
125.89	-26.185	-26.292	-27.359	-27.466	-27.305	-27.412
158.49	-26.198	-26.304	-27.369	-27.476	-27.318	-27.424
199.53	-26.205	-26.312	-27.376	-27.483	-27.320	-27.427
251.19	-26.209	-26.316	-27.377	-27.484	-27.323	-27.430
316.23	-26.217	-26.324	-27.382	-27.489	-27.328	-27.435
398.11	-26.219	-26.326	-27.384	-27.491	-27.330	-27.436
501.19	-26.216	-26.322	-27.381	-27.487	-27.328	-27.434
630.96	-26.215	-26.320	-27.381	-27.487	-27.326	-27.431
794.33	-26.203	-26.308	-27.371	-27.476	-27.321	-27.425
1000.00	-26.183	-26.286	-27.356	-27.459	-27.303	-27.405
1258.92	-26.149	-26.250	-27.333	-27.433	-27.278	-27.378
1584.89	-26.096	-26.193	-27.291	-27.388	-27.239	-27.335
1995.26	-26.011	-26.102	-27.230	-27.321	-27.175	-27.265
2511.89	-25.885	-25.966	-27.137	-27.219	-27.081	-27.162
3162.28	-25.696	-25.762	-26.999	-27.065	-26.935	-27.001
3981.07	-25.454	-25.495	-26.813	-26.855	-26.739	-26.779
5011.87	-25.250	-25.259	-26.626	-26.635	-26.520	-26.528
6309.57	-25.397	-25.387	-26.640	-26.629	-26.458	-26.447
7943.28	-26.826	-26.863	-27.406	-27.443	-27.078	-27.115
10000.00	-30.257	-30.449	-29.887	-30.079	-29.404	-29.595

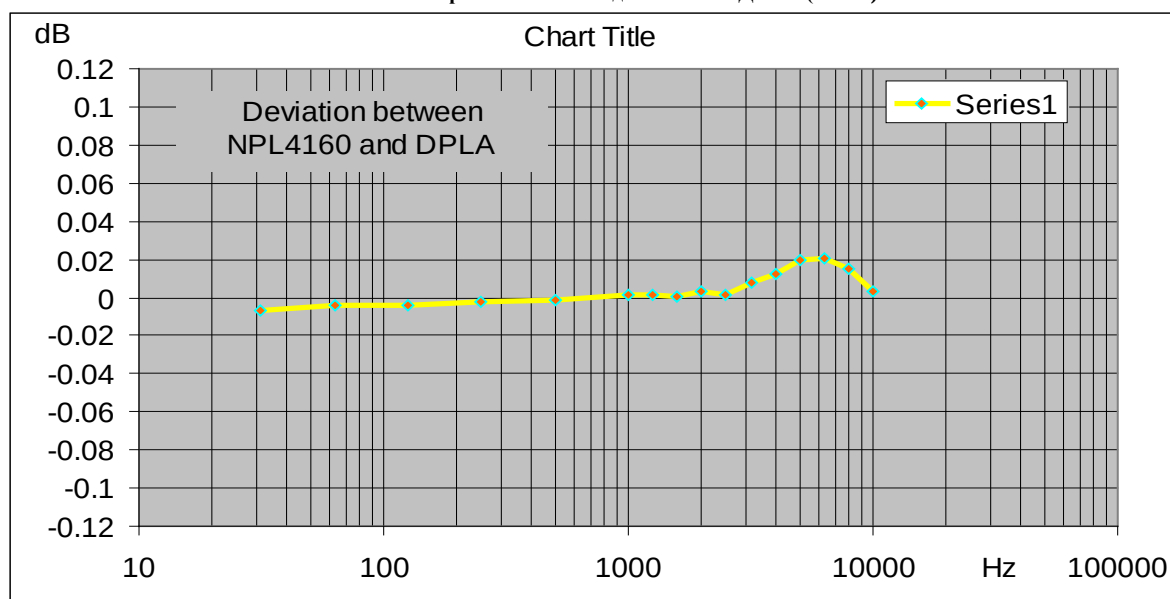
Ambient Conditions:

Pressure	94.20	kPa
Temperature	23.0	C
Humidity	45.7	%RH

Microphone Parameters:

Front Volume	543.0	mm3	535.0	mm3	545.0	mm3
Cavity Depth	1.950	mm	1.950	mm	1.977	mm
Equivalent Volume	137.0	mm3	136.0	mm3	138.0	mm3
Resonance Frequency	8.2	kHz	8.2	kHz	8.2	kHz
Loss Factor	1.05		1.05		1.05	
Total Length	18.9	mm	18.9	mm	18.9	mm
Effective Diameter	17.9	mm	17.9	mm	17.9	mm
Ps Correction	-0.015	dB/kPa	-0.015	dB/kPa	-0.0149	dB/kPa
Temperature Correction	-0.002		-0.002		-0.002	
RH Correction	UNK		UNK		UNK	

Сравнение на резултатите от участието на НЦМ в международното сравнение „EURAMET AUV A-K5” за еталонен микрофон LS1P тип 4160 с оригиналното свидетелство от Дания (DPLA)



4. Заключение

Резултатите от успешното участие на БИМ, ГД НЦМ в ключови сравнения по проектите на EURAMET, показват висока стабилност на техническите характеристики на Националния еталон за звуково налягане във въздушна среда. Той функционира вече 10 години без прекъсвания и ремонти, което доказва високото качество и надежност на основните му компоненти.

5. Литература

[1] IEC 61094-1, Measurement microphones Part1: Specifications for laboratory standard microphones (2000).

[2] IEC 61094-2, Measurement microphones Part2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique (1992).

[3] Technical documentation of reciprocity calibration system type 9699 including reciprocity calibration apparatus type 5998, Brüel & Kjær (2006).

Данни за автора:

инж. Марин Ненов Чушков, ВМЕИ - София, специалност „Радиотехника” (1984 г.). Институт по радиоелектроника и технологии (ИРЕТ) - София, н.с. в секция „Системи за автоматичен контрол и измерване”(1984 - 1992 г.). БИМ - ГД НЦМ „Акустични измервания” (от 1992 г.)

National standard for sound pressure in air. Traceability. International comparisons

Marin Nenov Chushkov

National Centre of Metrology, 52-B, G.M. Dimitrov Blvd., 1797 Sofia, Bulgaria

Abstract: Short information of the National standard for sound pressure in air, created in 2005, accepted in 2009 and 10 years successful used in International comparisons. Basis factors for uncertainty. Results of International comparisons with DPLA-Denmark, PTB-Germany and „EURAMET AUV A-K5”, NPL-UK.

Key-Words: National standard, Sound pressure, Standard microphone, Reciprocity calibration.

КОМПЛЕКСЕН ПРОЕКТ ОПРЕДЕЛЯНЕ НА АКУСТИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ТРАНСФОРМАТОРИ И НА РЕЗУЛТАНТНАТА СТОЙНОСТ НА ЗВУКОВАТА МОЩНОСТ. ИЗМЕРВАНИЯ В ЗВУКОИЗОЛИРАНА КАМЕРА

Борис Михайлов¹⁾

¹⁾ СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Теодосий Търновски“ 30, София, 1421, spectri@spectri.net, www.spectri.net

Резюме: В този документ се дава системазирана информация относно конкретен реализиран проект на СПЕКТРИ ЕООД и адаптация на стандартизирано решение на Brüel & Kjær – за определяне на звукова мощност на трансформатори.

Ключови думи: шум, звукова мощност

1. Обзор:

Проектът включва реализацията на автоматизирана многоканална система за определяне на звукова мощност на различни по вид трансформатори (производство на Българския производител Леми Трафо).

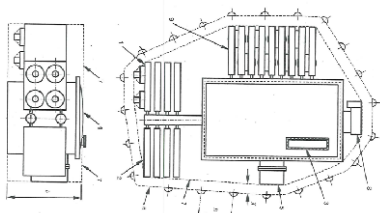
Измерване в 6 бр. измервателни точки, в звукоизолирана камера. Определянето на звуковата мощност е в съответствие със специализирания за подобен тип продукти стандарт EN IEC 60076-10:2005. Базовият акустичен стандарт е ISO 3746:2010.

Реализираната система е 12-канална Brüel & Kjær PULSE LAN-XI анализираща платформа, от последно поколение (с 6-канален лиценз за Pulse Labshop v. 19).

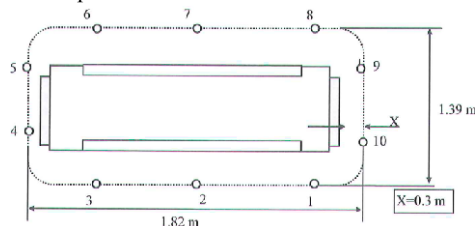
Системата е с интегрирани измервателни микрофони тип 4188 и предусилватели от Brüel & Kjær.

Доставен е софтуерен проект за определяне на звукова мощност на различни видове изделия (в съответствие със стандарт ISO 3746:2010). СПЕКТРИ ЕООД тества и обучава персонала на производителя на трансформаторите за измерване и определяне на звукова мощност според стандарт EN IEC 60076-10:2005.

Едновременни измервания в 6 броя измервателни точки, по контур



Фиг. 1 Измервателна постановка



Фиг. 2 Измервателен контур

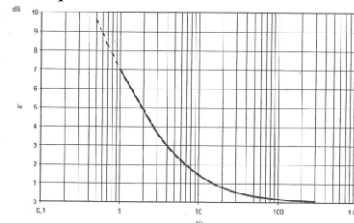
На тази база изчисляваме:

0.3m	Разстояние м/у микрофони	
h	Височина в метри на изм. точки (микрофони)	1
lm	Дължина на контура	6
S	=1.25.h.lm	7.5

$$K = 10 \lg \left(1 + \frac{4}{A/S} \right)$$

K=2.43, за S = 7.5

K се определя и според:



Използвана звукоизолирана камера със следните параметри:

TEST ROOM CORRECTION FACTOR	
Average acoustic absorption coefficient	$\alpha = 0.46$
Total area of the surface of the test room	$S_v = 86.95 \text{ Squared m}$
Test area factor	$A = 40 \text{ Squared m}$
$A = \alpha \cdot S_v$	

Тестов обект – Леми Трафо трансформатор, измервателна точка



Фиг. 4 Звукоизолирана камера и измервателно оборудване

2. Стандартизирана методика

Първо се провеждат измервания на фона (без включен трансформатор).

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1L_{bgAi}} \right)$$

$\overline{L_{bgA}}$ – осреднен резултат на звуковото налягане за времето на измерване, за 6-те бр. измервателни точки, фон.

M = 6 (бр. измервания).

Измерен резултат: $\overline{L_{bgA}}$ 32.82 dB(A)

Следва включване на трансформатора и провеждане на измервания.

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pAi}} \right)$$

$\overline{L_{pA0}}$ – осреднен резултат на звуковото налягане на времето на измерване, за 6-те бр. измервателни точки, работещ трансформатор.

N = 6 (бр. измервания).

Измерен резултат: $\overline{L_{pA0}}$ 39.17 dB(A)

След това определяме коригираното осреднено ниво на звуковото налягане.

$$\overline{L_{pA}} = 10 \lg \left(10^{0,1\overline{L_{pA0}}} - 10^{0,1\overline{L_{bgA}}} \right) - K$$

Измерен резултат: $\overline{L_{pA}}$ 35.60 dB(A)

Накрая получаваме и резултатната звукова мощност.

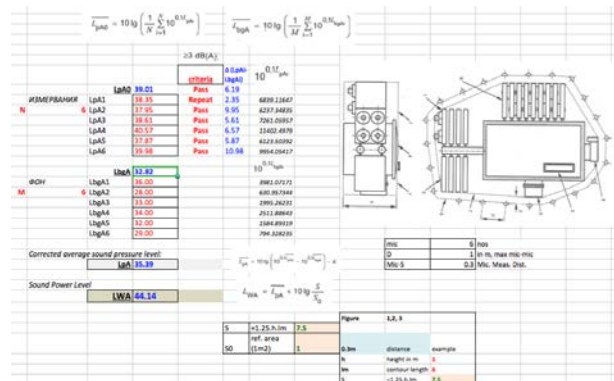
$$L_{WA} = \overline{L_{pA}} + 10 \lg \frac{S}{S_0}$$

Където $S_0=1m^2$ (еталонна площ).

Резултат звукова мощност: L_{WA} 44.35 dB(A)

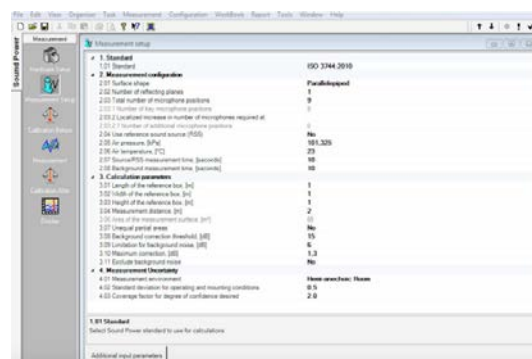
Инструментариум – резултати по 2 отделни начина:

Frequency [Hz]	Lp1 mean [dB]	Lw [dB]	Lp(A) [dB]	K1 [dB]	K2 [dB]	Lp(B) mean [dB]	Lp(S) mean [dB]	DeltaLp [dB]	U	Sigmatot [dB]	Lw ref, atm [dB]	Lw(A) ref, atm [dB]
50	30,73	70,92	38,82	1,30	0,00	51,69	52,83	0,33	0,00	0,00	68,98	39,74
63	33,46	72,26	38,26	1,30	0,00	34,06	34,76	0,70	0,00	0,00	62,63	26,44
80	30,52	49,81	27,31	1,30	0,00	31,48	31,82	0,34	0,00	0,00	49,69	27,19
100	31,55	50,83	31,73	1,30	0,00	32,37	32,85	0,48	6,08	3,04	50,72	31,69
125	37,56	56,86	40,76	1,30	0,00	37,55	38,86	1,31	6,08	3,04	56,73	40,64
160	38,06	57,30	43,86	0,48	0,00	28,73	38,54	9,81	6,08	3,04	57,23	43,83
200	42,80	62,89	53,19	0,30	0,00	31,34	43,09	11,76	4,12	2,06	61,97	51,88
250	43,52	62,81	54,21	0,17	0,00	29,57	43,69	14,12	4,12	2,06	62,68	54,58
315	43,51	62,80	56,20	0,19	0,00	30,12	43,70	13,58	4,12	2,06	62,68	56,08
400	46,01	65,30	60,50	0,00	0,00	28,35	46,01	17,66	3,16	1,58	65,18	60,38
500	44,71	64,00	60,80	0,00	0,00	28,27	44,71	16,44	3,16	1,58	63,88	60,68
630	47,47	66,76	64,06	0,00	0,00	25,68	47,47	21,79	3,16	1,58	66,64	64,74
800	48,81	68,10	67,30	0,00	0,00	23,94	48,81	24,87	3,16	1,58	67,98	67,18
1000	49,94	69,23	69,23	0,00	0,00	23,64	49,94	26,29	3,16	1,58	69,11	69,11
1250	47,87	67,17	67,77	0,00	0,00	22,71	47,87	25,16	3,16	1,58	67,04	67,64
1600	45,35	64,64	65,64	0,00	0,00	25,06	45,35	20,29	3,16	1,58	64,52	65,52
2000	45,47	64,76	65,96	0,00	0,00	26,71	45,47	24,76	3,16	1,58	64,64	65,84
2500	48,15	67,44	68,74	0,00	0,00	19,44	48,15	28,71	3,16	1,58	67,32	68,62
3150	50,34	69,63	70,83	0,00	0,00	17,25	50,34	33,09	3,16	1,58	69,51	70,71
4000	45,95	65,25	66,25	0,00	0,00	16,78	45,95	29,17	3,16	1,58	65,12	66,12
5000	40,29	59,59	60,09	0,00	0,00	13,83	40,29	26,46	3,16	1,58	59,46	59,96
6300	37,45	56,74	56,64	0,00	0,00	12,82	37,45	24,62	5,10	2,55	56,62	56,52
8000	42,59	61,88	60,78	0,00	0,00	11,52	42,59	31,07	5,10	2,55	61,76	60,66
10000	45,14	64,43	61,23	0,00	0,00	10,86	45,14	34,27	5,10	2,55	64,21	61,01
12500	42,93	62,22	57,92	0,00	0,00	10,93	42,93	32,00	0,00	0,00	62,10	57,80
16000	30,53	49,52	43,22	0,00	0,00	11,07	30,53	19,46	0,00	0,00	49,70	43,10
20000	25,17	44,47	35,17	0,17	0,00	11,26	25,35	14,09	0,00	0,00	44,34	35,04
Overall 50-20000		78,98	77,94	1,30	0,00				3,16	1,58	78,86	77,82



Резултати за звуковата мощност са налични посредством автоматизираня СПЕКТРИ PULSE измервателен проект (използвано PULSE PKL програмиране за получаване на осреднените измервателни стойности за L_{pA0} и L_{pA}).

При рефериране и използване на измервателна постановка в съответствие с акустичен стандарт ISO 3746:2010 е наличен стандартния PULSE Brüel & Kjær пакет за определяне на звукова мощност – тип 7799).



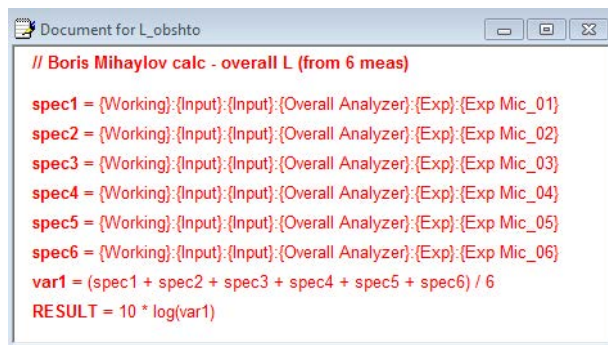
Фиг. 5 Brüel & Kjær PULSE пакет тип 7799 - настройки

Position	Microphone	Reference [dB(A)]	Background [dB(A)]	Source [dB(A)]
1	Autospectrum(Signal 01)	51.81	51.81	59.44
2	Autospectrum(Signal 02)	51.82	51.82	59.96
3	Autospectrum(Signal 03)	53.52	53.52	60.57
4	Autospectrum(Signal 04)	51.77	51.77	59.81
5	Autospectrum(Signal 05)	51.81	51.81	59.44
6	Autospectrum(Signal 06)	51.82	51.82	59.96

Фиг. 6 Brüel & Kjær PULSE пакет тип 7799 - резултати

3. Измервателна постановка

6 бр. едновременни измервания на звук - октавни измервания, общи, изчисления



```
// Boris Mihaylov calc - overall L (from 6 meas)

spec1 = {Working}:{Input}:{Input}:{Overall Analyzer}:{Exp}:{Exp Mic_01}
spec2 = {Working}:{Input}:{Input}:{Overall Analyzer}:{Exp}:{Exp Mic_02}
spec3 = {Working}:{Input}:{Input}:{Overall Analyzer}:{Exp}:{Exp Mic_03}
spec4 = {Working}:{Input}:{Input}:{Overall Analyzer}:{Exp}:{Exp Mic_04}
spec5 = {Working}:{Input}:{Input}:{Overall Analyzer}:{Exp}:{Exp Mic_05}
spec6 = {Working}:{Input}:{Input}:{Overall Analyzer}:{Exp}:{Exp Mic_06}
var1 = (spec1 + spec2 + spec3 + spec4 + spec5 + spec6) / 6
RESULT = 10 * log(var1)
```

6. Изводи:

Реализираната система за акустични измервания и определяне на стандартизирана звукова мощност, в комбинация с изградена звукоизолационна камера позволява

- **бързо и точно** професионално измерване на различни видове трансформатори и

Данни за авторите:

- (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*.

A COMPLEX PROJECT FOR DEFINING ACOUSTICS PARAMETERS OF TRANSFORMERS, AND RESULTING SOUND POWER VALUE. MEASUREMENTS IN SOUND INSULATING CHAMBER

Boris Mihaylov¹⁾

¹⁾ SPECTRI Ltd., 30, "St. T. Turnovski" Str., Sofia 1421,
spectri@spectri.net, www.spectri.net

Abstract: In the recent document, one could find systemized information re. SPECIFIC RREALISED BY SPECTRI LTD. project – adapting a standard Brüel & Kjær solution for determination of sound power values of transformers.

Key words: noise, sound power

- осигурява необходимата **повтаряемост, проследимост и верификационна** обезпеченост.
- Системата е изградена върху една **отворена платформа** предоставяща възможност за бъдещо надграждане
- за допълнителни видове измервания (напр. вибрации), а също и
- за допълнителни измервателни канали.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Интернет базирана информация: Вж. www.SPECTRI.net.
- [2] Интернет базирана информация: Вж. www.BKSV.com.
- [3] EN IEC 60076-10:2005. Power transformers - Part 10-1: Determination of sound levels - Application guide
- [4] ISO 3746:2010 Акустика. Определяне на нивата на звукова мощност и звукова енергия на източници на шум чрез използване на звуково налягане. Методи на обвивната повърхнина от клас на точност 3 върху отразяваща повърхност

РЕАЛИЗАЦИЯ НА ИЗМЕРВАНЕ, ОБСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ЕСТЕСТВО НА ОПЛАКВАНЕ ОТ НИСКОЧЕСТОТЕН / ТОНАЛЕН ШУМ. ПРАКТИЧЕСКИ ПРИМЕР

Борис Михайлов¹⁾

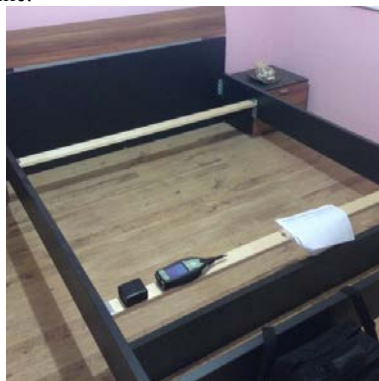
¹⁾ СПЕКТРИ ЕООД, София, Т. Търновски 30, spectri@spectri.net, www.spectri.net (URL)

Резюме: Целта изследването е да се извърши обследване, преглед и анализ на акустичното влияние на непрекъснато работещ трансформатор разположен в сграда, точно етаж отдолу под наблюдавания обект. Разгледани са нормативните изисквания и доказаното надгранично ошумяване, взимайки в предвид наличието на тонален шум.

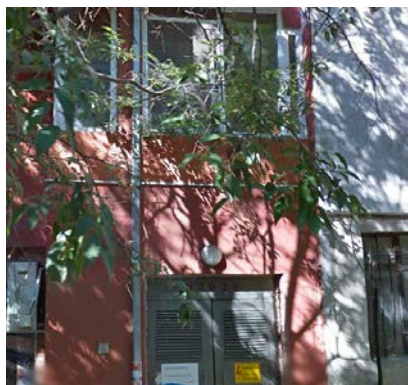
Ключови думи: шум, тонален шум, анализ.

1. Въведение, общи положения:

Обект на измерването е спалня в жилищно помещение.



Фиг. 1 Разполагане на уреда при измерване



Фиг. 2 Разполагане на трансформатора в жилищната сграда

2. Нормативна уредба

Оценката от проведеното измерване се извършва по Наредба № 6 от 26 юни 2006 г. за показателите за шум в околната среда, отчитащи степента на дискомфорт през различните части на денонощието, граничните стойности на показателите за шум в околната среда, методите за оценка на стойностите на показателите за шум и на вредните ефекти от шума върху здравето на населението.

Гранични стойности на нивата на шума в помещения на жилищни и обществени сгради.

№	Предназначение на помещенията	Таблица № 1 Еквивалентно ниво на шума, dB (A)		
		ден	вечер	нощ
1	2	3	4	5
1.	Стаи в лечебни заведения и санаториуми, операционни зали.	30	30	30
2.	Жилищни стаи, спални помещения в детските заведения и общежития, почивни станции, хотелски стаи.	35	35	30
3.	Лекарски кабинети в лечебни заведения и санаториуми, зали за конференции, зрители зали на театри и кинозали.	40	40	35
4.	Класни стаи и аудитории в учебни заведения, заведения за научноизследователска дейност, читални.	40	40	40
5.	Работни помещения в административни сгради.	50	50	50
6.	Кафе-сладкарници, столове, фойейта на театри и кинозали, клубове, бръснаро - фризьорски и козметични салони, ресторанти.	55	55	55
7.	Търговски зали на магазини, зали за пътници в гари.	60	60	60

Забележки:

1. При въздействие на тонален или импулсен шум поправката е - 5 dB(A) и се отнася за помещенията от т. 1 до т. 5 от табл. № 1.
2. Тонален шум е този, при който се чува звук с определена честота (тон).
3. Импулсен е този шум, който се възприема като отделни удари и се състои от един или няколко импулса на звуковата енергия, като продължителността на всеки импулс е по-малка от 1 s.

Извършени са измервания за нощен период.

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

3. Определяне на тонален шум

С.2.3.1 Тонални нива на звуково налягане, L_p

Тоновите могат да се установят с теснолентов честотен спектър чрез визуален преглед. Тоналните нива на звуково налягане се определят чрез спектъра.

Всички локални максимуми с широчина на лентата от 3 dB, по-малки от 10 % от широчината на лентата, се възприемат като тон.

АКУСТИКА ОПИСАНИЕ, ИЗМЕРВАНЕ И ОЦЕНЯВАНЕ НА ШУМА В ОКОЛНАТА СРЕДА Част 2: Определяне на нивата на шум в околната среда

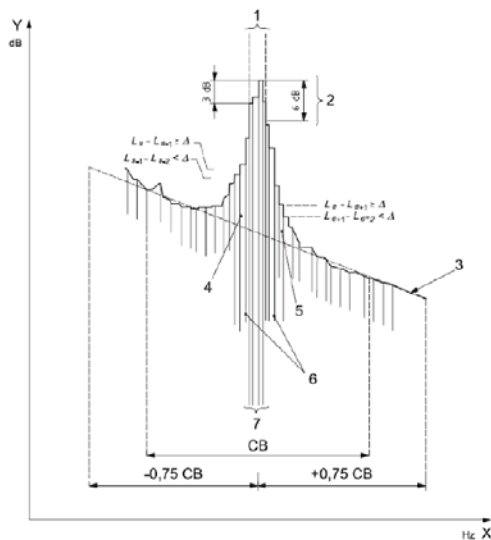
Tone Analysis Setup

Analyze

Tone Standard

ISO 1996-2:2007

^



Легенда:

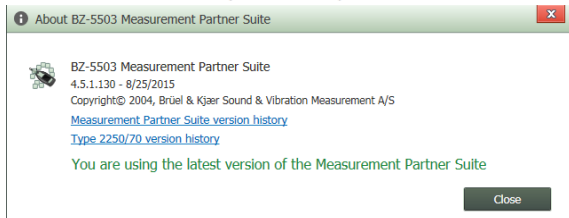
1. тон, когато широчината на лентата от 3 dB е по-малка с 10 % от критичната лента
2. тонална енергия
3. линейно намаляване на линията на нивото на шума
4. начало на шумовите паузи
5. край на шумовите паузи
6. нито тон, нито шум
7. тон

Приложение D (информационно)

ОБЕКТИВЕН МЕТОД ЗА ОЦЕНЯВАНЕ НА ЯСНОТАТА НА ТОНОВЕ В ШУМА ОПРОСТЕН МЕТОД

Тестът за яснотата на долговим, дискретно-честотен спектрален компонент (тон) обикновено сравнява усредненото по време ниво на звуково налягане в определени една-трета октавни ленти с усреднено по време ниво на звуково налягане в съседните две една-трета октавни ленти. За да се определи като присъстващ даден долговим, дискретен тон, усредненото по време ниво на звуково налягане в разглежданата една-трета октавна лента трябва да превишава усреднените по време нива на звуково налягане в съседните две една-трета октавни ленти с една и съща постоянна разлика между нивата. Постоянната разлика между нивата може да варира в зависимост от честотата. Възможни са следните разлики между нивата:

- 15 dB в нискочестотната една-трета октавна лента (25 Hz до 125 Hz),
- 8 dB в средночестотните ленти (160 Hz до 400 Hz),
- 5 dB във височестотните ленти (500 Hz до 10 000 Hz).



Tone Analysis Setup Analyze

Tone Standard: ISO 1996-2:2007

Low Freq. Last Band [Hz]: 20

Middle Freq. Last Band [Hz]: 16000

Level Difference Low [dB]: 15.0

Level Difference Middle [dB]: 8.0

Level Difference High [dB]: 5.0

Based on: LAeq

4. Измервания

№ по ред	Работно място / помещение / източник
1	Ап. 4 Спалня (работещ трафопост)
2	Ап. 4 Детска (работещ трафопост)
3	Ап. 5 Стая (работещ трафопост)
4	Ап. 4 Дневна (работещ трафопост)
5	Ап. 4 Спалня (неработещ трафопост)
6	Ап. 4 Детска (неработещ трафопост)
7	Ап. 4 Дневна (неработещ трафопост)
8	Ап. 5 Стая (неработещ трафопост)

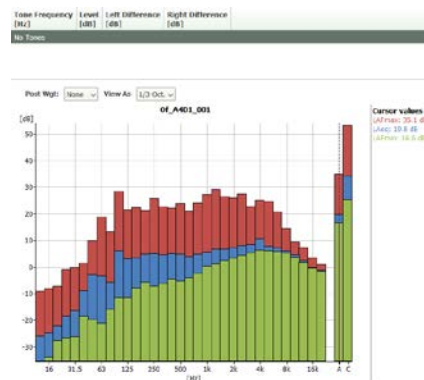
Нош	
Измерена стойност	Норма
32,51	25*
32,70	25*
24,37	25*
30,20	25*
21,43	30
19,83	30
18,74	30
19,78	30

I	C	Name	Graph	Start Time	L	LAfmax	LAfmin	N	Location	Si	LCpeak
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:52:46 AM	19	35.1	16.6	00	00	60.4	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:57:21 AM	18	27.2	17.2	00	00	56.7	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:48:25 AM	21	42.2	16.6	00	00	73.4	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 1:02:00 AM	19	39.6	17.1	00	00	65.0	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:12:12 AM	37	59.0	29.2	00	00	79.0	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:15:46 AM	32	43.5	26.0	00	00	64.5	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:19:00 AM	32	36.8	32.1	00	00	63.3	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:34:29 AM	29	51.7	21.0	00	00	74.1	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:37:48 AM	28	49.7	23.0	00	00	75.9	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:41:16 AM	30	41.4	22.7	00	00	61.3	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:01:26 AM	35	39.0	33.6	00	00	61.0	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:04:39 AM	28	41.1	23.0	00	00	65.3	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:08:04 AM	32	54.2	27.2	00	00	77.5	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:23:14 AM	22	38.0	19.1	00	00	62.1	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:26:22 AM	23	35.8	21.0	00	00	60.8	
1	0	0F_A401_001		9/16/2015 12:29:43 AM	24	41.8	20.1	00	00	65.2	

Фиг. 3 Извадка на измерванията от софтуера на уреда



Фиг. 4



Фиг. 5

5. Резултат

Еквивалентното ниво на шум за «нощен» период $L_{нош}$, dB (A) в измерените помещения в Ап. 4 (спалня, детска и дневна стая) при пуснат трафопост не съответства на изискванията на Наредба № 6/2006, (ДВ бр.58/2006), табл. 1, т. 2 (забележка 1). Установено е наличие на тонален шум (**тонове на честота 50Hz и кратни на нея (100 Hz, 200 Hz)**) и в съответствие със забележка 1 от на Наредба № 6/2006, (ДВ бр.58/2006), табл. 1, т. 2 е извършена корекция. След извършената корекция, **граничната стойност е 25 dB(A), а измерените нива са цитирани по-долу:**

ЕКСПЕРТИЗА

Инж. Борис Михайлов, СПЕКТРИ ЕООД

Работно място / помещение / източник	Измерена стойност Еквивалентното ниво на шум за «нощен» период L_{night}	Норма (гранична стойност)
Ап. 4 Спалня (работещ трафопост)	32,51 dB (A)	25 dB(A)
Ап. 4 Детска (работещ трафопост)	32,70 dB (A)	25 dB(A)
Ап. 4 Дневна (работещ трафопост)	30,20 dB (A)	25 dB(A)

Контролът на шума при работещ трафопост показва наличие на постоянно наднормено ошумяване в измерените жилищни помещения на Ап. 4. Постоянният тонален шум е с характерно постоянно дразнещо и смущаващо съня въздействие.

Промяна на акустичните характеристики на използвания трансформатор не е възможна сама по себе си. Възможно и препоръчително от нас е извеждането на трансформатора извън сградата.

6. Изводи

Определяне, регистрация и отчитане на тонален шум е от **изключително значение** при контрола и оценката на шум в

Данни за авторите:

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

MEASUREMENT, INVESTIGATION AND ANALYSIS OF LOW FREQUENCY AND TONAL NOISE COMPLAINT. PRACTICAL EXAMPLE

Boris Mihaylov¹⁾

- ¹⁾ SPECTRI Ltd., 30, “St. T. Turnovski” Str., Sofia 1421, spectri@spectri.net, www.spectri.net (URL)

Abstract: Purpose of this research project is to investigate, overview and analyse the acoustics impact of lower floor situated building electrical transformer – just bellow the observed object. Performed analyse of local legislation requirements, and proven over limit exposure, esp. taking into account the prevailing tonal low frequency noise.

Key words: noise, tone noise, analysis.

битова/околна среда

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)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Интернет базирана информация: Вж. www.SPECTRI.net.
 [2] Интернет базирана информация: Вж. www.BKSV.com.
 [3] БДС ISO 1996-2:2011 Акустика. Описание, измерване и оценяване на шума в околната среда. Част 2: Определяне на нивата на шум в околната среда

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2015”	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

INVESTIGATION OF PROPERTIES OF COMBINED ABSORBER OF ENERGY OF ELECTROMAGNETIC AND ACOUSTIC WAVES BASED ON METALPOLYMER COMPOSITES

Проф. д.т.н. В.Ковтун¹, проф. д.т.н. М.Миховски², доцент, д-р В.Банний¹

¹ Гомельский инженерный институт МЧС, Гомель, Беларусь

² Институт механики Болгарской академии наук, София, Болгария

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. В волноводных линиях и безэховой камере в диапазоне частот от 2 до 12 ГГц исследованы радиофизические характеристики материалов. Акустические параметры материалов исследованы на частоте 2,95 МГц. Показано, что радиопоглощающие материалы сочетают в себе высокую эффективность экранирования сверхвысокочастотного излучения (СВЧ-излучения) наряду с звукоизолирующими характеристиками. С помощью растровой электронной микроскопии изучена структура композитных поглотителей электромагнитных и акустических волн. Даны рекомендации по применению разработанных поглотителей для обеспечения электромагнитной безопасности.

Ключевые слова: поглотители энергии, электромагнитная волна, акустическая волна, металлополимерные композиты, волокнистые и комбинированные материалы, электромагнитные экраны

1. Введение. В связи со стремительным развитием научно-технического прогресса проблема воздействия на биологические объекты акустических и электромагнитных волн (ЭМВ) различного диапазона приобретает актуальность. Совокупность аperiodических звуковых колебаний различной интенсивности и частоты (шум) наносит ощутимый вред здоровью человека. Шумы 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. В тоже время развитие радио- и электронной промышленности, эксплуатация радиотехнических систем СВЧ привели к возникновению проблемы электромагнитной безопасности. Повышенные уровни электромагнитных излучений (ЭМИ) также оказывают отрицательное влияние на биологические объекты, организм человека.

Электромагнитные экраны (ЭМЭ), формируемые из композитных радиопоглощающих материалов (РПМ), являются эффективным средством обеспечения требований электромагнитной экологии, электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности [1-4]. Использование ЭМЭ и РПМ позволяет снизить радиолокационную заметность объектов военной техники и существенно расширяет возможности технологий Stealth [5].

В совокупности многообразия ЭМЭ и РПМ свое определенное место занимают композиты на основе термопластов и функциональных наполнителей (ФН). Они привлекают технологичностью и малой удельной массой; им присущи гибкость, легковесность, высокие звукопоглощающие и теплозащитные характеристики.

Цель работы – создание новых комбинированных поглотителей энергии электромагнитных и акустических волн на основе металлополимерных композитов; анализ их свойств и потенциала применения полимерных

композитных РПМ и ЭМЭ в решении проблем электромагнитной безопасности и экологии.

2. Материалы и методы исследования.

Объектами исследования выбраны пленочные, листовые и волокнистые нетканые композитные РПМ на основе термопластов – полиэтилена (ПЭ, ГОСТ 16803-070, ТУ 6-05-1866-78, ГОСТ 16337-77), полиэтилена низкого давления (ПЭНД ГОСТ 16338-77), полипропилена (ПП, ГОСТ 26996-86). В качестве ФН использовали магнитные и электропроводящие вещества: дисперсные магнитно-мягкий марганец-цинковый феррит (ММФ, ТУ 6-09-5111-84, марка 2500 НМС), технический углерод; углеродные волокна, углеродные ткани, порошки металлов – карбонильного железа (КЖ, ТУ 6-09-300-78), меди, никеля (ГОСТ 9722-78) и др.; диэлектрические материалы.

Параметры экранирования и ослабления энергии СВЧ-излучения, проходящего через исследуемые РПМ и ЭМЭ, оценивали рефлектометрическим методом по коэффициенту отражения (R) и ослаблению (S) энергии СВЧ-излучения в диапазоне частот 8.3–12.0 ГГц при нормальном падении ЭМВ – в волноводном тракте измерителя (P2-61) КСВ_н и ослабления, а также в безэховой камере в диапазоне частот 2–4 ГГц.

Измерения скорости и затухания ультразвука (U_3) в образцах РПМ проводили с целью выяснения эффективности их использования как средства вспомогательной акустической изоляции.

Электронно-микроскопические исследования выполнены с применением сканирующего электронного микроскопа Leo 982 (США).

3. Результаты и обсуждение.

Схема взаимодействия ЭМИ с полимерным композитным ЭМЭ детально изложена в работе [6]. Остановимся лишь на основных аспектах взаимодействия ЭМИ с веществом. Взаимодействие СВЧ-излучения с полимерным

материалом, наполненным ФН, различающегося по природе, форме, размерам и распределению в полимерном связующем, определяется совокупностью физических механизмов. Оценка индивидуального вклада этих механизмов в эффективность экранирования необходима при разработке листовых монолитных, волокнистых и комбинированных ЭМЭ. Такой подход позволяет регулировать функциональные возможности полимерных

и джоулевых потерь, ее отражения на границе экрана с атмосферой и рассеяния вследствие многократных внутренних переотражений на межфазных поверхностях композита. Эффективность экранирования зависят от частоты источника излучения, его пространственного расположения по отношению к ЭМЭ, а также от структуры и электрофизических свойств материала экрана. 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.

Среди полимерных композиционных РПМ можно выделить наиболее перспективные:

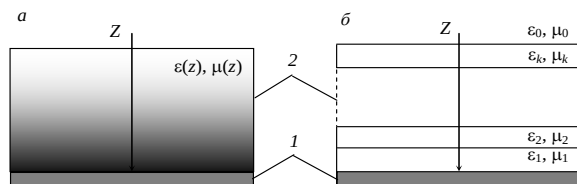
- волокнистые нетканые и комбинированные материалы;
- материалы, содержащие воду или водные растворы солей, гели и суспензии;
- РПМ на основе компонентов природного происхождения, в том числе биоразлагаемых;
- материалы на основе энантиоморфных структур;
- наноструктурированные материалы;
- материалы на основе полимеров с собственной проводимостью и т.п.

По структурно-конфигурационным признакам различают:

- (а) слоистые ЭМЭ с плоской или профилированной поверхностью, в том числе однослойные с изотропной или анизотропной структурой и многослойные [4, 7];
- (б) 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. Это во многих случаях обусловлено плохим согласованием волнового импеданса подобных ЭМЭ со «свободным пространством».

Указанного недостатка лишены одно- и многослойные ЭМЭ градиентного типа, задающие плавное (фиг. 1, а), либо ступенчатое (фиг. 1, б) 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.



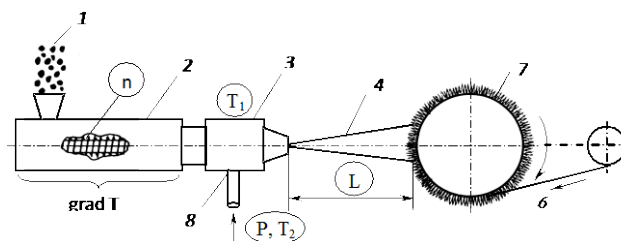
Фиг. 1. Поперечные сечения однослойного (а) и многослойного (б) ЭМЭ с градиентом электрических и магнитных потерь в направлении распространения (Z) ЭМВ: $\epsilon_0, \mu_0 \approx \epsilon_k, \mu_k < \dots < \epsilon_2, \mu_2 < \epsilon_1, \mu_1$; 1 – отражающая подложка; 2 – материал с дисперсным наполнителем, обеспечивающим электрические и магнитные потери.

РПМ путем варьирования их рецептурных, структурных и размерных параметров.

Анализ взаимодействия ЭМИ с компонентами полимерного композитного ЭМЭ позволил представить эффективность экранирования как степень ослабления электрической и магнитной составляющих поля падающей на экран ЭМВ. Эффективность экранирования определяется суммой величины поглощения экраном энергии ЭМИ по механизмам магнитных, диэлектрических

В первом случае (фиг. 1, а) 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 (фиг. 1, б) градиент электромагнитных свойств зависит от количества слоев некоторой толщины, типа и содержания ФН в каждом слое.

Нетканые волокнистые РПМ. В [7] разработан оригинальный способ изготовления волокнистых РПМ на основе функционально-наполненных термопластов по технологии пневмораспыления композитного расплава (melt-blowing) [8]. 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 (фиг. 2). В качестве ФН связующего при производстве волокнистого РПМ использовали порошок ММФ с размером частиц менее 50 мкм.

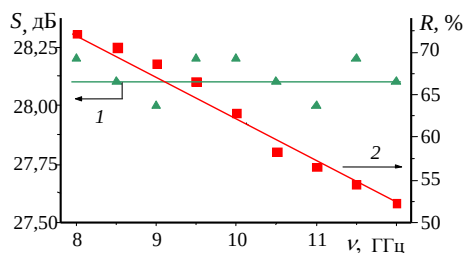
Фиг. 2. Схема изготовления волокнистых композитных РПМ на базе технологии melt-blowing: 1 – композитные полимерные гранулы; 2 – экструдер; 3 – распылительная головка; 4 – газо-полимерный поток; 5 – формообразующая подложка; 6 – углеродная нить; 7 – волокнистая масса; 8 – сжатый воздух.

Процессом распыления полимера управляли путем регулирования температуры расплава в экструзионной головке и давления распыляющего газа. Формирование волокнистой структуры РПМ зависит от нескольких технологических факторов. Важнейший из них – расстояние L от сопла головки до формообразующей подложки. 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 взаимодействие 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 $\rho = 0,30 \pm 0,025 \text{ г/см}^3$, при $L = 25 \text{ см}$ – $\rho = 0,24 \pm 0,025 \text{ г/см}^3$.

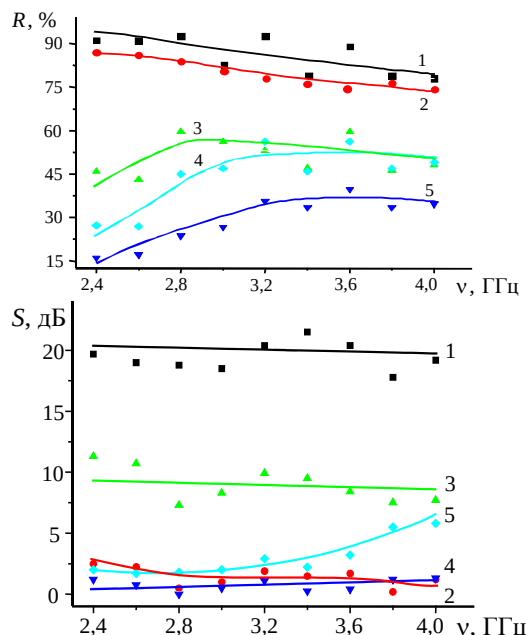
По описанному способу были изготовлены волокнистые РПМ с постоянным содержанием, а также с градиентом концентрации ФН по толщине полотна композита [9]. Градиентное распределение частиц наполнителя в РПМ обеспечило хорошее согласование его волнового сопротивления с воздушным пространством. РПМ этого типа 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.

Радиофизические исследования. На фиг. 3 приведены радиофизические характеристики многослойного комбинированного РПМ, состоящего из нескольких слоев волокнистого melt-blown материала и слоев углеродной ткани различной структуры и электропроводности, обеспечивающих градиент магнитных, диэлектрических и джоулевых потерь, противоположный направлению распространения ЭМВ. Общая толщина материала составляла 14 мм.



Фиг. 3. Ослабление энергии (1) и коэффициент отражения (2) в зависимости от частоты ЭМВ, нормально падающей на образец волокнистого РПМ типа «сэндвич».

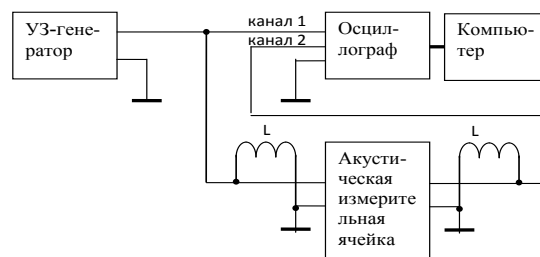
В безэховой камере в диапазоне частот ЭМИ 2–4 ГГц измерены радиофизические характеристики R и S некоторых листовых волокнистых и комбинированных РПМ (фиг. 4). Размер образцов $40 \times 30 \text{ см}$.



Фиг. 4. Частотные зависимости R и S ЭМВ для листовых образцов волокнистых комбинированных и монолитных РПМ: 1 – волокнистый ПЭ + металлическая сетка; 2 – волокнистый ПЭ + углеродные нити; 3 – волокнистый ПЭ + углеродная ткань Бусофит ТР3/2; 4 – монолитный ПЭ + ММФ (40 мас.%, $d = 50\text{--}200 \text{ мкм}$); 5 – блочный ПЭ + ММФ (40 мас.%, $d = 50\text{--}200 \text{ мкм}$) + стеклосферы (10 мас.%, $d = 200\text{--}500 \text{ мкм}$).

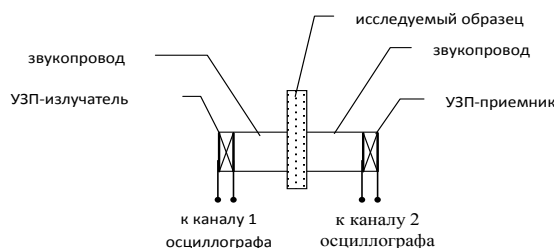
Как видно, образцы 1 и 2 относятся к ЭМЭ отражающего типа: значение R велико и сравнимо с отражением от металлического листа. Чем толще углеродная нить, выше ее электропроводность и масса углеродных нитей, приходящаяся на единицу длины образца, тем характернее приближение свойств композитного материала к металлическому листу. Для сравнения, на фиг. 4, приведены радиофизические характеристики монолитного и блочного образцов РПМ. Образцы 4 и 5 можно рассматривать в качестве поглотителей ЭМИ в исследуемом частотном диапазоне. Эти образцы содержат в значительном количестве ММФ, обеспечивающий магнитные потери. По радиофизическим характеристикам образец 3 занимает промежуточное положение между экранами поглощающего и отражающего типов.

Акустические исследования. Измерения скорости и затухания УЗ в образцах РПМ проводили с целью выяснения эффективности их использования как средства вспомогательной акустической изоляции. Образцы изготавливали в виде таблеток диаметром 18 мм и толщиной 3–10 мм. Таблетки помещали между алюминиевыми звукопроводами акустической измерительной ячейки в установке, разработанной в Брестском государственном техническом университете (БрГТУ, Беларусь) [10]. Акустический контакт обеспечивался тонким слоем эпоксидной смолы. Схема установки представлена на фиг. 5.



Фиг. 5. Экспериментальная установка для измерения скорости и затухания акустических волн.

Ультразвуковой преобразователь (УЗП) возбуждался генератором электрических импульсов и излучал в исследуемый образец продольный акустический импульс. Излученные, отраженные и прошедшие звуковые сигналы регистрировались осциллографом НМ1507 фирмы NAMEG с цифровой индикацией амплитудных и временных интервалов сигнала и выходом на персональный компьютер через интерфейс RS-232 (COM-порт). Генератор импульсов Г5-54 возбуждал колебания частотой 2–4 МГц. Схема акустической измерительной ячейки изображена на фиг. 6.



Фиг. 6. Акустическая измерительная ячейка.

Затухание α ультразвука в образце определяли по формуле:

$$\alpha = \frac{\ln(u_1/u_2)}{2h}, \quad (1)$$

где h – толщина образца; u_1/u_2 – отношение амплитуд соседних переотраженных сигналов.

Формула для расчета относительной точности измерения затухания имеет с учетом (1) следующий вид:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \sqrt{\frac{1}{\ln(u_1/u_2)} \left[\left(\frac{\Delta u_1}{u_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta u_2}{u_2} \right)^2 \right] + \left(\frac{\Delta h}{h} \right)^2} \quad (2)$$

Основная погрешность в измерении затухания определяется первыми двумя слагаемыми в выражении (2). При сравнительно сильном поглощении $\ln u_1/u_2 > 1$. В этом случае хорошей точности измерений можно достигнуть при относительно высоком уровне сигналов u_1 и u_2 . Необходимыми условиями выполнения этого требования являются согласование акустических импедансов пьезокерамического звукопровода и образца, а также выбор пьезокерамики с большим значением константы электромеханической связи. С целью достижения коротких излучаемых акустических импульсов УЗП должен быть частотно широкополосным. В противном случае излучаемые и отражаемые от конечной грани образца сигналы, в особенности при малой толщине образца, будут накладываться друг на друга.

Условия широкополосности УЗП и снижение двойных вносимых потерь на преобразование сигнала (к.п.д. УЗП) находятся в противоречии друг с другом. Поэтому необходимо было найти компромиссное решение. Изготовленные в БрГТУ УЗП рабочих частот 1; 2; 3,5; 5; 7,5 МГц излучали сигналы длительностью в три, четыре периода и имели двойные вносимые потери на преобразование 28 дБ. Использовалась низкодобротная пьезокерамика РКР-1 (с добротностью $Q = 68$) и константой электромеханической связи $k=0,58$ производства СКБ физики Ростовского государственного университета (Россия).

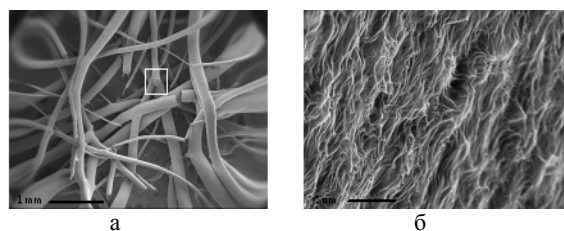
В таблице приведены результаты акустических исследований образцов волокнистых и монолитных РПМ.

Таблица. Акустические параметры образцов волокнистых листовых melt-blown (№ 1, № 2) и монолитных (№№ 3-5) РПМ при частоте УЗП 2,95 МГц

№	Параметры	Скорость УЗ, км/с	Затухание УЗ, дБ/мм
1	ПЭ, $h = 3,4$ мм	3,56	18,4
2	ПЭ + ММФ (38 %, 50 мкм), $h = 7$ мм	не прозвучивался	>14,8
3	ПЭ+ММФ (50 % масс, 160-200 мкм)	1,9	8,8
4	ПЭ+ММФ (50%, 160-200 мкм) +стеклосферы (10%)	1,9	11,9
5	ПЭ+ММФ (50%, 160-200 мкм) +углерод. ткань	2,15	17,4

Из таблицы видно, что скорость распространения звука в исследуемых образцах изменяется от 1,9 км/с до 3,56 км/с, а затухание – от 1 мм^{-1} (8,8 дБ/мм) до $2,1 \text{ мм}^{-1}$ (18,4 дБ/мм) при частоте УЗП 2,95 МГц, т.е. разработанные РПМ являются хорошими поглотителями УЗ-волн. Даже ненаполненные волокнистые материалы (образец № 1) являются хорошими УЗ-поглотителями. Это обусловлено тем, что нетканое полотно имеет разветвленную пористую структуру, увеличивающую активную поверхность рассеяния акустических волн.

Электронно-микроскопические исследования. По данным электронно-микроскопических исследований нетканые melt-blown РПМ представляют собой совокупность наполненных полимерных волокон, когезионно связанных в местах контакта. Частицы наполнителя (ММФ, Ni, КЖ) закапсулированы внутри волокон (фиг. 7).



Фиг. 7. Электронно-микроскопические изображения: а – melt-blown РПМ состава ПЭ + ММФ (38 мас.%); б – поверхность волокон.

Melt-blown РПМ имеют пористую структуру, что увеличивает площадь поверхности рассеяния, а также способствует прохождению ЭМВ в глубь экрана. Некоторое поглощение энергии ЭМИ происходит по механизму магнитных потерь из-за наличия частиц ферритового наполнителя, закапсулированных в связующем, имеющем технологически обусловленную фибриллярную структуру. Параметры рассеяния ЭМИ повышаются благодаря большой площади межфазных границ и возможности придавать экранам разнообразную форму, например, в виде усеченных пирамид, расположенных на плоском листовом основании.

4. Заключение. Результаты исследований показали, что среди многообразия РПМ и ЭМЭ перспективными являются нетканые волокнистые и комбинированные РПМ, изготовленные по технологии melt-blowing, 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. Подобные РПМ целесообразно применять в радиоэлектронной и военной промышленности для изготовления радиозащитной одежды, камуфляжных покрытий, элементов строительных конструкций.

5. 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. 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)
4. Макаревич, А.В. Радиопоглощающие полимерные композиционные материалы в технике СВЧ. – Материалы, технологии, инструменты, Т. 4, № 3, 1999, 24-32 стр. (А.В. Макаревич, В.А. Банний)
5. Алексеев, А.Г. Физические основы Stealth технологии. – Вестник СПбО РАЕН, №1-2, 1997, 139-146 стр. (А.Г. Алексеев, Е.А. Штагер)
6. Банний, В.А. Взаимодействие СВЧ-излучения с полимерным композитным электромагнитным экраном: физические модели и эксперимент. – Материалы,

- технологии, инструменты, № 2, 2008, 45-51 стр. (В.А. Банний, В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук)
7. Банний, 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. Банний)
8. 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)
9. Банний, В.А. Радиопоглощающий материал для верхней одежды. Патент 7364 ВУ, МКП 7 А41D31/00, G21F3/02. – Афіцыйны бюлетэнь, Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці, №3, 2005. (В.А. Банний, Л.С. Пинчук, А.В. Макаревич)
10. Данилевский, В.П. Акустические спектроскопические методы и средства диагностики материалов и веществ. – Материалы, технологии, инструменты, Т. 8, № 3, 2003, 104–112 стр. (В.П. Данилевский, Д.А. Костюк, Н.В. Кудинов, Ю.А. Кузавко)

ЕТАПИ ЗА ВНЕДРЯВАНЕ И ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ НА ТЕХНОЛОГИЯТА ЗА ВИСОКОСКОРОСТНО ПАКЕТНО ПРЕДАВАНЕ НА ДАННИ В НИЗХОДЯЩАТА ЛИНИЯ НА МОБИЛНА СИСТЕМА UMTS/HSPA

STAGES OF IMPLEMENTATION AND BASIC PRINCIPLES OF TECHNOLOGY FOR HIGH SPEED PACKET DATA IN THE DOWNLINK OF THE MOBILE SYSTEM UMTS/HSPA

доц. д-р инж. П. Петров, доц. д-р инж. Б. Найденов
 Технически университет – Варна, България, E-mail: borna@abv.bg

Abstract: The evolution of the technology for high speed packet data mobile system UMTS/HSPA is examined and the basic principles of the technology for high speed packet data downlink HSDPA are analyzed.

Keywords: HSPA (High-Speed Packet Access); HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access); MIMO (Multiple-Input Multiple-Output); SD (Spatial Diversity); SM (Spatial Multiplexing)

1. Увод

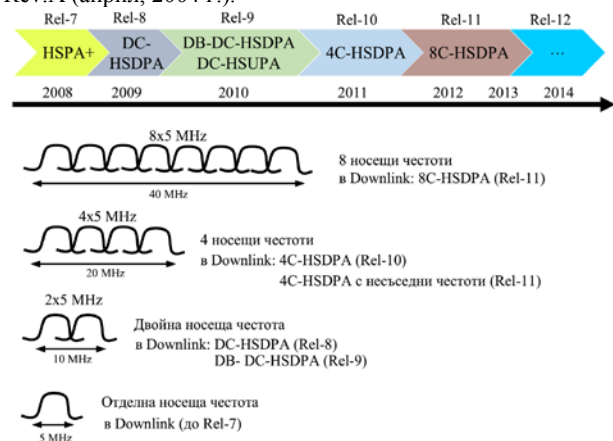
Като резултат от същественото изоставане на внедряването на перспективни технологии се наблюдава времево разсъгласуване, при което една технология още напълно не е „преживяла“, докато на пазара се появява друга алтернативна технология. Такава ситуация е характерна и при внедряване на технологиите HSPA (High-Speed Packet Access – високоскоростно пакетно предаване на данни) и LTE (Long Term Evolution – стандарт за дългосрочно развитие). Експертите считат, че в следващите години еволюцията на мрежите UMTS/HSPA ще продължава, а еволюцията на технологията HSPA+ (HSPA Evolution) ще бъде ключова за безжичния широколенов достъп. Това се обяснява с факта, че с всяка нова версия на спецификациите на 3GPP се извършва разширяване на възможностите на тази технология. Резултатите от изследванията на новите системи HSPA и LTE-Advanced за използвания от операторите радиочестотен ресурс (в агрегирана форма) показват приблизително еднаква пикова скорост за предаване на данните [1, 2].

Развитието на стандартите на 3GPP в частта на система HSPA (Rel'8-Rel'12) се характеризира преди всичко с внедряване на различни варианти за агрегирано използване на различен брой честотни ленти от 5 MHz. Очакваното интегриране в една честотна лента на низходящата линия на HSPA на технологията MIMO (Multiple-Input Multiple-Output – множествен вход-множествен изход), адаптивните модуляции QPSK, 16QAM или 64QAM и OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ортогонално мултиплексиране на честотни канали) все още не е реалност. От тази гледна точка, целта е да се разгледат етапите за внедряване на технологията HSPA и се анализират основните принципи на технологията за високоскоростно пакетно предаване на данни в низходящата линия HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access - HSDPA).

2. Етапи за внедряване на технология HSPA

В 3GPP технологията за достъп с високоскоростно пакетно предаване на данни в низходящата линия (HSDPA)

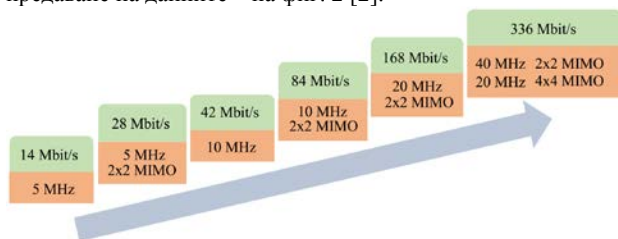
за първи път е описана във версия Rel'5 (2002 г.), а технологията за достъп с високоскоростно пакетно предаване на данни във възходящата линия (High-Speed Uplink Packet Access – HSUPA) – във версия Rel'6 (март, 2006 г.). HSDPA, съвместно с HSUPA се наричат HSPA, а тяхното развитие – HSPA+. Като цяло технологията HSDPA е аналогична на технологията cdma2000 EV-DO Rev.0 (1999 г.), а технологията HSUPA – на технологията cdma2000 EV-DO Rev.A (април, 2004 г.).



Фиг. 1. Еволюция на 3GPP-стандартите за агрегиране на спектъра в HSDPA

В началото на 2006 г. е публикуван стандарт cdma2000 EV-DO Rev.B, чрез който се осигурява обединяване до 15 честотни канала (всеки с ширина 1,25 MHz) в един агрегиран честотен канал. В стандарт 3GPP Rel'8 (2009 г.) е въведено агрегирано използване на два съседни честотни канала, често наричано „две носещи честоти“ (Dual Carrier-HSDPA – DC-HSDPA), в Rel'9 (2010 г.) – агрегирано използване на две носещи честоти от два различни честотни диапазона (Dual Band-DC-HSDPA – DB-DC-HSDPA), в Rel'10 (2011 г.) – агрегирано използване на четири съседни носещи честоти (4C-HSDPA), а в Rel'11 (2012 г.) – агрегирано използване до осем носещи честоти (8C-HSDPA), които са необезателно съседни и

необезателно от един честотен диапазон. Развитието на 3GPP-стандартите за агрегиране на спектъра в HSDPA е показано на фиг. 1 [2], а пределно достижимите скорости за предаване на данните – на фиг. 2 [2].



Фиг. 2. Максимални скорости за предаване на данните в HSDPA

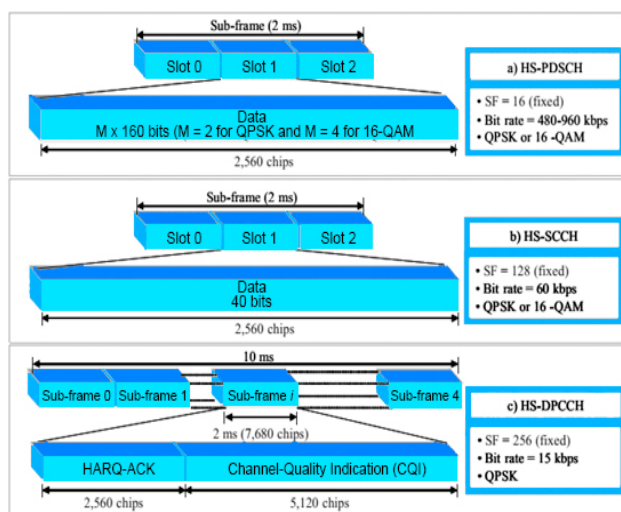
Може да се обобщи, че еволюцията на 3G-системите се извършва на три етапа. Етап 1 е формулиран в 3GPP2 Rev.0 и 3GPP Rel'5, а главен резултат от изследванията е станала технологията HSDPA. Етап 2 е свързан с технологии cdma2000 EV-DO Rev.A и HSUPA. В етап 3 услугите и приложенията, поддържани от мобилните системи се реализират на базата на IP-протокола. За тази цел в 3GPP2 са стандартизирани системите: cdma2000 EV-DO Rev.B за повишаване скоростта на предаване на информацията чрез мащабиране на работната честотна лента с много носещи; cdma2000 EV-DO Rev.C (Ultra Mobile Broadband – UMB). В 3GPP са стандартизирани няколко системи HSPA, LTE и LTE-Advanced.

В съответствие с еволюцията на 3G-системите, внедряването на технология HSDPA също може да се раздели на три етапа [3, 4]. Етап 1, често наричан базова версия на HSDPA е описан в Rel'5, етап 2 – в Rel'6 и Rel'7, а етап 3 – във версиите след Rel'7. Основна цел на етапи 1 и 2 е последователното внедряване в една честотна лента на низходящата линия на методите адаптивна модулация и кодиране, мултикодово предаване и MIMO. Основна цел на етап 3 е внедряване на различни варианти за агрегирано използване на различен брой честотни ленти, а неговият завършващ стадий се очаква да бъде стандартизацията на нов радио интерфейс, получил наименованието HSOPA (High-Speed OFDM Packet Access) [3].

3. Основни принципи на технология HSDPA

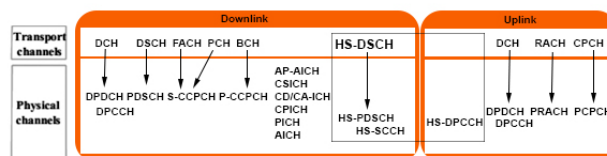
В [4-6] основните принципи на технология HSDPA са обособени в две групи: допълнителни функции; предаване с използване на много антенни системи.

3.1. Допълнителни функции



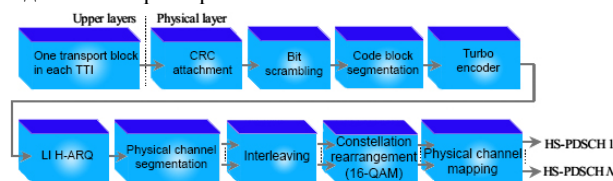
Фиг. 3. Sub-frame – структура на физически канали HS-PDSCH, HS-SCCH и HS-DPCCH

Допълнителните функции се характеризират с използване на ключови технически решения, станали методологическа основа на технология HSDPA: намаляване продължителността на фрейма от 10ms на 2ms (фиг. 3 [7]; адаптивна модулация и кодиране (Adaptive Modulation and Coding – AMC); въвеждане на високоскоростен общ транспортен низходящ канал HS-DSCH (High-Speed Downlink Shared Channel) за предаване на данни и мултиплексване с времево и кодово разделяне; използване на мултикодов режим за предаване и динамично заделяне на канални (кодови) ресурси; използване на хибридно автоматично запитване за повторно предаване (Hybrid Automatic Retransmission Query – HARQ); оперативно определяне поредността за предаване на пакетите на базовата станция с помощта на протокол MAC-hs (Medium Access Control-high speed), често наричан „планировчик на пакетите”.



Фиг. 4. Транспортни и физически канали на система HSPA

За разлика от базовата версия на UMTS (технология WCDMA), в която базовата станция регулира мощността на сигнала в точката на приемане, в технология HSDPA е въведен принципа за AMC при постоянна мощност на базовата станция. Неговата цел е да адаптира формата на модулацията и скоростта на кодиране на шумоустойчивите кодове към характеристиките на канала.

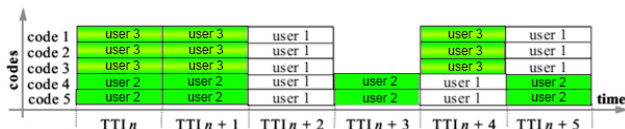


Фиг. 5. Основни обработки на сигналите на физическо ниво във високоскоростните низходящи канали за предаване на пакетни данни в система HSDPA

Друга важна отличителна особеност на HSDPA е въвеждането на транспортния канал HS-DSCH и три нови типа физически канали (фиг. 4 [7]): HS-PDSCH (High-Speed Physical Downlink Shared Channel), които са N=15 броя (фиг. 5 [7]) и са предназначени за предаване на пакетни данни; HS-SCCH (High-Speed Shared Control Channel) – низходящ канал за сигнализация; HS-DPCCH (High-Speed Dedicated Physical Control Channel) – възходящ канал за сигнализация. Физическите канали HS-PDSCH осигуряват времево мултиплексване на пакетите с данни за различните мобилни станции. За тази цел, целият радиофрейм се разбива на 5 субфрейма по 2ms, всеки от които се състои от 3 слота. В пределите на субфрейма (Sub-frame) се извършва разпределение на каналните ресурси, като е възможна едновременна трансляция (мултикодово предаване) на 5, 10 или 15 физически канала HS-PDSCH, често наричани „кодови канали” или „кодове”. Скоростта на модулационните символи във всеки от тези канала винаги е 240 ksymbol/s, което осигурява фиксиран коефициент на разширяване на спектъра (Spreading Factor) SF=16.

Физическият смисъл на SF е колко броя чипа съответстват на един модулационен символ. Тъй като скоростта на предаване на чиповете във физическите канали е винаги постоянна и равна на 3,84 Mchip/s, а скоростта на предаване на модулационните символи в низходящата линия на базовата версия на UMTS е променлива (3840/SF ksymbol/s) е необходимо да се използват кодове с променлив коефициент на разширяване

(Variable Spreading Factor – VSF), в които SF се изменя от 512 до 4. SF=4 осигурява теоретична скорост за предаване на модулационните символи 960 ksymbol/s, която при използване на QPSK съответства на скорост на предаване на кодираните битове 1,92 Mbit/s. Практически, пропускателната способност на технология WCDMA не превишава 384 kbit/s. Този недостатък в технология HSDPA е отстранен чрез мултикодово предаване, където вместо кодове с VSF се използват кодове със SF=16. Тогава при скорост на предаване на модулационните символи във всеки от физическите канали 240 ksymbol/s и използване на 15 броя канали, скоростта на предаване на символите в транспортния канал е 3,6 Msymbol/s, която при използване на QPSK съответства на 7,2 Mbit/s, на 16QAM – 14,4 Mbit/s, а на 64QAM – 21,6 Mbit/s.



Фиг. 6. Динамично разпределение на каналните ресурси в технология HSDPA

Един от критериите, по който каналният (кодovият) ресурс от до 15 кодови канала се разпределя между ползвателите е отношението сигнал/шум на входовете на техните приемници. Рационалният смисъл на подобен подход се изразява в предоставяне на приоритетен достъп към каналните ресурси на тези ползватели, които са способни по най-добър начин да ги използват в текущия момент на времето. Сканирането на отношението сигнал/шум и преразпределението на кодовите ресурси се осъществява на всеки времеви интервал за предаване (Transmission Time Interval – TTI), т. е. за времетраенето на един субфрейм от 2ms. Други критерии, които могат да се използват са съвместният профил на ползвателя или вида на заявената от ползвателя в дадения момент услуга. На фиг. 6 [7] е показана ситуация, когато кодovият ресурс (5 кода) на интервали TTI_n , TTI_{n+1} , ... се разпределя между мобилните станции на няколко потребители.

Другите технически решения на допълнителните функции са подробно описани в техническата литература и не са обект на разглеждане.

3.2. Предаване с използване на многоантенни системи

Технология MIMO обикновено се разглежда като метод за формиране на канала за връзка с многоантенни системи. Затова означението MIMO обобщава редица технологии: smart antennas; SDMA (Space Division Multiple Access – множествен достъп с пространствено разделяне); STC (Space-Time Coding – пространствено-времево кодиране) и др. В много литературни източници MIMO се дефинира като технология за предаване на данни, съгласно която входният поток с данни се разделя в демултиплексор на $N_{прд}$ потоци за обработка и предаване по отделни предавателни тракта. В приемната станция има $N_{пр}$ приемни тракта, данните от които постъпват в пространствено-времеви декодер и се обработват със специални алгоритми.

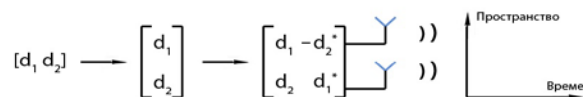
На практика се използват следните методи за предаване по MIMO-каналите: пространствено-времево кодиране, често наричано пространствено разнасяне (Spatial Diversity – SD); пространствено мултиплексиране (Spatial Multiplexing – SM); формиране диаграмата на насоченост (Beamforming).

Принципът на пространственото разнасяне се изразява в това, че от символите на входната информационна последователност в съответствие с правила, определени от съответния код се формират „копия“ на предаваните

символи. Последните след допълнителна обработка се излъчват едновременно, в една и съща честотна лента и в течение на зададен времеви интервал. Ефектът от пространственото разнасяне се постига чрез предаване на една и съща информация по няколко канала, които са с некорелирано затихване.

Различават се два вида пространствено разнасяне: Tx-разнасяне (разнасяне при предаване), когато всяко копие се предава чрез отделна антена; Rx-разнасяне (разнасяне при приемане), когато всяко копие се приема чрез няколко антени. В 3GPP Rel'5 са предвидени две схеми за Tx-разнасяне с две антени: STTD (Space Time Transmit Diversity – пространствено-времево разнасяне при предаване); CLM (Closed Loop Mode). Схеми за разнасяне с повече от две антени са описани в следващите версии на 3GPP.

За пространствено-времево кодиране се използват следните кодове: пространствено-времеви решетъчни кодове (Space-Time Trellis Codes – STTC); пространствено-времеви блокови кодове (Space-Time Block Codes – STBC); пространствено-времеви турбо кодове (Space-Time Turbo Trellis Codes – STTTC); многонивови пространствено-времеви кодове (Layered Space-Time Codes – LSTC). От тях най-голямо приложение в технология HSDPA са получили STBC, автор на първия от които е Alamouti.



Фиг. 7. Принцип за STBC-кодиране на сигналите с две предавателни антени

Пространствено-времевият блоков код на Alamouti е предназначен за системи MIMO с две предаващи и една приемна антени. Принципът за кодиране на сигналите е показан на фиг. 7 [8]), където d_1 и d_2 са подлежащи за предаване комплексни информационни символи; d_1^* и $-d_2^*$ – комплексни информационни символи, които са комплексно спрегнати със символите d_1 и d_2 и аналитично се изразяват чрез зависимостите

$$\begin{aligned} d_1 &= a_1 + jb_1; \\ d_2 &= a_2 + jb_2; \\ -d_2^* &= -a_2 + jb_2; \\ d_1^* &= a_1 - jb_1, \end{aligned}$$

където a_i и b_i са съответно действителна и имагинерна съставляващи на i -тия комплексен символ.

В основата на този метод е залегнало разнасянето в пространството и във времето на копията на предаваните символи. Принципът на действие предполага групиране на предаваните данни в блоковете от по два символа (нечетен d_1 , четен d_2). Всеки блок се предава чрез две антени за времетраенето на два времеви интервала, продължителността на всеки от които е равна на продължителността на символите. Тогава за времето на първия времеви интервал, символът d_1 постъпва на първата антена, а d_2 – на втората. За времето на втория времеви интервал на първата антена постъпва символът $-d_2^*$, а на втората антена – символът d_1^* .

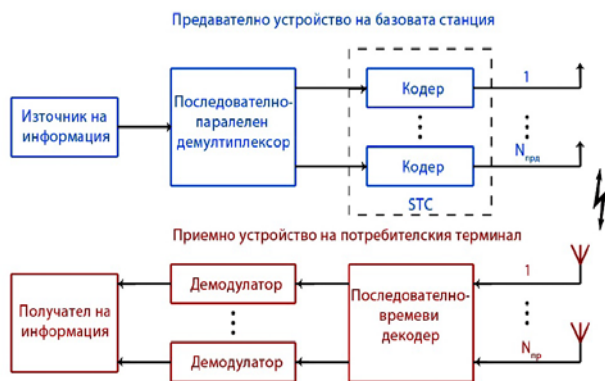
Физическият смисъл на STBC на Alamouti се изразява в това, че ако излъчваните сигнали в първия времеви интервал са били синфазни, то във втория интервал те ще бъдат в противофаза и обратно. Ако фазите на сигналите в първия интервал са ортогонални, то те ще останат такива и във втория, с тази разлика, че изпреварвания на фазите последователно ще възникват ту на първата, ту на втората антени. Освен това, ортогонални ще бъдат и сигналите, последователно излъчвани от всяка антена.

Тези свойства могат значително да подобрят приемането в условия на много лъчевост, тъй като насоченото излъчване на двуелементната антенна система зависи от съотношението на фазите на сигналите на нейните антени. Резултатът от това е, че насочените сумарни излъчвания на двойка сигнали в различните моменти на времето ще се различават. С други думи, даже при слабо различни символи d_1 и d_2 в първия времеви интервал, във втория времеви интервал се получава добра различимост на техните комплексно спрегнати копия d_1^* и d_2^* .

От гореизложеното става ясно, че копията на подлежащите за предаване символи се излъчват не само чрез две антени, но и в различно време. Затова STBC включват в себе си както пространствено, така и времево копие на символа (фиг. 7). С цел повишаване ефективността от разнасянето в условия на многолъчевост, могат да се използват повече от две предавателни антени. В тези случаи се използват други кодове STBC, в чиито кодови матрици номерът на реда съответства на номера на предаващата антена, а номерът на стълба – на номера на информационния символ в блока на копието. С други думи, редът е пространствената координата, а стълбът е времевата координата.

Пространственото разнасяне чрез различни пространствено-времеви кодове осигурява лесна реализация на устройствата за кодиране/декодирание и висока точност на приетата информация (малка вероятност за грешка на бит) в условия на многолъчевост. Сериозен недостатък на този метод за предаване по MIMO-канал е сравнително невисоката скорост на предаваната информация. В случаите, когато първостепенна задача е повишаването на скоростта на предаване на информацията, а влиянието на затихването на сигналите е малко е целесъобразно да се използва пространствено мултиплексирание.

MIMO-канал се образува, когато многоантенни системи се използват както при предаването, така и при приемането. В предавателя това се осигурява чрез пространствено мултиплексирание (SM). Неговият принцип (фиг. 8 [8]) се изразява в това, че потокът от символи, подлежащи за предаване чрез демултиплексор се разпределя (мултиплексира) на няколко паралелни ниско скоростни подпотока. Всеки от подпотоките след кодиране с пространствено-времеви код и модулация се предава едновременно с другите в една и съща честотна лента, но с различни антени. В идеалния случай, скоростта на предаване на информацията се увеличава толкова пъти, колкото е броят на предавателните антени.



Фиг. 8. Обобщена структурна схема на MIMO-система с пространствено мултиплексирание

Различават се два основни типа SM: алгоритъм BLAST (Bell Laboratories Layered Space Time) с модификации D-BLAST и V-BLAST; на базата на последователно-паралелен демултиплексор и пространствено-времеви кодове.

Алгоритъмът BLAST се използва само, когато броят на предавателните антени е по-голям от броя на приемните. Алгоритъмът D-BLAST позволява да се постигнат по-големи скорости за предаване на данните, но е много сложен за практическа реализация. Поради тази причина, приложение е намерил само алгоритъмът V-BLAST.

В схемата с SM, показана на фиг. 8, когато броят на предавателните антени $N_{прд}$ е по-малък от броя на приемните антени $N_{пр}$, тогава MIMO-системата осигурява предаване на информация по $N_{прд}$ пространствени канала, като всички канали работят в една и съща честотна лента и се разделят единствено на базата на метода SDMA. Възможността за едновременно предаване на информация по $N_{прд}$ пространствени канала определя високата спектрална ефективност на този принцип за построяване на мобилни MIMO-системи.

От друга страна, с цел намаляване на сложността и цената на мобилната станция е необходимо броят на антените в мобилната станция да бъде малък, докато броят на антените в базовата станция може да бъде увеличен. В този случай, броят на пространствените канали се определя от броя $N_{пр}$ на приемните антени. За низходящата линия това означава, че в предавателя на базовата станция след разделяне на входния високоскоростен поток с данни на $N_{пр}$ нискоскоростни подпотока ($N_{пр}$ е брой на приемните антени в мобилната станция), възниква задачата за тяхното предаване чрез $N_{прд}$ антени ($N_{прд}$ е брой на предавателните антени в базовата станция).

Ако състоянието на канала е известно в предавателя на базовата станция, тогава може да се построи адаптивна MIMO-система, която осигурява скорост на предаване на информацията, близка до пределно възможната. Ако състоянието на канала трудно може да бъде оценено и не може да бъде известно в предавателя на базовата станция, тогава се използват системи без адаптация. Последните е удачно така да се реализират, че да обединяват предимствата на пространственото мултиплексирание и пространственото разнасяне.

4. Заключение

За осигуряване в условия на многолъчевост на висока точност на приетата високоскоростна информация в низходящата линия на система UMTS/HSPA, освен традиционните обработки, допълнително се използват мултикодово предаване, пространствено мултиплексирание и пространствено разнасяне. По-нататъшното усъвършенстване на тези ключови технически решения е основен фактор за съществено повишаване на качествените показатели на мобилната комуникационна система.

5. Литература

1. Скрынников, В. Г. Эволюционное развитие технологий ИМТ. Электросвязь, 2012, № 8, с. 12-17.
2. Скрынников, В. Г. Агрегированное использование РЧС в системах UMTS/HSPA+ и LTE-Advanced. Электросвязь, 2014, № 7, с. 24-32.
3. Гепко, И. А., В. Ф. Олейник, Ю. Д. Чайка, А. В. Бондаренко. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. Киев, „ЕКМО“, 2009, 672 с.
4. Хаберланд, Б., Ф. Браун, С. Блох. HSDPA – путь развития систем третьего поколения. Электросвязь, 2005, № 1, с. 21-22.
5. Ericsson White Paper. Basic Concept of HSPA. February, 2007, p. 1-20.
6. Шумов, А. П., М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин. Повышение эффективности технологии MIMO HSDPA для систем третьего поколения. Электросвязь, 2006, № 10, с. 12-16.
7. Sanchez, J., M. Thionne. UMTS. ISTE Ltd, 2007.
8. Тихвинский В. О., С. В. Терентьев, А. Б. Юрчук. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. Москва, Эко – Трендз, 2010, 284 с.

ФРИКЦИОННИ САМОВЪЗБУЖДАЩИ СЕ ТРЕПТЕНИЯ НА НЯКОИ МЕХАНИЧНИ СИСТЕМИ

FRICTION INDUCED VIBRATIONS OF SPECIFIC MECHANICAL SYSTEMS

Доц. д-р П. Синапов

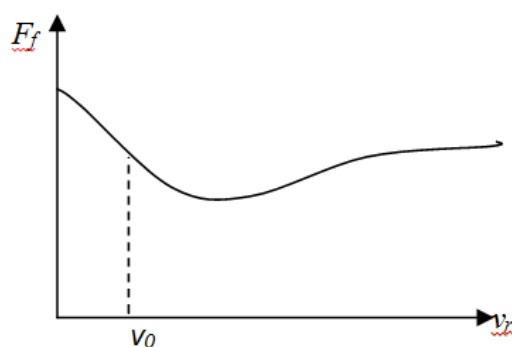
ТУ-София, ФТ, p_sinapov@tu-sofia.bg

Abstract: This publication considers mechanical systems, which treats friction induced vibrations. The analysis is based on previous studies of the author, where discrete mechanical systems and continuous systems are considered.

Keywords: Friction induced vibrations, discrete and continuous mechanical systems, FEM.

1. Увод

Фрикционните самовъзбудящи се трептения са нежелателно явление в машините, защото предизвикват високи динамични натоварвания, вибрации и шум. Като примери за това явление могат да се посочат: приплъзване на железопътно колело спрямо релса, трептения на детайла и инструмента на металорежещи машини, трептения при спиране на транспортни средства и др. Тези нежелателни трептения се предават на въздушната среда и се възприемат като шум от човешкото ухо. Причината е, че характеристиката на силата на триене в зависимост от релативната скорост на плъзгане между триещи се двойки (детайли) (фиг. 1) има падащ участък.



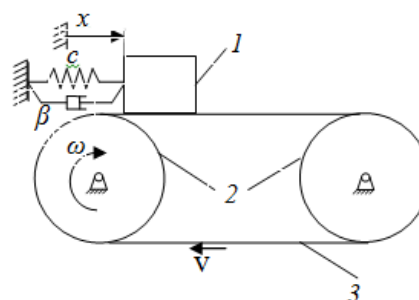
Фиг. 1
Сила на триене

2. Състояние на проблема и изследвани модели

В тази част от публикацията ще бъдат включени някои механични системи за изследване на фрикционни трептения, като по-голямата част от моделите, няма да бъдат изяснявани подробно. Та тях интересувашите се изследователи могат да открият подробности в посочената литература.

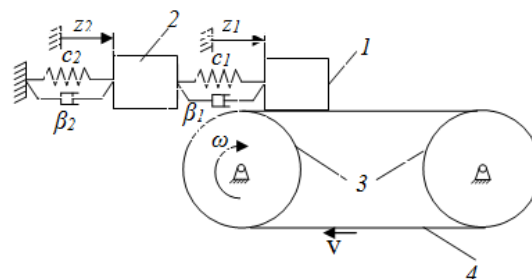
Най-известният модел [1], описващ явлението е показан на фиг. 2. Той се състои от тяло 1, което е поставено

върху подвижна лента. Тялото е свързано с неподвижна опора посредством пружина и демпфер. Когато релативната скорост на плъзгане между тялото и лентата е в падащия участък на силата на триене (фиг. 1), възникват трептения, наречени фрикционни самовъзбудящи се трептения или автотрептения. Те се характеризират с честота, равна на собствената честота на механичната система.



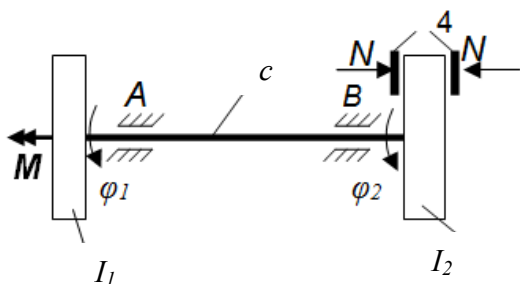
Фиг. 2.
Модел на Ван дер Пол

Интересен е случаят, когато степените на свобода станат 2 [5, 12] (фиг. 3), защото възниква въпросът коя от двете честоти ще се прояви. Факт е, че при този случай могат да се реализират трептения с първа, втора или с двете собствени честоти на системата едновременно.



Фиг. 3
Автотрептяща система с две степени на свобода

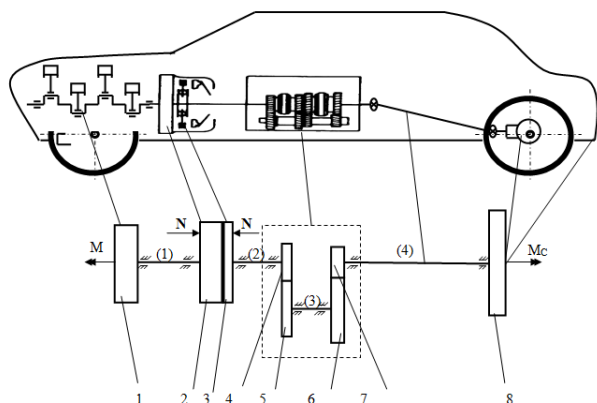
На фиг. 4 е показан модел, изследващ влиянието на масовите инерционни моменти върху устойчивостта на фрикционните трептения на двумасова механична система [4, 14].



Фиг. 4

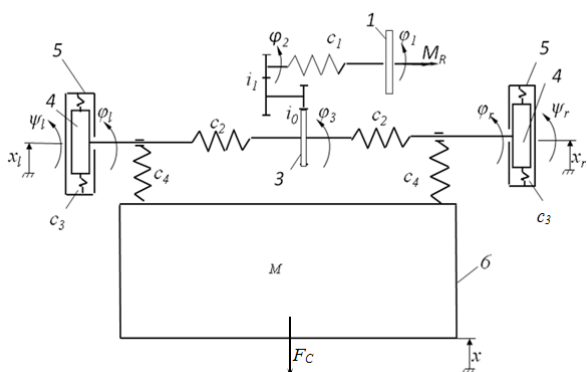
Автотрептяща система с две степени на свобода

Често срещано явление е приплъзването на съединителя на транспортно средство [4, 6, 10]. На фиг. 4 и фиг. 6 са дадени модели, изследващи явлението, на трансисии на транспортно средство със задно и съответно с предно предаване.



Фиг. 5

Модел на трансисия на транспортно средство със задно предаване

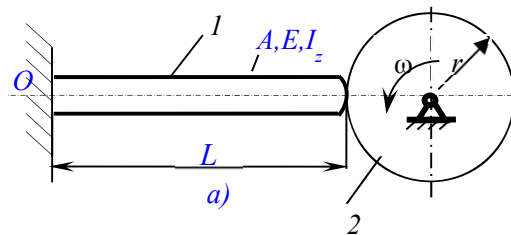


Фиг. 6

Модел на трансисия на транспортно средство с предно предаване

При системите с разпределени параметри трудността възникват при моделирането на задачите, защото те се описват с частни диференциални уравнения, което затруднява изключително решението [7]. Като пример може да се посочи

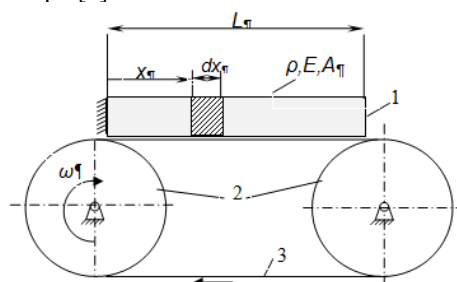
фиг. 7. Този модел може да се причисли към металорежещите машини. С него се изследват трептенията на гредата 1.



Фиг. 7

Модел на система с разпределени параметри

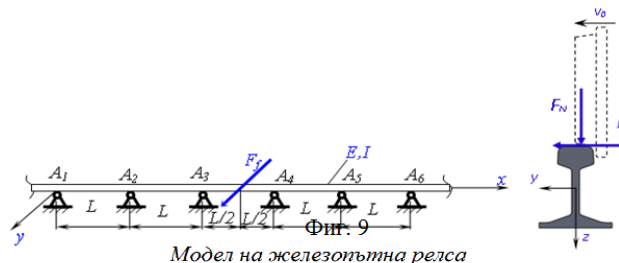
На фиг. 8 е представен моделът на Ван дер Пол, като тялото 1 се приема за система с разпределени параметри [3].



Фиг. 8

Модел на система с разпределени параметри

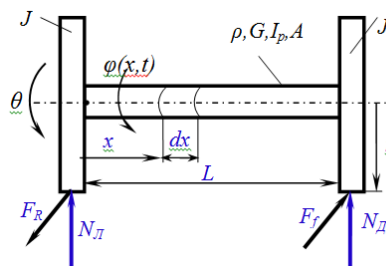
Редица примери на фрикционни трептения на системи с разпределени параметри могат да се посочат и в железопътната техника. Пример е опростения модел (фиг. 9) за описване автотрептенията на железопътната релса [8], породени от напречна сила на триене.



Фиг. 9

Модел на железопътна релса

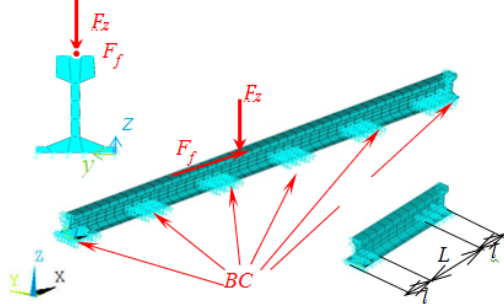
Моделът, описващ усукващи трептения на колоос на железопътно средство при плъзгане на колелото спрямо релсата в крива [9], е показан на фиг. 10. Оста между колелета се разглежда като система с разпределени параметри



Фиг. 10

Модел на колоос

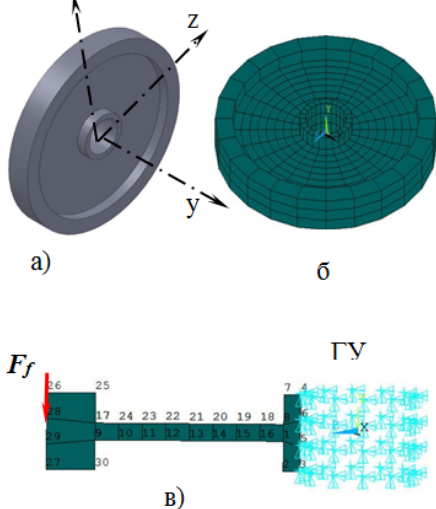
По обстоен модел [13, 14] на релса, в сравнение с този от фиг. 9, е показан на фиг. 11.



Фиг. 11

Модел на железопътна релса

Умален приближен модел [2] на железопътно колело с помощта на МКЕ за експериментални изследвания е показан на фиг. 12.



Фиг. 12

Опростен модел на железопътно колело

3. Диференциални уравнения на движението

Дискретните механични системи на показаните в т. 2 механични системи се решават с обикновени диференциални уравнения, а решението на задачите свързани със системите с разпределени параметри е изключително трудно и за това частните диференциални уравнения се дискретизират с метод на крайните елементи. И в двата случая диференциалните уравнения на движението са от вида:

$$(1) \quad [M^*]\{\ddot{u}\} + [C^*]\{\dot{u}\} + [K^*]\{u\} = \{F^*\}$$

където с $[M^*]$ и $[K^*]$ за означени съответно матриците на масите и еластичностите с размерност $(n) \times (n)$;

$\{u\} = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$ - вектор на обобщените координати;

$[C^*] = \alpha[M^*] + \beta[K^*]$ - матрицата на демпфиране;

$\{F^*\}_{n \times 1}$ - матрица на възловите сили и моменти с размерност $(n) \times 1$.

При решението на уравненията (1) от изключителна важност е определянето на собствените честоти, тъй като известно, че автоотрептения се отличават именно с тяхната поява. Те се определят от хомогенните уравнения [11]

$$(2) \quad [M^*]\{\ddot{u}\} + [K^*]\{u\} = 0.$$

4. Резултати и дискусия

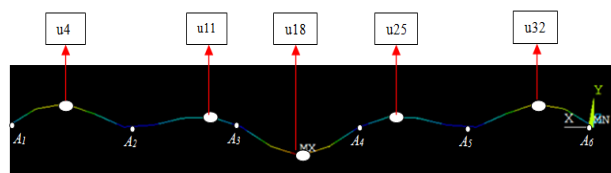
При модела от фиг. 2 се реализират триконтинентни трептения на тяло 1 с честота равна на собствената честота на системата ($k = \sqrt{c/m}$). Интересен е случаят, когато степените на свобода станат 2 (фиг. 3). При този случай могат да се реализират трептения с първа, втора или с двете собствени честоти на системата едновременно.

При модела от фиг. 4 се реализират трептения с честота

$$(3) \quad \omega = \sqrt{\frac{c(I_1 + I_2)}{I_1 I_2}}.$$

При модела от фиг. 5 се реализират трептения с първа и втора собствени честоти на трансмисията, докато при модела от фиг. 6 трептенията се отличават с трета собствена честота.

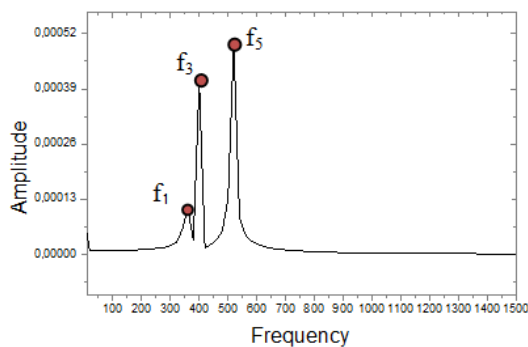
Възникналите трептения при моделите от фиг. 7 и от фиг. 8 са с първа собствена честота, а при модела от фиг. 9 – с трета собствена честота. Формата на трептенията в този случай е показана на фиг. 13.



Фиг. 13

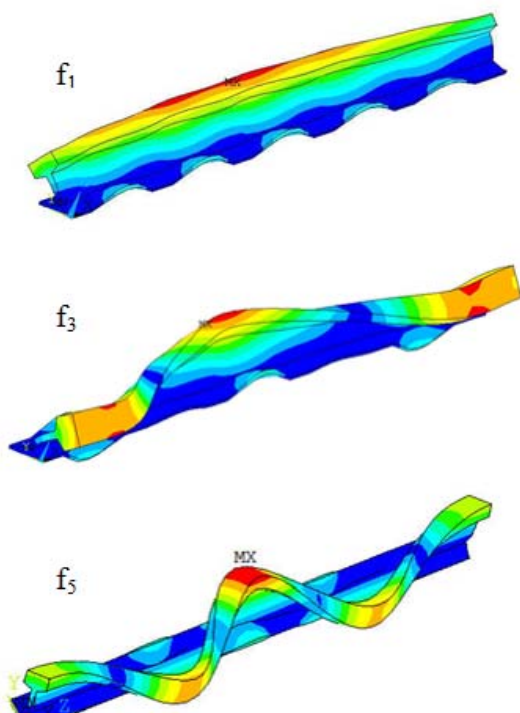
Форма на трептене на железопътна релса

Резултатите при модела от фиг. 11 са показани на фиг. 14, а формите на трептене на фиг. 15. Тук се отчита появата на 1, 3 и 5 собствени честоти.



Фиг. 14

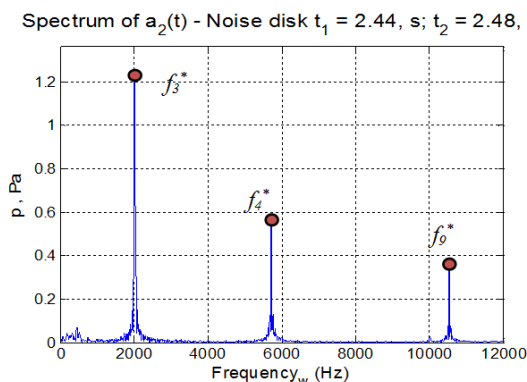
Спектрален анализ на трептения



Фиг. 15

Форма на трептене на железопътна релса

Резултатите при модела от фиг. 12 са показани на фиг. 16. Тук се отчита появата на 3, 4 и 9 собствени честоти.



Фиг. 16

Спектрален анализ на трептения

5. Заключение

При всички от разгледаните механични системи, изследванията не показват появата на точно определени собствени честоти. Оказва се, че възникването на тези трептения е сложен механизъм, зависещ от свойствата на конкретните механични системи и силите на триене, които възникват между триещите се детайли. В реалността това е допълнено със странични фактори, които допълнително правят системите неустойчиви. Поради това е необходимо индивидуално изследване за всяка конкретна механична система и решението за справяне с проблема ще зависи от особеностите на конкретната механична система.

Най-често прилаганите методи за отстраняване на фрикционни самовъзбуждащи се трептения в техниката са:

- Увеличаване на съпротивлението (демпфирането) в системата;
- Промяна на характеристиката на силата на триене с помощта на смазочни материали;
- Промяна на някои параметри на системата – маси и масови инерционни моменти (те влияят пряко върху устойчивостта на механичните системи);
- Промяна на скоростите между триещите се повърхнини.

5. Литература

- [1] Белниколовски Б., *Избрани глави от динамиката*, ТУ – София, София, 2006.
- [2] Игнатов, И., П. Синапов, И. Кралов, К. Неделчев, *Изследване на фрикционни трептения на плоча*, Созопол, Бултранс, 2014.
- [3] Кралов, И., П. Синапов, И. Игнатов, *Фрикционни самовъзбуждащи се трептения на система с разпределени параметри*, МТФ'2012, АМТЕХ 2012.
- [4] Синапов, П., *Фрикционни самовъзбуждащи се трептения, възникващи в машинни агрегати*, докторска дисертация, 2010 г., София.
- [5] Синапов, П., *Фрикционни трептения на системи с две степени на свобода*, *Механика на машините*, Варна, 2011.
- [6] Синапов, П., Г. Полихронов, Г. Дунчев, К. Неделчев, И. Кралов, *Самовъзбуждащи се трептения в системи, притежаващи метало-керамични фрикционни двойки*, Бултранс-2010, Созопол.
- [7] Синапов, П., К. Неделчев, И. Игнатов, *Фрикционни самовъзбуждащи се трептения на запъната гредка*, Бултранс-2012, Созопол.
- [8] Синапов, П., *Фрикционни самовъзбуждащи се трептения на железопътна релса*, *Механика на машините*, Варна, 2012.
- [9] Синапов, П., *Фрикционни самовъзбуждащи се трептения на колоос на ПЖПС*, *Механика на машините*, Варна, 2012.
- [10] Синапов, П., И. Кралов, Г. Полихронов, К. Неделчев, И. Игнатов, *Експериментално изследване на трептенията на автомобил при потегляне*, Созопол, Бултранс, 2011.
- [11] Славчев, С., *Анализ на собствените честоти на коша на специализиран вагон за превоз на контейнери и полуремаркета серия Sdggmrss*, Бултранс-2015, Созопол.
- [12] Тондл, А., *Автоколебания механических систем*, Мир, 1979, Москва.
- [13] Kralov, I., P. Sinapov, K. Nedelchev, I. Ignatov, Non-stationary Friction Induced Vibrations of a Railway Rail, *Journal of the Balkan Tribological Association Vol. 19, No 3, 419–425 (2013)*.
- [14] Kralov, I., P. Sinapov, K. Nedelchev, I. Ignatov, Non-Stationary Friction Induced Vibrations of a Railway Rail, *BulTrans-2013, Sofia*.
- [15] Sinapov, P., I. Kralov, K. Nedelchev, *Mass Moments of Inertia Effect on Friction Oscillations Endurance in Two-Component Mechanical System*, 36th International Conference "Applications of Mathematics in Engineering and Economics", AMEE'10; Sozopol, 2010.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ПРЕОБРАЗУВАНИЯТА НА ФУРИЕ ЗА РЕАЛИЗИРАНЕ НА OFDM-МОДУЛАЦИЯТА В МНОГОКАНАЛЕН SS-MC-MA – ПРЕДАВАТЕЛ. ЧАСТ 1

APPLICATION OF FOURIER TRANSFORMATIONS TO REALIZATION OF OFDM-MODULATION IN MULTI SS-MC-MA - TRANSMITTERS. PART 1

доц. д-р инж. П. Петров, доц. д-р инж. Б. Найденов
Технически университет – Варна, България, E-mail: borna@abv.bg

Abstract: It's proposed a structure of new generation multichannel SS-MC-MA - base station transmitter. It's presented an analogue algorithm formation of base-band OFDM – signal, on which base is analysed the application of IDFT and IFFT for the implementation of an OFDM modulation.

Keywords: LTE (Long Term Evolution); OFDMA (Orthogonal Frequency Multiple Access); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform); IFFT (Inverse Fast Fourier Transform); SS-MC-MA (Spread Spectrum-Multi Carrier-Multiple Access)

1. Увод

Характерна особеност на радио интерфейса на мобилна комуникационна система LTE (Long Term Evolution – стандарт за дългосрочно развитие) е използването в низходящата линия за връзка на технологията за множествен достъп с ортогонално честотно разделяне (Orthogonal Frequency Multiple Access - OFDMA). За съществено повишаване на техническите показатели на тази мобилна система и в съответствие с техническата концепция на мрежата за радио достъп от 5G (комбинирано използване на няколко метода за множествен достъп) в [1] е предложена структура (фиг. 1) на многоканален предавател, реализиран по метода “SS-MC-MA” (Spread Spectrum-Multi Carrier-Multiple Access; разширяване на спектъра-много носещи-множествен достъп). В него е използвано хибридно мултиплексиране, представляващо комбинация от CDM (Code Division Multiplexing – мултиплексиране с кодово разделяне), често наричано мултикодово предаване и OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ортогонално честотно мултиплексиране). Общото за LTE-предавателя и SS-MC-MA-предавателя е, че на входа на многоканалните OFDM-модулатори постъпват в паралелен код L на брой символи, които след това модулират L на брой ортогонални подносещи честоти.

Реализацията на OFDM-модулаторите на основата на аналогови алгоритми за предаване при голям брой ортогонални подносещи честоти е много сложна техническа задача. От друга страна, генерирането на дискретни фрагменти на сигнали, описвани с аналогови изрази за предаване може лесно да се осъществи чрез обратно дискретно преобразуване на Фурие (Inverse Discrete Fourier Transform – IDFT), а ефективен способ за реализацията на IDFT е обратното бързо преобразуване на Фурие (Inverse Fast Fourier Transform – IFFT).

Целта е на базата на аналогов алгоритъм за формиране на base-band OFDM-сигнал да се анализира приложението на IDFT и IFFT за реализиране на OFDM-модулацията в многоканален SS-MC-MA-предавател.

2. Предпоставки и начини за решаване на проблема

Обратното дискретно преобразуване на Фурие се определя с израз [2]

$$(1) \quad x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{i2\pi kn/N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1,$$

от който следва, че IDFT представлява разлагане на последователността $x[n]$ с дължина N в базис, образуван от N ортогонални последователности

$$(2) \quad \varphi_k[n] = \frac{1}{N} e^{i2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

със същата дължина, а значенията $X[k]$ са коефициенти на това разлагане. С други думи, IDFT представлява преход от дискретния спектър към времевите отчети на сигнала.

Скаларното произведение на двойка базисни последователности е [2]

$$(3) \quad (\varphi_k, \varphi_m) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{N} e^{i2\pi kn/N} \frac{1}{N} e^{-i2\pi mn/N} = \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} e^{i2\pi (k-m)n/N} = \frac{1}{N} \delta_{km},$$

където δ_{km} е символ на Кронекер.

От (3) следва, че базисът е ортогонален, но не е ортонормален: нормата на базисните последователности е $|\varphi_k| = 1/\sqrt{N}$ [2].

Ако се извърши нормирането $\psi_k[n] = \sqrt{N} \varphi_k[n]$ се получава ортонормалният базис

$$(4) \quad \psi_k[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{i2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1.$$

По аналогия с (3), за скалярното произведение на двойка ортонормални базисни последователности се получава $(\psi_k, \psi_m) = \delta_{km}$.

При използване на ортонормален базис IDFT приема симетричната форма [2]

$$(5) \quad x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_{\psi}[k] e^{i2\pi kn/N}, n=0,1,\dots,N-1.$$

Предимствата на ортонормалния базис (4) пред ненормирания ортогонален базис (2) са подробно описани в [2], поради което по-надолу ще се използва базисът (4) и съответстващото му дискретно преобразуване (5).

3. Решение на проучения проблем

3. 1. Аналогов алгоритъм за формиране на base-band OFDM-сигнал

Структурата на многоканален SS-MC-MA – предавател е показана на фиг. 1 [1]. Той осигурява работа както в традиционен режим с OFDM-мултиплексване (както в LTE), така и в хибриден режим чрез надграждане с мултикодово предаване (подобно на използваното в системи UMTS/HSDPA и cdma2000-1x EV).

В схемата от фиг. 1, цифровото съобщение на всеки k -ти ползвателски канал ($k = 0, 1, \dots, K-1$) след характерните за всяка съвременна комуникационна система обработки (шумоустойчиво кодиране, скремблиране, блоково разместване, адаптивна модулация, повторение) постъпва на входа на серийно-паралелен преобразувател (Serial-to-Parallel converter – S/P) във вид на последователност от M на брой правоъгълни многонивови символи

$$(6) \quad q^k(t) = \sum_{m=0}^{M-1} q_m^k \text{rect}(t - mT_q), \quad 0 < t < T_q,$$

където T_q е продължителност на символите; q_m^k – амплитуда на текущия m -ти символ, която във всеки от дискретните моменти на времето mT_q ($m = 0, 1, \dots, M-1$)

приема една от възможните стойности на множеството $q_m^{k*} = 2m^* - 1 - M^*$; M^* – брой на нивата на използваната многонивова модулация (BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM, 64QAM); $m^* = 1, 2, \dots, M^*$; $q_m^k(t) = q_m^k \text{rect}(t / T_q - m)$, $mT_q < t < (m+1)T_q$ – m -ти правоъгълен символ от k -тия ползвателски канал.

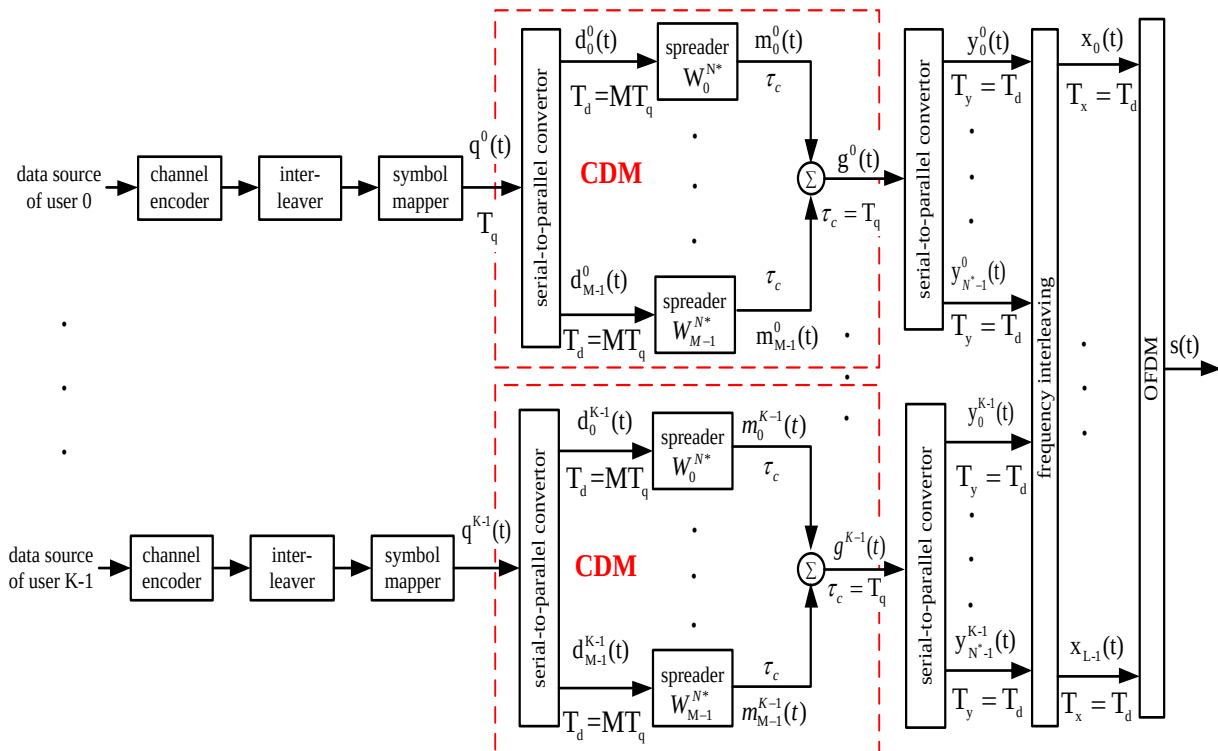
В S/P чрез задържане на входния високоскоростен поток (6) на M времеви интервали T_q на изходите му се формират M паралелни нискоскоростни подпотоци, символите $d_m^k(t) = d_m^k \text{rect}(t / T_d - j)$, на които са с продължителност $T_d = MT_q$, а амплитудата d_m^k на всеки нискоскоростен символ $d_m^k(t)$ е равна на амплитудата q_m^k на съответния входен високоскоростен символ $q_m^k(t)$. С други думи, значенията на амплитудите на цифровия сигнал в паралелен код съвпадат със значенията на амплитудите на същия сигнал в последователен код, а във всеки j -ти ($j = 0, 1, \dots$) времеви интервал T_d , M броя символи

$$(7) \quad q^k(t) = \{q_0^k(t), q_1^k(t), \dots, q_m^k(t), \dots, q_{M-1}^k(t)\}$$

в последователен код (всеки със скорост на предаване $R_q = 1 / T_q$) се предават едновременно по M -броя подканални чрез символите

$$(8) \quad d^k(t) = \{d_0^k(t), d_1^k(t), \dots, d_m^k(t), \dots, d_{M-1}^k(t)\}$$

на паралелния код, всеки със скорост на предаване $R_d = 1 / T_d = 1 / MT_q = R_q / M$.



Фиг. 1. Многоканален SS-MC-MA – предавател за базова станция от ново поколение

Символите на паралелния код (8) се разширяват във времевата област с предназначения за тях ортогонални кодови последователности на Адамар-Уолш. Например, $W_i^{N^*}$ е i -та кодова последователност на Адамар-Уолш с брой на чиповете N^* ; $i = 0, 1, \dots, N^* - 1$; $n = 0, 1, \dots, N^* - 1$; $a_n^i(t)$ – n -ти по ред чип от i -тата кодова последователност, характеризиращ се с продължителност $\tau_c = T_d / N^* = MT_q / N^*$, с амплитуда, равна на 1 и с полярност, определена от елементите a_n^i на матрицата на Адамар. Трябва да се има предвид, че за общия случай на фиг. 1, N^* може да бъде както равен на броя на паралелните подканални M , така и по-голям.

За получилия най-широко приложение вариант $M = N^*$ във всеки от M -те паралелни подканални на всеки ползвателски канал (например k -тия), разширените информационни символи $m_m^k(t) = d_m^k W_m^{N^*}$ се състоят от $M = N^*$ чипове $m_{mn}^k(t)$, всеки с продължителност $\tau_c = T_d / N^* = T_q$. По такъв начин, всеки разширен информационен символ $m_m^k(t) = d_m^k W_m^{N^*}$ предава цялата информация на символа $d_m^k(t)$, а всеки негов чип $m_{mn}^k(t) = d_m^k(t) a_n^m(t)$ – само $(1 / N^*) = (1 / M)$ -та от нея.

След сумиране на разширените информационни символи от M -те паралелни подканални се получава груповият разширен информационен символ на k -тия ползвателски канал

$$(9) \quad g^k(t) = \sum_{m=0}^{M-1} m_m^k(t) = \{g_0^k(t), g_1^k(t), \dots, g_n^k(t), \dots, g_{N^*-1}^k(t)\},$$

състоящ се също от $M = N^*$ на брой чипове $g_n^k(t)$, където

$$(10) \quad g_n^k(t) = m_{0n}^k(t) + m_{1n}^k(t) + \dots + m_{mn}^k(t) + \dots + m_{(M-1)n}^k(t) = \sum_{i=0}^{M-1} m_{in}^k(t),$$

е също с продължителност $\tau_c = T_q$. В този случай, груповият разширен информационен символ (9) предава в последователен код сумарната информация от паралелните кодове на разширените информационни символи, а всеки негов чип $g_n^k(t)$ – сумарната информация от n -тите $m_{in}^k(t)$ чипове на всичките паралелни информационни символи $m_m^k(t)$ [1].

Разгледаните до тук обработки на сигналите в k -тия ползвателски канал са изведени като мултикодово предаване (Multi Code), което е залегнало в основата на принципа за построяване на мобилните комуникационни системи UMTS/HSDPA и cdma2000-1x EV и следващите техни версии.

За разглеждания времеви интервал $T_d = MT_q = \tau_c N^*$, N^* – броя чипове на груповия разширен информационен символ $g^k(t)$ (9) в последователен код и с продължителност T_q , чрез втори S/P се предават едновременно по N^* – броя паралелни подканални чрез символите на паралелния код

$$(11) \quad y^k(t) = \{y_0^k(t), y_1^k(t), \dots, y_n^k(t), \dots, y_{N^*-1}^k(t)\},$$

всеки от които е с продължителност $T_y = T_d$.

Тъй като всеки от символите $y_n^k(t)$ предава информацията на съответния групов чип $g_n^k(t)$, последният предава сумарната информация от n -тите чипове $m_{in}^k(t)$ на

всичките разширени паралелни информационни символи $m_m^k(t)$, а всеки символ $m_m^k(t)$ предава информацията на съответния информационен символ $d_m^k(t)$, то в крайна сметка, всеки от входните информационни символи $q_m^k(t)$ (с продължителност T_q) се предава чрез всичките $y_n^k(t)$ символи (всеки с продължителност $T_y = T_d = MT_q$).

Когато мултикодното предаване е с коефициент на разширяване на спектъра $T_d / \tau_c = \tau_c N^* / \tau_c = 1$, т. е. отсъства разширяване на спектъра във времевата област, тогава символите на паралелния код $d^k(t)$ (8) трябва директно да постъпват на входа на блока “frequency interleaving”, като всеки един от тях предава само информацията на съответния символ от последователния код $q^k(t)$ (7). Тази операция е същата като в многоканалния LTE/OFDM-предавател. Това означава както безпроблемна адаптация на високоскоростните канали на стандартите (UMTS/HSDPA, cdma2000-1x EV и техните по-нови версии), използващи мултикодово предаване и стандартите (LTE, UMB, WiMAX), използващи технологията OFDMA в единна архитектура на универсална комуникационна система, така и възможност за работа в режими с или без мултикодово предаване.

Следователно, основното различие между двата режима се изразява в това, че при мултикодното предаване всеки от входните информационни символи $q_m^k(t)$ се предава чрез всичките $y_n^k(t)$ символи, докато в режим LTE/OFDM, всеки от входните информационни символи $q_m^k(t)$ се предава чрез съответстващия му символ $d_m^k(t)$ от паралелния код (8).

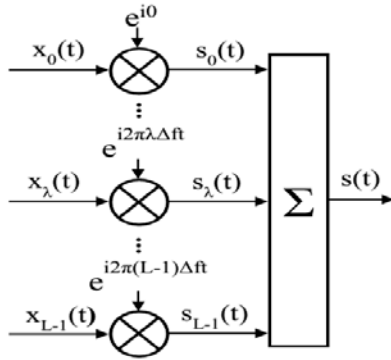
За да могат символите на всеки ползвателски паралелен код (11) да се предават чрез набори от непоследователни ортогонални честоти (избрани от целия честотен диапазон на системата) се използва блок за честотно раз местване (frequency interleaving). В резултат на тази операция на входа на OFDM-модулатора се формира паралелния код

$$(12) \quad x(t) = \{x_0(t), x_1(t), \dots, x_\lambda(t), \dots, x_{L-1}(t)\}; L = KN^*,$$

където всеки от символите $x_\lambda(t)$ [$\lambda = 0, 1, \dots, (L - 1)$] е с продължителност $T_x = T_y = T_d = MT_q$, съответства на строго определен символ $y_n^k(t)$ (11) в режим с мултикодово предаване (или $d_m^k(t)$ (8) в режим LTE/OFDM) и се предава на определена ортогонална подносеща честота $f_\lambda = \lambda \Delta f = \lambda / T_x = \lambda / MT_q$.

По такъв начин, независимо от използвания режим (с мултикодово предаване или LTE/OFDM), винаги на входа на блока “frequency interleaving” от всеки ползвателски канал постъпват по N^* – броя символи, всеки с продължителност $T_y = T_d$. Затова методът CDM, използван при мултикодното предаване за едновременно предаване на данните от подпотоците на един ползвателски канал не следва да се разглежда като мултиплексиране на ползвателски канали.

Същността на множествения достъп с ортогонално честотно разделяне на каналите OFDMA се изразява в назначаване за всеки ползвателски канал на $M = N^*$ на брой различни ортогонални подносещи честоти, синтезирани в съответствие с принципа на OFDM. За разглеждания случай това означава, че за времеви интервал $T_x = T_y = T_d = MT_q = \tau_c N^*$ всички ползвателски канали едновременно предават $L = KN^* = KM$ символи $x_\lambda(t)$ чрез назначените за тях $L = KN^*$ ортогонални подносещи честоти f_λ (фиг. 2).



Фиг. 2. OFDM-модулятор на многоканален SS-MC-MA – предавател

По такъв начин на изхода на всеки λ -ни модулатор в течение на един времеви интервал T_x се формира частния модулиран сигнал с подносеща ω_λ

$$(13) \quad s_\lambda(t) = x_\lambda(t)e^{i\omega_\lambda t} = x_\lambda(t)e^{i2\pi\lambda t/T_x} = x_\lambda(t)e^{i2\pi\lambda\Delta ft},$$

а пълният модулиран сигнал (често наричан „комплексен OFDM-сигнал“) в base-band диапазона на изхода на суматора за времетраенето на същия времеви интервал T_x има вида [1]

$$(14) \quad s(t) = \sum_{\lambda=0}^{L-1} s_\lambda(t) = \sum_{\lambda=0}^{L-1} x_\lambda(t)e^{i2\pi\lambda\Delta ft} = \sum_{\lambda=0}^{L-1} x_\lambda(t)e^{i2\pi\lambda t/T_x}.$$

В общия запис (13), процесът на лентовата модулация във всеки от подканалите представлява умножение на комплексната обвиваща на символа (често наричана „комплексен модулационен символ“)

$$(15) \quad x_\lambda(t) = a_\lambda(t) + ib_\lambda(t) = \sqrt{[a_\lambda(t)]^2 + [b_\lambda(t)]^2} e^{i\varphi_\lambda(t)} = A_\lambda(t)e^{i\varphi_\lambda(t)}$$

с ортогоналната подносеща $e^{i\omega_\lambda t} = \cos \omega_\lambda t + i \sin \omega_\lambda t$ с последващо предаване само на действителната част на това произведение

$$(16) \quad s_\lambda(t) = a_\lambda(t)\cos\omega_\lambda t - b_\lambda(t)\sin\omega_\lambda t = A_\lambda(t)e^{i\varphi_\lambda(t)}e^{i\omega_\lambda t}$$

където $A_\lambda(t)$ е амплитуда на комплексната обвиваща; $\varphi_\lambda(t) = \arctg[b_\lambda(t)/a_\lambda(t)]$ - фаза на комплексната обвиваща; $a_\lambda(t)$ и $b_\lambda(t)$ - синфазна и квадратурна съставлящи на комплексната обвиваща на символа от λ -тия подканал. След заместване на (16) в (14), аналоговият алгоритъм за формиране на base-band OFDM-сигнал приема вида

$$(17) \quad s(t) = \sum_{\lambda=0}^{L-1} S_\lambda(t) = \sum_{\lambda=0}^{L-1} A_\lambda(t)e^{i\varphi_\lambda(t)}e^{i2\pi\lambda\Delta ft} = \sum_{\lambda=0}^{L-1} A_\lambda(t)e^{i\varphi_\lambda(t)}e^{i2\pi\lambda t/T_x}$$

Литература:

- [1] Петров, П. П. Конвергенция на технологиите HSDPA (EV-DO) и LTE (UMB) чрез многоканален SS-MC-MA – предавател. Национална конференция на Шуменски Университет „Еп. К. Преславски“, 2011.
- [2] Васюков, В. Н. Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры в системах подвижной радиосвязи. Новосибирский государственный технический университет, 2006, 292 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ПРЕОБРАЗОВАНИЯТА НА ФУРИЕ ЗА РЕАЛИЗИРАНЕ НА OFDM-MОДУЛАЦИЯТА В МНОГОКАНАЛЕН SS-MC-MA – ПРЕДАВАТЕЛ. ЧАСТ 2

APPLICATION OF FOURIER TRANSFORMATIONS TO REALIZATION OF OFDM-MODULATION IN MULTI SS-MC-MA - TRANSMITTERS. PART 2

доц. д-р инж. П. Петров, доц. д-р инж. Б. Найденов
 Технически университет – Варна, България, E-mail: borna@abv.bg

Abstract: It's proposed a structure of new generation multichannel SS-MC-MA - base station transmitter. It's presented an analogue algorithm formation of base-band OFDM – signal, on which base is analysed the application of IDFT and IFFT for the implementation of an OFDM modulation.

Keywords: LTE (Long Term Evolution); OFDMA (Orthogonal Frequency Multiple Access); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform); IFFT (Inverse Fast Fourier Transform); SS-MC-MA (Spread Spectrum-Multi Carrier-Multiple Access)

3. 2. IDFT (IFFT)-алгоритми за формиране на base - band OFDM-сигнал

Ако в схемата от фиг. 1 [1] броят на ползвателите е един ($K=1$), тогава $L=KM=KN^*=M=N^*$, а изразът (17) приема вида

$$(18) \quad s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} s_m(t) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m(t) e^{i\varphi_m(t)} e^{i2\pi m \Delta f t} = \sum_{m=0}^{M-1} A_m(t) e^{i2\pi m t / T_x}.$$

За този случай е известно, че във времеви интервал $T_x = MT_q = \tau_c N^*$, сигналът (18) може да се представи като дискретна във времето последователност, ако компонентите на комплексните обвиващи $x_m(t) = A_m(t) e^{i\varphi_m(t)}$ (15) се разглеждат като дискретни значения на амплитудите и фазите на хармонични от ред на Фурие, отчетени в дискретните моменти [3] $t = q\Delta t = qT_q$ ($q=0, 1, \dots, M-1$; $\Delta t = T_x/M = \tau_c = T_q$), т. е.

$$(19) \quad s[q] = s(q\Delta t) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{i\varphi_m} e^{i2\pi m q / M} = \sum_{m=0}^{M-1} X[m] e^{i2\pi m q / M},$$

където $s[q]$ е q -ти елемент на вектора

$$(20) \quad s = (s[0], s[1], \dots, s[q], \dots, s[M-1])^T;$$

$A_m e^{i\varphi_m} = X_m = X[m]$, а $s[q]$ и $s(q\Delta t)$ са най-често срещаните означения на един и същи процес.

От друга страна, IDFT (5) характеризира функционалната връзка между времевата форма на дискретния сигнал и неговата честотна форма чрез израза

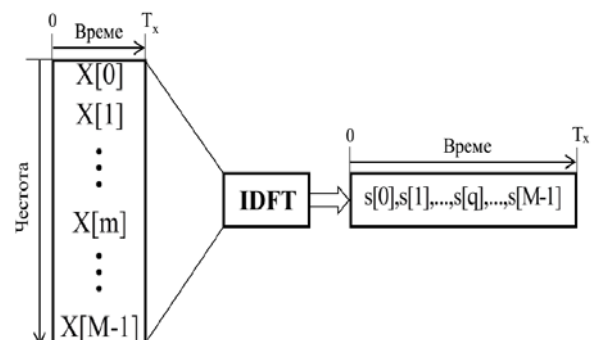
$$(21) \quad s[q] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} X[m] e^{i2\pi m q / M},$$

$$q = 0, 1, \dots, M-1,$$

който е равен на (19) само, когато се отчете нормиращия множител $1/\sqrt{M}$. При тези обстоятелства, векторът s (20) представлява реалната част на IDFT на M -броя паралелно предадени символи, а неговият q -ти елемент има вида (21). Тогава от (18) за предадения сигнал, съответстващ на (21) се получава

$$(22) \quad s(t) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} s_m(t) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} A_m(t) e^{i\varphi_m(t)} e^{i2\pi m \Delta f t} = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} x_m(t) e^{i2\pi m t / T_x}.$$

Следователно, осъществявайки дискретизация на OFDM-сигнала във времеви интервал от 0 до T_x със стъпка Δt се получава представа за OFDM-сигнала в отчетните моменти на времето $t = q\Delta t$ във вид на IDFT-преобразуване на M - елементна последователност от комплексните модулационни символи $X[m]$ (фиг. 3 [4]). На фиг. 3 $X[m]$ е m -тия модулационен символ с продължителност T_x , който модулира m -тата подносеща ортогонална честота във временния интервал от 0 до T_x . Векторът s на изхода на блока за IDFT представлява OFDM-сигнала.



Фиг. 3. Принцип за формиране на OFDM-сигнал чрез IDFT

При K на брой ползватели и в съответствие с (21) и (22) се получава:

$$(23) \quad s[q] = s(q\Delta t) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{\lambda=0}^{L-1} A_{\lambda} e^{i\varphi_{\lambda}} e^{i2\pi\lambda q/L} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{\lambda=0}^{L-1} X[\lambda] e^{i2\pi\lambda q/L},$$

$$(24) \quad s(t) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{\lambda=0}^{L-1} A_{\lambda}(t) e^{i\varphi_{\lambda}(t)} e^{i2\pi\lambda\Delta f t} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{\lambda=0}^{L-1} x_{\lambda}(t) e^{i2\pi\lambda t/T_x},$$

където вече $\Delta t = T_x/L$; $t = q\Delta t = qT_x/L$; $q=0,1,\dots,L-1$.

От друга страна, времевият интервал Δt е свързан с честотата на дискретизация f_s чрез зависимостта $\Delta t^* = 1/f_s$. Според критерия на Найкуист за OFDM-модулятор с един ползвател е необходимо $[5] f_s > 2(M-1)\Delta f$, а приложението на това условие има вида $f_s = M_1\Delta f$, където $M_1 > 2(M-1)$ е цяло положително число и се избира от условието $M_1 = 2^m$ (m е цяло число). Тогава $\Delta t^* = 1/f_s = 1/(M_1\Delta f) = T_x/M_1$; $t = q^*\Delta t^*$; $q^* = 0,1,\dots,M_1-1$; $\Delta f\Delta t^* = 1/M_1$, а в съответствие с [6], IDFT-алгоритъмът (21) се трансформира в IFFT-алгоритъма

$$(25) \dots s[q^*] = s(q^*\Delta t^*) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{i\varphi_m} e^{i2\pi m\Delta f q^* \Delta t^*} =$$

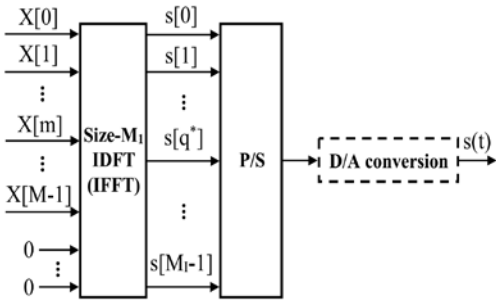
$$= \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{i\varphi_m} e^{i2\pi m q^*/M_1} = \frac{1}{\sqrt{M_1}} \sum_{m=0}^{M_1-1} A_m^* e^{i\varphi_m^*} e^{i2\pi m q^*/M_1} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{M_1}} \sum_{m=0}^{M_1-1} X^*[m] e^{i2\pi m q^*/M_1},$$

където

$$(26) \quad X^*[m] = A_m^* e^{i\varphi_m^*} = \begin{cases} X(m) = A_m e^{i\varphi_m} & \text{при } 0 \leq m < M \\ 0 & \text{при } M \leq m < M_1 \end{cases}$$

По такъв начин, всяка от последователностите $s[0]$, ..., $s[q^*]$, ..., $s[M_1-1]$ се явява IDFT-преобразуване на символите $X[0]$, ..., $X[m]$, ..., $X[M-1]$, разширени с нули до дължината M_1 (фиг. 4 [6]), а OFDM-модулацията се реализира чрез IFFT-обработка, съпроводена от цифрово-аналогов преобразувател (D/A conversion) като M_1/M може да бъде и не цяло число.



Фиг. 4. Концептуален модел на едноканален OFDM-модулятор с IFFT-обработка

При K на брой ползватели и в съответствие с (25) и (26), IDFT- алгоритъмът (23) се трансформира в IFFT-алгоритъма

$$(27) \quad s[q^*] = s(q^*\Delta t^*) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{\lambda=0}^{L-1} A_{\lambda} e^{i\varphi_{\lambda}} e^{i2\pi\lambda\Delta f q^* \Delta t^*} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{\lambda=0}^{L-1} A_{\lambda} e^{i\varphi_{\lambda}} e^{i2\pi\lambda q^*/L_1} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{L_1}} \sum_{\lambda=0}^{L_1-1} A_{\lambda}^* e^{i\varphi_{\lambda}^*} e^{i2\pi\lambda q^*/L_1} = \frac{1}{\sqrt{L_1}} \sum_{\lambda=0}^{L_1-1} X^*[\lambda] e^{i2\pi\lambda q^*/L_1},$$

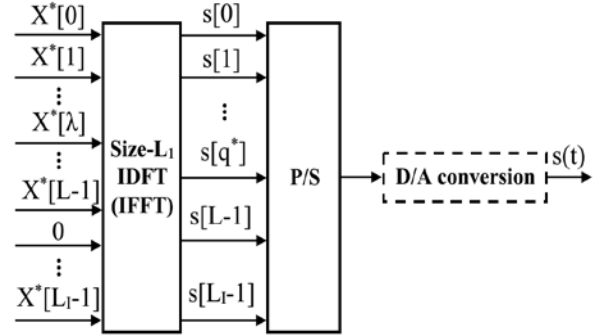
където

$$(28) \quad X^*[\lambda] = A_{\lambda}^* e^{i\varphi_{\lambda}^*} = \begin{cases} X[\lambda] = A_{\lambda} e^{i\varphi_{\lambda}} & \text{при } 0 \leq \lambda < L; \\ 0 & \text{при } L \leq \lambda < L_1, \end{cases}$$

$$f_s = L_1\Delta f; L_1 > 2(L-1); \Delta t^* = 1/f_s = 1/(L_1\Delta f) = T_x/L_1;$$

$$t = q^*\Delta t^*; q^* = 0,1,\dots,L_1-1; \Delta f\Delta t^* = 1/L_1.$$

По такъв начин чрез дискретизация на OFDM-сигнала (24) във времеви интервал от 0 до T_x със стъпка $\Delta t^* = T_x/L_1$ се получава представа за OFDM-сигнала в отчетните моменти на времето чрез последователностите $s[0]$, ..., $s[q^*]$, ..., $s[L_1-1]$, които от своя страна представляват IFFT-преобразуване на комплексните модулационни символи $X[0]$, ..., $X[\lambda]$, ..., $X[L-1]$, разширени с нули до дължината L_1 (фиг. 5). Векторът s от изхода на блока за IFFT-обработка след P/S и D/A-обработки се преобразува в OFDM-сигнала $s(t)$ (24).



Фиг. 5. OFDM-модулятор с IFFT-обработка на многоканален SS-MC-MA – предавател

В спецификацията на LTE са определени следните фиксирани значения на широчините на низходящите и възходящите канали [6]: 1,4MHz; 3MHz; 5MHz; 10MHz; 15MHz; 20MHz. Например, при широчина на канала 10MHz, броят на подносещите е $L=600$, а размерът на IFFT е $L_1=1024$, което съответства на извадки с честота $f_s = 1/\Delta t^* = L_1\Delta f = 15,36\text{MHz}$, където $\Delta f=15\text{kHz}$. Забелязва се, че условието $L_1 > 2(L-1)$ не се изпълнява.

Трябва да се има предвид, че OFDM-сигналът има безкрайна лента на пропускане. По тази причина, теоремата на отчетите никога не може напълно да се реализира, но за нейното практическо използване е необходимо $L_1\Delta f > L\Delta f$ [6]. От друга страна, с цел осигуряване на обратна съвместимост на технологии LTE и W-CDMA е необходимо честотите за дискретизация (тактови честоти за IFFT) на всичките канали на LTE да бъдат кратни на честотата за дискретизация на W-CDMA, която е 3,84MHz.

В съответствие с [2], матричната интерпретация на разгледаната IDFT (IFFT)-обработка на вектора

$$(29) \quad X^* = (X^*[0], X^*[1], \dots, X^*[\lambda], \dots, X^*[L-1], \dots, X^*[L_1-1])^T$$

(стойностите на комплексните модулационни символи след $X[L-1]$ са нули) може да се опише с матричния израз

$$(30) \quad s = W^H X^* = W^{-1} X^*,$$

където

$$(31) \quad s = (s[0], s[1], \dots, s[q^*], \dots, s[L-1], \dots, s[L_1-1])^T;$$

$$(32) \quad W^{-1} = \frac{1}{\sqrt{L_I}} \begin{bmatrix} W_{L_I}^0 & \dots & W_{L_I}^0 & \dots & W_{L_I}^0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{L_I}^0 & \dots & W_{L_I}^{-\lambda q^*} & \dots & W_{L_I}^{-\lambda(L_I-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{L_I}^0 & \dots & W_{L_I}^{-(L_I-1)q^*} & \dots & W_{L_I}^{-(L_I-1)^2} \end{bmatrix};$$

$W^H = W^{-1}$; W^H е матрица, която е ермитово спрегната на матрицата W ; W^{-1} – обратна матрица;

$$(33) \quad W_{L_I} = \exp(-i2\pi / L_I);$$

$$(34) \quad (W_{L_I})^{\lambda q^*} = \exp(-i2\pi \lambda q^* / L_I);$$

$$(35) \quad [(W_{L_I})^{\lambda q^*}]^{-1} = (W_{L_I})^{-\lambda q^*} = \exp(i2\pi \lambda q^* / L_I).$$

3. 3. OFDM-модулятор с IFFT-обработка и добавяне на циклически префикс

OFDM-символът представлява съвкупност от всички подносеци на времеви интервал с продължителност $T_x = 1/\Delta f = 66,7 \mu s$. OFDM-модулацията представлява мощно средство за борба с между символната интерференция, когато в началото на OFDM-символа се добави защитен интервал. Тогава частта на сигнала, предавана за продължителността на защитния интервал T_{CP} се явява циклически префикс (Cyclic Prefix – CP) на OFDM-сигнала, т. е. на интервала T_{CP} се предава копие на частта от OFDM-сигнала (последните $T_{CP} = 4,7 \mu s$), взета от края на полезния T_x - интервал (фиг. 6 [6]).

изменя в границите от 0 до T_{CP}) сигналите $s_k(t)$ и $s_m(t)$ са ортогонални е нулевата стойност на тяхното скалярно произведение [7], т. е.

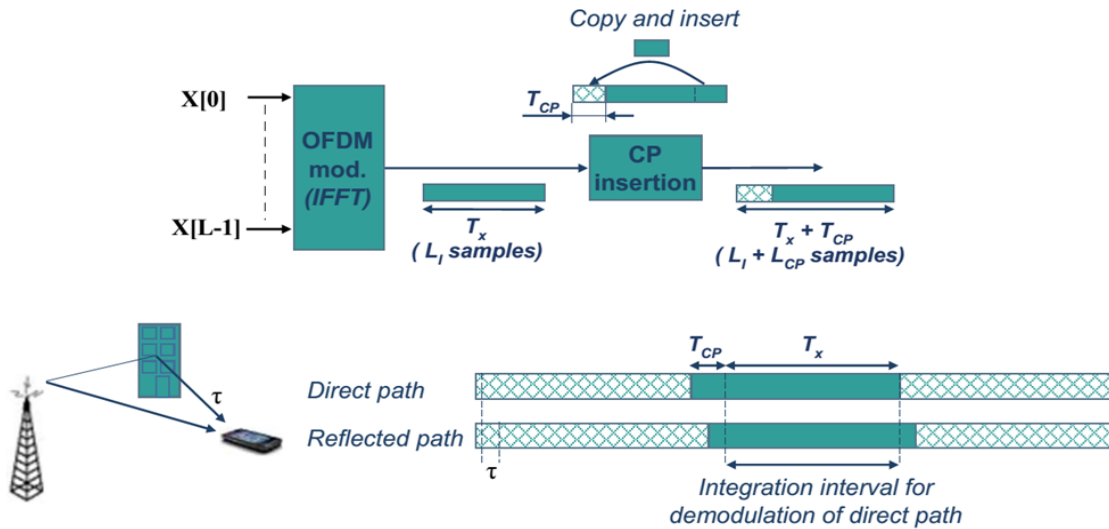
$$(36) \dots [s_k(t), s_m(t)] = \dots \\ = \int_{-\tau}^{T_x - \tau} a_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) a_m \cos(2\pi f_m t + \varphi_m) dt = \frac{n!}{r!(n-r)!} \\ = \frac{a_k a_m}{2} \left[\frac{\sin(2\pi(f_k + f_m)(T_x - \tau) + \varphi_k + \varphi_m) - \sin(\varphi_k + \varphi_m)(-\tau)}{2\pi(f_k + f_m)} + \right. \\ \left. + \frac{\sin(2\pi(f_k - f_m)(T_x - \tau) + \varphi_k - \varphi_m) - \sin(\varphi_k - \varphi_m)(-\tau)}{2\pi(f_k - f_m)} \right] = 0$$

при условие, че $(f_k + f_m)$ и $(f_k - f_m)$ са цели числа, кратни на $1/T_x$.

Тъй като на времеви интервал T_x съответстват $L_I = T_x / \Delta t^*$ на брой отчета във времева област (31), тогава на времеви интервал T_{CP} ще съответстват $L_{CP} = T_{CP} / \Delta t^*$ на брой отчета във времева област, а на времеви интервал $T_s = T_{CP} + T_x$ ще съответстват $(L_{CP} + L_I)$ отчета, които могат да се представят чрез вектора

$$(37) \quad s_s = (s[L_I - L_{CP}], \dots, s[L_I - 1], s[0], \dots, s[q^*], \dots, s[L_I - 1])^T.$$

Добавянето на отчетите на CP $s[L_I - L_{CP}], \dots, s[L_I - 1]$ към отчетите (31) е показано на фиг. 7 [8], а матричният запис на получаването на вектора s_s има вида [7, 9]



Фиг. 6. Принцип на циклическия префикс

Следователно, продължителността на разширения с CP OFDM-символ T_s представлява сума от полезната част T_x и защитния интервал T_{CP} . При това от гледна точка на малки загуби в скоростта на предаване на информацията е необходимо T_x съществено да превишава T_{CP} , а от гледна точка на ефективно противодействие на между символните изкривявания е необходимо T_{CP} да има голяма стойност.

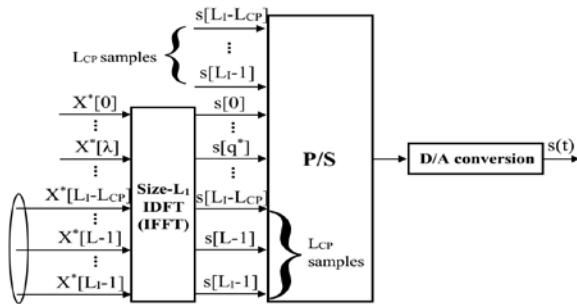
Наличието на CP не изкривява ортогоналността на елементарните сигнали. Това следва от обстоятелството, че времевият прозорец за анализ е T_x , поради което се анализира или непосредствено полезната част на разширения OFDM-символ (при идеална синхронизация на непосредствено разпространяващия се сигнал), или полезната част на символа, възстановена чрез CP (фиг. 6). Аналитичното доказателство, че на времеви интервал от τ до $T_x - \tau$ (τ е времево изместване и се

$$(38) \quad s_s = C \times s = \begin{bmatrix} O_{L_{CP} \times (L_I - L_{CP})} & I_{L_{CP}} \\ & I_{L_I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s[0] \\ M \\ s[q^*] \\ M \\ s[L_I - 1] \end{bmatrix},$$

където

$$(39) \quad C = \begin{bmatrix} O_{L_{CP} \times (L_I - L_{CP})} & I_{L_{CP}} \\ & I_{L_I} \end{bmatrix}$$

е матрица, която представлява операцията за допълване с CP; $I_{L_{CP}}$ и I_{L_I} са единични матрици; $O_{L_{CP} \times (L_I - L_{CP})}$ - нулева матрица.



Фиг. 7. OFDM-модулятор с IFFT-обработка и добавяне на цикличен префикс

4. Заключение

1. В предложената структура на многоканален SS-MC-MA – предавател за базова станция от ново поколение (фиг. 1), когато мултикодовото предаване е с коефициент на разширяване на спектъра $T_d/\tau_c = \tau_c N^*/\tau_c = 1$, т. е. отсъства разширяване на спектъра във времевата област, тогава символите на паралелния код $d^k(t)$ (8) директно постъпват на входа на блока “frequency interleaving”, като всеки един от тях предава само информацията на съответния символ от последователния код $q^k(t)$ (7). Тази операция е същата като в многоканалния LTE/OFDM-предавател. Това означава както безпроблемна адаптация на високоскоростните канали на стандартите (UMTS/HSDPA, cdma2000-1x EV и техните по-нови версии), използващи мултикодово предаване и стандартите (LTE, UMB, WiMAX), използващи технологията OFDMA в единна архитектура на универсална комуникационна система, така и възможност за работа в режими с или без мултикодово предаване.

2. Независимо от използвания режим (с мултикодово предаване или LTE/OFDM), винаги на входа на блока “frequency interleaving” от всеки ползвателски канал постъпват по N^* -броя символи, всеки с продължителност $T_y = T_d$. Това означава, че за времеви интервал $T_x = T_y = T_d = MT_q = \tau_c N^*$ всички ползвателски канали

едновременно предават $L = KN^* = KM$ символи $X_\lambda(t)$ чрез назначените за тях $L = KN^*$ ортогонални подносещи честоти f_λ (фиг. 2).

3. Полученият IFFT-алгоритъм (27) показва, че чрез дискретизация на OFDM-сигнала (24) във времеви интервал от 0 до T_x със стъпка $\Delta t^* = T_x / L_I$ се получава представа за OFDM-сигнала в отчетните моменти на времето чрез последователностите $s[0], \dots, s[q^*], \dots, s[L_I - 1]$, които от своя страна представляват IFFT-преобразуване на комплексните модулационни символи $X[0], \dots, X[\lambda], \dots, X[L-1]$, разширени с нули до дължината L_I (фиг. 5). Това дава възможност непосредствено да се използва съществуващата в стандарт LTE-техника за добавяне на цикличен префикс (фиг. 7).

5. Литература

1. Петров, П. П. Конвергенция на технологиите HSDPA (EV-DO) и LTE (UMB) чрез многоканален SS-MC-MA – предавател. Национална конференция на Шуменски Университет „Еп. К. Преславски“, 2011.
2. Васюков, В. Н. Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры в системах подвижной радиосвязи. Новосибирский государственный технический университет, 2006, 292 с.
3. Y a n g, L. Multicarrier Communications. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
4. Тихвинский, В. О., С. В. Терентьев, А. Б. Юрчук. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. Москва, Экотрендз, 2010, 284 с.
5. Hanzo, L., T. Keller. OFDM and MC-CDMA. A Primer. John Wiley & Sons Ltd, 2006.
6. Dalhman, E., S. Parkvall, J. Skold, P. Beming. 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband. Elsevier, 2007.
7. Гельгор, А. Л., Е. А. Попов. Технология LTE мобильной передачи данных. Учебное пособие. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011, 204 с.
8. Ghosh, A., J. Zhang, J. Andrews, R. Muhamed. Fundamentals of LTE. Prentice Hall, 2011.
9. Khan, Farooq. LTE for 4 G Mobile Broadband. Air Interface Technologies and Performance. Cambridge University Press, 2009.

MORPHOLOGICAL PROCESSING OF THE AUDIO SPECTROGRAM FOR IMPROVED ACOUSTIC RECOGNITION OF BIRD SPECIES

МОРФОЛОГИЧНА ОБРАБОТКА НА АУДИО СПЕКТРОГРАМИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ АКУСТИЧНОТО РАЗПОЗНАВАНЕ НА ПТИЦИ

Todor D. Ganchev

Technical University of Varna, str. Studentska 1, 9010 Varna, Bulgaria

E-mail: tganchev@tu-varna.bg, URL: <http://tu-varna.bg/aspl/>

Abstract: We propose a method for morphological filtering of the audio spectrogram that aims to suppress non-target sound events and thus facilitate the acoustic detection of target species. The method makes use of image processing techniques applied on the audio spectrogram, which is considered a grey-scale image. We demonstrate that the proposed morphological filtering method successfully suppresses concurrent acoustic events which overlap in the time-frequency domain with vocalizations of the target species -- here the Amazonian Streaked Antwren (*Myrmotherula multostriata*). The proposed method is of moderate computational complexity and can be straightforwardly integrated into the audio parameterization flow of various DFT-based audio feature estimation methods.

Key words: automated acoustic recognition, audio spectrogram, morphological filtering, image processing, 2D audio processing.

1. INTRODUCTION

Soundscape recordings typically contain time-varying environmental noise and concurrent sound events of multiple animal species and this is the prime obstacle for obtaining high accuracy in the automated acoustic recognition of species. Traditional signal enhancement methods (*aka* 1-D methods), aiming at noise suppression in the time or frequency domain, are not efficient when concurrent sound events overlap in both time and frequency with vocalizations of the target species. This motivated the development of image processing-based interference reduction methods which operate simultaneously on multiple columns and rows of the spectrogram. These methods take advantage of the concurrence of the temporal and frequency information, and by that reason are often referred to as 2-D audio parameterization methods. The simultaneous operation along the temporal and frequency dimensions in the time-frequency (*aka* spectro-temporal) domain provides certain advantages in the suppression of noise and interferences, and also helps for the reliable identification of regions of interest that correspond to potentially important sound events in the spectrogram. The price paid is that the outcome of audio processing at a certain time moment depends on future values of the signal, which doesn't permit for the real-time implementation of these algorithms. However, because audio is typically processed in chunks (*i.e.* blocks of samples), the near real-time processing and the off-line processing of sound recordings is acceptable in many applications, including some of these in computational bioacoustics. In this connection, the 2-D audio parameterization methods have been reported successful for the purpose of signal pre-processing or the subsequent feature extraction process [1-5].

Morphological filtering [6] is a well known image processing technique, which allows selective filtering of an image. The outcome of morphological filtering largely depends on the image properties and on the choice of size and shape for the structuring element. In the present work we propose a method for selective filtering of the audio spectrogram, which makes use of the morphological operations erosion and dilation. We demonstrate that morphological filtering incorporated into a

DFT-based feature extraction process could be beneficial for the improved recognition of bird species.

In Section 2 we present the overall concept of the morphological filtering of the audio spectrogram and in Section 3 we discuss related work and make conclusions about the practical worth of the proposed method.

2. METHOD

The overall block diagram of the morphological filtering method is shown in Fig. 1, where the audio processing steps are provisionally separated to *audio pre-processing*, *2-D processing* of the audio spectrogram, and *computation of descriptors*.

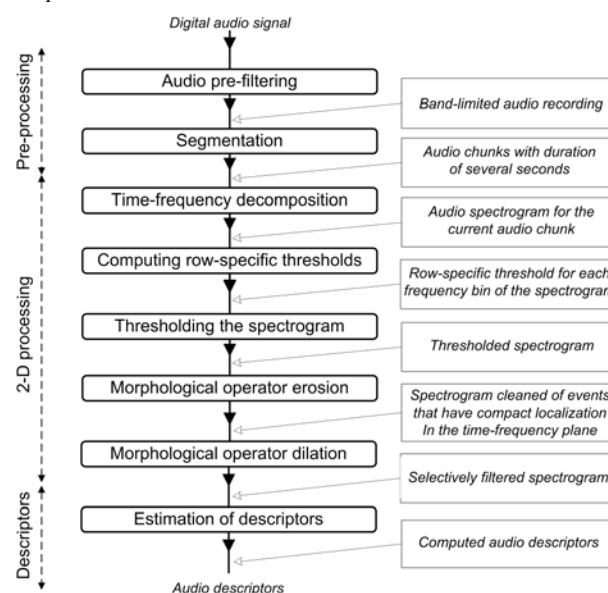


Fig.1. Block diagram of the audio processing flow

The digital audio signal is first *pre-processed* for (i) adjusting the sampling frequency, (ii) implementing some noise reduction, (iii) partitioning of long audio recordings to pieces of few seconds (*aka* audio chunks), and (iv) segmenting to short-

term quasi-stationary portions with duration in the range of milliseconds. The short-term Fourier transform is applied to compute the audio spectrogram for each audio chunk.

The audio spectrogram, which here is considered a grey-scale image, is next subject to *2-D processing* by means of some well-known image processing techniques. Such a *2-D processing* aims to eliminate the non-target sound events, while leaving intact the target species vocalizations. In the present work this is implemented by applying the morphological operators erosion and dilation on the thresholded audio spectrogram. The thresholded audio spectrogram is computed by applying subband-specific thresholds to the spectrum of a sequence of quasi-stationary portions of audio. Here we make the implicit assumption that soundscape recordings are already pre-recorded and available, and thus the morphological filtering does not have to operate in real-time.

The choice of *audio descriptors* is an application-specific issue. When cepstral coefficients or some other Fourier transform-based audio parameterization is considered, the *2-D audio processing* is straightforwardly incorporated in the computation of audio descriptors. In the following we formalize these processing steps and describe the audio parameterization process in details:

Let's consider the digital audio signal $s(n)$. Quite often the signal $s(n)$ is first subject to downsampling which aims to reduce the computational and memory demands in the subsequent processing steps. Next, high-pass filtering of the downsampled signal is carried out, aiming to decrease the influence of low-frequency noise due to vibrations of equipment, direct wind blows in the microphone, vegetation movements due to wind, and other low-frequency environmental interferences that reside outside of the frequency range of interest. The high-pass filtered signal is then subject to segmentation to quasi-stationary portions with fixed duration. The dynamic spectrum for the signal $s(n)$ is computed through the short-time discrete Fourier transform (STDFT)

$$S(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n)W(n + lL) \exp\left(-\frac{j2\pi nk}{N}\right), 0 \leq n, k \leq N-1, \quad (1)$$

where n is the index of the time domain samples, k is the index of the Fourier coefficients, l denotes the relative displacement of the current audio segment in terms of steps of L samples, and $W(m)$ is a certain pre-defined window function. Here we consider the Hamming window

$$W(m) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi m}{M}\right), m = 0, 1, \dots, M-1, \quad (2)$$

which is the most common choice due to the good trade-off between time and frequency resolution it provides. The window function is applied to reduce the spectral distortions caused by abrupt changes in the signal amplitude at the boundary points of each audio segment.

Therefore the dynamic spectrum (1) is obtained after applying the STDFT for N samples on the zero-padded signal $s(n)$ weighted with a sliding window function of M samples. The window function is sliding with a step of L samples between subsequent segments.

The audio spectrogram $|S(k, l)|^2$, obtained as the power 2 of the absolute dynamic spectrum (1), is considered a grey-scale image and is the main source of information in the subsequent image processing steps. Amplitudes in the spectrogram are often represented in logarithmic scale. However, despite the preferred amplitude compression law, it is important that the amplitudes in the spectrogram remain linked in a reasonable manner to the intensity of the original input audio signal. In the following discussion we will stick to linear amplitude range for

simplicity of exposition, however all results hold for the log-amplitude compressed spectrogram.

For convenience of exposition let's consider the audio spectrogram $|S(k, l)|$ shown in Fig. 2, computed for a 5-second excerpt¹ of a real-field recording. The specific audio chunk is characterized with a relatively high signal-to-noise ratio and contains multiple sound events of six different species. In order to facilitate the following discussion on methods and the interpretation of results, the audio spectrogram has been manually annotated on the level of individual sound events. Specifically, the sound events tagged with label /1/ belong to the bird species Amazonian Streaked Antwren (*Myrmotherula multostriata*), which in the present work is regarded as the target species. The sound events with tags /2/ - /6/ originate from other species, which are acoustically active in the same time interval. As shown in Fig. 2, we need to successfully address two main problems:

- (i) the sound events tagged with /2/ and /3/ overlap in time and in frequency range with the sound events of the target species /1/, therefore any method that is based on spectral subtraction in the frequency domain or on filtering in the time-domain will not be effective – it might reduce the interference but will alter the spectrum of the sound events of the target species as well,
- (ii) the sound event tagged with /5/ has a relatively high short-time energy, which is higher than the weak parts of the sound events tagged with /1/, and therefore the common energy-based thresholding methods will not provide an effective interference reduction.

Therefore, some selective filtering approach is required in order to remove any interference /2/-/6/ without altering the target sound events /1/. In the following we discuss a morphological filtering-based method that implements selective filtering of the audio spectrogram.

Following the above mentioned signal processing steps (cf. Fig. 1) each audio chunk is downsampled to 24 kHz and then high-pass filtered with a Butterworth filter of order 10. The cut-off frequency of the high-pass filter is an application-dependant issue and therefore varies in a wide range. Here we consider $f_{cut} = 1000$ Hz as our target species does not vocalize within that range. As shown on the spectrogram in Fig. 2, the frequency subband [0, 1] kHz is significantly suppressed (due to the high-pass filtering) when compared to the other frequency bands.

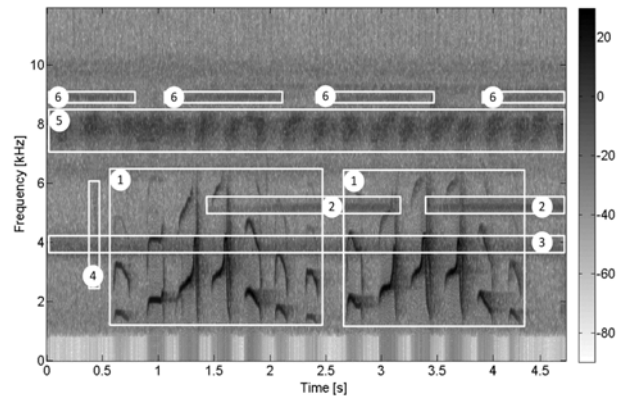


Fig.2. Log-amplitude spectrogram of a high-pass filtered audio signal (cut-off frequency 1000 Hz)

¹ An excerpt from recording MYRMUL09.mp3. The dominant species tagged with /1/ in Fig.2 is the Amazonian Streaked Antwren (*Myrmotherula multostriata*), recorded by Jeremy Minns, 2003-04-10, 15:58h, Brazil, Pousada Thaimaçu. Rio São Benedito. Source: XenoCanto. Last accessed on Aug. 2015 at URL: <http://www.xenocanto.org/sounds/uploaded/DGVLLRYDXS/MYRMUL09.mp3>

Next, in order to reduce the influence of environmental noise, we reset to zero all frequency components with amplitude under a certain threshold θ :

$$S_{\theta}(k,l) = \begin{cases} |S(k,l)| & \text{if } \theta_k \geq |S(k,l)| \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (3)$$

where the frequency bin index k is bounded to $0 \leq k \leq N-1$, the audio segment index l is bounded to $0 \leq l \leq T-1$, N is the DFT size, and T is the total number of audio segments in the spectrogram. An individual threshold θ_k is computed for each frequency band k as the mean value over the entire duration of the spectrogram:

$$\theta_k = \frac{1}{T} \sum_{l=0}^{T-1} |S(k,l)|, \quad 0 \leq k \leq N-1, \quad 0 \leq l \leq T-1. \quad (4)$$

In Fig.3 we show the outcome of applying (4) to the spectrogram in Fig. 2. All frequency components $|S(k,l)|$, which are smaller than the mean of each frequency band θ_k , were reset to value zero.

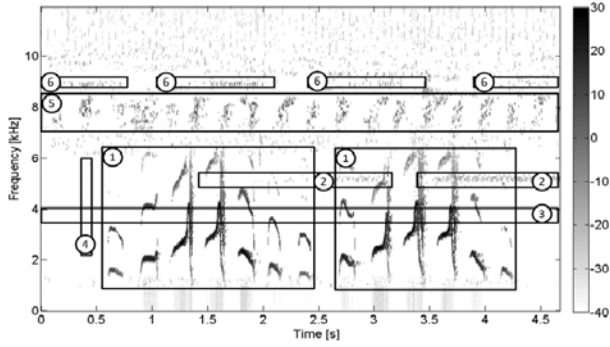


Fig.3. Log-amplitude spectrogram of the audio signal after thresholding by amplitude

As shown in Fig.3, certain amount of background noise has been removed together with the sound events tagged with /3/ and /4/. However, the processed audio spectrogram still contains some residual noise and interferences overlapping with the sound event of category /1/. Parts of the sound events with tags /2/, /5/, and /6/, are with higher amplitude than the amplitude of details in /1/ and thus cannot be eliminated via simple thresholding procedure without degrading the target sound events /1/.

Therefore here we aim at implementing a selective filtering method of the audio spectrogram via subsequent application of the morphological operator *erosion* followed by *dilation*. The structuring element used with these operators has shape and size selected based on prior knowledge about the structure of sound events of the target species. In the present work the structuring element was chosen a square with dimensions 7-by-7 pixels.

First we apply the operator *erosion* (5) on the thresholded spectrogram (3), and obtain the audio spectrogram shown in Fig. 4 which is cleaned from details smaller than the pre-selected structuring element C :

$$S_{\theta e}(k,l) = S_{\theta}(k,l) \square C = \{z : C_z \subseteq S_{\theta}(k,l)\}. \quad (5)$$

As shown in the Fig. 4, the operator *erosion* shrinks the bright objects, i.e. the regions with high energy, and eliminates from the spectrogram the unimportant blobs whose dimensions are smaller than the size of the structuring element C . When we compare the audio spectrograms shown in Fig. 3 and Fig.4, we observe that the cleaned spectrogram in Fig.4 is more or less

free of any competing sound events, including these with tag /5/, which are well seen as prominent events in Fig. 3. The sound events tagged with /1/ are degraded to some extent however are still clearly discernible in the image. The last indicates that most of the important information about these vocalizations was kept intact.

A well established approach for recovering eroded contours is the dilation operator, which fills in missing patches in the structure of an object. Applying the dilation operator on the audio spectrogram already eroded through (5) by using the same structuring element C , would recover the loss of quantity in the objects which survived the erosion operator.

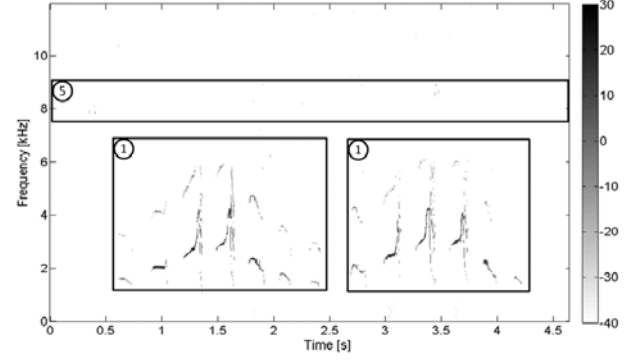


Fig.4. The thresholded spectrogram after applying the erosion operator

Therefore the dilated spectrogram

$$S_{\theta ed}(k,l) = S_{\theta e}(k,l) \oplus C = \{z : C_z \cap S_{\theta e}(k,l) \neq \emptyset\} \quad (6)$$

would have a smaller number of objects than the eroded spectrogram (Fig. 4) and the objects should generally have larger dimensions do to the quantitative enlargement depending on the shape and size of the structuring element C . Applying the dilation operator (6) on the eroded spectrogram shown in Fig. 4 would results to a spectrogram with a smaller number of objects (cf. Fig. 5) due to the merge of objects located in close proximity, i.e. when the gap between objects is smaller than the dimensions of the structuring element C these will be merged.

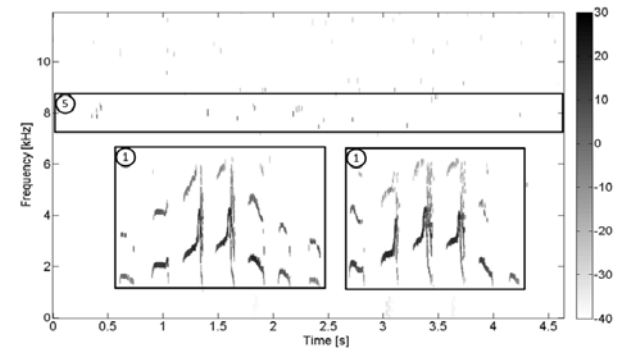


Fig.5. The spectrogram after applying the dilation operator

As shown in Fig. 5, the residual noise that survived the erosion operator (5) was amplified after applying the dilation operator (6) – an undesired side effect. However, as shown in Fig.5 the main purpose of the dilation operator is fulfilled successfully – all objects belonging to the sound events tagged with /1/ were recovered completely, while nearly all interference from competing sound events were removed. Exceptions are some miniature residual blobs in the area with tag /5/. Their existence is conditioned on the fine-tuning of the threshold (3) and on the size and shape of the structuring elements in (5) and (6). Optimal selection of these free parameters of the algorithm would

guarantee minimum residual noise in the morphologically filtered spectrogram.

In the following audio processing steps we explain the MFCC computation for each frame l . The Mel-scale warping of the frequency scale is implemented through the filter-bank $H_i(k)$ consisting of K Mel-spaced equal-height filters acting on the power spectrum $|S(k,l)|^2$ for each selected frame l . The log-energy for the corresponding filter output is computed as:

$$S_m(i,l) = \ln \left(\sum_{k=1}^{N-1} |S(k,l)|^2 H_i(k) \right), i=1,2,\dots,K. \quad (7)$$

Each filter in the filter-bank $H_i(k)$ is defined as:

$$H_i(k) = \begin{cases} 0 & \text{for } k < f_{b_{i-1}} \\ \frac{(k - f_{b_{i-1}})}{(f_{b_i} - f_{b_{i-1}})} & \text{for } f_{b_{i-1}} \leq k \leq f_{b_i} \\ \frac{(f_{b_{i+1}} - k)}{(f_{b_{i+1}} - f_{b_i})} & \text{for } f_{b_i} \leq k \leq f_{b_{i+1}} \\ 0 & \text{for } k > f_{b_{i+1}} \end{cases}, i=1,2,\dots,K, \quad (8)$$

where i stands for the i th filter, f_{b_i} are the boundary points of the individual filters, and $k = 1, 2, \dots, N$ corresponds to the k th coefficient of the N -point STDFT. The boundary points f_{b_i} are expressed in terms of position, which depends on the sampling frequency F_s and the number of points N in the STDFT:

$$f_{b_i} = \left(\frac{N}{F_s} \right) \cdot \hat{f}_{mel} \left(\hat{f}_{mel}(f_{low}) + i \cdot \frac{\hat{f}_{mel}(f_{high}) - \hat{f}_{mel}(f_{low})}{K+1} \right), \quad (9)$$

where the function $\hat{f}_{mel}$ stands for the transformation

$$\hat{f}_{mel} = 1127 \cdot \ln \left(1 + \frac{f_{lin}}{700} \right). \quad (10)$$

Here f_{low} and f_{high} are respectively the low and high boundary frequencies for the entire filter-bank, K is the total number of filters, and $\hat{f}_{mel}^{-1}$ is the inverse transformation to linear frequency scale, defined as:

$$\hat{f}_{mel}^{-1} = f_{lin} = 700 \left(\exp \left(\frac{\hat{f}_{mel}}{1127} \right) - 1 \right). \quad (11)$$

Next, we apply the discrete cosine transform on the result of (7) in order to obtain $J+1$ MFCC parameters:

$$c_j = \sum_{i=1}^K |S_m(i,l)| \cos \left(j(i+0.5) \frac{\pi}{K} \right), j=0,1,\dots,J. \quad (12)$$

Afterwards, the MFCCs are usually standardized for zero mean and unit standard deviation. This results in obtaining the z-score $\bar{c}_j$ of each individual parameter c_j :

$$\bar{c}_j = \frac{c_j - \nu_j}{\xi_j}, j=0,1,\dots,J. \quad (13)$$

The z-scores quantify the distance from the mean value in terms of the standard deviation. The mean value ν_j and the

standard deviation ξ_j are estimated for each of the $J+1$ dimensions, for each audio recording separately.

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Although the selective morphological filtering method discussed here makes use of prior knowledge about the target sound events, which is incorporated mainly through the settings of the morphological filtering such as size and shape of the structuring elements, the method is applicable to a wide range of sound emitting species.

The pursuit of original sound events preservation (in terms of both shape and energy) is quite important as it conditions the accurate estimation of audio descriptors. This holds true for the computation of MFCC parameters and for audio parameterization methods that model the temporal evolution of energy of frequency components. The morphological filtering method presented in this section is not tuned to the computation of specific audio descriptors but instead can serve as a pre-processor for different audio parameterization algorithms, including cepstral coefficients, wavelet packet-based descriptors, or other 1-D audio descriptors.

The selective morphological filtering method discussed here results in spectrogram with many zeros in the columns and rows, and therefore MFCC might not be the most efficient representation of sound events if the regions of interest are not kept intact. However, when the subsequent audio feature computation stage takes advantage only of the 2-D contours of the sound events, the preservation of the original target events is not crucial and could be skipped for decreasing the complexity and memory usage.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge with thanks the logistic support by the project OP "Competitiveness" BG161PO0031-1.2.04-0044 financed by the Structural Funds of the European Union, and by the project *ISP1* financed by the Technical University of Varna, Bulgaria.

REFERENCES

- [1]. Aide, T.M., Corrada-Bravo, C., Campos-Cerqueira, M., Milan, C., Vega, G., Alvarez, R. "Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification". *PeerJ* 1:e103, 2013. Available on-line: <https://dx.doi.org/10.7717/peerj.103>.
- [2]. Bardeli, R. "Similarity Search in Animal Sound Databases", *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 11, no. 1, Jan. 2009. pp. 68-76.
- [3]. Briggs, F., Lakshminarayanan, B., Neal, L., Fern, X. Z., Raich, R., Hadley, S. J. K., Hadley, A. S., Betts, M. G. "Acoustic classification of multiple simultaneous bird species: A multi-instance multi-label approach". *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 6, pp. 4640-4650. 2012.
- [4]. Lee, C.-H., Hsu, S.-B., Shih, J.-L., Chou C.-H. "Continuous Birdsong Recognition Using Gaussian Mixture Modeling of Image Shape Features", *IEEE Trans. on Multimedia*, vol. 15, no. 2, Feb. 2013.
- [5]. Potamitis, I., "Automatic classification of a taxon-rich community recorded in the wild". *PLoS ONE*, vol. 9, no.5, e96936. 2014.
- [6]. Heijmans, H., Ronse, C. "The algebraic basis of mathematical morphology. Part I: Dilations and erosions", *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, vol. 50, pp. 245-295, 1990.



ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕСТАЦИОНАРНИ АКУСТИЧНИ СИГНАЛИ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ВРЕМЕННО-ЧЕСТОТЕН АНАЛИЗ ПО МЕТОДА НА ПРОЗОРЕЧНО ФУРИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Гл. ас., д-р. И. Илиев
ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“
Email: ilieviliyan@ymail.com

1. Въведение.

Сонарните системи се използват за решаване на различни задачи в областите на предаване на данни, откриване на обекти и определяне на характеристиките им. Основно изискване към тях е измерване на параметрите на обектите в зоната за обзор с изискваната разделителна способност и точност. Това изисква използването на нестационарни сигнали с временно изменящ се спектър. Множеството на тези сигнали включва синусоидален импулс, гаусовсинусоидален импулс, гаусов импулс с линейно-честотна модулация, фазово кодиран импулс и честотно кодиран импулс. В сонарните приложения е изключително важно да се изследват спектрите на различните компоненти в приетия сигнал. За сигнали с нестационарен спектър ефективни са методите за временно-честотен анализ на сигнала. Те генерално се разделят на два класа: линейни и квадратични. Квадратичните методи се използват за анализ, класификация и детектиране на скритата в сигнала информация. Линейните методи се използват за подтискане на шума и отделяне на компонентите на сигнала във входния сигнал. Методите на временно-честотен анализ се основават на прозоречно Фурие преобразование на сигнала (STFT).

2. Основни предимства и недостатъци при обработка на сигнал чрез използване на дискретно преобразование на фурие.

Известно е, че обработката на сигнали в честотната област чрез прилагане на дискретно преобразование на Фурие (DFT) позволява намаляване на прага на откриване на приемното устройство поради извършване на анализа в тесни честотни ленти. Ширината на единичната честотна лента при анализ на основата на DFT се определя от отношението:

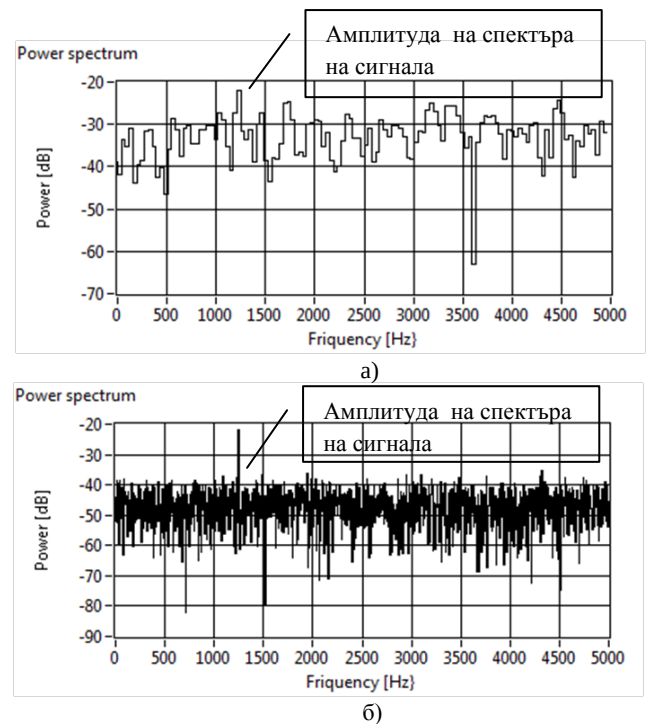
$$(1) \quad \Delta f = \frac{f_s}{M}$$

където, f_s – честота на дискретизация на сигнала;
 M – размер на блока отчети на DFT по честота.

В общият случай, ако спектралната плътност на шума в честотна лента с ширина B е N_0 , то при спектрален анализ на теснолентов сигнал на фона на шума в честотни ленти с ширина Δf , отношението сигнал/шум при откриване на отделните спектрални съставки на сигнала се подобрява максимално с:

$$(2) \quad 10 \lg \left(\frac{B}{B_1} \right) \text{ dB}$$

където, B_1 е честотната лента на сигнала и $B > B_1$. На фигура 1 е показано подобряване на отношението сигнал/шум с 12 dB при обработка на синусоидален сигнал с честота 1250 Hz на фона на гаусов шум в честотна лента с ширина 2,44 Hz в сравнение с обработката в честотна лента с ширина 39 Hz.



Фиг. 1. Сравнение на отношението сигнал/шум при честотен анализ на сигнал с честота 1250 Hz на фона на гаусов шум: а) Анализ в честотна лента 39 Hz. б) Анализ в честотна лента 2,44 Hz. Спектрите са измерени чрез софтуера LabView на NI.

За нестационарните теснолентови сигнали е характерно, че за времето на измерване спектърът им се изменя във времето в сравнение със стационарния тонал сигнал. Прилагането на DFT към тези сигнали с цел подобряване на откриването в същото време не позволява да се проследи характера на временното му изменение, защото информацията за спектралните съставки в обработвания сигнал се обновява с период равен на времето на измерване, което се определя от интервала на дискретизация по честота Δf :

$$(3) \quad T_{\text{изм}} = \frac{1}{\Delta f}$$

В същото време спектърът на нестационарните сигнали се изменя за време равно на времето на импулса, което е по-малко от времето за измерване доколкото спектърът на сигнала $B_1 \gg \Delta f$.

DFT обработката на сигнал се описва чрез израза:

$$(4) \quad DFT(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{-j \frac{2\pi k n}{N}}$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, NDFT-1$$

където, $s(n)$ – дискретните отчети на сигнала;

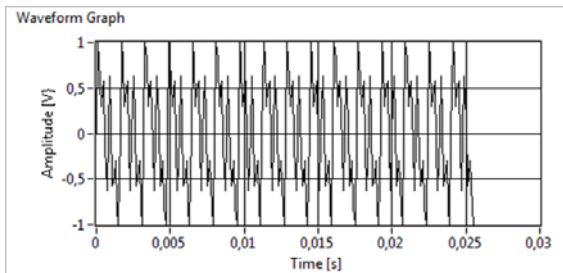
N – броят на дискретните отчети на сигнала;

$NDFT$ – броят на точките на дискретното преобразование на Фурие.

Нека $s(n)$ е сума от три непрекъснати сигнала без фазова разлика по между им, на честоти 625 Hz, 1250 Hz и 2500 Hz и с амплитуди 1 V. Ако сумарният сигнал се дискретизира с честота $f_s = 10$ kHz в комплексна форма дискретния му вид се описва чрез изказа:

$$(5) \quad s(n) = e^{j \frac{2\pi 625 n}{10000}} + e^{j \frac{2\pi 1250 n}{10000}} + e^{j \frac{2\pi 2500 n}{10000}} \\ n = 0, 1, 2, \dots, \infty$$

На фигура 2 е показана диаграма на 256 отчета на сумарния сигналотговарящи на временен интервал 25 ms.



Фиг. 2. Временна диаграма на сигнал съставен от три синусоидални сигнали на честоти 625, 1250 и 2500 Hz. Сигналът е синтезиран чрез програмната среда LabView на NI.

Дискретният ред на Фурие, чрез който може да се представи сигналът при използване на 256 точково преобразование на Фурие е:

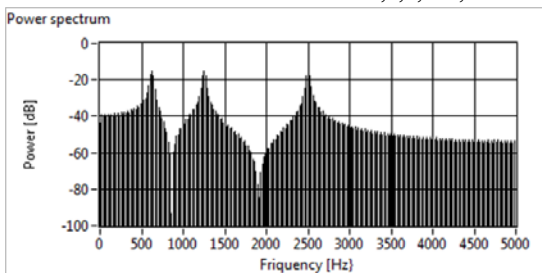
$$(6) \quad s(n) = \frac{1}{256} \sum_{k=0}^{255} \hat{S}(k) e^{j \frac{2\pi kn}{256}} \\ n = 0, 1, 2, \dots, 255$$

където, дискретните комплексни коефициенти $\hat{S}(k)$ в реда на Фурие се определят чрез формулата:

$$(7) \quad \hat{S}(k) = \sum_{n=0}^{255} s(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{256}} \\ k = 0, 1, 2, \dots, 255$$

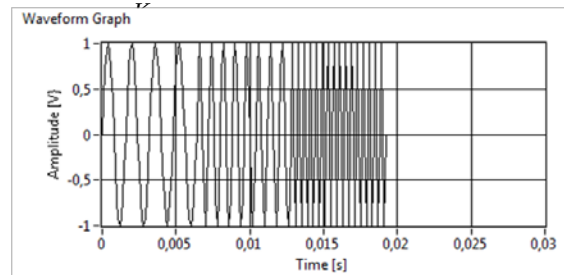
Мощностният спектър на сигнала показан на фигура 3 се определя чрез изказа:

$$(8) \quad P(k) = \frac{1}{2} \sum_{p=0}^{255} |\hat{S}(p) \hat{S}^*(p)| \delta(k - p) \\ k = 0, 1, 2, \dots, 255$$



Фиг. 3. Мощностен спектър на сигнал съставен от сумата на синусоидални сигнали на честоти 625, 1250 и 2500 Hz. Спектърът е получен с 256 точково FFT чрез програмната среда LabView на NI.

За сравняване на спектрите се изследва честотно кодиран сигнал със същата продължителност (честота се изменя скокообразно през интервал от 64 дискрета), чиято диаграма е показана на фигура 4.



Фиг. 4. Временна диаграма на нестационарен честотно кодиран сигнал. Дискретни честоти – 625, 1250 и 2500 Hz. Сигналът е синтезиран чрез програмната среда LabView на NI.

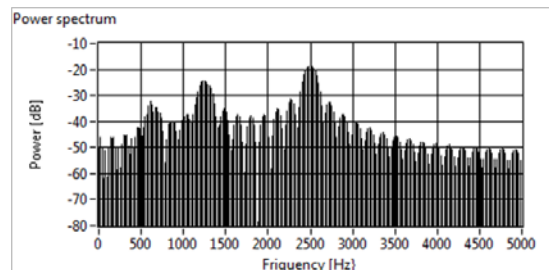
Дискретният честотно кодиран сигнал във временната област се описва с изказа:

$$(9) \quad s(n) = \begin{cases} e^{j \frac{2\pi 625 n}{10000}} & \text{за } n = 0, 1, 2, \dots, 63 \\ e^{j \frac{2\pi 1250 n}{10000}} & \text{за } n = 64, \dots, 127 \\ e^{j \frac{2\pi 2500 n}{10000}} & \text{за } n = 128, \dots, 191 \\ 0 & \text{за } n = 192, \dots, 10000 \end{cases} \\ n = 0, 1, 2, \dots, \infty$$

Едностранный дискретен спектър на честотно кодирания сигнал получен чрез 255 точково FFT има вида:

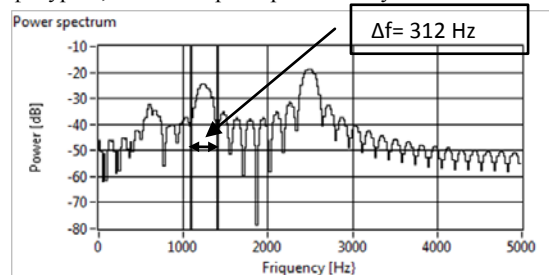
$$(10) \quad |\hat{S}(k)| = \left| \frac{\sin\left(\pi \left(\frac{k}{256} \frac{625}{10000}\right) 64\right)}{\pi \left(\frac{k}{256} \frac{625}{10000}\right)} + \frac{\sin\left(\pi \left(\frac{k}{256} \frac{1250}{10000}\right) 64\right)}{\pi \left(\frac{k}{256} \frac{1250}{10000}\right)} + \frac{\sin\left(\pi \left(\frac{k}{256} \frac{2500}{10000}\right) 64\right)}{\pi \left(\frac{k}{256} \frac{2500}{10000}\right)} \right| \\ k = 0, 1, 2, \dots, 255$$

Мощностният спектър на сигнала е показан на фигура 5.



Фиг. 5. Мощностен спектър на честотно кодиран сигнал с честоти 625, 1250 и 2500 Hz. Спектърът е получен с 256 точково FFT чрез програмната среда LabView на NI.

От сравнението на спектрите на двата сигнала се вижда, че те се различават по характера на изменение на обвиващата на амплитудата на спектралните съставни. При спектъра на кодирания сигнал обвиващата на амплитудата на дискретните честоти се изменя по закона $\frac{\sin(x)}{x}$, показано на фигура 6, което е характерно за импулсните сигнали.



Фиг. 6. Форма на обвиващата на мощностния спектър на честотно кодиран сигнал. Максимуми на дискретни честоти – 625, 1250 и 2500 Hz. Спектърът е получен с 256 точково FFT чрез програмната среда LabView на NI.

От анализа на спектъра при липса на информация за приетия сигнал във временната област, може да се направи

заклучение, че са приети три импулса с продължителност по 0,0064 s на честоти 625, 1250 и 2500 Hz съответно. Заклучението следва от това, че ширина на основните листи на честоти 625, 1250 и 2500 Hz на спектъра показан на фигура 6 са по 312 Hz, което отговаря на дължина на импулса:

$$(11) \quad \tau = \frac{2}{\Delta f_{\text{дискр}}} = \frac{2}{312} = 0,0064 \text{ s}$$

Поради липса на разрешаваща способност по време на DFT информацията за момента на приемане на всеки импулс не може да бъде извлечена. Този недостатък на DFT се отстранява чрез използване на методи за временно-честотна обработка на сигнала.

3. Изследване на ефективността на STFT при обработка на нестационарен сигнал.

Прозоречното Фурие преобразование е сравнително лесен способ за анализ на нестационарен сигнал, но ефективното му използване се определя от правилния избор на неговите параметри. За изследване на STFT на честотно кодираният сигнал разгледан в точка втора се използва пълзящ прозорец с различна дължина и вид, за разделянето на сигнала на блокове с по-малка дължина, след което към всеки от тях се прилага FFT за определяне на спектъра. По този начин се изследва точността в оценката на временните и честотни характеристики на нестационарния сигнал в зависимост от параметрите на STFT.

STFT преобразованието представя интензивността на дискретната спектрална съставка k в дискретния момент m и се описва с израз: [1]

$$(12) \quad \text{STFT}\{s(m-n)\} \equiv \hat{S}(m, k)$$

$$(13) \quad \hat{S}(m, k) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n)s(n-m)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, N-1;$$

$$m = 0, dM, 2dM, \dots, (N-1)dM.$$

където, $s[n]$ е сигнала, $w(n)$ е прозоречната функция с дължина L , dM е временна стъпка за преместване на прозореца и N е броя на точките на FFT преобразованието.

Прозоречната функция се използва за отделяне в дискретните моменти m на сигнал с дължина L и подтискане на алиазинга в следствие на секционирането на сигнала. Дължината на прозоречната функция определя правилното временно-честотно представяне на изследвания сигнал на спектрограмата, която е графично изобразяване на квадрата на модула на STFT в логаритмичен мащаб [2].

$$(14) \quad P(m, k) = 10 \log |\hat{S}(m, k)|^2$$

Между дължината на прозореца и разрешаващата способност по разстояние Δt и по честота Δf на STFT съществуват следните зависимости:

$$(15) \quad \Delta t = \frac{L}{f_s} \text{ (s)}$$

$$(16) \quad \Delta f = \frac{f_s}{L} \text{ (Hz)}$$

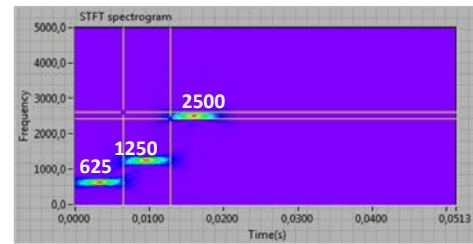
Разрешаващата способност по честота, която е функция на дължината на прозореца определя минималната стойност на този параметър на STFT и се нарича честота на Релей.

За оценка на влиянието на дължината и вида на прозореца върху вида на спектрограмата на честотно кодирания сигнал са използвани правоъгълна прозоречна функция и прозоречна функция на Hemming с три различни дължини: по-голяма от дължината на сигнала, равна на дължината на отделната честотна компонента и по-малка от дължината на отделната честотна компонента. Първият прозорец е с дължина на прозореца $L = 320$ дискрета, която е пет пъти по-голяма от дължината на отделната честотна компонента. Спектрограмите на сигнала са показани на фигура 7. Тази дължина на прозореца осигурява потенциална разрешаваща способност по честота:

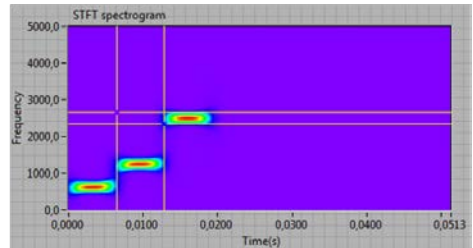
$$(14) \quad \Delta f = \frac{f_s}{L} = 31,25 \text{ Hz}$$

и потенциална разрешаващата способност по време на прозореца е:

$$(15) \quad \Delta t = \frac{L}{f_s} = 0,032 \text{ s}$$



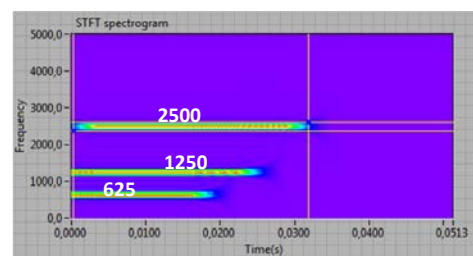
а) Правоъгълен прозорец



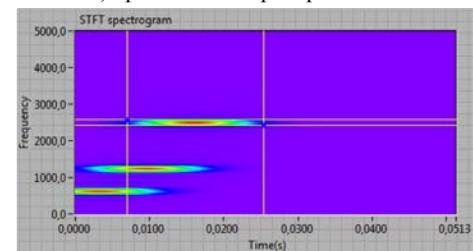
б) Прозорец на Hemming

Фиг. 7. Спектрограми на честотно кодиран сигнал с дължина 0,0192 ms при дължина на прозореца 0,032 ms. Спектрограмите са получени с 512 точково FFT чрез програмната среда LabView на NI.

Използването на прозорец с косинусидална форма подобрява разрешаващата способност по време 1,75 пъти. При дължина на прозореца равна на дължината на отделната честотна компонента, която е 64 дискрета се получава най-точно представяне на сигнала във временната област, което е показано на фигура 8. Дължината на отметката по време съответства точно на дължината на отделната честотна компонента. От сравняването на спектрограмите на сигнала за двата вида прозорци се вижда, че във временната област разрешаващата способност е еднаква, като позволява много точно да се определи дължината на отделната честотна компонента и момента на изменението на честотата на сигнала. В честотната област разрешаваща способност за тази дължина на прозореца е 157 Hz, като правоъгълният прозорец подобрява разрешението по честота 1,7 пъти в сравнение с прозореца на Hemming.



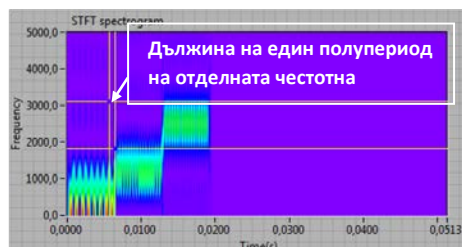
а) Правоъгълен прозорец



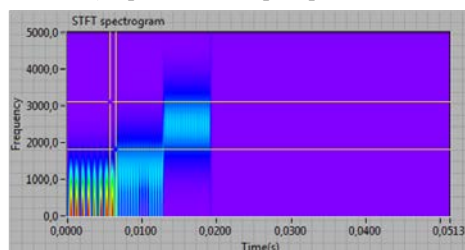
б) Прозорец на Hemming

Фиг. 8. Спектрограми на честотно кодиран сигнал с дължина 0,0192 ms при дължина на прозореца 0,0064 ms. Спектрограмите са получени с 512 точково FFT чрез програмната среда LabView на NI.

При намаляване на дължината на прозореца под дължината на отделната честотна компонента се получава свръх разрешение по време, което позволява по спектрограмата да се определи временната структура на отделната честотна компонента. Това се обяснява с факта, че прозореца придобива характер на делта функция. [3]В същото време разрешаващата способност по честота намалява значително независимо от вида на прозореца. На фигура 9 са показани спектрограмите на сигнала за дължина на прозореца 8 дискрета, която е осем пъти по-малка от на дължината на отделната честотна компонента дискрета. Разрешаващата способност по време при тази дължина на прозореца е 0,0008 ms, а разрешаващата способност по честота е 1250 Hz.



а) Правоъгълен прозорец



б) Прозорец на Hemming

Фиг. 9. Спектрограми на честотно кодиран сигнал с дължина 0,0192 ms при дължина на прозореца 0,0008 ms. Спектрограмите са получени с 512 точково FFT чрез програмната среда LabView на NI.

Изводи: Изследването на използването на STFT за анализ на сонарни сигнали дава основание да се счита, че методът е високо ефективен, при сигнална обработка на активни сигнали, тъй като познаването на техните параметри позволява да се изберат най-подходящите параметри на STFT преобразованието. При анализ на шумови сигнали точността на спектрограмата ще зависи от степента на съвпадение на параметрите на преобразованието и статистическите характеристики на шумовия сигнал.

Литература:

1. Sanjit K. Mitra, "Digital Signal Processing: A computer-based approach", McGraw-Hill, 2005
2. Ricardo Gutierrez-Osuna, "Introduction to Speech Processing", CSE@TAMU, 2002
3. R. Gonzalez and R. Woods, "Digital Image Processing", 3rd edition, Prentice Hall, 2008

Study of unsteady acoustic signals through the use of temporary-frequency analysis method window Fourier transformation

Asst. Prof., Ph. Dr. I. Iliev
N. Y. Vaptsarov Naval Academy – Varna

Abstract: In many sound-analysis applications, it is important to identify the spectral content of the signal. Using the FFT to transform a time-domain signal to the frequency-domain representation of the signal can help you discover information that might be hidden in the time-domain waveform. The power spectrum of a signal can show the relative intensity of the energy of a signal at each frequency for the entire signal. However, the power spectrum of a signal for a shorter time scale can be more useful. Even within a particular utterance, variations in signal characteristics might exist, so it is useful to analyze the signal with a short time scale. The short-time Fourier transform (STFT) is the simplest method to use to analyze a time-varying signal or non stationary signal whose frequency component varies over time.

Keywords: Non stationary signal, spectrogram, FFT, STFT.



MATERIALS FOR PROTECTION OF OIL AND GAS PIPELINES FROM MECHANOCHEMICAL DAMAGE

Prof. D.Sc. Kudina E.¹⁾, Assoc. Prof. Ph.D. Sergienko V. P.¹⁾, Assoc. Prof. Ph.D. Bukharov S.¹⁾,
Prof. D.Sc. Malachowski J.²⁾, Prof. D.Sc. Mihovski M. M.³⁾, Ph.D. Mirchev Y.N.³⁾

¹⁾ V. A. Belyi Metal Polymer Research Institute of NAS, Gomel, Belarus,
e-mail: kudina_mpri@tut.by, Sergienko_vp@mail.ru, sbuharov@tut.by

²⁾ Military University of Technology, Warsaw, Poland, e-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl

³⁾ Institute of Mechanics- BAS, Sofia, Bulgaria, e-mail: mirchev@imbm.bas.bg

Introduction

The recent years have shown a positive total dynamics in oil production and corresponding growth of interest towards monitoring and safety of pipeline systems. Steel pipes have remained for the present and will be in the nearest future the main elements of the field pipelines thanks to their mass production, low cost, high strength and easy maintenance. The total length of steel pipelines in service, including the field, trunk and distribution ones is roughly estimated in a few million kilometers (about 980 the in Russia alone) [1]. Maintenance of the pipelines in a safe and serviceable condition is a complex technical and economic task solved depending on the pipeline peculiarities and operation conditions [2-7].

The service life of the field pipelines is insignificant (5-10 years), that of the trunk lines is about 50 years and more. Both pipe metal and insulator coating undergo essential changes during this period and influence durability of the whole pipeline. We have witnessed in the last decades a growing number of emergency situations on the pipelines. According to judgments of the experts, failure of the pipelines arises from the following causes [8]: corrosive attack – 39%; external mechanical damage – 25% (including hydraulic shock, pressure gradient and vibration); spoilage during construction and assembly jobs and natural calamities – 26%; erroneous activity of the staff and other reasons – 5%. Accidents as a result of corrosion attack are growing in number in contrast to all other kinds of damages [9-11]. The insulator coatings are short-lived and after 15-20 years of operation require substitution because of the degraded protective properties. The actual volumes of repair works of pipeline insulation is much lower than the demand, and it is practically impossible to substitute the whole branch within the desired terms. Besides, the long-distance trunk pipelines suffer from special types of corrosion damage by stress-cracking called also stress-corrosion, which is rarely observed on the field lines [11-14]. Just this type of failure has become lately most dangerous. To limit accidents from stress-corrosion it is necessary to reinsulate the pipeline sections where the pipe metal enters in contact with the soil electrolyte.

It is critical to update promptly both procedures and facilities for protection of pipelines from corrosion.

1. Corrosion-proof materials intended for pipeline protection

A complete overhaul of the oil and gas lines involving substitution of insulation is usually conducted today after knock-off and pressure relief on the pipeline. Durability of the pipelines can be raised by application of anticorrosion coatings on the pipes as well as usage of corrosion-proof steels or other materials (e.g., plastics) and wider application of corrosion inhibitors [15, 16].

2. Corrosion inhibitors

Modern classification of corrosion inhibitors includes oxidizers and various agents of the adsorptive, complexing and polymeric types. Named subdivision visualizes the variety of corrosion inhibition mechanisms and vistas in adoption of achievements in different branches of chemistry. A wide spectrum of corrosion inhibitors is subdivided according to the type of the medium (neutral, alkaline, or acidic media, hydrogen sulfide or atmospheric corrosion), mechanism (passivating or adsorptive), protective character (anodic, cathodic, mixed), chemical nature (volatile, organic, inorganic).

The inhibitors on the base of nitrogen-containing compounds are most applicable today [17, 18]. The protective effect is displayed by such compounds as aliphatic amines and their salts, amine alcohols, amino acids, azomethines, anilines, hydrazides, imides, acrylonitrile, imines, pentamers (benzimidazoles, imidazolines, benzotriazoles, etc.) and hexamers (pyridines, quinolines, piperidines, etc.) heterocycles [19, 20]. Of great interest in this respect are the compounds containing one atom of sulfur, namely: thiols, polysulfides, thiosemicarbasides, sulfides, sulfoxides, sulfonates, thiobenzamides, thiocarbamates thiourea, thiosulfonic acids, thiophenes, sulfur-containing triazoles and tetrazoles, tjiocyanates, mercaptan, sulfur-containing aldehydes, ketosulfides thioesters, ditionaphthenes, and other. Among phosphorus-containing compounds used as corrosion inhibitors we can name thiophosphates, pyrophosphates, phosphoramides, phosphonic acids, phosphonates, dialkyl- and diarylphosphates. Along with above-named substances wide application have gained also pyrans, pyrimidines, dioxanes, phenols, both cyclic and linear esters, alkyl alcohol esters, benzaldehydes and benzoic acids, diurea, alcohols, furans, dioxolanes, acetals, dioxonaphthenes, and other. Inorganic substances with oxidative properties (nitrates,

molybdates, chromates) are creating protective oxide films on the metal surface subjected to corrosion effect [17, 18]. A large group of passivators (phosphates, silicates, carbonates of alkali metals) are forming difficultly soluble substances with the ions of corroded metal. A tendency has appeared lately to use a raw material for corrosion inhibitors that contains transition metals, complexes on their base and complex-forming compounds interacting with transition metals present in electrolytes on the metal surface being protected. Most promising among corrosion inhibitors turn to be the polymer-based ones [21] and the blends containing the compounds able to form self-organizing surface layers.

Corrosion inhibition is present at all stages of oil production, refining and storage. Most of additives are protecting metal by forming a film on its surface. To name but a few: IFGANGas, INKRGAS, AMDOR-IK, sulfanol P, Odazol T2P, Koreksit-6350, ISA-148, Sepakor 5478, Doligen 4482-1, and other [19, 23, 24]. The main purpose of corrosion inhibitors is to protect oil-refining equipment in the media containing hostile components [24]. It is strongly recommended to apply corrosion inhibitors for the oilfield equipment used in highly mineralized environment containing carbonic acid, hydrogen sulfide and high oxygen content. For instance, Amfikor-N or Alpan. In the presence of carbonic acid and hydrogen sulfide in a highly mineralized medium such inhibitors as SNPH-1003, SNPH-1004, NAPOR-1007, SNPH-6302, SNPH-6301, and Amfikor-N. In conditions of microbiological corrosion good results are shown by such bactericides as SNPH-1003 and 1004, NAPOR-1007 and 1010.

Nevertheless, named agents are unable to provide reliable protection in all situations. The protective efficiency may differ significantly even within a short distance of a pipeline on one and the same oilfield. So, to solve the problems of corrosion-induced damage of pipelines it is important to design such corrosion inhibitors that can ensure high protective efficiency under various operation conditions as well as to improve the existing compositions and produce additional insulating materials or combine thereof.

3. Application of insulating materials

From the above procedure it follows that reliability of the pipelines is interrelated first of all with solution of corrosion protection and repair problems of the pipelines. It seems expedient in this respect to employ more efficient insulating materials when conducting repair works of sheathing in the field conditions instead of using expensive pipes with a shop-made insulation [26-29]. However, the problem on the choice of insulating materials for the field repairs with account of the pipeline peculiarities (large diameters, climatic conditions, long distances, etc.) has not been solved till the present time. These problems are in part solved by the pipes with a factory insulation. The joints between the pipes are insulated by special thermocontractable cuffs. This is efficient for construction of a new pipeline or for the overhaul with substitution of the pipes. In this case, thousands kilometers of pipes will remain without insulation repair, leaving corrosion defects to grow year to year.

It is important to adopt novel highly efficient insulating materials and technologies of their application in field conditions [25-26, 29-32]. These materials should comply with a number of sometimes contradicting properties, such as high adhesion and mechanical parameters, durability, manufacturability in various climatic conditions, low cost, availability and other. The use of high-quality coats ensures durable protection of the pipelines together with economy in time and cost [33-36].

Numerous corrosion-proof materials have been developed lately [15, 37]. Unfortunately, many of them are turn to be inappropriate for operation in aggressive environment where the facilities and equipment for oil production are installed. Most of the

technologies and materials used are insufficiently efficient. Application of a low-quality or unfit for the requirements insulating coating results in the appearance of defects on the coating during pipeline operation (especially in the case of poor surface cleaning from corrosion products). This disturbs insulation properties of the coating leading to corrosion on the pipes with corresponding stoppage and repair leading to immense financial losses [39]. Therefore, safety and reliability of pipelines will be inefficient unless a strong durable adhesive interaction between the coating and the pipe metal is enforced [38]. The coating cost constitutes on the average 3-5% of the whole pipeline price, while the incorrect choice of the protective system makes operation reliability of the whole object doubtful. Since the coating often displays high electric resistance, the cathodic protection turns to be inefficient on the large areas of the delaminated coating. So, the importance of a reliable corrosion-proof coat is evident [40]. From the technical point of view, the experts should take into account the following factors for the choice of anticorrosive coatings: operation temperature, presence of a fail-free system for protecting couplings, transportation, environment conditions [40].

The materials for the protective anticorrosion pipeline coatings can be classified according to the following aspects:

- composition of the material (polymeric, e.g. tape type, mineral, e.g. bitumen ones, combined, paint and varnish, glass-enamel, paste, metalized);
- type (normal or reinforced);
- application technology (shop-made, field or basic);
- number of layers (single-layer, multilayered, with one adhesive layer or from both sides);
- reinforcement (with/without reinforcement);
- deposition temperature (cold/hot, with thermal treatment or heating in winter);
- deposition method (painting, spraying, extrusion, winding (tapes) pouring (liquid types), by thermal shrinkage);
- state of the initial material (liquid, plastic, solid-plastic, solid, powdery);
- purpose (insulating, structural (reinforcing), wrapping);
- temperature of the pipe metal preparation (with/without preheating);
- chemical resistance (weather-proof, gasoline-proof, waterproof, chemically resistive, thermoresistant, biostable);
- desired cleaning degree of the pipe (1, 2, 3 or 4th degree).

Let us touch upon some characteristics of modern insulating materials.

4. Polymer composite materials based on a single-component binder

These materials are manufactured from epoxy resin, polyurethane or polyurea [43-45].

Epoxy resin does not screen the cathodic protection, shows high water resistance, its water absorption is of a saturating type [46-49]. The transient resistance drops initially and stabilizes afterwards. The coating becomes permeable for the cathode currents and preserves high barrier properties towards oxygen and ions of the corrosive medium [50]. It ensures reliable protection of the metal within a wide range of the cathodic polarization potential under the low-current densities via passivation of the metal surface by the products of cathodic reactions [51-53]. This occurs beneath the delaminated coat too. Epoxide displays perfect adhesive properties to metal, high thermal resistance and resistance to moisture, as well as low cathodic delamination values [40, 54-59]. At the same time, the epoxide layer is rather brittle, insufficiently elastic, so its impact strength is low and it tends to cracking [43, 60-62]. The minimal thickness of the epoxy layer should be 150-250 μm . Epoxide-based 150-400 μm thick factory coatings have gained popularity in the USA, Canada, GB and a number of other countries

thanks to their perfect protective and other service characteristics, and elevated thermal resistance (till 80-100 °C) but their impact strength is low, especially under the negative temperatures.

Most applicable today are the epoxide coatings of grades: «SCOTCHKOTE 226» produced by «3M» Co. (USA), «Resicoat R-726 LD» of «AkzoNobel» (Holland) [63], «Eurocote 712 PP» produced by «BS Coating France», «PEP 0103» of the «Yaroslavl factory ZPK» (Russia) and «PEP-0305» of the NPO «Pigment» (Russia).

Polyurethane is more elastic and tough at impacting, weather resistant, undergoes fast curing [15, 64-66] but its adhesive and thermoresistant properties cede the epoxide coatings [43]. It requires, as a rule, special equipment and should not be applied under negative temperatures.

The high-grade polyurethane coatings extensively used at present are: «SCOTCHKOTE 352 NT» of «3M» Co. (USA) [67], «PROTEGOL» of «Goldschmidt TIB GmbH» (Germany) (the coatings «PROTEGOL UR-Coating 32-55», obtained by the hot airless spraying and «PROTEGOL UR-Coating 32-55 L» applied by hand, «PURSTOP 2000» produced by «Ernesto Stoppani» (Italy); «SIGMALINNING 7655» of «Sigma Coating BV» (the Netherlands); «COPONHYCOTE 165» of Co. «E. Wood» (GB), «BIURS» of the «PORSIL» Co. (Russia) [67, 68].

Polyurea displays impermeability of the film and high cure rate along with reactionary capacity under negative temperatures and presence of water. Nevertheless, viscosity of the composition tends to increase in cold conditions leading to reduction of surface wettability and, as a consequence, to poor adhesion. Water on the surface impairs adhesion too. A primer is desired.

Most frequently used polyurea coatings are «KARBOFLEX» of manufacturer «Polybent» and «Izocor-140» of Co. NPP «Izolan» (Russia) [68], «Nukote NT» produced by «NUKOTE Coating Systems» (NCS) (USA).

5. Polymer composite materials based on two-component binders

Such materials are produced mainly from epoxy resins and polyurethanes [64-71]. When combined these ingredients reduce brittleness of the former and improve adhesion of the latter [72].

Most known grades of epoxy-polyurethane coatings are: «UP 1000 | FRUCS 1000 A» produced by «Kawakami Paint» (Japan) [68], «POLYKEN 980, 1600, 2000» of «Covalence Corrosion Protection Group» (USA) [73].

Tape materials [74, 75].

Polymeric tapes are subdivided into two main groups: 1 – the main protective functions are born by the polymer film stuck to the pipe by a glue; 2 – the protective insulation is here a glue, while the film plays the role of a substrate and wrapping. The third group includes the tapes in which both components – the tape and the glue feature the insulating properties. To raise the efficiency of polymeric tapes, an additional wrapping can be used to protect from mechanical damage. The polymeric tapes simplify the insulation procedure in both basic and field conditions and raise productivity. The polymer tapes are used together with the bitumen-polymeric, polymer and bituminous primers. They are intended for insulation of the pipelines not exceeding 1420 mm in diameter.

Adhesive tapes from polyvinylchloride, polyethylene and polypropylene are used for pipeline insulation.

- Polyvinylchloride tapes are employed to ensure elasticity and plasticity, and are plasticized by special additives. PVC is also doped with stabilizers to raise their stability in atmospheric conditions and pigments. Some tapes are produced with a butyl-rubber adhesive layer. Such tapes are moisture-proof, show perfect dielectric and protective properties, resist solvents.

- Polyethylene tapes are also intensively used [76, 77]. Manufacture of polypropylene tapes is gaining force today [78].

These tapes are resistant to light and atmospheric ageing, display strong electric resistance, better adhesion and less water-absorption than the PVC ones. Besides, they show high chemical resistance against water, acids, alkalis, solvents, and preserve mechanical strength within a wider temperature range than the PVC tapes. PE tapes can be applied on the pipes under negative temperatures (till – 40 °C). They have high dielectric resistance but adhesion of the PE and PP tapes to steel and other materials is rather poor. Besides, they require expensive and power-consuming factory equipment for insulation works.

To most applicable grades belong polyethylene tapes «POLYLEN» (Russia), «Lupolen 4552D» produced by BASF (Germany), «Borcoat HE 3450» of «Borealis» Co. (Austria), «Luxene HDPE 2050» of «M.P.B.» Co. (Italy), «Stavrolen F 3802» produced by «Polyplastic» Co. (Russia); polyvinylchloride tape PVH-BK, PVH-L, PVH-DBK (Russia); polypropylene tape «Borcoat HE 3450» of «Borealis» Co. (Austria) [79].

The main foreign suppliers of insulating materials for the polymeric tape coatings are the next: «Polyken Pipeline Coating Systems» (USA), «Altene» (Italy), «Nitto Denko Corporation», «Furukawa Electric» (Japan) [75, 80].

6. Mineral materials

This type of materials includes bitumen-based ones [81].

They are obtained as residual oil-refining products in the form of a solid either melting or viscous fluid mixtures of hydrogen sulfate and its derivatives. As the prime composition of bitumens serve mineral oils, resins and pyrobitumen [82]. It is the oldest available on the market material, cheap, resistant to water, vapor, some acids and alkalis. But it softens under the effect of sun radiation and temperature, shows poor elasticity and impact strength under the low temperatures. Besides, bitumens show insufficient chemical and atmospheric resistance. Bitumen-based materials are not always durable within a desired time and temperature interval, so their lifetime is limited.

Most applicable bitumen grades are BN 90/10, BN 70/30, BNI-IV, MBP (MBP-65, 75, 90, 100, 120), BPP (Russia) [83-85]. Grades BN 90/10, BN 70/30 and BNI U are recommended for use in summer, BN 70/30 or BNI-IV in winter time.

The major suppliers of bitumen-based insulation materials are the companies: IndiaMART [86], Renqiu Xingbang International Trade Co. Ltd. (China) [88].

7. Combined materials

The combined materials have been developed not long ago. They are formed of heterogeneous organic and inorganic ingredients to combine positive properties of two components in one material. To this class we relate such composites as acrylosilicate, acrylo-polysiloxane [15, 88-105], epoxy-silicate [70, 72, 89-92], epoxy-polysiloxane [93-97], polyurethane-silicate [70, 72, 90, 98, 99], bitumen-rubber or polymer-bitumen ones [100] and other [88, 101, 106].

«Pielart Service» SRL» is a widely known supplier of industrial coatings of insulating materials produced by the company «PAZKAR» Ltd.» (Israel) [102]. This company has developed a series of water-based hydroinsulating materials [102-104]. Extensively used are the hybrid polymer and polyurethane materials InoPaz H₂O, Master Roof, AcrylPaz and Master Wall; as well as the bitumen-polymer ones RapidFlex, MasterFlex, ElastoPaz и ElastoMix.

The rubber-bitumen composites of grades GPB-1, GT-760 (Russia) and polymer-bitumen grades «BITUREL» [107] and «ASMOL» (Russia) [107, 108] have gained popularity lately. Most spread bitumen-polymer mastics are the bitumen-polydien (bitudien), bitumen-polyethylene (bitulen), bitumen-polydien-polypropylene (BPP) ones. In contrast to the bitumen-rubber

mastics, bitulen is more viscous and stable, is less prone to deformation under compressive strains and to solving in aromatic hydrocarbons.

A Belgium firm «Owens-Coming Fiberglas Europe S.A.» has developed new in principle insulating coatings «Flakeglass» intended for use in strongly aggressive media. The coating includes glass flakes. The binders are polyesters or epoxy resins [109].

The company «Servicised Ltd.» (GB) specialized in insulation of pipes, fittings and accessories in the field conditions has developed a rust-proof sheathing made of a thick layer of an adhesive compound and a strong elastic tape. This insulation is characterized by high adhesive properties and resistance against cathodic delamination. The insulation is applied onto the surface being insulated in a cold state, is perfectly compatible with the coatings based on the coal tar pitch, bitumen coatings and epoxide insulation laid on the pipe surface in shop conditions [110].

The «Denso North America Co.» (USA) has developed an epoxy-urethane insulation devoid of any carcinogenic resins and isocyanides. The coating is brushed or rolled on the isolated surface in a liquid state and can be used to protect welded seams in field conditions [111].

A fabric with a glass fiber coating has been manufactured by the company «Vivian Regina» («VR») (SAR) since 1963. The wrapping material for the pipes produced by the «VR» looks like a non-woven felt or a glass fiber fabric on the polymeric binder. The material «Menshwrap» is manufactured in the form of a woven net, which strength is raised by a longitudinal orientation of the staple glass braid. Such wrapping materials present a reinforcement for the bitumen insulating coatings. They are highly resistant to acids and alkalis, are not subjected to decay by moisture and microorganisms [112].

The company «Stroievolution» (Russia) [105] has created a liquid ceramic coating «Keramoizol» containing an izoplastic polymer matrix based on a structured acrylic polymer and dispersed poly-xyloxane modified by glass microballs. A novel acrylo-mineral hybrid composite coating has been demonstrated recently by the company «Dow Coating Materials» [101].

The authors from the East Michigan University (USA) [106] have described a system of coatings capable of self-restoration. This property is unique since the restoration volume is proportional to that of the damage, which looks like a scheme “repair on request”. The restoring agent is a diisocyanate cross-linking additive contained in the microcapsules protected by a thermoplastic shell. Simulation of natural ageing initiates liberation of the restoring agents able to heal the damage and improve properties of the coating as a whole.

When selecting a coating one should take into account the fact that the organic types of coatings (PE, epoxide, urethane and other) are very expensive. Nevertheless, the decisive factor in choosing a coating is their properties. The properties like ageing, narrow temperature range present a barrier to extensive use of organic coatings. For e.g., PE and epoxide coatings should not be used above 60-80 °C. More resistant are the PP (above 150 °C) and fluoroplastic coatings (200°C). These properties limit the life of above-named coatings to 10-20 years.

8. Glass-enamels

Silicate (glass-enamel) coatings possess higher technical and performance characteristics as compared to organic coatings. They include higher chemical resistance to acids, alkalis and salt solutions, aqua, organic solvents and so on. They have strong adhesion to metals, their hardness is on a par with steel, they endure higher temperature gradients and may be used under higher operation temperatures (till 300-400 °C). The distinguishing feature of the glass-enamel coatings is their specific thermal conductivity and thermal expansion coefficient, which are similar to metal.

Therefore, the temperature difference in the pipelines do not damage enamel coatings, which is especially important for the curvilinear portions of the mains. These properties of the glass-enamel coatings serve the base for a prolonged operation of the pipes till 40-50 years. It is also important that the raw materials for inorganic coatings are rather cheap and always in stock.

There exist the primer-free enamels of grades T, ML, MK-5R, E-1, E-1L (Russia), etc. for obtaining glass-enamel coatings.

9. Paint-and-lacquer materials

Paint-and-lacquer materials are extensively used to protect objects from atmospheric corrosion. They are subdivided into the oil, enamel, powder paints and lacquers.

More frequently applied grades are the «COPON KSIR 88» produced by «E. WOOD Ltd.» (GB); TK-2 and 770-33 produced by «TuboscopeVetco» (USA); «Amercoat 391 PC» of «PPG Industries Netherlands B.V.» (the Netherlands); «Sigmalining SF 23» of «SigmaCoatings» (the Netherlands); «Hempadur 87540» of «Hempe» Co. (Denmark); «Permacor 128/A» and «Permacor 2807/HS-A» of «Permatex» Co. (Germany); «GAMMA for pipes» and «Eloben-Terma» («GAMMA» (Russia)); «SCOTCHKOTE» XC-6171, XC-6178 of «ZM » (USA); TK-236, TK-216 and NN-205 of «Tuboscope Vetco»(USA); P-EP-585 (OAO NPF «Pigment » (Russia); HTEK-3 for pipes produced by Okhtinskii factory of powder paints (Russia) [88, 116].

Of interest are the paint-and-lacquer coatings of «COMBI» based on polyurethane or polysiloxane binders produced by a Scandinavian company «TEKNOS OY» [117, 118]. The «TEKNODUR COMBI 3560» is a polyurethane two-component paint cured by an aliphatic isocyanate resin, applied in a paint shop or in the field.

The coating «INERTA MASTIC MIOKS» (TECHNOPLAST PRIMER 7; TECHNOZINC 80 SE) is a two-component epoxide coating with a MIOKS pigment and a slight solvent content. It is used as a paint for repair of steel surfaces in frames of paint systems K41, K46, K56 and K60 in the case the environment restricts sand blasting application or a thick one-layer film is preferable to obtain by brushing [116, 119].

To protect steel pipes from corrosion most efficient in world practice are considered to be two types of anticorrosion coatings, namely the one-layer and two-layer epoxy coatings (Fusion Bonded Epoxy (FBE) and Dual Fusion Bonded Epoxy (DFBE)) two-layer and three-layer epoxy-polyolefin 3LPE or 3LPP (PE-based or PP-based) [40, 43]. Mainly the 3LPE and 3LPP coatings are used in Europe, in the USA and Canada, 99% of steel pipes of any diameter are covered by the systems FBE and DFBE [57, 120, 121]. 3LPE are preferably used in Russia. It is accustomed to use the two-layer epoxide coatings for the pipes till 820 mm in diameter [40]. It is expedient to employ the three-layer polyolefin systems for the larger pipes (above 920 mm) [40]. In fact all steel pipes of any diameter in the USA and Canada are insulated following the technology of epoxide coatings. As for Europe, they prefer the three-layer polyolefin systems (Table 1).

Table 1. One-layer epoxide coatings compared to three-layer polyolefin ones.

Parameter	Three-layer polyolefin systems	Single- and two-layer epoxide coatings
World experience	Europe, Russia	USA, Canada, Italy
Economic aspects	High cost, application is justified for the pipes of large diameter.	Cheaper materials and equipment, lower power consumption.

Each of the insulating system has its advantages and technological peculiarities (Table 2). The only known advantage of the three-layer system is its resistance to a direct shock. Therefore, the use of the three-layer insulation is justified mainly for the large-diameter pipes. There are, however, such essential disadvantages in the three-layer coating technology as expensiveness, imperfect protection system of the pipe coupling and incompatibility of the coating with the cathodic protection. The two-layer epoxide system is advantageous due to a reliable and fast-made protection of the pipeline coupling and compatibility of the coating with the cathodic protection. Not a single case of a stress-corrosion cracking under the coating was observed for more than a 50-year experience in the two-layer epoxide coating application [40]. Besides, impact resistance of the two-layer epoxide systems is lower than that of the three-layer polyolefin ones. Nevertheless, the two-layer epoxide coatings have not gained popularity so far in Russia.

Taking into account technological and economic merits of the technology and wide experience in operation of the two-layer epoxide coatings in different countries it seems expedient to use the two-layer epoxide systems to insulate pipes till 820 mm in diameter. Like in the case with the three-layer polyolefin systems the main protection mechanism against corrosion in the two-layer systems is provided by the epoxide coating.

Conclusions

It is evident from above discourse that the technology of corrosion protection of the pipelines undergoes updating. Composite materials on the polymer binders have turned to be most promising in this sphere. Since the pipelines are costly and metal-intensive objects, the resource of their polymeric coatings should encompass the whole service life of the pipeline.

A wide spectrum of composite materials has been developed in the recent decades. Their analysis has proved that the composites based on epoxy resins or their combinations with other resins or silicates are preferable in providing most efficient repair of the trunk pipelines subjected to mechanochemical damage.

It follows that epoxy resins as well as their combinations with rubbers and silicates are most promising materials for abating corrosion in oil and gas pipelines.

Table 2. Comparison between the two-layer epoxide coatings and three-layer polyolefin coatings.

Pipeline property	Factor	Three-layer polyolefin systems	Single- and two-layer epoxide coatings
Reliability and service life of the pipeline.	Coupling protection	The coupling is protected mainly by thermo contractable collars. Lasting operation is hand-made. Quality depends on operator.	The coupling is often sealed by the same material as the whole pipeline. There exists a simple automatic technology
	Compatibility with cathodic protection	Incompatibility	Compatible. Even if the epoxide coating delaminates, the metal is protected by cathodic guard.
	Repairability	The existing methods of repair don't ensure high quality si-	Simple and reliable maintenance technology in factory and

		milar to the factory-made. Damages are not observed under the PE layer.	field conditions.
Transportation. Is important for large-size pipes and long distances.	Impact resistance	Higher than two-layer epoxide coatings have.	–
Pipeline construction. Especially important for construction by NNB method. Resistance to slit and strip off	Especially important for construction by NNB method.	–	Almost 5-7 times higher than for three-layer coatings.
	Integrity	Three-layer system. Integrity is absent	Consists of two sequentially sprayed epoxide materials. Monolithic coating

The authors gratefully acknowledge the support of the European Commission, Marie Curie program, contract no. PIRSES-GA-2012-318874, project “Innovative Non-Destructive Testing and Advanced Composite Repair of Pipelines with Volumetric Surface Defects (INNOPIPES)”.

References:

- [1]. Economics and Fuel-and-Energy Complex today (14.07.2013), http://www.rusoil.ru/opinions/TEC_21_2013.pdf;
- [2]. Guermazi, N., Elleuch, K., Ayedi, H.F. The effect of time and aging temperature on structural and mechanical properties of pipeline coating, *Mater. Des.*, **30** (2009), 2006-2010;
- [3]. Zen, K. Corrosion and life cycle management of port structures, *Corros. Sci.*, **47** (2005), 2353-2360;
- [4]. NACE Standard RP0176-2003, Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Structures Associated with Petroleum Production, NACE International, Houston (2003);
- [5]. He Ruixia, Jin Huijun. Permafrost and cold-region environmental problems of the oil product pipeline from Golmud to Lhasa on the Qinghai-Tibet Plateau and their mitigation, *Cold Regions Science and Technology*, **64** (2010), № 3, 279-288;
- [6]. Manning Devid G. Corrosion performance of epoxy-coated reinforcing steel: North American experience, *Construction and Building Materials*, **10** (1996), № 5, 349-365;
- [7]. Shafikov, R.R. Repair of the main gas pipelines with welding and related technologies without stopping gas transfer, *Territory Neftgaz*, (2009), № 6, 80-83;
- [8]. Veinstok, S. The principle of multivector development, 17.07.2013, <http://www.rusoil.ru/oil/index.html>;
- [9]. Alamilla, J.L., Sosa, E., Sánchez-Magaña, C.A., Andrade-Valencia, R., Contreras, A. Failure analysis and mechanical performance of an oil pipeline, *Materials and Design*, **50** (2013), 766-773;
- [10]. Margarit Isabel, C.P., Mattos Oscar, R. About coatings and cathodic protection: Properties of the coatings

- influencing delamination and cathodic protection criteria, *Electrochimica Acta*, **44** (1998), № 2-3, 363-371;
- [11]. Comprehensive structural integrity. Vol.1: The Structural Integrity of Oil And Gas Transmission Pipelines (Ed. Phil Hopkins) Penspen Ltd., UK, 2002;
- [12]. Parkins, R.N. Predictive approaches to stress corrosion cracking failure, *Corros. Sci.*, **20** (1980), 147-166;
- [13]. Hasan, F., Iqbal, J., Ahmed, F. Stress corrosion failure of high-pressure gas pipeline, *Engineering Failure Analysis*, **14** (2007), № 5, 801-809;
- [14]. Sadeghi Meresht, T., Shahrabi Farahani, Neshat, J. Failure analysis of stress corrosion cracking occurred in a gas transmission steel pipeline, *Engineering Failure Analysis*, **18** (2011), № 11, 963-970;
- [15]. Keith D. Weiss. Paint coatings: a mature industry in transition, *Prog. Polym.Sci.*, **22** (1997), 203-245;
- [16]. Sathyanarayana, M.N., Yaseen, M. Role of promoters in improving adhesion of organic coatings to a substrate, *Progress in Organic Coatings*, **26** (1995), № 2-4, 275-313;
- [17]. Gabitov, A.I. Results and prospects in the theory and practice of abating corrosion, 1998;
- [18]. Nagumanov, K.B., Andreev, R.A., Nasybullin, S.M. Field pipeline protection against soil corrosion, *Oil economy*, **4** (2005) 66-69;
- [19]. Corrosion inhibitor for oil and gas industry, 20.09.2013, <http://incorgaz.ru/produkcija/>;
- [20]. Corrosion inhibitors for oil pipes and equipment, 20.09.2013, http://metallischekiy-portal.ru/articles/zashita_ot_korrozii_metalla/ingibitori_korrozii/ingibitori_korrozii_neftanixah_trub_i_oborudovaniya/1/;
- [21]. Kholinkov, A.J. Corrosion inhibitors for steel based on phosphorus-containing compounds and polyelectrolytes. Ph.D. Chem. Sci. Thesis, Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, Tashkent, 2009;
- [22]. Corrosiojn inhibitors, 20.09.2013, <http://www.okorrozii.com/ingibitor-korrozii.html>;
- [23]. Pipeline protection from corrosion and the inhibitor thereof, 20.09.2013, <http://www.napor.ru/production/ingibitory/zashita-truboprovodov-ingibitory-korrozii/>;
- [24]. Bukharov, S.N., Yakimovich, N.V., Machanovskiy, E., Alexiev, A., Mirchev, Y. Polymer composite materials used for the repair of main pipelines via composite sleeve technology (survey) // Conference proceedings "NTD Days 2013", Sozopol, June 17-21 (2013), No.2, vol.139, 158-161;
- [25]. Milenin, A.S. Repair of field pipelines without knock-off. Practical recommendations. Proc. 7th National Sci. and Techn. Conf. and exhib., "ND testing and technical diagnostics", Kiev, 2012, 351-363;
- [26]. LaMorte, C.R., Boring, M., Porter, N. Advanced Welding Repair and Remediation Methods for In-Service Pipelines, Final Report, Columbus: EWI, 2007;
- [27]. Bruce, W.A. Qualification and Selection of Procedures for Welding Onto In-Service Pipelines and Piping Systems, Edison Welding Institute (EWI) Project No. J6176, Columbus, Ohio, 1996;
- [28]. BMT Fleet Technology Ltd. Business Briefing: Exploration & Production: The Oil & Gas Review 2004. Welding Procedure Development for Repair of Inservice Pipelines;
- [29]. Bowdoin, L.A. Direct deposit welding advances make it a viable repair technique. Pipe Line and Gas Industry (2000), 67-72;
- [30]. Bruce, W.A., Alexander C. Pipeline Repair Methods. In Service Welding Course, 2007;
- [31]. Bruce, W.A. Repair of in-service pipelines by welding. Pipes & Pipelines International (2001), 5-11;
- [32]. Perdomo, J.J., Song, I. Chemical and electrochemical conditions on steel under disbonded coatings: the effect of applied potential, solution resistivity, crevice thickness and holiday size, *Corros. Sci.*, **42** (2000), 1389-1415;
- [33]. Kin, F., Been, J., Worthingham, R., Rubie, G. Laboratory and field investigations of the performance of HPCC coatings, In: International pipeline conf., Calgary, Canada; Paper no. 0082, 2004;
- [34]. Papavinasam, S., Revie, R.W. Coating for pipelines. In: International workshop on advanced research & development of coatings for corrosion protection, Golden, USA, 2004;
- [35]. Gudov, A.I., Saifutdinov, M.I. Quality improvement of insulating materials and technology of their application during overhaul and reconstruction of trunk oil pipelines, *Oil pipeline transport*, 1998, № 2, 22-23;
- [36]. Joseph Ron. High-solids low-VOC solvent-based coatings, *Metal Finishing*, **108**(2010), № 11-12, 78-89;
- [37]. Dedeshko, V.N., Salyukov, V.V., Mitrokhin, M.Yu. et al. Reinsulation technologies and new insulating coatings for pipeline protection. *Gas Industry*, **2** (2005), 68-71;
- [38]. Samadzadeh, M., Boura, S., Hatami Peikari, M., Kasiriha, S.M., Ashrafi, A. A review on self-healing coatings based on micro/nanocapsules, *Progress in Organic Coatings*, **68** (2010), № 3, 159-164;
- [39]. Corrosion protection of pipelines, 22.07.2013, <http://colordigest.com/antikorroziionnaya-zashhita-truboprovodov-2/>;
- [40]. Bierwagen, G.P. Reflections on corrosion control by organic coatings, *Prog. Org. Coat.*, **28** (1996), 43-48;
- [41]. Le Thu, Q., Bierwagen, G.P., Touzain, S. EIS and ENM measurements for three different organic coatings on aluminum, *Prog. Org. Coat.*, **42** (2001), 179-187;
- [42]. BIURS, 15.07.2013, <http://mpkm.org/katalog/antikor/biurs/>;
- [43]. Protection from corrosion, *Journal "Corrosion. Territories NEFTEGAZ"*, **1** (2009), № 12, 26-33, 11.07.2013, <http://neftegas.info/korroziya-tng/3478-perspektiva-primeneniya-odnosloynnyh-i-dvuhosloynnyh-epoksidnyh-pokrytiy-v-rossii-tehnicheskie-i-ekonomicheskije-predposylki.html>;
- [44]. Markets. Original source. Coatings of the world, **17** (2012), № 6, 32-33, 8.07.2013, <http://www.coatingsworld.com/>;
- [45]. Wei-Gang Ji, Ji-Ming Hu, Jiar-Qing Zhang, Chu-Nan Cao. Reducing the water absorption in epoxy coating by silane monomer incorporation, *Corrosion Science*, **48**(2006), 3731-3739;
- [46]. Lee, M.C., Peppas, N.A. Water transport in epoxy-resins, *Prog. Polym. Sci.*, **18** (1993), 947-961;
- [47]. Popineau, S., Shanahan, M.E.R. Simple model to estimate adhesion of structural bondings during humid ageing, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, **26** (2006), 363-370;
- [48]. Bajat, J., Dedi, O. *Journal of Adhesion Science and Technology*, **21** (2007), 819-831;
- [49]. Martinez Sanja, Zulj Lidija Valek, Kapor Frankica. Disbonding of underwater-cured epoxy coating caused by cathodic protection current, *Corrosion Science*, **51** (2009), № 10, 2253-2258;
- [50]. High service temperature epoxy powders, *Focus on Powder Coatings*, 2008, № 8, 2-4;
- [51]. Gan, F., Sun, Z.W., Sabde, G. et al. Cathodic protection to mitigate external corrosion of underground steel pipe beneath disbonded coating, *Corrosion*, **50** (1994), 804;
- [52]. Han, X.P. Technique for detecting corrosion and coating flow of buried pipelines, *Nat. Gas Ind.*, **21** (2001), 108;

- [53]. Frigione, M.E., Mascia, L., Acierno, D. Oligomeric and polymeric modifiers for toughening of epoxy resins, *Eur. Polym. J.*, **31** (1995), 1021-1029;
- [54]. Yiquan Song, Cuiwei Du, Xiaogang Li. Electrochemical corrosion behavior of carbon steel with bulk coating holidays, *Journal of University of Science and Technology Beijing*, **13** (2006), № 1, 37-43;
- [55]. Nagendiran, S., Alagar, M., Hamerton, I. *Acta Mater.*, **58** (2010), 3345;
- [56]. Niu, L., Cheng, Y.F. Development of innovative coating technology for pipeline operation crossing the permafrost terrain, *Construction and Building Materials*, **22** (2008), № 4, 417-422;
- [57]. Cheng, Y.F., Gray, L., King, F. Field characterization of the long-term performance of FBE-coated pipelines using electrochemical impedance spectroscopy. Report prepared for CEPA, NOVA Research and Technology Center, Calgary, 2001;
- [58]. Legghe, E., Aragon, E., Bélec, L., Margailan, A., Melot, D. Correlation between water diffusion and adhesion loss: study of an epoxy primer on steel, *Prog. Org. Coat.*, **66** (2009), 276-280;
- [59]. Low temperature epoxy curing agents, *Focus on Powder Coatings*, 2003, № 3, 3-4;
- [60]. Potter, W.G. Epoxy resins, New York: Spriger, 1970;
- [61]. Kinjo, N., Ogata, K., Keneda, A. Epoxy molding compounds as encapsulation materials for microelectronic devices, *Adv. Polym. Sci.*, **88** (1989), 1-48;
- [62]. AkzoNobel, 25.07.2013, <http://www.technoservice.ru/manufacturers/5744.php>;
- [63]. Mafi, R., Mirabedini, S.M., Naderi, R., Attar, M.M. Effect of curing characterization on the corrosion performance of polyester and polyester/epoxy powder coatings, *Corros.Sci.*, **50** (2008), 3280-3286;
- [64]. Worsley, D.A., Williams, D., Ling, J.S.G. Mechanistic changes in cutedge corrosion induced by variation of organic coating porosity, *Corros. Sci.*, **43** (2001), 2335-2348;
- [65]. Vipulandan, C., Paul, E. Characterization of polyester polymer and polymer concrete, *J. Mater. Civil Eng.*, **5** (1993), № 1, 62-82;
- [66]. 3M™ ScotchKote™, (29.07.2013), <http://gaz-complect.ru/scotchkote/index.php>;
- [67]. Niziev, S.G. Modern protective coatings for pipeline fittings and valves, 25.07.2013, <http://www.oomzm.ru/articles/25/>;
- [68]. Mouritz, A.P. Post-fire flexural properties of fibre-reinforced polyester, epoxy and phenolic composites, *J. of Materials Sci.*, **37** (2002), 1377-1386;
- [69]. Gnyp, I.P., Neprila, M.V., Hanulych, B.K. Development of heat-and impact-resistant coatings for main pipelines, *Materials Science*, **42** (2006), № 4, 487-493;
- [70]. Atta, A.M., El-Kafrawy, A.F., Morsy, M.H., Abdel-Azim, A.-A.A. New epoxy resins based on recycled poly(ethylene terephthalate) as organic coatings, *Prog. Org. Coat.*, **58** (2007), 13-22;
- [71]. Defeng Wu., Chixing Zhou, Xie Fan, Dalian Mao, Zhang Bian. Linear rheological behavior and thermal stability of poly(butylene terephthalate)/epoxy/clay ternary nanocomposites, *Polymer Degradation and Stability*, **87** (2005), 511-519;
- [72]. Polyken Announces New Primerless Coating System for Corrosion Protection, 19.07.2013, <http://www.24-7pressrelease.com/press-release/polyken-announces-new-primerless-coating-system-for-corrosion-protection-28235.php>;
- [73]. Legghe, E., Joliff, Y., Belec, L., Aragon, E., Margailan, A. Computational analysis of internal stresses generated during the manufacturing process of a monolayer or three-layer pipeline coating, *Computational Materials Science*, **48** (2010), № 2, 360-365;
- [74]. Niziev, S.G. On corrosion protection of trunk and field pipelines by modern polymeric coatings, 22.07.2013, http://www.oomzm.ru/statii/protivokor_zashite_magistrali;
- [75]. Howell, G.R., Cheng, Y.F. Characterization of high performance composite coating for the northern pipeline application, *Progress in Organic Coatings*, **60** (2007), № 2, 148-152;
- [76]. Guermazi, N., Elleuch, K., Ayedi, H.F. The effect of time and aging temperature on structural and mechanical properties of pipeline coating, *Mater. Design.*, **30** (2009), 2006-2010;
- [77]. Guidetti, G.P., Rigosi, G.L., Marzola, R. The use of polypropylene in pipeline coatings, *Progress in Organic Coatings*, **27** (1996), № 1-4, 79-85;
- [78]. Komolova, O.A. The first home glue-based composition ATI-06 for three-layer factory insulation of pipelines. AdvantaGES and promises in application. 19.07.2013, <http://neftegas.info/korroziya-tng/3480-ati-06-pervaya-otechestvennaya-kleevaya-kompozitsiya-dlya-zavodskoy-trehsloynoy-izolyacii-truboprovodov-preimuschestva-i-perspektivy-primeneniya.html>;
- [79]. Corrosion protection of pipelines using modern protective insulation coatings, 17.07.2013, <http://www.ankort.ru/story2.php>;
- [80]. Protection of pipelines from corrosion. Corrosion-proof insulating coatings, 19.07.2013, <http://yanvikt.narod.ru/exz/exz.htm>;
- [81]. Materials and coatings for gas pipeline insulation, 22.07.2013, <http://magak.ru/vodosnabgenie/materials/73-1-1?showall=&start=14>;
- [82]. Insulating materials for protecting pipelines from corrosion, 20.07.2013, <http://www.vashdom.ru/vsn/008-88/>;
- [83]. Insulating materials, 16.07.2013, http://kabelino.ru/products/izolyatsionnye-materialy_8;
- [84]. New materials, 17.07.2013, http://www.fid-tech.com/rus/technol/data/new_materials/1.421.html;
- [85]. IndiaMART, 20.09.2013, <http://www.indiamart.com/jai-gopala-marketing/water-proofing-insulation.html>;
- [86]. Renqiu Xingbang International Trade Co., Ltd., Bitumen Products, 20.09.2013, <http://rqxingbang.en.alibaba.com/>;
- [87]. New approach to prepare corrosion-resistant epoxy coatings, 20.07.2013, <http://www.european-coatings.com/Raw-Materials-Technologies/Raw-Materials/Binders/New-approach-to-prepare-corrosion-resistant-epoxy-coatings>;
- [88]. Xi Li, Zai-Ji Zhan, Gui-Rong Peng, Wen-Kui Wang. Nano-disassembling method – A new method for preparing completely exfoliated epoxy/clay nanocomposites, *Applied Clay Sci.*, **55** (2012), 168-172;
- [89]. El-Hawary, M.M., Abdel-Fattah, H. Temperature effect on the mechanical behavior of resin concrete, *Construction and Building Materials*, **14** (2000), 317-323;
- [90]. Lan, T., Kaviratna, P.D., Pinnavaia, T.J. Epoxy Self-Polymerization in Smectite. *Clays. J. Phys.Chem. Solids.*, **57** (1996), № 6-8, 1005-1010;
- [91]. Shi, X., Nguyen, T.A., Suo, Z., Liu, Y., Avci, R. Effect of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating, *Surf. Coat. Technol.*, **204** (2009), 237-245;
- [92]. Matejka, L., Strachota, A., Plestil, J., Whelan, P., Steinhart, M., Slout, M. Epoxy networks reinforced with polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS). Structure and morphology, *Macromolecules*, **37** (2004), 9449-9456;

- [93]. Asuncion, M.Z., Laine, R.M. Silsesquioxane Barrier Materials Macromolecules, **40**(2007), 555-562;
- [94]. Hai-Bo Fan, Rong-Jie Yang, Xiang-Mei Li. Organic/inorganic hybrid epoxy nanocomposites based on octa(aminophenyl)silseuioxane, *Chinese Journal of Polymer Science*, **31** (2013), № 1, 148-158;
- [95]. Ananda Kumar S., Balakrishnan, T., Alagar, M., Denchev, Z. Development and characterization of silicone/phosphorus modified epoxy materials and their application as anticorrosion and antifouling coatings, *Progress in Organic Coatings*, **55** (2006), № 3, 207-217;
- [96]. Ji, W.G., Hu, J.M., Zhang, J.Q., Cao, C.N. Reducing the water absorption in epoxy coatings by silane monomer incorporation, *Corros. Sci.*, **48** (2006), 3731-3739;
- [97]. Ma, J., Zhang, S., Qi, Z.N. Synthesis and characterization of novel segmented polyurethane/clay nanocomposites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **82** (2001), 6, 1444-1448;
- [98]. Ke, Y.C., Qi, Z.N., Long, C.F. Crystallization, properties, and crystal and nanoscale morphology of PET-Clay nanocomposites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **71** (1999), 1139-1146;
- [99]. Babakova, O.A., Ogorodnikova, T.V., Kochetkov, V.M., Timofeev, V.S. RU Patent №2258725, A composition for corrosion protection, Russia, 2003;
- [100]. Innovations in the field of highly efficient self-restoring water-based coatings, 15.07.2013, <http://www.aquarella.ru/news/28-european-coatings/434-innovation-vdlkm.html>;
- [101]. TECHNOPROK, 19.09.2013, <http://www.technoprok.ru/>;
- [102]. Pazkar LTD., 24.09.2013, <http://www.pazkar.com/>;
- [103]. «Pielart Service» SRL. Co., 24.09.2013, <http://www.pazkar.md/>;
- [104]. Liquid ceramic coating “Keramoizol”, 17.07.2013, <http://www.evolut.ru/10/teploizolyaciya/242>;
- [105]. Polymeric coatings reacting on external effect, 16.07.2013, <http://www.aquarella.ru/news/28-european-coatings/265-coatings.html>;
- [106]. Mastic “Biturel”, 18.07.2013, <http://www.stroim.org/mastika/biturel/>;
- [107]. Insulation “ASMOL”, 16.07.2013, http://pss.oml.ru/izolyaciya_asmol;
- [108]. Kharisov, R.A., Khabirova, A.R., Mustafin, F.M., Khabirov, R.A. State of pipeline protection from corrosion by modern polymeric coatings, 16.09.2013, <http://www.ogbus.ru>;
- [109]. Serviurap’s pipeline protection system, *Water and Waste Treat (Or. Brit.)*, **5** (2000), 46;
- [110]. Epoxy-urethane insulation for pipelines. New products and literature, *Pipeline and Gas J.*, **5**(1992), 14-16;
- [111]. Class fibre pipewrapping, *Corros. and Coat, S.Afr.*, **92** (1991), 22;
- [112]. Corrosion resistance and mechanism of steel rebar coated with three types of enamel, *Corrosion Science*, **59** (2012), 157-168;
- [113]. Conde, A., de Damborenea, J.J. Electrochemical impedance spectroscopy for studying the degradation of enamel coatings, *Corros. Sci.*, **44** (2002), 1555-1567;
- [114]. Conde, A., de Damborenea, J.J. Monitoring of vitreous enamel degradation by electrochemical noise, *Surf. Coat. Technol.*, **150** (2002), 212-217;
- [115]. Zhuchenko, A.V. The use of single-layer anticorrosion paint and lacquer coatings is one more step towards economizing, 17.07.2013, <http://neftegas.info/korroziya-tng/3475-primenenie-odnosloynnyh-antikorrozionnyh-lakokrasochnyyh-pokrytiy-ocherednoy-shag-k-ekonomii-finansovyh-sredstv.html>;
- [116]. Commercial anticorrosion coatings for protecting metal and concrete in industry TEKNOS OY, 18.09.2013, http://www.tehraska.ru/promyshlennyye_antikorrozi_onye_pokr;
- [117]. TEKNOS OY, 18.09.2013, <http://www.tehraska.ru>;
- [118]. Epoxide coating INERTA MASTIC MIOX, 18.09.2013, <http://www.teknos.ru/>;
- [119]. Promises in using single-layer and two-layer epoxide coatings in Russia. Technical and economic premises, 17.07.2013, <http://neftegas.info/korroziya-tng/3478-perspektiva-primeneniya-odnosloynnyh-i-dvuh-sloynnyh-epoksidnyh-pokrytiy-v-rossii-tehnicheskie-i-ekonomicheskie-predposylki.html>;
- [120]. Pipeline Coating 2012. Pipeline industry grows with the need for increased security, *Focus on Powder Coatings*, **2011** (2012), 7-8;
- [121]. Legghe, E., Joliff, Y., Belec, L., Aragon, E., Margailan, A. Computational analysis of internal stresses generated during the manufacturing process of a monolayer or three-layer pipeline coating, *Computational Materials Science*, **48** (2010), № 2, 360-365.



АКУСТИКА

Национална конференция "Акустика 2015"

Варна
09 - 10.10.2015 г.
София
27-28.11.2015 г.

Година XVII

□ Брой 17

Декември 2015.

МЕТОДИКА ЗА ОЦЕНЯВАНЕ ИЗМЕНЕНИЕТО НА КОМФОРТА В ЖИЛИЩНИТЕ ТЕРИТОРИИ ОТ ВЪЗДЕЙСТВИЕТО НА ШУМ И ИНФРАЗВУК ИЗЛЪЧВАН ОТ КОМПРЕСОРНИ СТАНЦИИ

METHODOLOGY FOR ASSESSMENT OF NOISE COMFORT IN RESIDENTIAL AREAS FROM THE IMPACT OF INFRASOUND AND NOISE EMITTED BY COMPRESSOR STATIONS

гл. ас. д-р инж. Пировски Х. А.

Технически Университет – Варна, България, christo.pirovsky@tu-varna.bg

Abstract: Gas industry compressor stations and terminals emit noise over the entire frequency range. Noise in residential areas is assessed according to regulatory acceptable levels, but did not take into consideration the level of background noise in the survey area before the commissioning of industrial equipment. The big difference between the background noise level and the level caused by the compressor station in operation determine deterioration of noise comfort regardless of fulfillment of regulatory levels. This paper presents methodology for assessment of noise comfort in residential areas from the impact of infrasound and noise emitted by compressor stations.

Keywords: noise, infrasound, compressor stations, noise regulatory limits, noise comfort, residential areas

1. Въведение

Шум е всеки неприятен или нежелан звук. Той води до намалена работоспособност, затруднява речевото общуване и възприемането на звуковите сигнали от околната среда. От хигиенна и психо-физиологична гледна точка към шума се причисляват и тонове (звуци с определена честота), когато те оказват вредно въздействие върху човешкия организъм. Въздействието на шума върху човека има различни честотни проявления (инфразвук $f < 20$ Hz; доловим звуков диапазон $20 < f < 18$ kHz; ултразвук $f > 18$ kHz) [1].

Инфразвук е звук с честота, твърде малка, за да се улавя от човешкото ухо. За горна граница на инфразвуковите вълни се приемат честотите от 16 Hz до 20 Hz (минималната честота, която се улавя от човешкото ухо), а долната е под 0.1 Hz. Инфразвукът се характеризира със способност да се разпространява на големи разстояния и да заобикаля препятствия с малко разсейване. За него няма подходящи звукопоглъщащи материали. Проведени научни изследвания показват, че въздействието на инфразвук с честота между 7 и 19 Hz предизвиква усещане за страх и паника сред хората, т.е. макар и да не чуваме инфразвука, нашето тяло е способно да го усети и да реагира тревожно.

Повишеното ниво на **доловимия от човешкото ухо шум** влияе върху нервната и сърдечно-съдовата системи на човека и предизвиква раздразнение, умора, агресивност. Продължителната работа в условията на повишено ниво на вибрации и шум води до развитието на неврит на слуховия нерв, вибрационна болест, повишаване на кръвното налягане на човека, нарушаване на вестибуларния апарат и до други професионални заболявания. Този вид заболявания в развитите в икономическо отношение страни съставлява до 35% от общия брой на професионалните заболявания. Повишеното ниво на шум в околната среда и в домашни условия води до нарушаване на условията за възстановяване и допълнително способства развитието на професионалните заболявания.

Ултразвукът е звук с честота, по-голяма от горната граница на възприемане от човешкото ухо, над 18kHz. Някои животни притежават по-висока граница от тази на човешкото ухо и могат да чуват ултразвук. Ултразвукът може да окаже вредно въздействие върху човека и органичната материя единствено при излъчване от източници с голяма мощност и насочено

въздействие, намиращи се в непосредствена близост. Причината е бързото затихване (абсорбция) на ултразвуковите вълни от въздушната среда, в която се разпространяват, а при достигане на прегради те в голяма степен се екранират и абсорбират. Развитието на промишлеността, внедряването на нови технологии и оборудване, разширяването на урбанизираните територии създава предпоставки за все по-неблагоприятно въздействие на шума върху околната среда и човека. В този аспект правилната оценка за въздействието на шума върху околната среда и прилагането на съществуващата регулаторна база са ключов фактор за опазване на биоразнообразието в природата и здравето на човека.

Република България е част от европейската общност и европейската енергийна политика, в чиято основа стоят редица мерки, с които се цели постигането на интегриран енергиен пазар, сигурност и диверсификация на енергийните доставки, гарантиращи устойчиво развитие на енергийния сектор, независимо от нестабилната геополитическа конюнктура. Развитието и поддържането на газопреносната инфраструктура, изграждането на нови интерконекторни връзки, терминали и компресорни станции (КС) са единствения път за постигане на енергийна независимост в краткосрочен план.

Компресорните станции и приемни терминали на обектите от газопреносната промишленост излъчват шум в целия честотен диапазон. Поради съображения за безопасност компресорните станции се строят извън населени места. Нерядко това са тихи зони предназначени за отдых и почивка в близост до агломерации. Изграждането на приемните терминали на газопроводите преминаващи по дъното на големи водни басейни се извършва в непосредствена близост до морския бряг, което също не съответства с развитието на крайбрежните територии като зони за активен отдых и възстановяване. Понастоящем, съгласно действащата нормативна уредба, шума се оценява съгласно допустимите нива. Примерно, ако през нощта в тихи зони нивото на шумово натоварване е около 34-35dBA [2] се приема, че изискванията са изпълнени без да се отчита какво е било нивото на фоновия шум в обследваната територия преди въвеждането в експлоатация на промишленото съоръжение. Обикновено фоновия шум в тихите зони е около 23-28 dBA. При шумово натоварване близо до допустимото (в случая 35dBA) ще се създаде промяна на

нивото на шума с повече от 10 dB, което се определя като съществена промяна на комфорта [6].

2. Цели

Основната цел на настоящото изследване е разработване на методика за оценяване изменението на комфорта в населените територии около компресорни станции и терминали по параметрите на шум, инфразвук и нискочестотен шум.

3. Нормативна база

В таблица 1 са показани граничните стойности на нивата на шума в различни територии и устройствени зони в съгласно Наредба № 6 [2].

Таблица 1.

Територии и устройствени зони в урбанизираните територии и извън тях	Еквивалентно ниво, dBA		
	Ден	Вечер	Нощ
Жилищни зони и територии	55	50	45
Централни градски части	60	55	50
Територии, подложени на въздействието на интензивен автомобилен трафик	60	55	50
Територии, подложени на въздействието на релсов железопътен и трамваен транспорт	65	60	55
Територии, подложени на въздействието на авиационен шум	65	65	50
Производствено-складови територии и зони	70	70	70
Зони за обществен и индивидуален отдих	45	40	35
Зони за лечебни заведения и санаториуми	45	35	35
Зони за научноизследователска и учебна дейност	45	40	35
Тихи зони извън агломерациите	40	35	35

Съгласно представената информация в Наредба №6/2006 г. за показателите на шум в околната среда, отчитащи степента на дискомфорт през различните части на денонощието [2] не се нормират граничните стойности на показателите на инфразвук и нискочестотен шум в околната среда.

В таблица 2 е направено сравнение на пределно-допустимите нива на инфразвук и нискочестотен шум в някои държави на ЕС.

Таблица 2.

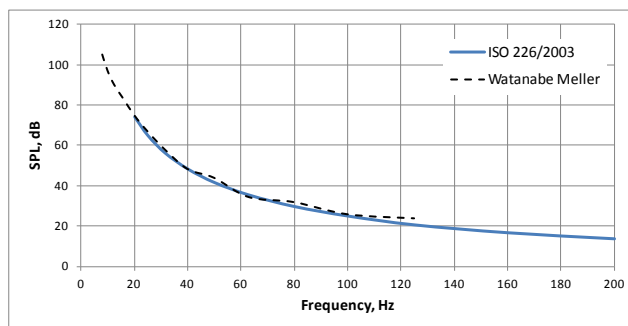
1/3 окт. Hz	ISO226 dB	Германия dB	Норвегия dB	Швеция dB	Дания L _{A20} dB	Полша L _{A10} dB
8		103				
10		95			90.4	80.4
12.5		87			93.4	83.4
16		79			76.7	66.7
20	74.3	71	74		70.5	60.5
25	65	63	64		64.7	54.7
31.5	56.3	55.5	55	56	59.4	49.3
40	48.4	48	46	49	54.6	44.6
50	41.7	40.5	39	43	50.2	40.2
63	35.5	33.5	33	41.5	46.2	36.2
80	29.8	28	27	40	42.5	32.5
100	25.1	23.5	22	38	39.1	29.1
125	20.7			36	36.1	26.1
160	16.8			34	33.4	23.4
200	13.8			32		20.9
250	11.2					18.6

Съгласно таблица 2 в частта инфразвук норми са регламентирани само от Германия, Дания и Полша като държави от Европейската общност. Още по-строги са нормите на Руската Федерация съгласно санитарни норми СН2.2.4/2.1.8.583-96 „Инфразвук на работните места, в жилищните и обществени помещения и на територията на жилищно застрояване” [5] пределно-допустимите нива на инфразвука приемат стойности показани в таблица 3.

Таблица 3.

Наименование на помещенията	Ниво на звуково налягане, dB, по октавни ленти				LIN dB
	2	4	8	16	
Производствени помещения и територии при работа с различна степен на натоварване	100	95	90	85	100
Производствени помещения и територии при работа с различна степен на интелектуално-емоционално натоварване	95	90	85	80	95
Жилищни зони и територии	90	85	80	75	90
Помещения в жилищни и обществени сгради	75	70	65	60	75

Съгласно [4] граничните нива на субективно възприемане на инфразвук и нискочестотен шум от човека са показани на фиг. 1. На фигурата с прекъсната линия са показани граничните нива на субективно възприемане на инфразвук и нискочестотен шум съгласно Watanabe и Meller, съответстваща на DIN 45680 [4], а с непрекъсната линия – линията на субективно възприемане на шума, съответстваща на 0 phon, съгласно DIN 45680 [4] и ISO 226/ 2003.



Фиг. 1. Гранични нива на субективно възприемане на инфразвук и нискочестотен шум от човека

4. Методика за оценяване изменението на комфорта в жилищните територии от въздействието на шум и инфразвук излъчван от компресорни станции

Изискванията на „Директива 2002/49/ЕС на Европейския парламент и на Съвета на Европа от 25 юни 2002г. относно оценка и управление на екологичния шум” и „Наредба №6 от 26 юни 2006 г. за показателите на шум в околната среда, отчитащи степента на дискомфорт през различните части на денонощието, граничните стойности на показателите на шум в околната среда, методите за оценка на стойностите на показателите на шум и на вредните ефекти на шума върху здравето на човека” се основава на сравняване на изчислените прогнозни сумарни нива на шум в населените места с граничните за населени места и жилищни територии за периода нощ. Причината е, че компресорната станция или терминал са с непрекъснат производствен процес и ще работят интензивно през нощта, когато допустимите нива приемат най-ниски стойности. При този подход на оценяване на въздействието по показателя шум могат да се дефинират две оценъчни зони:

- **Зона А** – прогнозното ниво на шум е по-ниско или равно на граничното за изследваната жилищна територия или населено място, т.е. нивото на шум в изследваното населено място е „допустимо”. Предвидените за строителство обекти не предизвикват шумово натоварване на живущите, превишаващо определените от нормативните документи гранични нива;

- **Зона D** - прогнозното ниво на шум е по-високо от граничното за изследваната жилищна територия или населено място, т.е. нивото на шум е „недопустимо”.

При оценка на въздействието по показателя шум от работата на предлаганата за строителство обект „недопустимо“ се отказва изпълнението на проекта в предложения вид и се разработват ефективни мерки за намаляване на излъчвания от обекта шум с цел изпълнение на нормите на Наредба №6.

Аналогична оценка се извършва на въздействието по показателя инфразвук от работата на терминали или компресорни станции. Съгласно изискванията на РФ [5] оценката се основава на сравняване на изчислените прогнозни октавни нива на инфразвук в населените места с граничните за населени места и жилищни територии. При този подход на оценяване на въздействието по показателя шум също се дефинират две оценъчни зони: **зона А** – прогнозното октавно ниво на инфразвук е по-ниско или равно на допустимото за изследваната територия и **зона D** – прогнозните октавни нива на инфразвук са по-високи от допустимите.

За оценяване на нискочестотния шум в октавните ленти 31.5 Hz и 63 Hz в настоящия момент няма разработени норми, т.е. не са дефинирани гранични нива на нискочестотен шум. В ISO7196 [3] и DIN45680 [4] са дефинирани само граничните нива на възприемане на нискочестотния шум.

Друг подход за оценяване на въздействието на шум, инфразвук и нискочестотен шум, излъчван от работата на компресорни станции и терминали, върху населените места в близост до районите на строителство, се базира на изменението на условията на комфорт в тези населени места. Съгласно Тейлор [6] повишаването на нивото на фоновия шум в населеното място, предизвикано от промяна на източниците на шум или въвеждане в действие на нови източници на шум, води до промяна на комфорта на живот независимо от това дали новото ниво на шум в населеното място превишава или не превишава граничното ниво на шум за изследваната жилищна територия. За оценяване на очакваната реакция на жителите на населеното място от промяната на нивото на шум Тейлор въвежда следната класификация [6].

Таблица 3.

Превишаване на нивото на шум над фоновото ниво, dBA	Очаквана реакция
0	Няма реакция
5	Единични жалби
10	Многочислени жалби
15	Организиран протести
20	Активни протести

На основата на показаната по-горе класификация на реакцията на жителите при промяна на акустичната обстановка в населеното място се предлага оценката на въздействието по показателите шум, инфразвук и нискочестотен шум от работата на приемен терминал и компресорни станции върху околната среда да се направи чрез въвеждане на 4 зонава скала на оценяване:

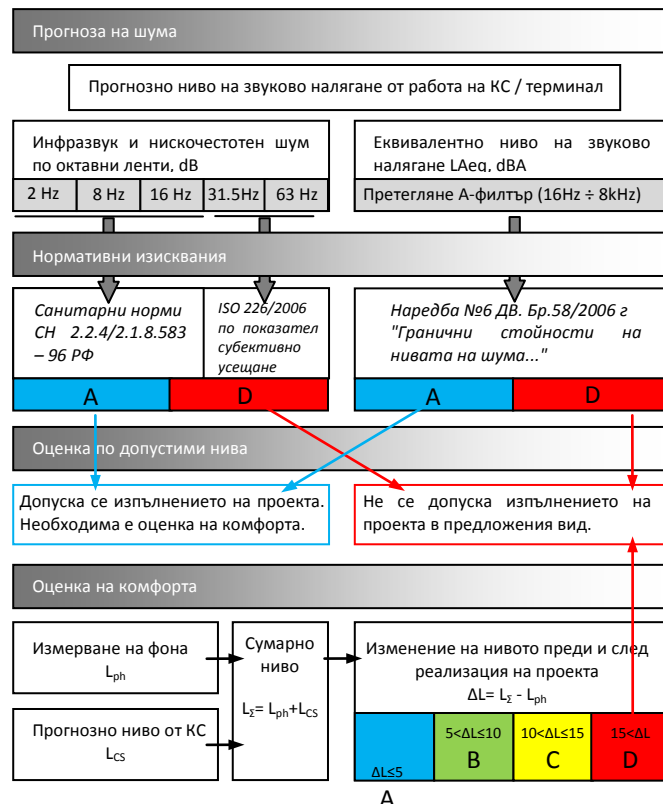
- **Зона А** – комфортът на населеното място не се променя. Разликата между изчисленото прогнозно ниво на шум/инфразвук/нискочестотен шум и измереното фонов ниво на населеното място е по-малка или равна на 5 dB;

- **Зона В** – комфортът се променя незначително. Разликата между изчисленото прогнозно ниво на шум/инфразвук/нискочестотен шум и измереното фонов ниво на населеното място е по-голяма от 5 dB, но е по-малка или равна на 10 dB;

- **Зона С** – комфортът се променя значително. Необходимо е да се вземат мерки за коригиране на нивото на шум на източниците, излъчващи високо ниво на шум/инфразвук/нискочестотен шум. Разликата между изчисленото прогнозно ниво на шум/инфразвук/нискочестотен шум и измереното фонов ниво на населеното място е по-голяма от 10 dB, но е по-малка или равна на 15 dB;

- **Зона D** – повишаване на нивото на шума с повече от 15dB. Определя се като недопустима промяна на комфорта. Не се допуска изпълнението на проекта в предложения вид.

На фиг. 2 е представена схема на методика за оценка на изменението на комфорта в жилищни територии по показателя шум и инфразвук.



Фиг. 2. Методика за оценяване изменението на комфорта в жилищните територии от въздействието на шум и инфразвук

5. Прогнозно изследване на комфорта в жилищните територии по показателя шум и инфразвук излъчван от компресорни станции.

Проведено е числено изследване на шума излъчван от компресорна станция, състояща се от 4 компресорни агрегата всеки с мощност 25MW, част проектно решение за пренос на природен газ от Русия за България и страните от централна и западна Европа. На фиг. 3÷5 са представени резултати от числено изследване на инфразвук и нискочестотен шум по ниво на звуково налягане за октавни ленти 16Hz, 31.5Hz, 63Hz, както и еквивалентно ниво - фиг. 6 Условно населените места в близост до мястото избрано за строителство на КС са означени НМ1, НМ2, НМ3, съответно разположение на 2.4km, 2.5km и 4.0km от КС. С цел оценка на комфорта съгласно предложената методика е извършено експериментално изследване на шумовия фон в населените места в няколко позиции. Усреднени резултати за шумовия фон за всяко едно от разглежданите населени места, както и прогнозни нива на шума от компресорните станции получени по числен път са показани в таблици 4 и 5.

Таблица 4.

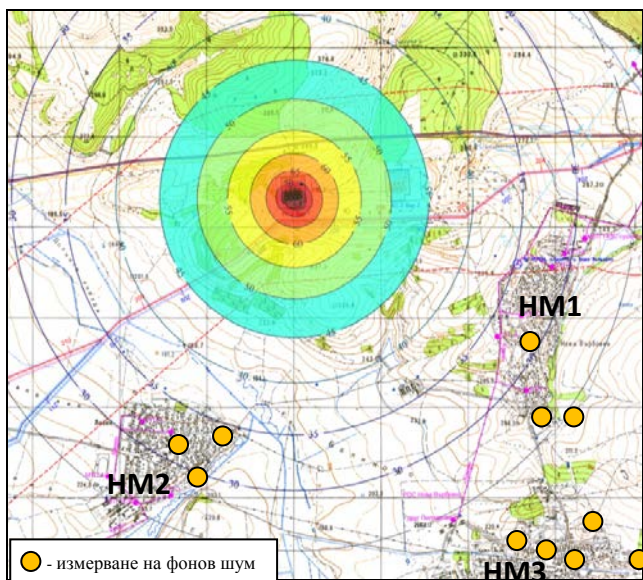
Населено място	Октави	Ниво на звуково налягане, dB			Гранични нива, dB		Оценка на комфорта	
		Фон	КС прогноза	Сумарно	ISO 226	CH2.2.4/ 2.1.8.583	$\Delta L=L_z-L_{ph}$	Зони
		Hz	L_{ph}	L_{CS}	L_z			
НМ1	16	58	45	58.2	87.7	75	0.2	A
	31.5	53.3	47	54.2	63.8	-	0.9	A
	63	48	46	50.1	41.5	-	2.1	A
НМ2	16	43.4	45	47.3	87.7	75	3.9	A
	31.5	37.9	47	47.5	63.8	-	9.6	B
	63	34.2	46	46.3	41.5	-	12.1	C
НМ3	16	52.6	40	52.8	87.7	75	0.2	A
	31.5	48.4	43	49.5	63.8	-	1.1	A
	63	47.3	42	48.4	41.5	-	1.1	A

Таблица 5.

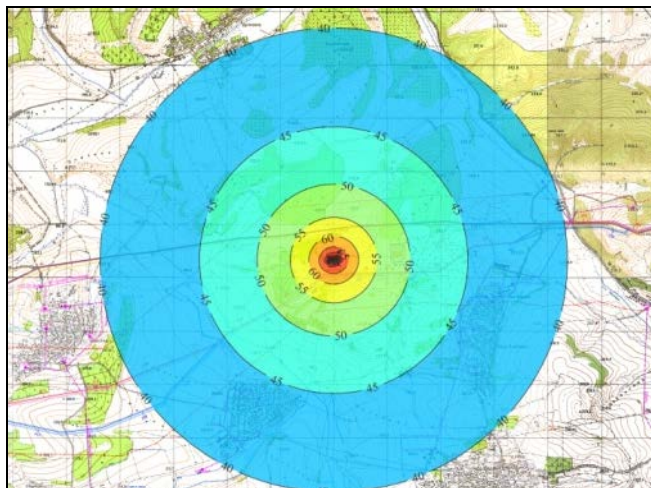
Населено място	Ниво на звуково налягане, dB			Гранични нива (нощ), dB	Оценка на комфорта	
	Фон	КС прогноза	Сумарно		$\Delta L = L_z - L_{ph}$	Зони
HM1	25.8	35.6	36.0	45	10.2	C
HM2	26.5	35.5	36.0	45	9.5	B
HM3	34.5	24.1	34.9	45	0.4	A

Сравнението на получените резултати за сумарното ниво на звуково налягане от работата на компресорната станция по октавни ленти за инфразвук и нискочестотен шум, таблица 4, показва превишаване за HM2 по октава 63Hz на показателя за субективно усещане ISO226 с 4.8dB. По отношение на оценката на комфорта, съгласно приложената методика, се установява отново за населено място HM2 изменение на нивото на звуково налягане (ΔL) за октави 31.5Hz и 63Hz преди и след реализация на проекта съответно 9.6dB (зона B) и 12.1dB (зона C).

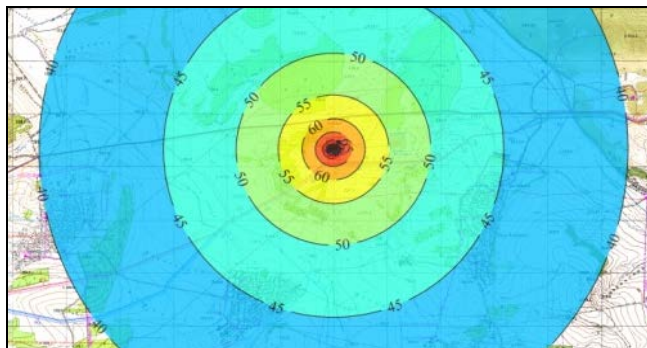
Оценката на шума по еквивалентно ниво на звуково налягане (L_{Aeq}), таблица 5, показва промяна на комфорта за населени места HM1 с 10.2 dBA (зона C) и населено място HM2 с 9.5dBA (зона B).



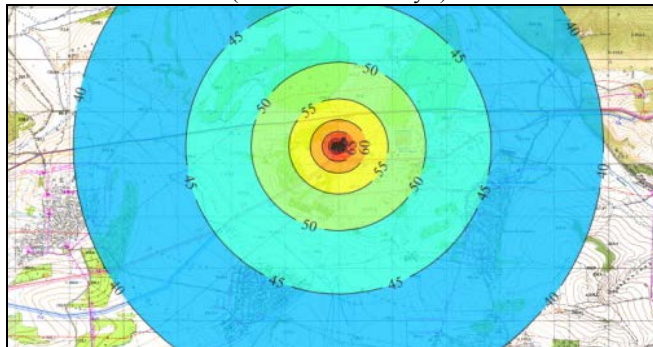
Фиг. 3. Шумова карта на еквивалентно ниво на звуковото налягане (dBA) на района около компресорна станция



Фиг. 4. Шумова карта на района около компресорна станция за октавна лента 16Hz (инфразвук)



Фиг. 5. Шумова карта на района около компресорна станция за октавна лента 31.5Hz (нискочестотен шум)



Фиг. 6. Шумова карта на района около компресорна станция за октавна лента 63Hz (нискочестотен шум)

6. Изводи

Проведените числени и експериментални изследвания на шума в районите около компресорната станция показват, че въпреки изпълнението на предвидените нормативни изисквания съгласно Наредба №6 [2] по отношение на шума за трите населени места, е налице чувствителна промяна на комфорта в две от тях - разположени на 2.5km от компресорната станция. Установена е зона на комфорт C, определяща висока вероятност от жалби на граждани. В населеното място отдалечено на повече от 4km се установява зона на комфорт A по показателите на шум, инфразвук и нискочестотен шум. Анализът на резултатите позволява да бъдат формулирани следните по-важни изводи:

- за постигане на нива на комфорт в населените места около компресорни станции и терминали се препоръчва изграждане на разстояние не по-малко от 4km;
- предложената методика може да бъде използвана и при оценка на изменението на комфорта по показателя шум излъчван не само от компресорни станции, а и от други промишлени източници с непрекъснат режим на производство, разположени в близост до населени места и зони за отдих и почивка;
- методиката представя по-обективна оценка на въздействието на шума излъчван от промишлени източници върху здравето и комфорта на гражданите.

Литература

1. Инфразвук, ултразвук, шум и вибрации, МФ, С., 1995.
2. Наредба №6 от 26 юни 2006 г. за показателите на шум в околната среда, отчитайки степента на дискомфорт през различните части на денонощието... ДВ. Бр.58/2006.
3. ISO 7196: 1995, Acoustics – Frequency weighting characteristic for infrasound measurements.
4. DIN 45680, Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen in der Nachbarschaft.
5. Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.583 – 96 Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки, Госкомсанэпид надзора РФ от 31 октября 1996 г №52.
6. Rupert Teylor "NOISE", Second Edition, England, 1975



ИЗСЛЕДВАНЕ ВЪЗДЕЙСТВИЕТО ВЪРХУ ОКОЛНАТА СРЕДА НА ИЗТОЧНИЦИТЕ НА ШУМ ОТ КОМПРЕСОРНИ СТАНЦИИ И ГАЗОРАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ ТЕРМИНАЛИ

STUDY OF ENVIRONMENTAL IMPACT OF NOISE SOURCES IN COMPRESSOR STATIONS AND GAS DISTRIBUTION TERMINALS

гл. ас. д-р инж. Пировски Х. А.

Технически Университет – Варна, България, christo.pirovsky@tu-varna.bg

Abstract: This study was conducted to assess the significance of the main noise sources from compressor stations and gas distribution terminals in the propagation of noise and infrasound in the environment. The publication presents a methodology to assess the propagation of noise, infrasound and low-frequency noise emitted by compressor stations and terminals. The main sources of noise are analyzed and numerically study was carried out to assess the impact of different sources of noise on the acoustic environment in the adjacent areas.

Keywords: noise sources, gas compressor station, gas pipelines, noise environmental impact

1. Въведение

Шумът от технологичното оборудване на компресорните станции и приемните терминали от газопреносната мрежа оказва съществено влияние върху околната среда. Правилната оценка на въздействието на шума е определящо за запазване на биоразнообразието в природата, както и здравето на хората живеещи и работещи на територията в близост до компресорните станции (КС) и приемни терминали (ПТ).

Технологичното оборудване в приемните терминали има за цел да подготви постъпващия газ за компресорните станции. Извършва се приемане на газа във вътрешнотръбни устройства от морския участък на газопровода, подгрев, филтриране и сепариране на газа, както и определяне на наговия дебит и качество, фиг.1. Основните технологични процеси, които се осъществяват на територията на компресорните станции са: очистване на газа от механични и течни примеси; съгъстяване на газа; охлаждане след съгъстяване; измерване на дебита и контрол на основни технологични процеси; управление на режимите работа в зависимост от необходимото потребление и т.н. Схема на общото разположение на технологичното оборудване на КС с обща инсталирана мощност на са газотурбокомпресорния агрегат ГТКА от 100MW е показано на фиг.2. Установено е, че технологичното оборудване в компресорните станции и терминали излъчва шум, който се характеризира като инфразвук, нискочестотен и средночестотен шум в честотния диапазон основно до 8kHz [3].

2. Цели

Настоящото изследване се провежда с цел оценяване на значимостта на основните източници на шум от компресорни станции и приемни терминали при разпространението на шума и инфразвука в околната среда. Реализирането на целта се осъществява чрез:

- разработване на методика за оценка разпространението на шум, инфразвук и нискочестотен шум излъчван от компресорни станции и приемни терминали;
- анализ на източниците на шум от компресорни станции и приемни терминали;
- числено изследване на въздействието на отделните източници на шум върху акустичната обстановка в прилежащите територии.

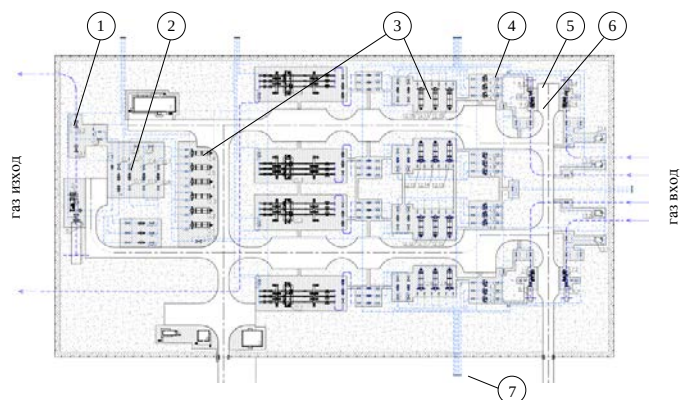
3. Източници на шум в приемните терминали и компресорните станции на газопреносната мрежа

Основните източници на шум в приемните терминали, фиг. 1, са регулиращата и спирателна арматура (1) и (2), подгревателите на газ (3), филтър-сепараторите (4), редуктор-клапани (5) и прахоуловители (6).

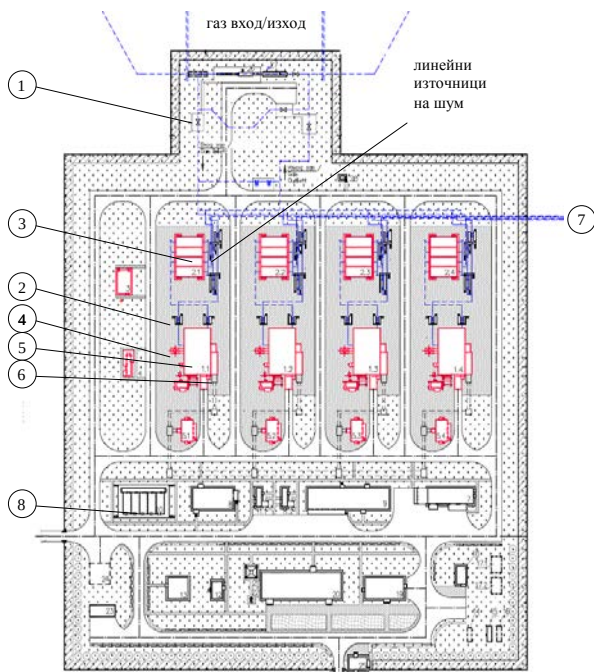
За компресорните станции на газопреносната мрежа основните източници на шум са ГТКА, фиг.2 (5), въздухоприемната камера (6), газоизпускателния тръбопровод (4), регулиращата и спирателна арматура (1) и (2), апаратите за въздушно охлаждане (3), електроцентралата на компресорната станция (8).

Всички надземни технологични тръбопроводи в приемните терминали и компресорните станции се отчитат като източници на шум от линеен тип.

Източници на шум с краткотрайно /импулсно/ действие са свещите (7) за аварийно изпускане на газ при разтоварване на тръбопроводите на приемни терминали и компресорни станции.



Фиг.1. Източници на шум в приемен терминал



Фиг. 2. Източници на шум в компресорна станция

В таблица 1 и таблица 2 са представени усреднени данни за ниво на звукова мощност на представените на фиг.1 и фиг. 2 източници на шум на основата на каталог на шумовите характеристики на газотранспортното оборудване [3].

Таблица 1.

Типове източници	Октави, L _w										L _w , dBA
	16	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Арматура, DN 1400	85	91	88	92	102	113	128	133	134	124	131
Арматура, DN 1000	83	87	85	98	91	95	107	101	109	104	112
Подгреватели	114	120	118	114	109	108	112	111	105	100	117
Филтър-Сепаратори	69	77	75	67	66	63	55	53	48	51	62
Редуктор Клапани	70	72	74	79	81	90	105	112	113	109	110
Прахоуловители	84	88	86	85	87	85	79	80	90	77	86
Лин. източници, тръби φ=500mm	63	70	68	80	87	97	104	106	104	100	109

Таблица 2.

Типове източници	Октави, L _w										L _w , dBA
	16	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Арматура, DN 1400	85	91	88	92	102	113	128	133	134	124	131
Арматура, DN 1000	83	87	85	98	91	95	107	101	109	104	112
Охладителни	123	125	124	120	116	116	111	107	98	93	117
газоизпускателния колектор	87	97	95	95	95	94	91	99	87	87	103
Страда ТКА	109	117	115	116	115	113	117	112	112	113	123
въздухоприемната камера	110	117	116	120	116	116	111	107	98	93	110
Лин. източници, тръби φ=500mm	63	70	68	80	87	97	104	106	104	100	109
Електростанция	93	95	92	-	-	-	-	-	-	-	95.5

4. Методика за пресмятане на разпространението на шума в райони около компресорни станции.

Методът за прогнозиране на нивото на шума по територията на застрояване на приемния терминал и компресорните станции и по територията в близост до жилищни зони се основава на зависимостите на акустиката за разпространение на шума от точков и линеен източник в свободно звуково поле. Предложената методика на прогнозиране на нивото на шум по територията на застрояване на приемния терминал и компресорните е съобразена с изисквания на Наредба №6 от 2006 г. за показателите на шум в околната среда, отчитащи степента на дискомфорт през различните части на дежурното, граничните стойности на показателите на шум в околната среда, методите за оценка на стойностите на показателите на шум и на вредните ефекти на шума върху

здравото на човека [1], както и "Методика за пресмятане на нивото на шума от компресорните станции" [4] на ОАО Газпром.

Нивото на звуковото налягане L_p на разстояние r от точков източник със звукова мощност L_w , dB, при разпространение на шума като сферична звукова вълна се определя по формулата:

$$L_p = L_w - 10 \cdot \lg(4 \cdot \pi) - 20 \cdot \lg(r / r_0), \text{ dB},$$

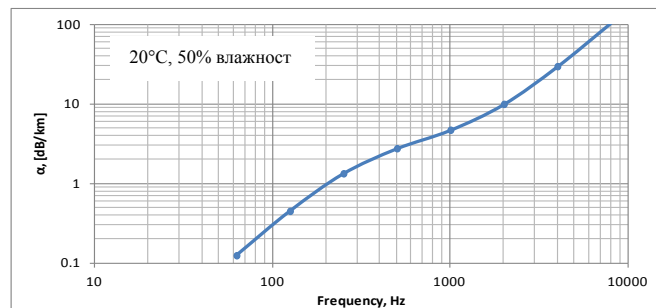
където $r_0 = 1 \text{ m}$.

Нивото на звуковото налягане L_p на разстояние r от линеен източник със звукова мощност L_w , dB, при разпространение на шума като цилиндрична звукова вълна се определя по формулата:

$$L_p = L_w - 10 \cdot \lg(2 \cdot \pi) - 10 \cdot \lg(r / r_0), \text{ dB},$$

където $r_0 = 1 \text{ m}$.

Освен от отдалечеността от източника, нивото на звуково налягане зависи съществено и от поглъщането на звуковата енергия от въздушната среда. Коефициентът на затихване (или въздушна абсорбция) α [dB/km] се определя от атмосферното налягане, влажността на въздуха и температурата. С увеличаване на честотата, респективно намаляване дължината на звуковата вълна, поглъщането се увеличава фиг. 3 [5].



Фиг. 3. Изменение на коеф. на затихване в зависимост от честотата при $t=20^\circ\text{C}$, 50% влажност, $p = 1 \text{ bar}$.

При липса на данни за разпределението на звуковата мощност от източника по октави се допуска коефициентът на затихване от въздушната среда да се приеме 3dB на всеки 1000 m, при условие, че еквивалентното ниво на източника не се определя основно от нискочестотни съставлящи и инфразвук. При пресмятане разпространението на инфразвук и нискочестотен шум в октавните ленти 16Hz до 63Hz се приема, че инфразвукът и нискочестотният шум не разсейват енергията си във въздушна среда, т.е. $\alpha \approx 0$ [dB/km], фиг.3.

Съществуват голям брой ефекти и условия, които могат да повлияят на нивата на прогнозирания шум. Приетите в изследването методи се основават на процедури, изложени в ISO 9613-2 1996 г.[2], където са описани физически и метеорологични ефекти, които засягат разпространението на звука на открито.

При прогнозирането на нивото на шум по териториите около компресорни станции и терминали е препоръчително да се пренебрегват следните ефекти от разпространение на шума:

- ефекти от отслабване нивото на шум поради въздушна турбулентност (турбулентно смесване);
- ефекти от защита чрез растителност (пренебрегва се ефекта на поглъщане на шума от горски масиви и единични дървета);
- специфични ефекти от поглъщане на звука от земната повърхност;
- ефекти на екраниране от релефа на земната повърхност;
- ефекти от насоченото действие на вятъра;
- ефекти на насочено разпространение на шума.

Пренебрегването на посочените ефекти от разпространение на шума осигурява известен запас в прогнозираното ниво на шум от 3 до 5 dB.

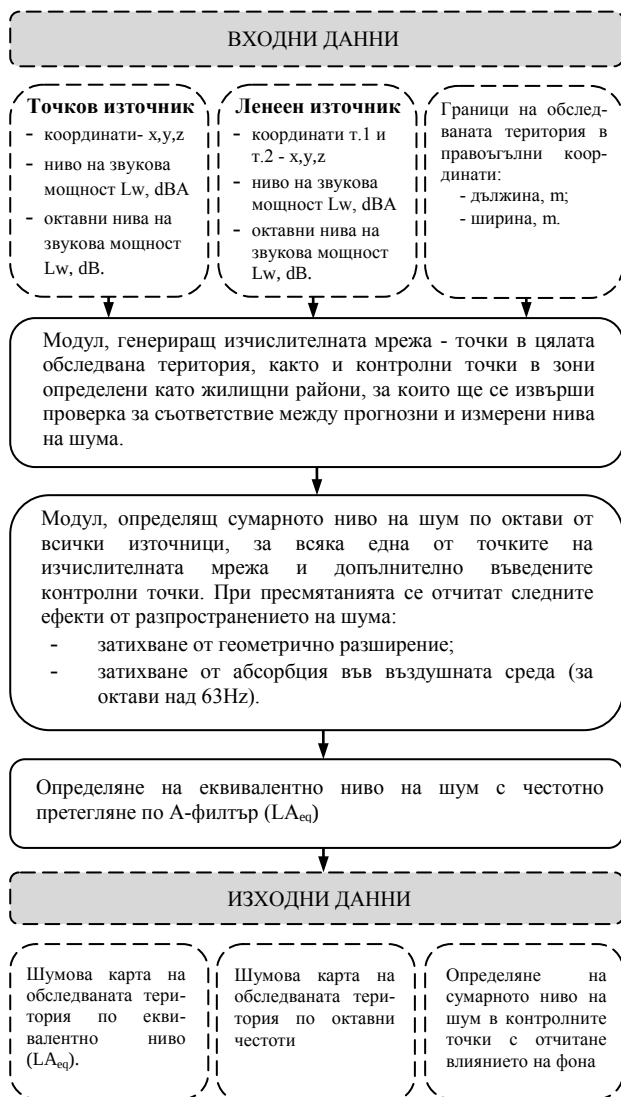
Прогнозната оценка на нивото на шум в населените места се определя по формулата за сумиране на два източника:

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{L_c}{10}} + 10^{\frac{L_{ph}}{10}} \right) [dB],$$

където L_c е нивото на шум в даденото населено място или точка на оценка от въздействието на шума от компресорната станция и/или терминал; L_{ph} – фонов ниво на шум в точката за оценка по резултати от проведени експериментални измервания на място; L_{Σ} – сумарно ниво на шум.

Препоръчително е при промишлени обекти с непрекъснат производствен цикъл, каквито са компресорните станции и терминали оценката на въздействие върху околната среда по показателя шум да се определя само за времеви интервал **нощ**, тъй като граничните нива на шум за жилищни зони и територии съгласно Наредба №6 за интервала нощ са най-ниски.

На фиг. 4 е показана блок-схема на програма за оценка на шума излъчван от компресорни станции и терминали.

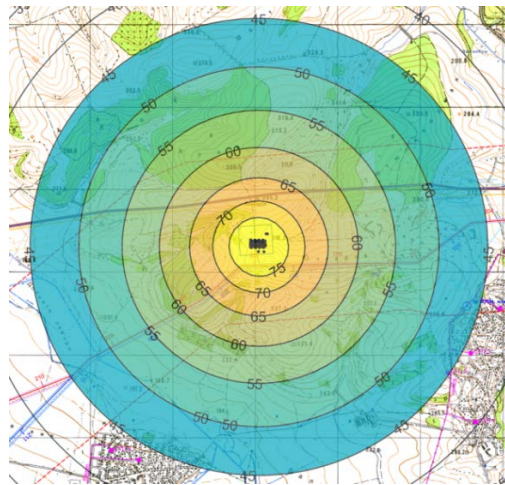


Фиг.4. Блок-схема на програма за оценка на шума излъчван от компресорни станции и терминали

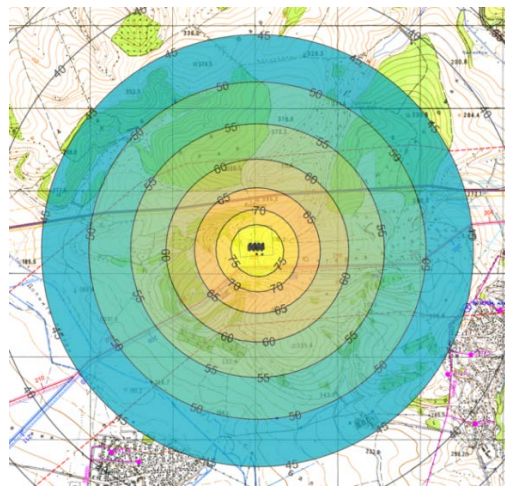
5. Числено изследване на шума излъчван от компресорна станция и приемен терминал.

Проведено е числено изследване на влиянието на основните източници на шум в КС и ПТ както в прилежащите урбанизирани територии, така и на територията на промишлените обекти. За провеждане на изследването е използвана предложената по-горе методика за пресмятане на разпространението на шума. За оценка влиянието на основните източници на шум, определени съгласно таблица 1 и таблица 2, са изследвани следните варианти на шумово въздействие:

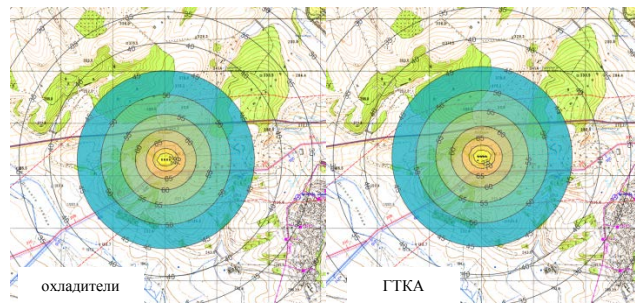
- от всички източници, фиг.4;
- от голямогабаритна спирателна арматура и тръбопроводи, фиг.5;
- от апаратите за въздушно охлаждане, фиг. 6;
- от ГТКА (сграда, въздухоприемна камера, газоизпускателен колектор), фиг.6.



Фиг.4. Кумулативен ефект от въздействието на всички източници на шум в КС.



Фиг.5. Кумулативен ефект от въздействието на спирателна арматура и тръбопроводи.

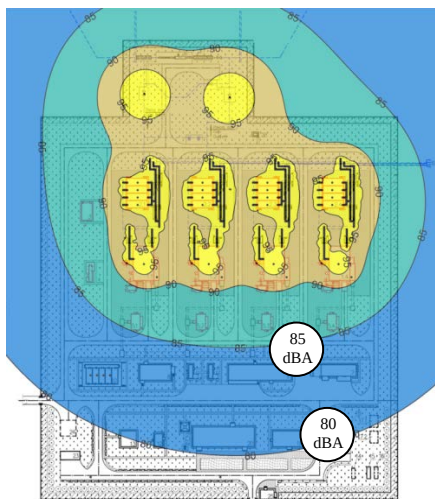


Фиг.6. Кумулативен ефект от апаратите за въздушно охлаждане на газа и ГТКА

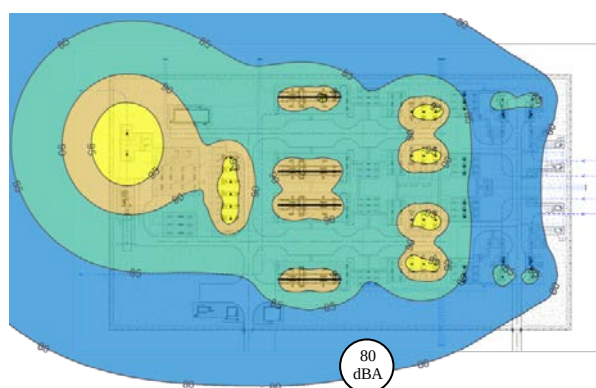
В резултат на проведения числен анализ на кумулативния ефект от разглежданите източници на шум се установява:

- основни източници на шум в КС и ПТ се явяват голямогабаритната спирателна арматура и откритите технологични тръбопроводи на транспортирания газ. Установява се, че откритите тръбопроводи, като линейни източници, и спирателните кранове, като точкови източници на шум, имат приблизително еднакъв принос към кумулативния ефект, фиг.4 и фиг.5.
- шумът излъчван от апаратите за охлаждане на газа и групата източници ГТКА оказва значително по-слаб ефект върху обследваните територии. Приносът към кумулативния ефект поотделно на въздухоохладителите и групата ГТКА е почти еднакъв, фиг.6;
- шумът излъчван от групата дизелгенератори към електростанцията на КС може да се пренебрегне.

На фиг. 7 и фиг. 8 са показани резултати числено изследване на разпространението на шума на територията на КС и ПТ. Установява се ниво на звуково налягане в района на КС, около сервисните и складови помещения, както и административното сдание, над 82dBA. В близост до сградата на ГТКА и апаратите за охлаждане на газа нивото на звуково налягане е над 85dBA. На територията на ПТ нивото на звуково налягане по границата на обекта е също над 80dBA, фиг. 8.



Фиг.7 Шумова карта в района на КС. Кумулативен ефект от всички източници

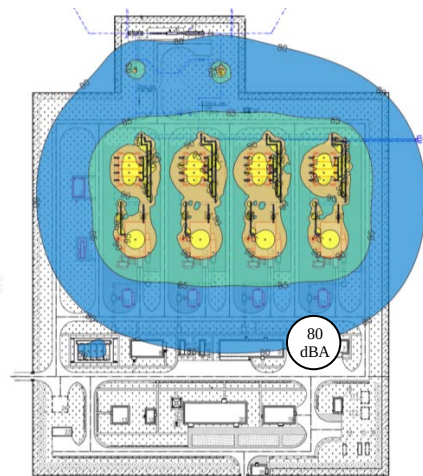


Фиг.8 Шумова карта в района на ПТ. Кумулативен ефект от всички източници

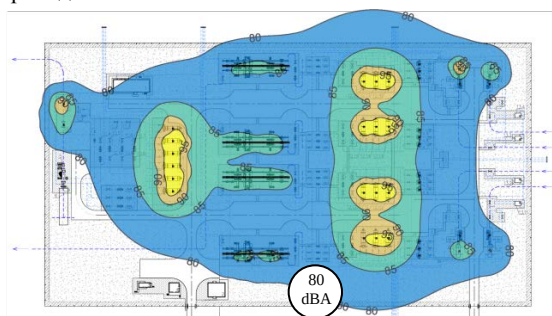
С цел намаляване шумовото въздействие от така определените основни източници - арматура и открити тръбопроводи, се препоръчва комплекс от мерки включващи:

- използване на арматура с по-ниско ниво на излъчваната звукова мощност;
- използване на тръби с по-голям диаметър, както и колена с по-голям радиус за редуциране скоростта на потока;
- звукопоглъщащи екрани около голямогабаритната арматура и откритите тръбопроводи;

- използване на звуко и вибропоглъщаща обзакза.



Фиг.9 Шумова карта в района на КС. Кумулативен ефект от всички източници при звукоизолация на арматура и открити тръбопроводи



Фиг.10 Шумова карта в района на ПТ. Кумулативен ефект от всички източници при звукоизолация на арматура и открити тръбопроводи

На фиг. 10 и фиг. 11 е показана карта на разпространението на шума в КС и ПТ след въвеждане на комплекс от мерки за намаляване въздействието от шума на арматурата и открити тръбопроводи. Около сервисните и складови помещения на територията на КС се установява ниво под 80dBA.

6. Изводи

Извършеното числено изследване на въздействието на източниците на шум от КС и ПТ позволява да бъдат направени следните по-важни изводи:

- основни източници на шум в КС и ПТ се явяват голямогабаритната спирателна арматура и откритите технологични тръбопроводи на транспортирания газ.
- шумът излъчван от апаратите за охлаждане на газа и групата източници ГТКА оказва значително по-слаб ефект върху териториите.
- за гарантирането на санитарните норми на шум на територията на КС и ПТ е необходимо въвеждане на комплекс от мерки за понижаване нивото на излъчвания шум от арматурата и откритите технологични тръбопроводи.

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. СТО Газпром 2-3.5-042-2005, Методика расчета уровня шума от компрессорных станций.
5. Crocker, Handbook of Acoustics, John Wiley & Sons, February 1998



АКУСТИЧНИ ОСЦИЛАЦИИ ПРИ НЕСТАБИЛНО ГОРЕНЕ НА РАКЕТНИ ДВИГАТЕЛИ

ACOUSTIC OSCILLATIONS DURING UNSTABLE COMBUSTION OF SOLID ROCKET MOTORS

Доц. д-р Генов Б.¹Проф. д-р Генов Г.²Д-р инж. Мирчев Й.³¹Институт по отбрана, София, бул. Проф. Цв. Лазаров 2, България, e-mail: genov@abv.bg²Шуменски университет „Епископ Константин Преславски“, Шумен, България, e-mail: g.b.genov@abv.bg³Българска академия на науките, Институт по механика, София, България, e-mail: nntdd@imbm.bas.bg

Abstract. Comparing to other power plants, the combustion process in rocket propulsion systems is very efficient due to the high combustion temperatures, helping to achieve nearly complete combustion. There has been much interesting research on rocket combustion and over the last 65 years we have now a better understanding of the phenomena and of the behavior of burning propellants. Preventing the occurrence of combustion instability has been related with considerable amount of time and money in solid rocket propulsion systems. Over this period, significant knowledge has been accumulated that can influence the acoustic stability of solid propulsive systems. This paper attempts to organize many of these research works and in addition, several mathematical relationships are presented which can be used to determine resultant thrust oscillations produced by acoustic oscillations.

This paper emphasizes double base propellants, but many observations apply to composite propellants as well.

Keywords: acoustic oscillations, stability, solid rocket propulsion system, unstable combustion process.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Твърдотопливните двигатели работят при налягания от порядъка от до 7 МПа, докато при класическите артилерийски системи наляганията са от порядъка на 400 МПа. За сметка на по-ниските налягания, посредством непрекъсната генерация на продукти на горенето, се осигурява траен импулс за продължително време [1]. По този начин зависимостта на налягането във функция от времето за горене при проектирането на твърдотопливни ракетни двигатели се явява основна както при проектирането на нови двигатели, така и при освидетелстването и преосвидетелстването им.

За оценка на характеристиките на реактивната система се използва специфичния импулс I_S :

$$(1) \quad I_S = \sqrt{\frac{2F}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}, \text{ където}$$

F – константа на силата, [J/g];

γ – специфичната топлина на газовете;

P_e – налягането при среза на соплото, [MPa];

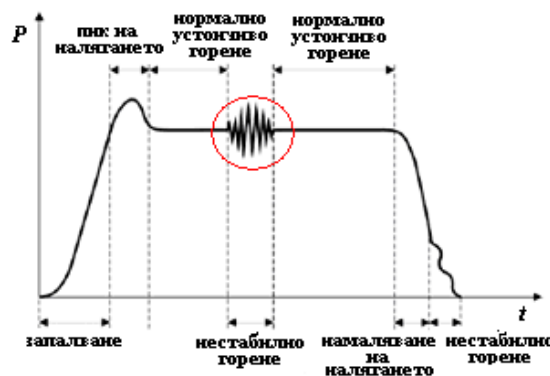
P_c – налягането в камерата на горене, [MPa].

Стойността на специфичния импулс I_S , е основна характеристика при проектирането на двигателите. Друга такава характеристика, която се използва и в процеса на преосвидетелстване на ракетите е зависимостта на налягането във функция на времето (фиг. 2) [2].

Специфичният пик на налягането фиг. 1 показва специфична нестабилност на горенето.

Пикове, като показания на фиг. 1, не са рядкост и като правило стига да не се големи като амплитуда, честота на появяване и/или продължителност, на практика те не се отразяват на работата на двигателя.

Линейната нестабилност е свързан с характерни синусоидални осцилации. Нелинейната нестабилност има несинусоиден характер и съдържа няколко акустични моди. Нестабилността на горенето на твърдотопливните ракетни двигатели е обект на изследване още с разработването на първите твърдотопливни ракетни двигатели. То се дължи основно на промени в химическия състав и/или механичните качества, зараждането на микропукнатини [3] и др.



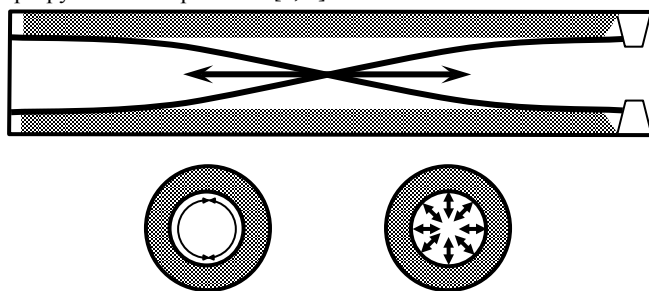
Фиг. 1. Типична крива на налягането на твърдотопливен ракетен двигател във функция на времето

Адаптирано по Генов Б. и др. [2]

Възникващите осцилации на налягането могат да бъдат надлъжни (фиг. 2а), тангенциални (фиг. 2б), а макар и по-рядко и радиални (фиг. 2в) [4].

Обикновено, общата продължителност на осцилациите на налягането е от порядъка на няколко процента от средното налягане. Понякога обаче, тези осцилации могат да предизвикат критични проблеми в управлението на ракетите, изменение на местоположението на максималната стойност

на налягането и/или местоположението ѝ във времето, а дори и разрушаване на ракетата [6, 7].

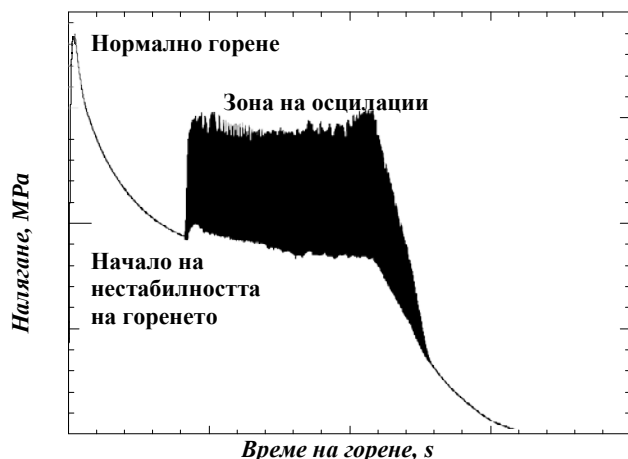


Фиг. 2. Осцилации на налягането в твърдотопливни реактивни двигатели: а) надлъжни; б) тангенциални; в) радиални

Адаптирано по Blomshield F. S. [5]

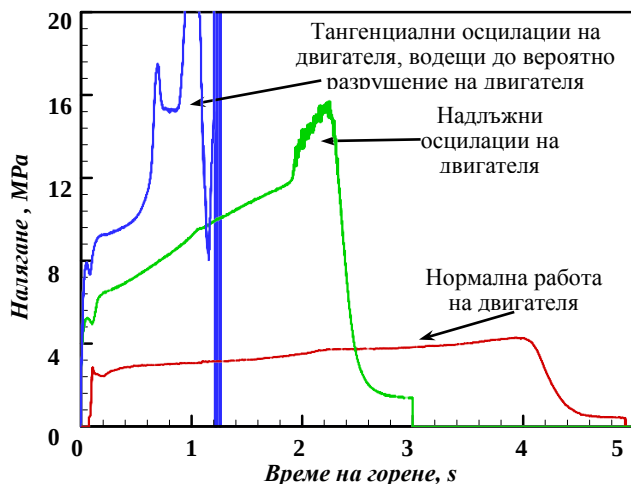
Пример за такива значителни осцилации и изместване на пика на максималното налягане във времето е показан на фиг. 3. При такива случаи, като показани на фиг.3, обикновено са налице сериозни повреди, щети и последващи разходи, както за нанесените щети, така и за ремонт и модернизация. Не са и изключение и случаите, когато такива системи остават в експлоатация при наличие на неразрушителни осцилации.

И докато от гл.т. на жизнения цикъл, във фазата на разработването, причините за нестабилността могат да се търсят и в инженерните разчети и са валидни за всички разработвани изделия, то във фазите на производството и експлоатацията, кривата на налягането може да бъде различна за различни изделия от партидата (фиг. 4).



Фиг.3. Критична нестабилност на горене на реактивен двигател (вариант)

Адаптирано по Blomshield F. S. [5]



Фиг. 4. Критична нестабилност на горене на реактивен двигател (вариант)

Адаптирано по Blomshield F. S. [5]

2. АНАЛИЗ НА ПРИЧИНИТЕ, ВОДЕЩИ ДО НЕСТАБИЛНОСТ НА ГОРЕНЕТО

Причините за нестабилното горене обикновено са с емпиричен характер, допълнени с изведени аналитични зависимости, там където е възможно. Независимо от направеното систематизиране по-долу, нестабилността на горенето рядко се дължи на само една причина.

2.1. Размери на частиците при смесевите горива

Съвременните твърдотопливни двигатели са реализирани на базата на смесиви горива (по английската систематизация – композитни горива). Най-разпространените са базирани на амониев перхлорат.

Като правило зависимостите между скоростта на горене, налягането и размерите на частиците, групирани заедно, се корелират трудно помежду си по отношение на нестабилността на горене.

Експериментално в [8, 9] е доказано, че наличието на голям брой много малки частици (с диаметър от порядъка на $1\mu\text{m}$) води до повишаване на налягането над разчетните стойности.

Наличието на големи размери на частиците амониев перхлорат (с диаметър превишаващ $200\mu\text{m}$) също води до нестабилност на горенето – повишаване на нелинейната акустична ерозионност [5].

Най-общо казано, ако средното налягане е по-високо, тенденцията е горенето на ракетния двигател да е нестабилно [9, 10, 11, 12], като и наличието на множество по-малки размери и наличието на множество големи частици амониев перхлорат, заедно или поотделно, може доведе до нестабилност на горенето.

2.2. Режим на потока

Вътрешната геометрия на ракетния двигател може да причини също нестабилност. Осцилациите обикновено са с амплитуда под 1% от максималната, като най-често се наблюдават при големите сегментни двигатели, в зоната на съединяване на отделните елементи. Честотите обикновено са ниски – под 50 Hz.

2.3. Ефект на частиците (горящи и инертни)

Ефектите на частиците са изследвани в продължителен период от време. Частиците на инертните материали, като Al_2O_3 , резултат от изгарянето на алуминиевия прах и стабилизаторите, като ZrC, причиняват т.нар. демпфериране. Изгарящите метални частици могат да доведат до нестабилност. При повечето състави, включващи такива частици, те горят много близо до повърхността и като правило не влияят на акустиката.

Частиците с малки размери са по-ефективни при високите честоти, докато тези с по-големи размери – при ниските честоти [13]. Линеаризацията на поведението им е невъзможна [11, 24], което означава, че дадена частица може да демпфира няколко акустични моди.

Акустичното затихване зависи от размера на частицата и вида ѝ (сферична форма, люспа или др.).

2.4. Ефекти вследствие на химическия състав

Химическият състав на барутните състави е от определящо значение за поведението на ракетните двигатели в процеса на горене. Доказано е, че при барутните състави, които са зависими от налягането при горене и по вероятно да се прояви нестабилност. Барутните състави, базирани на азотен пероксид, обикновено имат такъв тип пламък. Барутните състави, базирани на CL-20 и ADN окислителите имат по-малка чувствителност към налягането. НМХ базираните барутни състави нямат такива прояви и като правило са склонни по-малко към нестабилно горене в сравнение с тези базирани на азотен пероксид [15]. Пак в [15] е показано, че при CL-20 и ADN големината на частиците има много малък ефект върху скоростта на горене.

Освен това, колкото е по-висока е чувствителността към температурата, толкова е по-вероятно състава да е склонен към нестабилно горене.

2.5. Нелинейни ефекти

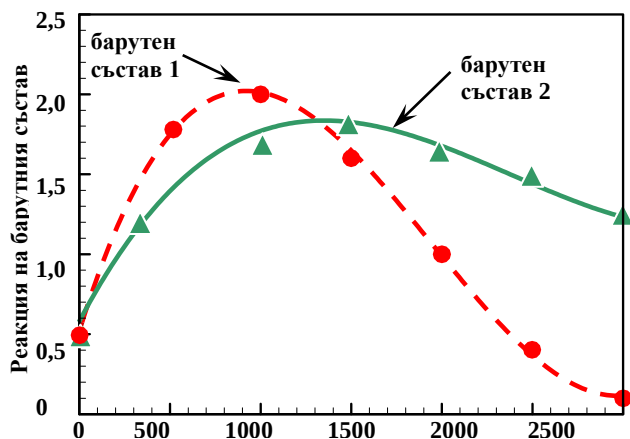
Изследванията на нелинейните ефекти са обект на множество експериментални изследвания и моделирания [11, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28]. Нелинейните ефекти зависят от конфигурацията на двигателя, скоростта на горене и стойностите на response function за честотните области. Този тип нестабилност често се предизвиква от частиците, преминаващи през среза на соплото, което кара двигателя да „пулсира“. Често, това е съпроводено и с преместване на максимума на налягането.

Нелинейната стабилност зависи от response на барутния състав в цялата честотна област, но нестабилността е доказано че се дължи на реакцията при по-високите хармоници [11, 16, 20, 29, 30].

Например на фиг. 5. барутен състав 1 има по-висок response peak в сравнение с барутен състав 2, който пък има response peak, който остава висок при нарастване на честотата. Барутен състав 1 би трябвало да бъде по-стабилен от барутен състав 2, който е по-податлив да усилва нелинейните височестотни вълни.

Пулсирането на ракетния двигател може да даде информация доколко стабилно е горенето.

Определени добавки могат да повишат стабилността на горене [11, 14, 24, 30] посредством намаляване на combustion response в определени честотни области. Фиг. 5, макар и илюстративна, показва как такава добавка понижава response при по-високите честоти.



Фиг. 5. Влияние на реакцията на барутния състав върху нелинейната стабилност (вариант)

Адаптирано по Blomshield F. S. [5]

За ранжиране на барутните състави по отношение на нелинейната нестабилност [32, 34] се използва следната зависимост:

$$(2) \quad \Pi = \frac{\alpha/f}{2R_{\infty}/P}, \text{ където}$$

α – is the linear growth rate of an oscillation;

f – is the frequency

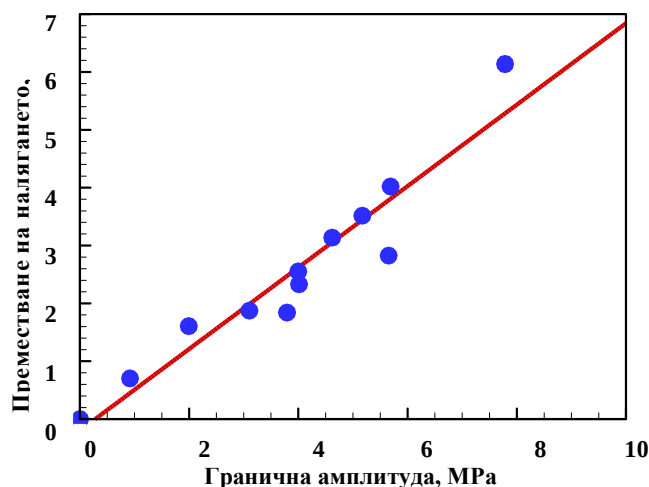
R_{∞} – is the limiting amplitude of an oscillation;

$\bar{P}$ – is the mean pressure.

Податливостта към нестабилност нараства с нарастването на налягането [11, 20, 24, 25, 30], като амплитудата на импулса, който може да приведе двигателя в нестабилно състояние е толкова по-малка, колкото е по-голяма стойността на налягането [11, 14, 20]. Обобщено, колкото е по-малка средната скорост на изтичане на продуктите,

толкова е по-вероятно двигателя да пулсира или да бъде доведен до нелинейна нестабилност [11, 20, 29, 30, 31].

Между преместването на максимума на налягането и лимитираната амплитуда на осцилациите при наличие на нелинейна нестабилност има зависимост [11, 20, 30] (фиг. 6).



Фиг. 6. Зависимост между преместването на налягането и граничната амплитуда

Адаптирано по Blomshield F. S. [5]

Такава зависимост може да се изведе за всички барутни състави, като наклона на линията на фиг. 6 зависи от параметрите на ракетния двигател и енергетичните характеристики на барутния състав.

Степента на затихване на колебанията не зависи от амплитудата [11, 14, 20, 30, 31], до степента до която тя не предизвиква нестабилност на горенето.

3. АНАЛИТИЧНИ ЗАВИСИМОСТИ

3.1. Честотен анализ

Честотният анализ на осцилациите позволява да се дефинират поведението на ракетния двигател.

3.1.1. Надлъжни моди

Най-характерната форма на нестабилност при двигателите с композитни барутни състави е свързана с наличието на надлъжни акустични вълни (вж. фиг. 1). За честотата на надлъжните моди се използва следното уравнение:

$$(3) \quad F_n = \frac{na}{2L}, \text{ където}$$

n – номер на акустичната мода;

a – действителната скорост на звука в кухината на двигателя (между ~ 900 m/s до ~ 1100 m/s за различните видове барутни състави), m/s;

L – дължина на камерата, m.

3.1.2. Напречни моди

Напречните акустични моди биват тангенциални и радиални осцилации (фиг. 1.) Тангенциалните са характерни за двукомпонентните барутни състави и са по-редки при тези съдържащи метални частици. Радиалните моди рядко се срещат при твърдотопливните двигатели, за сметка на течните. Като правило се проявяват или тангенциални или радиални осцилации, като едновременно им поява е рядкост. Тангенциалните моди са трудни за дефиниране, т.к. те ротира във вътрешността на двигателя. Наличието на различни конструктивни особености на двигателя, като прорези, могат да са причина тези моди да са статични. Честотният спектър на напречните моди показва намаляване на честотата с горенето, т.к. вътрешният диаметър става по-голям. Използва се следната модифицирана от [5] зависимост:

$$(4) \quad F_{\rho,\tau} = \frac{(\alpha_{\rho,\tau})a}{D}, \text{ където}$$

a – действителната скорост на звука в кухината на двигателя (между ~ 900 m/s до ~ 1100 m/s за различните видове барутни състави), m/s;

D – вътрешен диаметър в момента на нестабилност, m;

$\alpha_{\rho, \tau}$ – коефициент на модата (вж. Табл. 1.);

τ – номер на тангенциалната мода;

ρ – номер на радиалната мода.

Табл. 1. Стойности на коефициента $\alpha_{\rho, \tau}$ [5]

$\tau \backslash \rho$	0	1	2	3
0	0	1,220	2,233	3,238
1	0,586	1,697	2,714	3,726
2	0,972	2,135	3,173	4,192
3	1,337	2,551	3,611	4,643

3.1.3. Недименсионална честота Ω

Недименсионалната честота Ω често се използва за анализиране на натурата на нестабилността [4, 35, 36]. Тя се изчислява по следната зависимост [4]:

$$(5) \quad \Omega = \frac{2\pi \cdot f \cdot \eta}{\bar{r}^2}, \text{ където}$$

f – честота, ц/с;

η – топлинна дифузия (вж. Табл. 2.), in²/s;

$\bar{r}^2$ – скорост на горене, in/s.

Табл. 2. Стойности на η за различни барутни състави [5]

Основа на барутния	Стойност, in ² /s
РВАН AP	$2,64 \times 10^{-4}$
Полиуретан без Al	$1,82 \times 10^{-4}$
Чист AP	$3,45 \times 10^{-4}$
РВАН с 10% Al	$3,25 \times 10^{-4}$
Алуминизиран полиуретан	$2,80 \times 10^{-4}$
Алуминизиран НТРВ/РВАН	$1,60 \times 10^{-4}$

В израза (5) отношението $\eta/\bar{r}^2$ се среща в специализираната литература като характеристично време на топлинната вълна.

3.2. Осцилации на тягата вследствие на осцилациите на налягането

Веднъж възникнали, осцилациите на налягането влияят на тягата на двигателя. В действителност осцилациите на тягата ΔF почти винаги са по-тежки в сравнение с осцилациите на налягането ΔP .

Известни са две зависимости за оценка на ΔF .

Първата от тях е елементарна и недотам прецизна [5]:

$$(6) \quad \Delta F = 2A_C \Delta P, \text{ където}$$

A_C – напречно сечение на камерата;

ΔP – осцилации на налягането от пик до пик.

По прецизната зависимост е:

$$(7) \quad \Delta F = [F + P_A A_E - (\bar{P}_N + \bar{P}_H) A_C] \frac{\Delta P}{\bar{P}_N}, \text{ където}$$

A_E – сечение на соплото, m²;

A_C – сечение на камерата в момента на възникване на осцилацията, m²;

P_A – атмосферно налягане, МПа;

$\bar{P}_N$ – налягане в среза на соплото, МПа;

$\bar{P}_H$ – налягане в челната част, МПа.

3.3. Скорост на продуктите на горенето

Изчисляването на скоростта на горене става посредством апроксимационна зависимост, базирана на допускането, че

продуктите на горене се подчиняват на законите за идеалния газ:

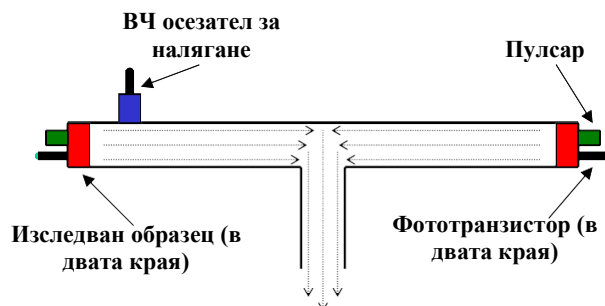
$$(8) \quad v = r_A \left(\frac{\rho_A}{\rho_0} \right), \text{ където}$$

ρ_A – плътност на барутния състав kg/m³.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АКУСТИЧНИТЕ ОСЦИЛАЦИИ

4.1. Експериментално изследване с Т-образна камера

Стандартизиран начин за изследване на процесите на горене е с помощта на Т-образна горивна камера (фиг. 7).



Фиг.7. Т-образна камера

Геометрията на Т-образната камера позволява да се изследват ефектите на акустични осцилации. Промяната на амплитудата на налягането се оценява с пиезоосезатели. Данните се получават посредством принудително пулсиране на барутния състав (ако е необходимо) в процеса на горене и след това.

Реакцията на барутния състав се изчислява посредством зависимостта:

$$(9) \quad R_{pc} = \frac{\alpha_c \bar{P}}{4 f a \rho_p \bar{r}_b \left(\frac{S_B}{S_C} \right)} \cdot \frac{a_m}{a}, \text{ където}$$

$\bar{P}$ – усредно налягане, МПа

f – честота, ц/с;

ρ_p – плътност на барутния състав, kg/m³;

$\bar{r}_b$ – измерена скорост на горене, m/s;

$\frac{S_B}{S_C}$ – съотношение на площите на горящата повърхност и канала;

$\frac{a_m}{a} = \frac{2 f L}{a}$ – съотношение на измерената и теоретичната скорост на звука;

L – дължина на Т-образната камера, m.

4.2. Експериментално изследване на акустичните осцилации в ракетни двигатели

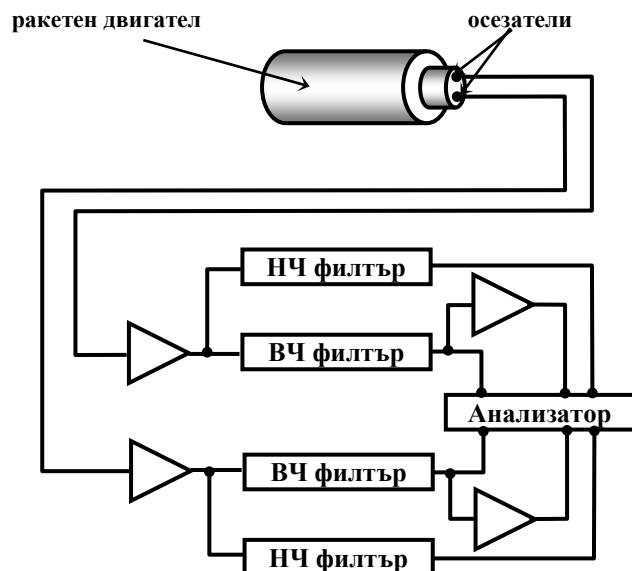
Тъй като експериментирането с Т-образната камера е свързано с определено идеализиране, е възможно да се получат известни отклонения при конструиране на реални двигатели. Поради това, често се предпочитат акустичните осцилации да се измерват директно върху проектиран двигател или негов мащабиран модел. В [30] са дадени описания на най-често използваната апаратура.

На фиг. 8 е предложен такъв вариант на опитна постановка, базиран на следните съображения:

1) Най-подходящото място за измерване на надлъжните моди са там където се локализируют анти-нодите на акустичното налягане.

2) Най-подходящото места за измерване на напречните моди са в зона на възникване на осцилациите с два осезателя – един на 0° и един на 120°.

3) Осезателите следва да са разположени максимално близо до камерата.



Фиг.8. Опитна постановка (вариант)

5. 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. Akhavan J., The chemistry of explosives, The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, Science Park, Milton Road, Cambridge CB4 0WF, UK 2004.
2. Генев Б. и др., Възможности за използване на радиационни методи за оценка на техническото състояние на твърдотопливни ракетни двигатели, XXIX Международна конференция "Дефектоскопия'11", 2014.
3. Williams L.M. et al., The study of crack criticality in solid rocket motors, Final report, Air Force Astronautics Lab, 1981.
4. De Luca L., Price E.W. and Summerfield M., Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants, Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 143, Published by the AIAA, Washington, DC, 1992.
5. Blomshield F. S., Lessons Learned In Solid Rocket Combustion Instability, Proceedings of the 2006 AIAA Missile Sciences Conference Held in Monterey, California on 14-16 November 2006.
6. Blomshield F.S., Historical Perspective of Combustion Instability in Motors: Case Studies, 37th AIAA Propulsion Conference, Paper No. 2001-3875, Salt Lake City, July 2001.
7. Brown R.S., Combustion Stability Of Interceptor Rocket Motors: A Practical Approach To Managing Instability Problems, CPTR 95-57, Chemical Propulsion Information Agency, 1995.
8. Crump J.E., Combustion Instability In Minimum Smoke Propellants, Part 1. Experimental Techniques and Results, NWC-TP-5936, Part 1, Naval Air Warfare Center, China Lake, 1977.
9. Rudy T.P. et. al., High Pressure Characterization, AFAL-TR-88-053, July 1988.
10. Blomshield .S. et. al., Stability Testing of Full-Scale Tactical Motors, AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 13. No. 3, pp. 349-355, May-June 1997.

11. Blomshield .S. et. al., Nonlinear Stability Testing of Full-Scale Tactical Motors, AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 13. No. 3, pp. 356-366, May-June 1997.
12. Crump J.E., Combustion Instability In Minimum Smoke Propellants, Part 1. Experimental Techniques and Results, NWC-TP-5936, Part 1, Naval Air Warfare Center, China Lake, 1977.
13. Kraeutle K.J. et. al., Combustion Instability Studies Using Metallized Solid Propellants: Additional Experimental Evidence for the Validity of Particle Damping Theory, 12th JANNAF Combustion Meeting, CPIA Publication No. 273, Vol. II, pp. 155-165, December 1975.
14. Blomshield F.S. and Beckstead M.W., Non-Linear Characteristics of Solid Propellant Combustion Instability, 29th JANNAF Combustion Meeting, CPIA Pub. 593, Vol. 4, pp. 197-207, NASA Langley, Virginia, October 1992.
15. Beckstead M.W., Potential Combustion and Combustion Instability Characteristics of CL-20 Propellants, 28th JANNAF Combustion Meeting, CPIA Publication 573, Vol. III, pp. 369-377, October 1991.
16. Culick F.E.C., Unsteady Motions in Combustion Chambers for Propulsion Systems, NATO Research and Technology Organization, RTO-AG-AVT-039, September 2006.
17. Flandro G.A., Energy Balance Analysis of Nonlinear Combustion Instability, Journal of Propulsion and Power, Vol. 1, No. 3, 1985, pp. 210-221.
18. Vuillot F. and Avalon G., Acoustic Boundary Layer in Large Solid Propellant Rocket Motors Using Navier-Stokes Equations, Journal of Propulsion and Power, Vol. 7, No. 2, 1991, pp. 231-239.
19. Flandro G.A., Effects of Vorticity on Rocket Combustion Stability, Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, No. 4, 1995, pp. 607-625.
20. Blomshield F.S., Pulsed Motor Firings, Chapter on Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics, edited by V. Yang, T. B. Brill, and W. Z. Ren, Vol. 185, AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics, Reston, VA, July 2000.
21. French, J.C. and Dunn, S.S., New Capabilities in Solid Rocket Motor Grain Design Modeling (SPP'02), 38th JANNAF Combustion Subcommittee, Destin, FL, 2002.
22. Coats, D.E., French, J.C., Dunn, S.S., Berker, D.R., Improvements to the Solid Performance Program (SPP), 39th AIAA Joint Propulsion Conference, Huntsville, AL, July 2003.
23. French, J.C., Non-Linear Combustion Stability Prediction of SRMs using SPP/SSP, 39th AIAA Joint Propulsion Conference, Huntsville, AL, July 2003.
24. Lovine R.L. and Micheli P.L., Non-Linear Stability for Tactical Motors: Volume I - Program Summary, AFRPL-TR-85-017, October 1985.
25. Micheli P.L., Non-Linear Stability for Tactical Motors: Volume II - Mechanism Study, AFRPL-TR-85-017, 1986.
26. French, J.C., Tangential Mode Instability of SRMs with Even and Odd Numbers of Slots, 38th AIAA Joint Propulsion Conference, paper 2002-3612, July 2002.
27. Baum J.D. and Levine J.N., Modeling of Non-Linear Combustion Instability in Solid Propellant Rocket Motors, AFRPL- TR-83-058, February 1984.
28. Micheli P.L. and Flandro G.A., Non-Linear Stability for Tactical Motors, Volume III - Analysis of Non-Linear Solid Propellant Combustion Instability, AFRPL-TR-85-017, February 1986.
29. Baum J.D., Levine J.N. and Lovine R.L., Pulsed Instabilities in Rocket Motors: A Comparison between Predictions and Experiments, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 4, No 4, 1988, pp. 308-316.
30. Blomshield F.S. et al., Stability Testing and Pulsing of Full Scale Tactical Motors, NAWCWPNS-TP-8060, Naval Air Warfare Center, Weapons Division, China Lake, CA, July 1992.
31. Lovine R.L., Non-Linear Stability for Tactical Motors: Volume IV - Pulsing Considerations, Parts 1 and 2, AFRPL-TR-84-017, August 1985.

32. Beckstead M.W. and Jensen R.C., Non-Linear Interpretation of Linear T-Burner Data, 9th JANNAF Combustion Meeting, Vol. I, pp. 239-247, September 1972.
33. Jensen R.C. and Beckstead M.W., Non-Linear Analysis of Combustion Instability Data, 10th JANNAF Combustion Meeting, CPIA Publication 243, Vol. II, pp. 163-177, December 1973.
34. Beckstead M.W., Non-Linear Mechanisms of Solid Propellant Combustion Instability, 24th JANNAF Combustion Meeting, CPIA Publication 476, Vol. I, pp. 27-40, October 1987.
35. Denison M.R. and Baum E., A simplified Model of Unstable Burning in Solid Propellants, *American Rocket Society Journal*, pp. 1112-1122, August 1961.
36. Culick F.E.C., A Review of Calculations for Unsteady Burning of a Solid Propellant, *AIAA Journal*, Vol. 6, Number 12, pp. 2241-2255, December 1968.



БЕЗРАЗРУШИТЕЛНО ИЗПИТВАНЕ НА СТОМАНЕНИ СЪТЛБОВЕ ОТ ПЪТНАТА ИНФРАСТРУКТУРА ЧРЕЗ НОРМАЛНИ УЛТРАЗВУКОВИ ВЪЛНИ

INSPECTION OF STEEL LAMP POSTS USING ULTRASONIC GUIDED WAVES

д-р инж. Стайков К., д-р инж. Ганчев Д.
Технически Университет – София, България,
e-mail: staikov@tu-sofia.bg, e-mail: ganchevdmyan@gmail.com

Abstract: The paper discusses the potential of guided waves for inspection of steel lamp posts using meander coil EMATs. Experiments are conducted in order to select suitable guided wave mode and inspection parameters. Detection capability and sensitivity of the method are established for the most common corrosion defects in lamp posts. Conclusions include advantages and limitations of the method. Guidelines for future work and further practical application of the method are made.

KEY WORDS: GUIDED WAVES, LAMP POST, LOCAL CORROSION, EMAT, MEDIUM RANGE, MEANDER COIL,

1. Увод

През последните години в национален и световен мащаб се наблюдава покачване на случаите на паднали стоманени стълбове за улично осветление и градски транспорт. Основна причина за това е корозията в следствие на влиянието на околната среда. Най-проблемен е участъкът от стълба, който се намира около и под земното равнище. Корозията (фиг. 1) предизвиква едновременно редукция на сечението на стълба в неговата основа и понижаване на физико-механичните му свойства. Този участък се явява концентратор на механични напрежения и в определен момент от живота си, при лоши метеорологични условия, стълба може да изгуби устойчивост, създавайки предпоставка за инциденти (фиг. 2). Най-често аварията са предизвикани от корозия в основата на стълба в напреднал стадий на развитие, която в някои случаи е причина за цялостна липса на метал в определени участъци.



Фиг. 1 Изтъняване на основата на стълб за улично осветление, вследствие на корозия

Повечето конвенционални методи за безразрушителен контрол за откриване и оценка на дефектните участъци изисква пряк достъп до проблемните зони. В конкретния случай приложението им е неефективно и икономически необосновано, тъй като се налага извършването на изкопни, ремонтни и др. допълнителни дейности, което е свързано със значителни разходи.



Фиг. 2 Паднал стълб на градски транспорт в гр. София, вследствие на корозия в основата му

Напоследък ултразвуковите нормални вълни се прилагат все по-широко за безразрушително изпитване на изделия с постоянно напречно сечение (изделия от листов материал, тръбопроводи, пръти и др.) и предимствата им са широко дискутирани [1,2]. Използването им за откриване и оценка на дефекти в подземната част на стоманените стълбове има голям потенциал, тъй като възбуждането на вълните ще се осъществява от надземната част на стълба, което елиминира нуждата от извършване на допълнителни операции за осъществяване на достъп до дефектните зони.

Съществуват различни начини за възбуждане и приемане на нормални вълни. Единият от тях е чрез електромагнитни преобразуватели. Електромагнитното безконтактно възбуждане и приемане на нормалните вълни дава няколко допълнителни преимущества на метода в технологичен аспект. Най-значимото е, че при него не се налага използването на свързваща среда. Свързващата среда, обикновено грес или специални гелове, осигурява акустичен контакт между излъчвателя/приемника и контролираното изделие. Контактните среди, които се използват в традиционния ултразвуков безразрушителен контрол са консуматив и процеса на нанасяне и последващо почистване отнема значителен времеви и финансов ресурс. Безконтактната технология води до висока прецизност и повторемост на резултатите и понижаване на субективния фактор в процеса на изпитване. Освен това липсата на акустичен контакт прави

методиката подходяща за контрол на изделия с по-груба и корозирала повърхност, както и на изделия, върху които са нанесени покрития, както обикновено е случая при по-голямата част от стълбовете от пътната инфраструктура [2-4].

В статията са представени първоначални експериментални изследвания върху приложимостта на нормалните вълни с използване на електромагнитно възбуждане за контрол на подземните участъци на стълбове за улично осветление и градски транспорт.

2. Използвани образци, апаратура и експериментална методика

Използваната конфигурация на ЕМАТ за възбуждане на нормални и повърхностни вълни се състои от постоянен магнит и намотка с определен брой навивки. Посредством намотката в изделието се индуцират вихрови токове, които при взаимодействието си със статичното магнитно поле образуват движеща сила, която се преобразува в акустични вълни. Дължината на вълната на дадена мода на нормалните вълни се определя от разстоянието между пистите на намотката, като по този начин се ограничава възбуждането на други моди при определена честота. При по-дебели изделия с тази конфигурация могат да се възбуждат повърхностни вълни [4].

При изследванията е използвана апаратура състояща се от:

- Електромагнитен преобразувател за възбуждане и приемане на нормални вълни;
- Ролков скенер, снабден с механичен енкодер (позволява периферно сканиране на стълба);
- Мобилен ултразвуков дефектоскоп.



Фиг. 3 Електромагнитен преобразувател, монтиран върху ролков скенер с енкодер

Електромагнитният преобразувател е монтиран на ролковия скенер, което позволява едновременно надлъжно и по периферията сканиране на тръби (фиг. 3). Чрез него могат да се записват ултразвукови А-изображения през 0.25 mm от обиколката на тръбата. Софтуерът на дефектоскопа конвертира записаните А-изображения в Б-изображение, които 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 с DAC-криви, А- и Б- 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.

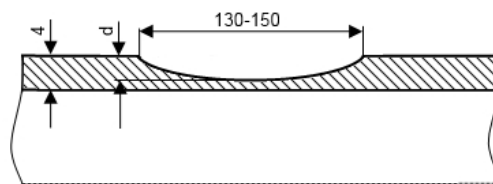
За изследване на надеждността и чувствителността на метода са използвани два експериментални образца, които представляват шевни стоманени тръби с диаметър 133 mm, номинална дебелина на стената 4 mm и дължина 1 m. Геометрията на образците е същата, като на част от проблемните стълбове в България. В образец 1 е изработен изкуствен отражател, наподобяващ клъстер от локални корозионни язви. Изкуствения дефект представлява

конфигурация от 7 конусни отвора със средна дълбочина 45% от дебелината (1.8 mm), изработени със стандартно свредло с ъгъл на върха 120° (фиг. 4).

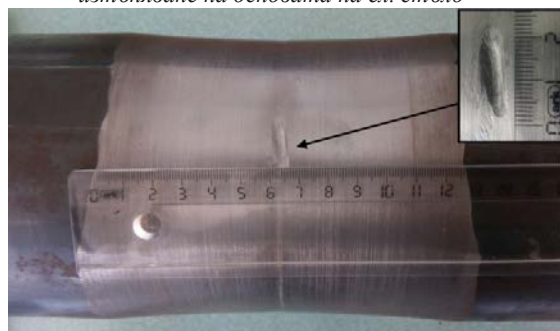


Фиг. 4 Изкуствена локална корозия (Corrosion Pit Cluster) в образец 1

В образец 2, посредством универсален струг е изработен изкуствен дефект, който имитира изтъняване на основата на ел. стълб, вследствие на корозия (фиг. 5). Дефектът представлява зона от тръбата с редуциран външен диаметър. Средната дължина на зоната е 140 mm, а профилът на редуцията има седловидна форма. Поради отклоненията от кръглост на образца, след процеса на струговане дълбочината на дефекта варира от 2.6 mm до 3.7 mm. Като цяло, вследствие на елипсовидната форма на профила на тръбата са се обособили две по-дълбоки и две по-плитки зони разположени на 90° диаметрално едни от други. При анализа на резултатите трябва също да се вземе предвид пластичната деформация на метала, която се получава в процеса на струговане т.е. сбора от дълбочината на дефекта и дебелината на остатъчния метал в централната част на дефекта е по-голяма от дебелината на тръбата в бездефектен участък.



Фиг. 5 Образец с изкуствен дефект, който имитира изтъняване на основата на ел. стълб



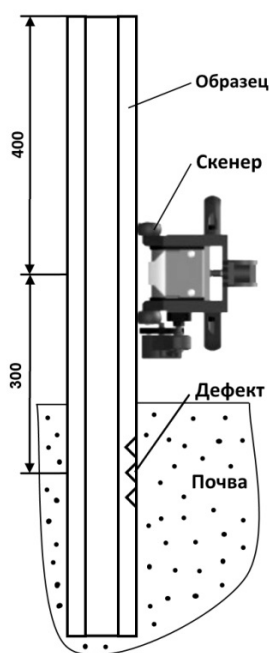
Фиг. 6 Участък от образец 2, имитиращ обща корозия в комбинация с изкуствена локална корозия

В дефектната част на образец 2 в зона с максимална дълбочина 2.8 mm посредством абразивен инструмент е изработен допълнителен дефект, имитиращ локална корозия. Конфигурацията му е видима на фигура 6, а максималната му дълбочина е 1.5 mm.

Бяха проведени предварителни изследвания за избор на подходяща мода на нормалните вълни и честота на възбуждане. При избора бяха взети е предвид следните фактори:

- степента на дисперсия на модата;
- коефициента на затихване и влиянието и от заобикалящата среда;
- чувствителността към очакваните типове несъвършенства;
- отсъствие на сигнали, свързани с възбуждането на други моди на нормалните вълни.

Най-надеждни резултати се получават при използване на мода A0 на нормалните вълни при честота 425 kHz. Нейните преимущества са подробно дискутирани в [5].



Фиг. 7 Схема на опитната постановка

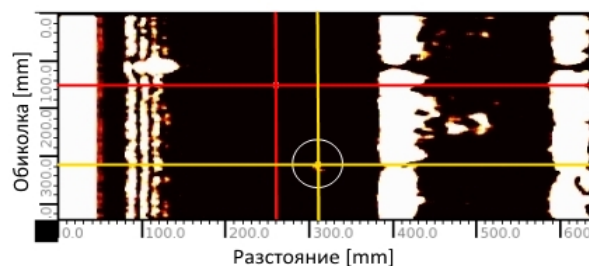
Двата образца са сканирани, като разстоянието между преобразувателя и центъра на дефектните зони е фиксирано на 300 mm. За всеки образец, е записано В-изображение. Ординатата на В-изображението представлява обиколката на тръбата, а абсцисата е разстоянието по дължина на тръбата. В-изображението е конструирано, като енкодерът на скенера е настроен да записва А-изображения през 0.25 mm от обиколката на тръбата. Направени са допълнителни настройки на цветовото кодиране на амплитудата с цел постигане на по-добър контраст на В-изображението. За съпоставимост на резултатите, двете В-изображения за записани при еднакво усилване на апаратурата. В следствие от В-изображенията са извлечени А-изображения в зоните, които представляват интерес. Схема на експерименталната постановка е представена на фиг.7.

5. Резултати и дискусия

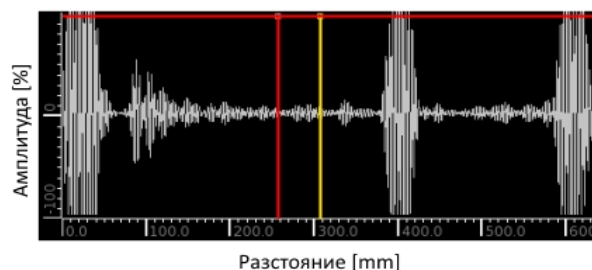
На фиг. 8 е представено В-изображение, получено при сканиране на образец 1. Индикацията от несъвършенството е видима на В-изображението при разстояние от 310 mm от преобразувателя и на 310 mm от началото на сканирането по обиколката на образца. Тя е отбелязана с жълт маркер. От

полученото А-изображение може да се отчете, че индикацията от изкуствения отражател надвишава нивото на шумовете с около 12 dB (фиг. 10), което е напълно достатъчно за надеждно регистриране. За сравнение на фиг. 9 е представено А-изображение от бездефектен участък на образца (червен маркер). При разстояние 400 mm и 600 mm се наблюдават индикации от двата срещуположни края на тръбата. Това се дължи на факта, че този тип електромагнитни преобразуватели възбуждат нормалните вълни в двете срещуположни посоки едновременно, което до известна степен затруднява интерпретацията на получените индикации.

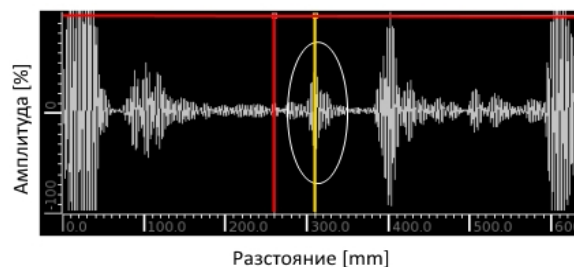
При разстояние 100 mm от началото на сканирането, на В-изображението се вижда, че амплитудата на повечето сигнали е понижена, тъй като там се намира заваръчният шев на тръбата. Поради различната му дебелина, в него не могат да се откриват надеждно дефекти с този метод. Това обаче не влияе върху практическото използване, защото липсата на информация само в тази зона (около 5 mm от обиколката на тръбата) не изкривява общата оценка за наличие или отсъствие на корозия. Зоната на влияние на началния импулс е около 150 mm. В тази зона също не могат да се регистрират и оценят надеждно индикации от дефекти, но се предполага, че преобразувателят се позиционира на по-голямо разстояние от участъците в които те се очакват.



Фиг.8 В-изображение, получено при сканиране на образец 1



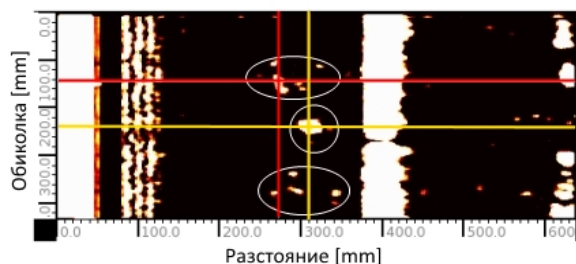
Фиг.9 А-изображение, получено при пролъчване на бездефектен участък от образец 1



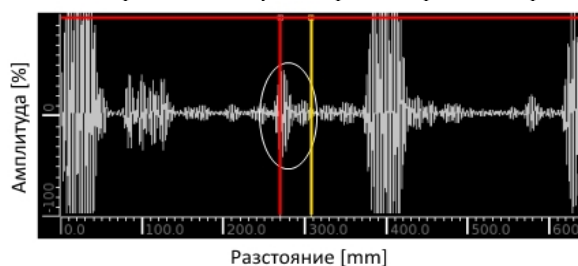
Фиг.10 А-изображение, получено при пролъчване на изкуствена локална корозия в образец 1

На фиг. 11 е представено В-изображение, получено при сканиране на образец 2. При разстояние 140 mm (отбелязано с червен маркер) и 360 mm от началото на сканирането се наблюдават зоните от изкуственото изтъняване, в които максималната му дълбочина надвишава 3.5 mm. Отраженията от тези зони се регистрират при разстояние от преобразувателя от 280 mm. От получените А-изображения може да се отчете, че индикациите от тези зони надвишават с 14 dB нивото на

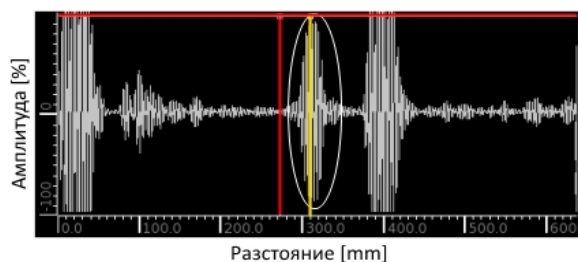
електронните и структурни шумове (фиг. 12). При разстояние 240 mm (отбелязано с жълт маркер), на Б-изображението се наблюдава индикация от изтъняването с максимална дълбочина 2.6 mm в комбинация с локална корозия. Тази индикация има най-висока амплитуда от всички останали изкуствени дефекти в двата изследвани образца (фиг. 13). Амплитудата и надвишава нивото на шумовете с 19 dB.



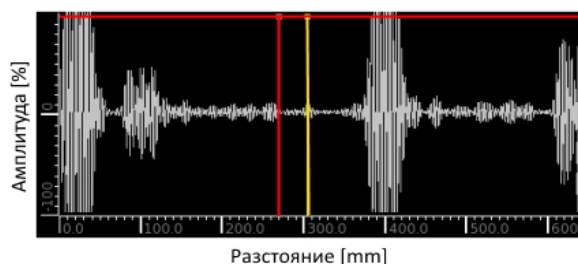
Фиг. 11 Б-изображение, получено при сканиране на образец 1



Фиг. 12 А-изображение, получено при пролъчване на изтъняване с максимална дълбочина 3.7 mm



Фиг. 13 А-изображение, получено при пролъчване на изтъняване с максимална дълбочина 2.6 mm в комбинация с локална корозия



Фиг. 14 А-изображение, получено при пролъчване на изтъняване с максимална дълбочина 2.6 mm

На фиг. 14 е представено А-изображение, получено при пролъчване на изтъняване с максимална дълбочина 2.6 mm. Индикацията от дефекта е съизмерима с нивото на шумовете и не може да бъде надеждно регистрирана. Тук трябва обаче да се вземе предвид, че профилът на този изкуствен отражател има идеалната форма и липсата на резки промени в дебелината и засечки в комбинация с малка дълбочина водят до понижено отражение на вълните. При реални обекти, където върху зоната на изтъняване има допълнителни язви от корозия този дефект може да бъде регистриран надеждно.

6. Заключение

От получените първоначални експериментални резултати върху приложимостта на нормалните вълни за откриване, локализиране и оценка на корозия в стълбове за улично осветление и градски транспорт чрез използване на електромагнитни акустични преобразуватели може да се заключи, че методът притежава добра чувствителност към повърхностни отражатели, имитиращи различни типове корозия. Освен това, характерът на разпространение на нормалните вълните в комбинация с съвременните софтуерни и хардуерни решения в тази област водят до висока производителност и ефективност на метода. Електромагнитното безконтактно възбуждане на вълните допълнително гарантира висока прецизност на резултатите и понижаване на субективния фактор в процеса на изпитване. Контрола на стълбовете с тази методика не е свързан с използването на допълнителни консумативи. След калибриране на апаратурата, се очаква контролът на един стълб и обработката на резултатите да отнема до 4-5 минути, в зависимост от квалификацията на оператора.

Съществуват някои известни вече ограничения на метода, породени основно от технологията за производство на тръби или различните техники използвани за монтаж на стълбовете. Например, големи отклонения от номиналната дебелина на стената на тръбата или обща корозия в напреднал стадий ще доведат до понижена чувствителност на метода. Същото важи и за големи разлики в магнитните свойства на метала по периферията на стълба, което се наблюдава при някои технологии за производство на безшевни тръби. Съществуват също някои случаи, при които капакът на стълба е разположен прекалено близко до земното равнище и мястото е недостатъчно за поставяне на сенсера.

Като следващ етап в процеса на развитие на метода се предвижда провеждане на експерименти с образци с друга геометрия, както и експерименти с образци с естествени дефекти. Това ще доведе до квалификация, валидиране и атестация на метода за контрол на стоманените стълбове от пътната инфраструктура и до изготвяне на документирана процедура за изпитване.

7. Литература

- [1] Rose, J. L., A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 124, 273-282, 2002
- [2] Salzburger H.J., F. Niese, G. Dobmann, EMAT pipe inspection with guided waves, Welding in the World 56, 2012
- [3] Ribichini, R. 'Modeling Of Electromagnetic Acoustic Transducers', PhD thesis, Mechanical Engineering Department, Imperial College London, 2011
- [4] Стайков К., Изследване на отражението на мода S1 на нормални вълни при електромагнитно акустично възбуждане, Научни извести на НТСМ, Година XXII, Брой 1 (150), 2014
- [5] Стайков К., Неразрушаващ контрол на стоманени листове с вълни на Ламб, Дисертация, Технически университет - София, София, 2012

CIRCULAR PISTON TRANSDUCER TEST TANK DIRECTIVITY PATTERN MEASUREMENT

ИЗМЕРВАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКАТА НА НАСОЧЕНОСТ НА БУТАЛЕН ЕЛЕКТРОАКУСТИЧЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ В ХИДРОАКУСТИЧЕН БАСЕЙН

Assoc. professor N. Zh. KOLEV, Instructor P. V. IVANOV
NIKOLA VAPTSAROV NAVAL ACADEMY, VARNA.

nzkolev@abv.bg

ivanov5ar@abv.bg

Abstract

In this paper investigation of the pulse method for far field transducer directivity pressure pattern test tank measurement is presented. Methodology, experimental setup and comparison between theoretical and experimental results are given for frequency 30 KHz

Keywords: sonar transducer, directivity pattern, test tank pulse electroacoustic measurements.

1. INTRODUCTION

The directivity pattern of a sonar transducer can be measured in a free from reflections isotropic and uniform underwater space. Several approaches can be used for underwater electroacoustic measurements according to Bobber [1]. They fall in the general category of free-field far-field measurements recommended by the theory. Facilities to ensure this kind of measurements are of various kinds-piers, bridges, barges, or other semi mobile floating structures, and boats or ships. Even this facilities however are far from ideal in providing the conditions assumed by the theory. A true free field or a uniform boundless medium is only an Idealized concept in this case. Even in relatively big facilities there are surface and bottom boundaries contributing reflections, influenced by meteorology changes in the temperature and water boundaries thus preventing accurate measurements and introducing errors in real transducer directivity pattern. Artificial pools and indoor tanks are used also, but they usually require pulsed sound measurement techniques. The basic requirements are (1) enough space so that interference from boundary reflections can be eliminated by pulsing techniques, anechoic boundaries, or spreading losses due to long distances, (2) a low ambient noise level, and (3) a water medium that is relatively free of anything that will cause refraction and scattering, like currents, temperature gradients, marine life, bubbles, and pollutants. A more satisfactory method of eliminating the effects of reflected waves in measurements is by the use of pulses. Instead of a steady constant waveform (CW) signal, a pulse corresponding to a sinusoidal CW signal of finite duration is emitted. This pulse reaches the receiver by the direct path before the reflected pulses arrive. If the response of the transducer can be measured in the interval before their arrival, their effect is entirely eliminated. Usually measurements of this kind are made in test tanks which ensures also controllable environment. The sonar laboratory, developed at the Naval Academy under national science fund infrastructure project is suitable for transducer pattern measurements using the pulse method [2].



Fig.1 Naval Academy underwater acoustic laboratory.

2. METHODOLOGY AND REQUIREMENTS FOR TEST TANK PULSE MEASUREMENTS

The proposed measurement system – fig. 1 consists of an arbitrary function generator NI PXI-5402, power amplifier B&K 2713, transducer under test, receiving hydrophone 8100, two channel preamplifier B&K2692 with digital RS-232 control and flexible two channel digitizer NI PXI 5922. It offers generation of underwater sound pulses with given time width and two channel synchronous sampling. One of the channels is configured as a reference for the other one.

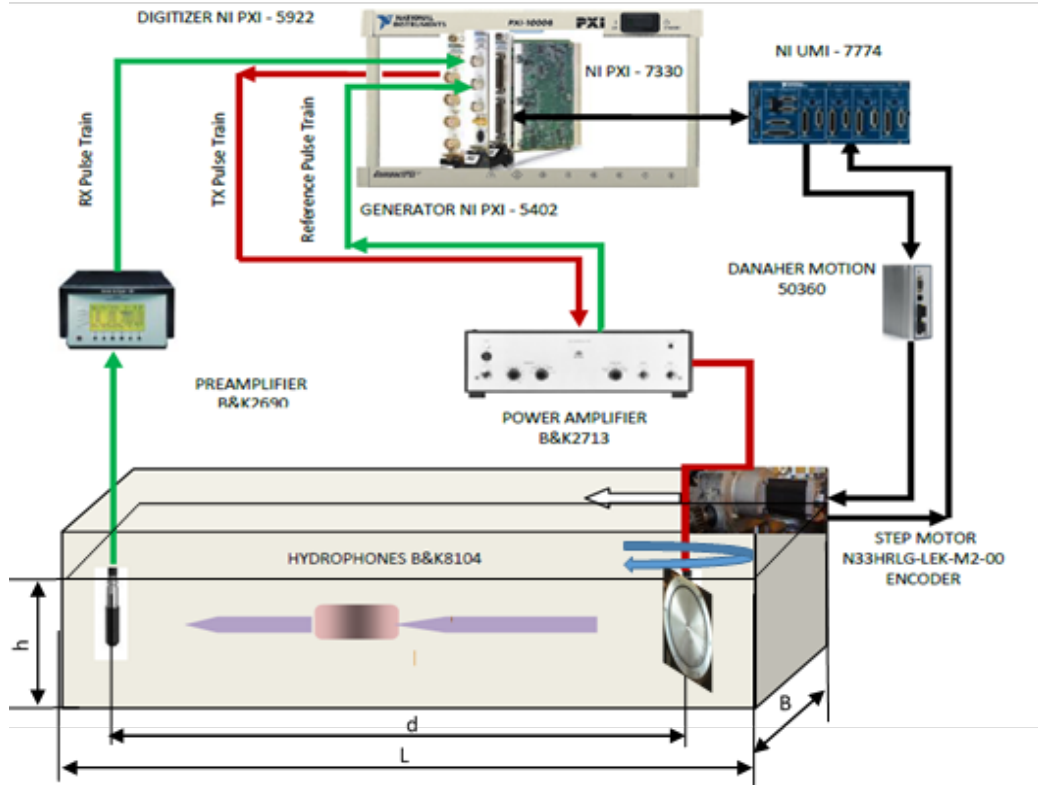
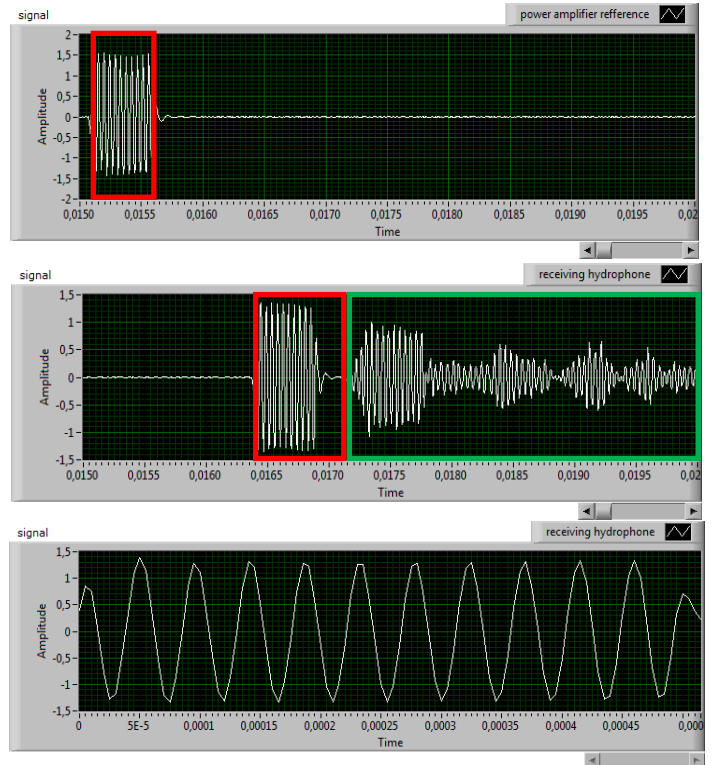


Fig. 2. Functional diagram of test tank directivity pattern measurement setup.

The test tank and stepper motor positioning system have horizontal plane positioning accuracy along the axis X and Y – 1 mm and angular resolution of the rotation around the vertical axis Z – 1° is a prerequisite for the rotation of the transducer and its accurate directivity measurements.

An electroacoustic transducer (projector) is driven with a pulse or short burst CW signal. The transmitter and receiver are controlled so that an acoustic signal will be measured only during the short period (gate) of time when the direct projector-to-hydrophone signal pulse impinges on the hydrophone. Pulses arriving prior to this time (like cable crosstalk) and pulses arriving after this time (like reflections from boundaries) are rejected by the receiving system. This “gating” process is necessary for adequate pulse measurements. In order to have adequate experimental results it is necessary to do the pulse measurements in a free from reverberation and far for the electroacoustic transducer zone (where the sound wave front is assumed flat in the place of the receiver). The transducer and the measurement hydrophone are situated in the test tank measurement volume. The parameters of measurement positions of the transducer and hydrophone according to the test tank boundaries and level of water are as follows: depth – h and distance – d. The size of the limiting volume boundaries are: - length L and width B – Fig. 2. The time elapsing between the arrival of the direct and reflected signals is a function of the size and shape of the test tank. In order to have measurements in a time interval free from reflections the direct pulse with width ϕ - should arrive at the receiving hydrophone before the reflected pulses from the test tank surface boundaries – fig. 3. The restrictions are defined with the following inequalities following from simple geometry relations:

$$(1) \quad \tau \leq \frac{2d}{c} \quad - \text{mutual reflections between transducer and receiving hydrophone;}$$



- ▭ **Time window of free from reverberation test tank measurement zone**
- ▭ **Time window of the test tank reverberation**

Fig. 3. Test tank pulse gating measurement principle with real signals.

$$(2) \quad \tau \leq \frac{L-d}{c} \quad - \text{reflections from the test tank walls;}$$

$$(3) \quad \tau \leq \frac{\sqrt{h^2 + d^2} - d}{c} \quad - \text{ reflections from the water surface.}$$

For the actual dimensions of the naval academy test tank and working positions of the transducer and hydrophone in the measurement volume a maximum pulse width is calculated to be 1-2 mS.

There is limitation however not only for the maximum pulse width to escape from reverberation and reflections but also for the minimum pulse width.

When a sinusoidal signal is applied to any electrical circuit containing inductances or capacitances or both, steady values of the currents and voltages are not immediately attained. At first there are present, in addition to the steady-state voltages and currents, transient voltages and currents which gradually die out with time. The time required for the transient essentially to disappear is known as the time constant of the circuit. For simple resonant circuits it is convenient to introduce a quantity Q - the quality factor of the electromechanical system of the transducer:

$$(4) \quad Q = \frac{2\pi f_0 L}{R}, \text{ where } f_0 \text{ is the resonant frequency, } L \text{ is inductance (equivalent mass) and } R \text{ is the resistance (damping constant).}$$

Q essentially measures the number of cycles at resonance required for the transient to die. In fact the time constant of the transducer:

$$(5) \quad \tau' = \frac{2L}{R}.$$

The pulse width or duration must be long enough for a steady-state condition of oscillation of the transducer. The practical criterion for this transient period is that it consists of at least Q cycles T or

$$(6) \quad \tau > QT = \frac{Q}{f_0} = \frac{\pi 2L}{R} = \pi \tau'.$$

It is well known that for far field measurements the distance between transducer and receiving hydrophone should be

$$(7) \quad d \geq \frac{a^2}{\lambda}, \text{ where } a \text{ is the maximum dimension of the transducer (diameter) and } \lambda \text{ is the wavelength.}$$

The requirement for a minimal pulse width linked with the quality factor limits the minimal frequency of transducer pattern measurement. One consideration to be taken into account during measurement is that the pulse repetition period (time) of the pulse train should be greater than the measured test tank reverberation time.

3. CIRCULAR PISTON RADIATION PATTERN MEASUREMENT

The sound pressure of a circular transducer with uniform normal velocity (called a circular piston because of the uniform velocity) in the far field is given with the following expression in cylindrical coordinates [3]:

$$(8) \quad p(r, \theta) = j\rho c k u_0 a^2 \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta},$$

where J_1 is Bessel function of first order, u is the normal speed of the transducer diaphragm, $\rho.c$ is the water impedance, k is the wave number and a is the radius of the transducer. The directivity pattern function of a circular transducer in the far field is given by the Bessel function of first order in (8):

$$(9) \quad b(\theta) = \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta}$$

It must be pointed out that this expression is valid for circular piston vibration in an infinite baffle under constant harmonic mechanical excitation. This is also analytical approximation of the far field acoustical pressure field or for very small vibration displacements of the flat transducer surface. It can be expected that the measured radiated pressure field of a real transducer will be approximated by this function. For the experiments piezoelectric circular piston shown on fig. 4 is used.



Fig. 4. Piezoelectric circular piston with diameter of the diaphragm 98 mm.

LabVIEW virtual instruments are designed for pulse signals generation, recording and rotary motion control of the transducer. A LabVIEW virtual instrument for motion control including a SubVI for pulse generation and sampling the analog signal at the output of the preamplifier is presented on the figure 5.

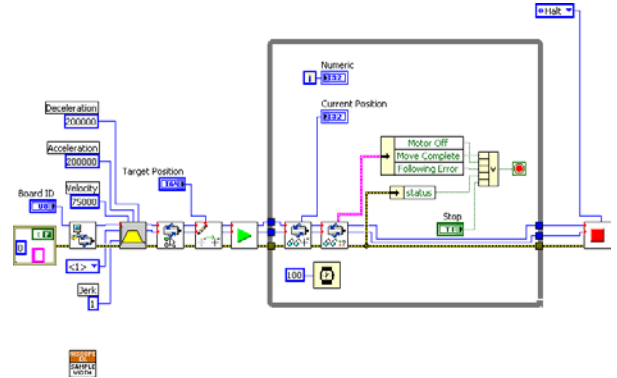


Fig. 5. A LabVIEW virtual instrument for motion control, including a SubVI for pulse generation and sampling.

Pulse train signals with frequency 30 KHz, width 2 mS, pulse repetition period 50 mS, transmitted through the water and recorded at the output of the receiving hydrophone are shown on fig. 6. The one-tenth of the reference (transmitted) pulse train (red) is sampled at the control output of power amplifier 2710.

The recorded pulse train was preprocessed and measured in LabVIEW and exported in MS Excel where the final pattern was obtained. The measured pressure pattern is shown on fig. 7. Comparison of the normalized measured pressure pattern and theory pattern of the piston transducer, according to expression 9, are shown on fig.8. The received RMS pressure field was measured only for direct signal in time window 0.5 mS from the initial direct pulse front to escape from any reverberation.

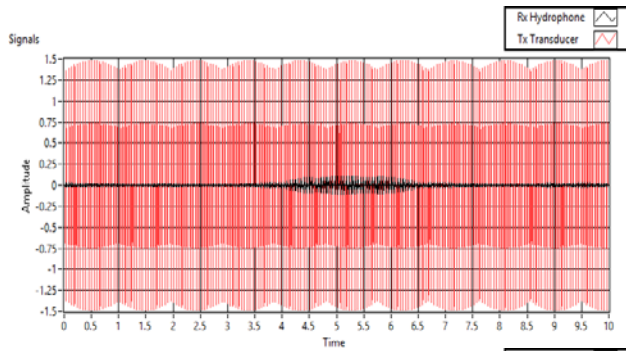


Fig 6 (a)

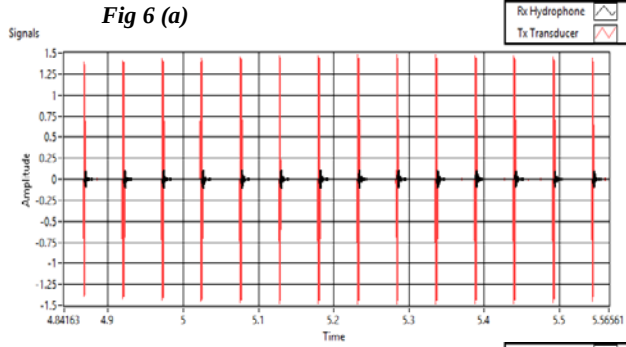


Fig 6 (b)

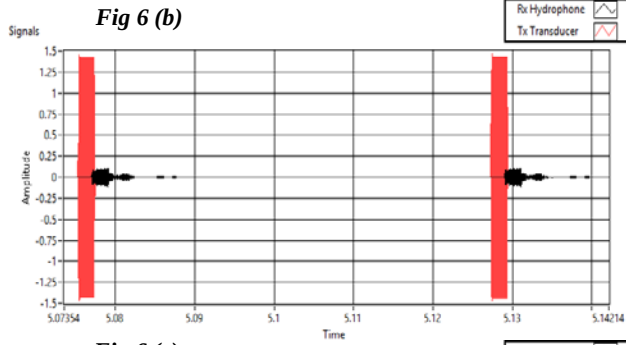


Fig 6 (c)

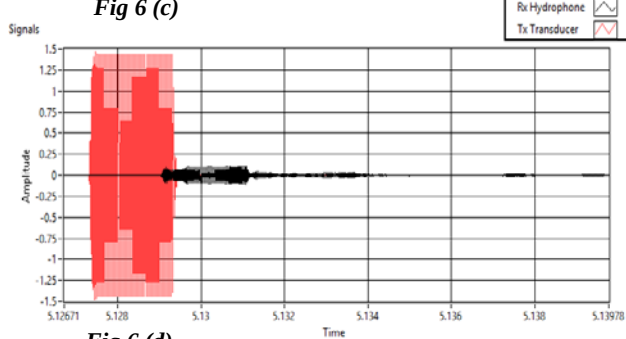


Fig 6 (d)

Fig.6. Transmitted and received pulse train at frequency 30 KHz in 10s total time interval of full transducer rotation on 360° in 4 different time scales: Fig. 6(a) to Fig. 6(c).

4. CONCLUSION

In this application an analysis of the advantages of the pulse method and its implementation for test tank transducer pressure directivity pattern measurement are made. The pulse method is applicable for test tank transducer pattern measurement for relatively high ultrasound frequencies and pulses with enough length. An experimental setup and initial results for 30 KHz piston transducer pressure pattern are presented. Similarity between far field theory pressure pattern and experimentally measured pressure in the main beam is obvious. The following conclusions can be drawn from the analysis of the experimental results:

1. Some defocusing of the directivity pressure pattern is seen estimated to be from:
 - transducer phase center displacement from the axis of rotation – 120 mm;
 - unstationary impulsive pressure field, sampled during constant rotation of the transducer;

- spread of the spectrum of the CW signal fed to the transducer due to pulse width.

2. On the basis of the test tank pulse measurement setup a detailed methodology can be developed not only for transducer directivity pattern but also for its transmitting and receiving sensitivity and impedance measurement as a function of frequency.

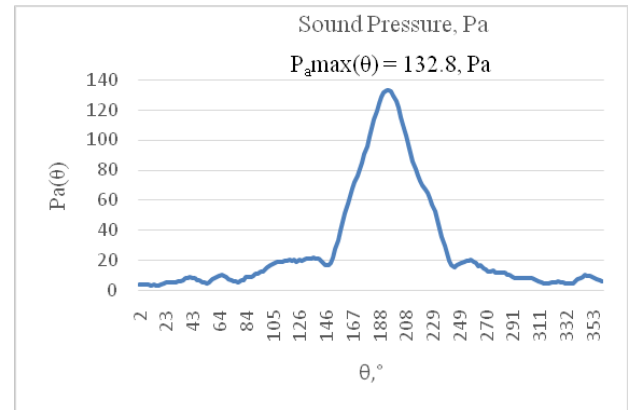


Fig.7. Test tank piston transducer pressure pattern at frequency 30 KHz.

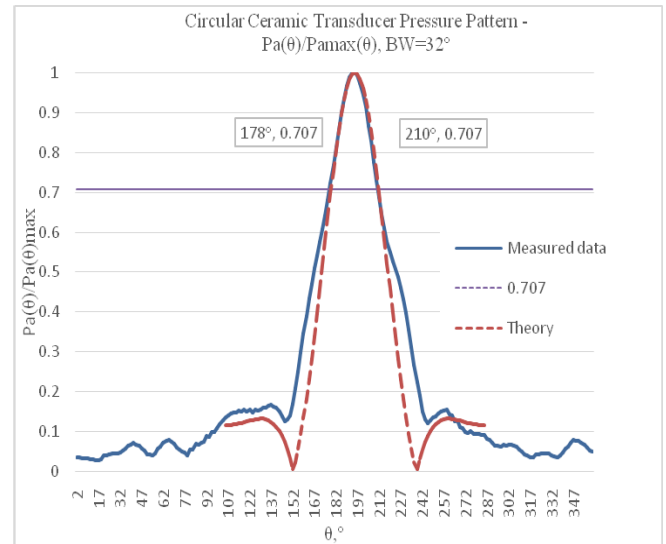


Fig.8. Comparison of the normalized measured pressure directivity pattern and theory pattern – expression (9), of the piston transducer at frequency 30 KHz.

5. REFERENCES

- [1]. Bobber R. J. Underwater Electroacoustic Measurements, Naval Research Laboratory, Washington D.C., July 1970.
- [2]. Kolev N., Ivanov P., Iliev I., An investigation of the pulse method for hydro-acoustic measurements and Naval Academy test tank performance estimation. National Conference Acoustics 2010, Conference Proceedings pp. 10-18, ISSN 1312-4897.
- [3]. Sherman C., Butler J., Transducers and Arrays for Underwater Sound, Springer, 2007, ISBN-10: 0-387-32940-4.

ВИБРО-АКУСТИЧЕСКА ДИАГНОСТИКА НА КЛАПАНИ ОТ ДВИГАТЕЛИ С ВЪТРЕШНО ГОРЕНЕ – ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТТА ПРИ ДИАГНОСТИКА

ВИБРО-АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КЛАПАНОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ - ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫСИТЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ В ДИАГНОСТИКЕ

VIBRO-ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF VALVES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES - OPPORTUNITY TO IMPROVE SENSITIVITY IN DIAGNOSIS

доц.д-р инж. Иван Коларов
катедра „Машинни елементи, материалознание и химия”,
Висше транспортно училище „Тодор Каблешков” – София, България

Abstract: The possibility of improving the sensitivity of the vibro - acoustic method for characterization of surface discontinuity in valves of internal combustion engines is discussed in this paper. Real samples of valves are studied. Artificial discontinuities are made in some of them and theoretical and experimental research has been implemented.

The results obtained indicate: surface discontinuity depth 0.4 - 0.5 mm can be characterized when the discretization frequency of the analog signal is about 3 Hz; if the discretization frequency is decreased to 1 – 1.5 Hz the characterization of the method increases to 0.1 – 0.2 mm. This capability is achieved by research of transverse mode. Assurance as to results can be increase by analyzing the frequency of more than one transverse mode.

Some signals caused by the excitation of longitudinal modes can appear on the spectrogram next to 4 and 5 transverse mode and gross errors be done. So, when these mode are used, it should be specified the origin of the signals.

KEY WORDS: *DIAGNOSTICS OF SURFACE DISCONTINUITY IN VALVES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES*

1. Въведение

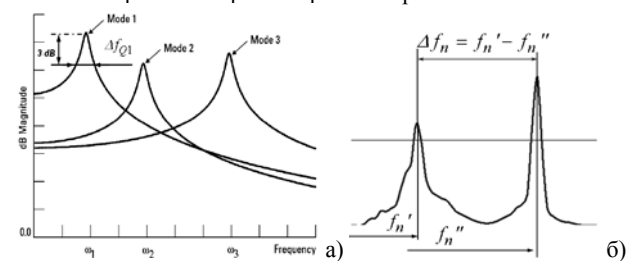
Клапаните са отговорни машинни елементи и са подложени на тежки механични и термични натоварвания. Типични технологични процеси за производство на клапани са рязане, пластично деформиране, запълване (на кухи участъци), фрикционно заваряване, нормализиране на структурата, рязане на метала, повърхностна обработка, шлифоване, контрол [1]. В процеса на производство са налице случайни смущения, свързани с химичния състав на материалите и техните повърхнини, измерване на геометричните размери и настройка на машините за обработка, в т.ч. и на режимите на заваряване. Допълнително, при фрикционно заваряване на съставни клапани са възможни нецялостности в резултат на частично свързване на двете части по общата им повърхнина на междумолекулно ниво [2, 3].

Клапаните се диагностират с често използваните в практиката безразрушителни методи [4], като за минимална дълбочина на нецялостност чрез вибро-акустическия метод е определена 1 mm, а методът е охарактеризиран като малко надежден. Показателно за актуалността на проблема е показаната в [5] разработка на фирмата Resonic за оценка на нецялостности в клапани чрез магнитно-акустически метод, реализиран в честотната област на 7 MHz. Повърхността на клапаните се изследва в тясна зона чрез ръчни манипулации на специализирана уредба. Не са публикувани данни за минималния размер на регистрираната нецялостност.

В научната литература са налице високо-технологични опитни уредби за вибро-акустически измервания, като измерване на вибрациите на машинните елементи чрез лазер, които трудно могат да намерят приложение в

производството поради финансови, технологични и др. проблеми.

Вибро-акустическият метод позволява контролиране на техническото състояние на машинни елементи и механизми. Най-често се оценява Q - фактора на спектралните линии (фиг. 1 а) в честотния диапазон 1000 – 3000 Hz. В [6] е посочен друг подход, при който се сравняват честотите на вибриране на образците при една мода в различни направления. В резултат на разлики в коравините за напречна мода n възниква разликата в честотите Δf_n (фиг. 1 б), която се приема за основна диагностична характеристика за охарактеризиране големината на нецялостностите. На базата на голям брой експериментални изследвания е установено, че анализирането на сигнала без следваща математическа обработка, в т.ч. филтриране, намалява грешките при измерване на резонансните честоти.



Фиг. 1. Подходи за оценка на съществуването на нецялостност; а) – чрез оценка на Q фактора; б) – чрез оценка на честотната разлика Δf_n в спектъра за напречна мода [6].

На базата на проучването е налице извода, че за контрола на големи серии от клапани е перспективно

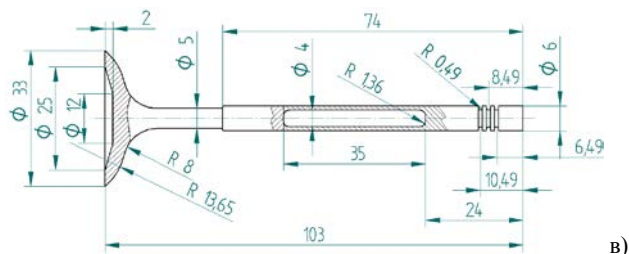
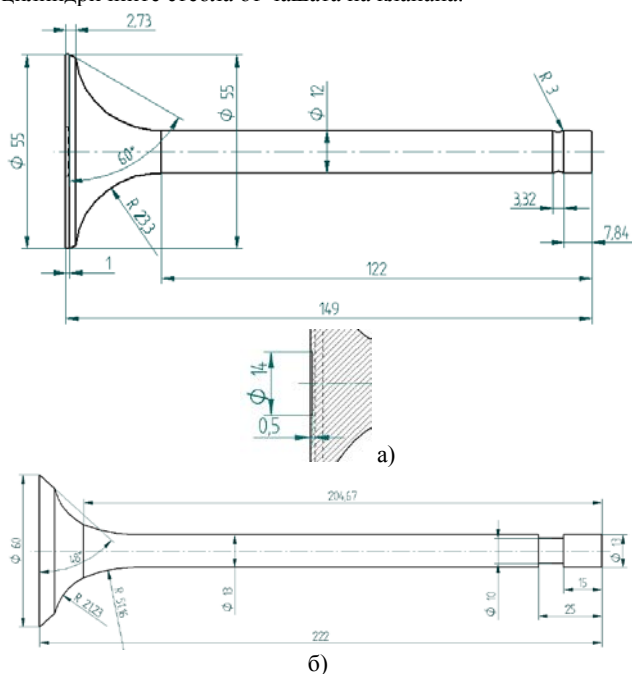
подобряване на чувствителността на вибро-акустическия метод и на неговата охарактеризираща способност чрез използване общо достъпни технически средства. Перспективен е подходът в [6], където основен акцент при създаването на диагностични признаци е честотната разлика на напречните моди в ортогонални направления с ориентация съобразно геометричните особености на напречното сечение на детайлите.

Цел на настоящата работа е да изследва минималната дълбочина на повърхностна нецялостност и типични отклонения на формата, които може да се регистрира с вибро-акустическия метод и да направи обосновано предложение за подобряване на чувствителността вибро-акустическия метод за диагностика при охарактеризиране на минималната дълбочина на нецялостност в типични конструкции на клапани от ДВГ.

2. Подходи за реализиране на изследването

2.1. Теоретично изследване

Теоретичното изследване е обектно насочено към реални конструкции на клапани от ДВГ. Изследвани са типични конструкции (всмукателни и изпускателни) клапани от леки и товарни автомобили и от локомотив (6-та серия от класификацията на БДЖ), които са с дължини l_i и диаметри d_i на цилиндричното стебло. Те са показани на фиг. 2. Клапаните са моделирани, като в участъци от тях са създадени и нецялостности от тип пукнатина. На клапаните е зададен материал «топло устойчива стомана» с изотропна структура. На практика са възможни отклонения в еластичните свойства, които са специфични за всеки технологически процес. Получени са теоретични резултати за честотите на напречните моди и те са сравнени с честотите, регистрирани при експериментално изследване на реални конструкции с и без нецялостности. Поради ограничен набор от образци, са използвани свалени от употреба клапани с известни отклонения «овалност», «огънатост» и отклонение в наклонението на цилиндричните стебла от чашата на клапана.



Фиг. 2. Конструкции на изследваните клапани; а) Клапан 1 - от товарен автомобил, б) Клапан 2 - от локомотив 6-та серия на БДЖ, в) Клапан 3 - изпускателен клапан от автомобил.

Описание на изследваните клапани:

- Клапан 1 представен с един образец, в който е установено равномерно износване на диаметъра с начало 40 mm от края на цилиндричното стебло и с дължина 40 mm и радиално биене 0.215 mm, измерено за база 114 mm. Измерена е овалност 0.015 mm и с дължина 6 mm в зона близка до преходната зона между стеблото и чашата на клапана. На разстояние 42 mm от челото на цилиндричното стебло е налице тънък разрез с дълбочина в рамките на 0.1 mm.

- Клапан 2 се състои от образец 1 с измерено радиално биене 0.015 mm и от образец 2 с радиално биене и 0.06 mm, измерени на база 162 mm.

- Клапан 3: представен е от 4 образца, в които са изработени изкуствени нецялостности в зоната на фрикционното заваряване и са измерени технически отклонения, показани в Табл. 1.

Табл. 1. Измерени отклонения в образци на клапан 3.

Образец	Дълбочина на нецялостн. mm	Радиално биене, mm	Ъглово отклонение, grad
1	1.1	0	5.33
2	0.8	0	0
3	0.6	0.3	0
4	0	0.1	7.59

Измерени са собствените честоти в образците преди и след създаване на нецялостностите.

Изследването е насочено към дешифриране на експериментално получени спектрограми за описаните по-горе клапани. За целта са моделирани измерените отклонения в клапаните и е оценено тяхното влияние върху честотата на модите.

Собствените честоти са определени по метода на крайните елементи. В изследването на изпускателните клапани е пренебрегнато влиянието на напълнителя (напр. натрий), който не оказва съществено влияние върху общата маса на клапана и неговата коравина. При обработка на резултатите е отчетено разсейване на честотите в рамките до ± 1.5 Hz. Резултатите имат показателен характер, тъй като са налице изменения еластичните свойства на реалните образци от клапани, в т.ч. наличие на анизотропия на материала в резултат на технологичните операции.

2.2. Експериментално изследване

Проведени са експериментални изследвания с образци от описаните клапани чрез акустическа система, състояща се от керамичен микрофон, хардуер за преобразуване на аналогов сигнал в цифров и с честота на дискретизация на честотата в рамките на 3 (до 4) Hz. За целта клапаните са окачвани на идеално гъвкава и неразтеглива нишка. Собствените честоти са определени чрез измерване на резонансните честоти на сигнали измервани от разстояние 120 – 150 mm в акустическо изолирано пространство и чрез софтуер за амплитудно-честотен (Фурие) анализ. Времето за измерване е 0.5 s.



Фиг. 3. Част от клапаните и опитна уредба за изследване на собствените им честоти.

Направено е предварително сравнение между теоретични и експериментални резултати за честотата на модите в диапазона 20 Hz - 18 kHz. В табл. 2 е показано сравнение на резултатите, получени за клапан 1. Теоретичните стойности на честотите на напречните моди се доближават до експерименталните. Регистрирана е една надлъжна мода и нейната честота се различава съществено (около 1300 Hz) от теоретичната. Подобни резултати са получени и за останалите клапани. Тази значителната честотна разлика изисква предварителни изследвания за честотно доближаване на надлъжна и напречна мода трябва да се вземе предвид при дешифриране на спектрограмите, тъй като ще предизвика съмнение за наличие на техническо отклонение в клапаните.

Табл. 2. Резултати, получени чрез теоретично и експериментално изследване на собствените честоти на моди за клапан от товарен автомобил

Мода	Теория	Експер.
№	Hz	Hz
1	1758.6	1771
2	4820.8	4487
Надлъжна	6315.3	7739
3	9558.6	9290
4	16061	16030

Забележки: 1. С числа от 1 до 4 са означени модите с напречни на стеблото деформации. 2. Теоретично са получени и честоти и на други моди, непоказани в таблицата.

3. Резултати от изследването

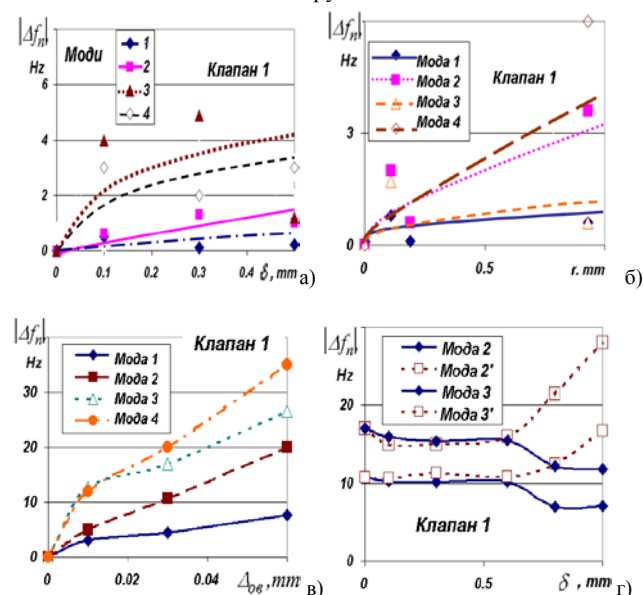
3.1. Теоретични резултати

Получени са теоретични резултати за изменението на абсолютната стойност на характеристиката Δf_n за описаните клапани от дълбочина на нецялостност δ , радиално биене r , овалност Δ_{ov} и ъгъл α на изместване на направлението на стеблото на клапана. Резултатите за различните клапани са показани на на фиг. 5.

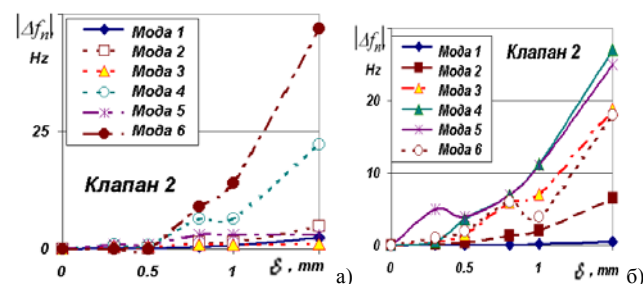
Налице е неравномерност на изменение на характеристиката Δf_n . Така например, за клапан 1 при наличие на срез с дълбочина δ до 0.5 mm в изследваната зона се променят по-значително моди 3 и 4 (в рамките на 2 – 4 Hz) и е налице незначително изменение на модите 1 и 2 (фиг. 4 а). Наличието на радиално биене (в т.ч. огънатост на профила) r до 1 mm предизвиква незначително изменение на Δf_2 Δf_4 (до 3 – 4 Hz) (фиг. 4 б). Значително по-голямо е изменението на Δf_n от овалността в участък от клапана. Максимално е изменението Δf_n за напречна мода 4, при нарастване на Δ_{ov} от 0 до 0.05 mm $\Delta f_4 = 35$ Hz. Но до тази мода е установен сигнал от надлъжна вълна в клапана, честотната разлика между двете е 96 Hz. Следователно, въпреки че мода 4 проявява чувствителност към овалността на цилиндричното стебло, то тя е неприложима за охарактеризиране на отклонението. Сравнително добра чувствителност за случая осигуряват напречните моди 2 и 3, като $\Delta f_2 = 30$ и $\Delta f_3 = 27$ Hz.

Интерес от практическа гледна точка представлява възможността за комбиниране на две и повече отклонения от

техническото състояние на детайлите. Тук са разгледани две гранични положения на разположението на нецялостността спрямо илюстрираната на фиг. 4 в) зависимост при съчетание на две отклонения: овалност $\Delta_{ov} = 0.03$ mm и нецялостност с дълбочина $\delta = 0 \div 1$ mm с разположение в средната част (на 42 mm от челото на стеблото) на клапана. Възможни съвпадение на отклоненията за сумиране или частично взаимно намаляване на влиянието на отклоненията върху характеристиката Δf_n . Получените резултати са показани на фиг. 4 г). Тук с пълтна линия е означено изменението при взаимно намаляване на влиянието на отклоненията и с прекъсната линия (означени допълнително със символа ') – при сумиране на влиянието на тези отклонения. Резултатите от посочения пример показват, че до нецялостност с дълбочина 0.5 mm е преобладаващо въздействието на овалността. За дълбочини $\delta > 0.5$ mm се променя характера на зависимостите Δf_2 и Δf_3 . Последното изследване налага необходимостта за отчитане на значимите фактори върху стойността на Δf_n чрез изследване на детайлите по други методи.



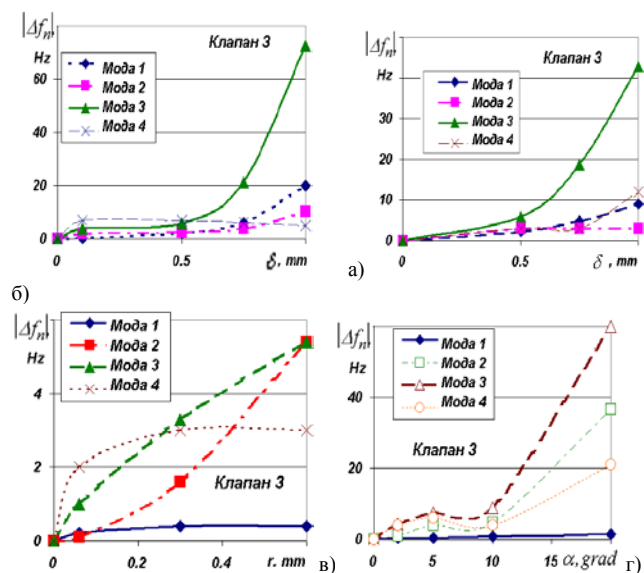
Фиг. 4. Резултати от изследване на характеристиката Δf_n за клапан 1 от δ (а), r (б), Δ_{ov} (в) и от δ и при едновременно наличие на овалност при $\Delta_{ov} = 0.03$ mm (г).



Фиг. 5. Резултати от изследване на характеристиката Δf_n за клапан 2 от δ при разположение на нецялостността в средата (а) и в началото на преходната крива между стеблото и чашата на клапана (б).

На фиг. 5 са показани зависимости за характеристиката Δf_n за напречни моди от 1 до 6 (в звуковия спектър) в зависимост от местоположението на нецялостност с дълбочина δ в диапазона $0 \div 1.5$ mm в средата на цилиндричното стебло и в преходната крива между стеблото и чашата на клапан 2. Забелязва се значимо изменение на Δf_n за дълбочина $\delta > 0.5$ mm за напречните моди 4 и 6 при

разположение на нецялостността в централната част и за модите с номера от 3 до 6 за разположение в преходната крива. Следователно след прецизно измерване на честотите на модите е възможно чрез въвеждане на обратната функция $\delta_{n,e} = F[\Delta f_n]$, за да се охарактеризира еквивалентната големина $\delta_{n,e}$ и разположението на нецялостността.



Фиг. 6. Резултати от изследване на характеристиката Δf_n за клапан 3 от δ при разположение на нецялостността в кухата част (а) и в плътната част (б) непосредствено до заварения участък в средата на стеблото; от радиалното биене r (в) и ъглово отклонение α в направлението (г).

На фиг. 6 а и б) са показани теоретични резултати от изследване зависимостта на Δf_n от дълбочината на нецялостността δ в участък от средната зоната на фрикционното заваряване на цилиндричното стебло. И тук се забелязва по значително изменение на Δf_n (за мода 3) при $\delta > 0.5$ mm. Получените графични зависимости са апроксимирани за мода 3 и са получени зависимостите:

$$\Delta f_3 = 8.0342\delta^4 + 200.59\delta^3 - 193.34\delta^2 + 57.321\delta + 10^{-10}$$

при $R^2 = 1$ за случая на фиг. 6 а) и (1)

$$\Delta f_3 = 36.533\delta^3 + 7.4\delta^2 - 1.0333\delta - 10^{-12} \text{ при } R^2 = 1 \text{ за случая на фиг. 6 б).}$$

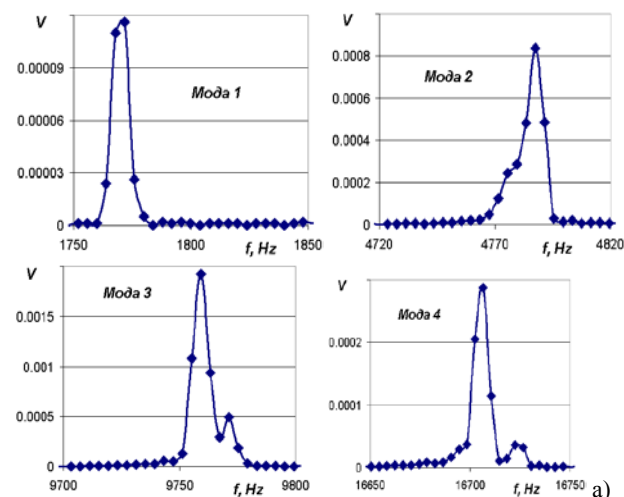
Допълнително са получени стойности за Δf_n и при огъване на цилиндричното стебло (при наличие на радиално биене r и отклонение на стеблото на ъгъл α). За описаните в табл. 1 отклонения е налице честотно изменение на модите в рамките на 2 – 8 Hz, което трябва да се вземе при настоящето охарактеризиране на нецялостностите.

3.2. Експериментални резултати и охарактеризиране на дълбочината на нецялостности в клапани от ДВГ

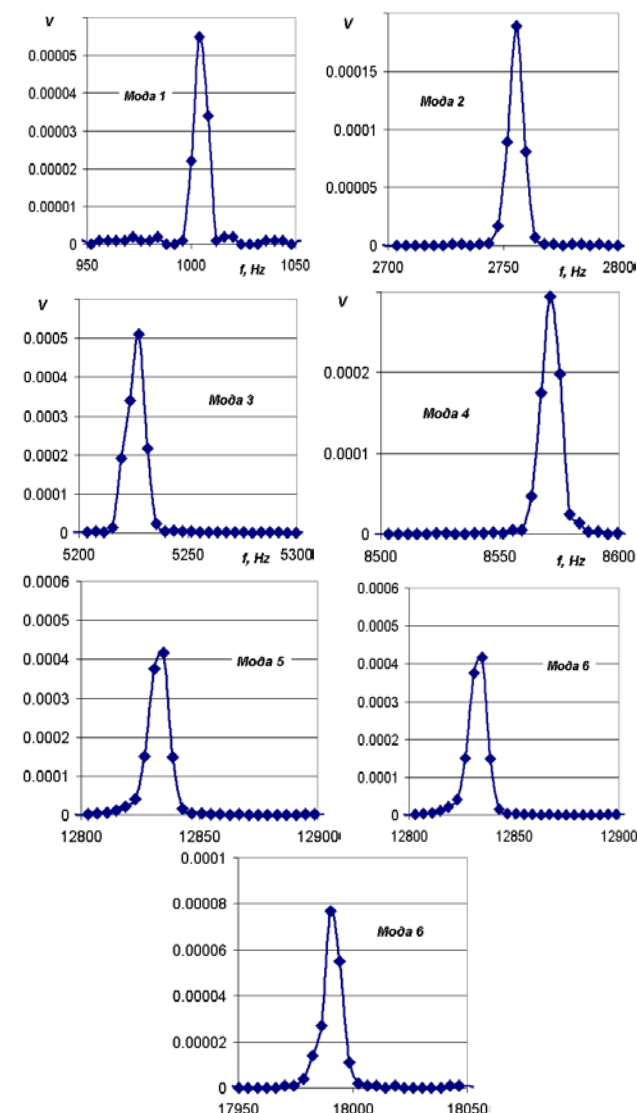
На фиг. 7 са показани регистрираните сигнали от динамичното поведение на клапан 1 в честотната област на моди 1 – 4. Тук сигналът от модата 4 е показан самостоятелно, без този от надлъжната мода. Вибрациите при мода 1 и 2 са с близки честоти и е трудно тяхното разделяне. Отчетени са стойности $\Delta f_1 = 0$ $\Delta f_2 = 6$ $\Delta f_3 = 16$ $\Delta f_4 = 20$, които се отдават преди всичко на забелязана овалност и радиалното биене на цилиндричното стебло (а не на съществуващата нецялостност).

На фиг. 8 и 9 са показани резултати от изследване на образец 1 и 2 от клапан 2. Малки отклонения не променят съществено граничните честоти (характеристиката Δf_n) на вибриране на детайлите при възбуждане на една напречна мода. При радиално биене 0.015 mm в образца е налице

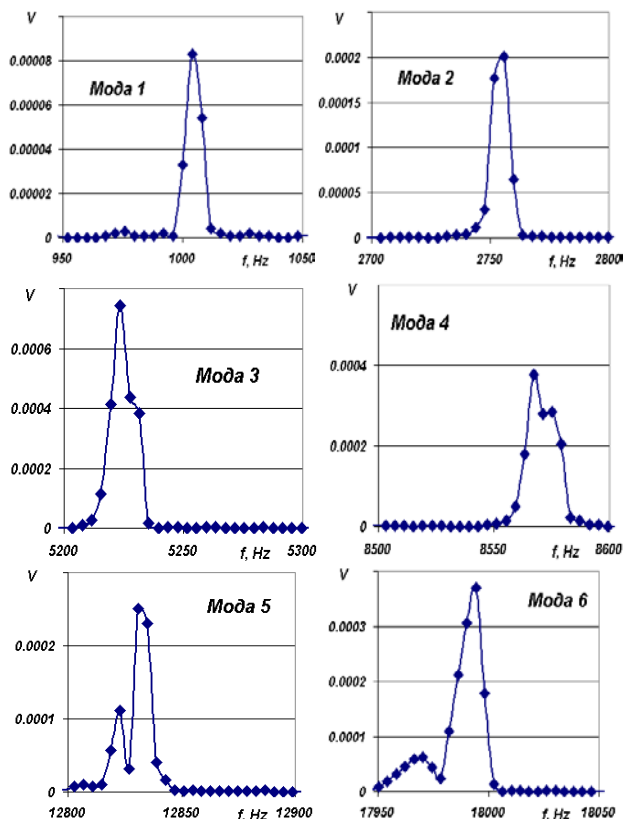
известно съмнение за симетричност на деформациите при анализиране на мода 6. При нея се забелязва известно нарастване от 3 Hz на широчината на сигнала в спектрограмата. За детайла с радиално биене 0.06 mm широчината на амплитудите нараства видимо. За него по спектрограмите се определят стойностите $\Delta f_3 = 3$ $\Delta f_4 = 8$ $\Delta f_5 = 8$.



Фиг. 7. Експериментални резултати от изследване на клапан 1.

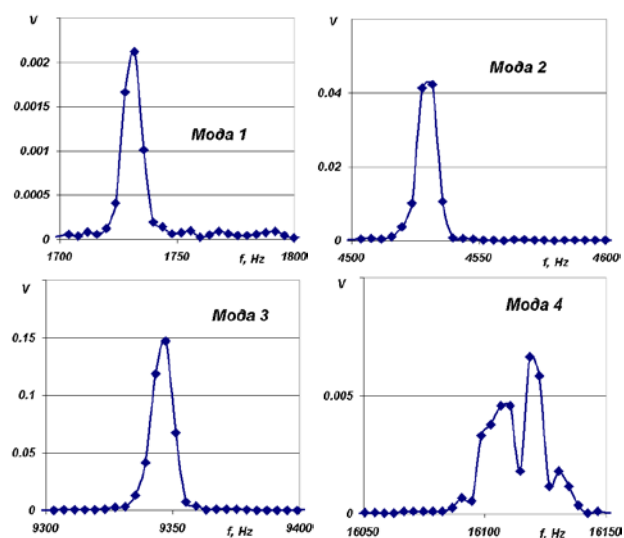


Фиг. 8. Експериментални резултати от изследване на образец 1 от клапан 2.



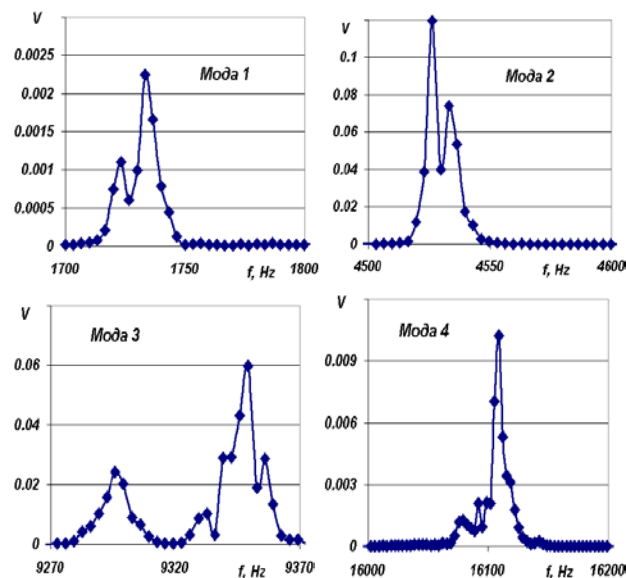
Фиг. 9. Експериментални резултати от изследване на образец 2 от клапан 2.

Измерени са резонансните честоти на образците от клапан 3, след което в част от тях са създадени повърхностни нецялостности, описани в табл. 1 в цилиндричното стебло в област близо до фрикционното заваряване. Направено е сравнение на измерените с теоретичните честоти и са идентифицирани модите. Установени са стойности на честотите на напречните моди за изследваните клапани, те се различават по стойност в рамките на 10 – 50 Hz за различните клапани. Анализират се честотите на модите, че преди мода 3 (на честотно разстояние около 1000 Hz) регистрира надлъжна мода. Непосредствено в зоната на напречна мода 4 (на честотно разстояние в рамките на 30 – 100 Hz) се регистрира друга надлъжна мода, която променя честотата си и е възможно да доближи сигналите от напречната мода.



Фиг. 10. Експериментални резултати от изследване на образец 2 от клапан 3 преди създаване на изкуствена нецялостност.

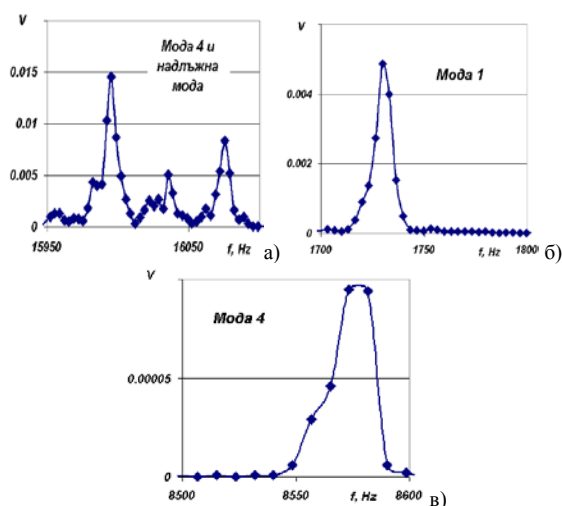
На фиг. 10 и 11 са показани типични спектрограми за модите 1 – 4 за образец 2 преди и след създаване на повърхностна нецялостност. Отчетено е изменението на характеристиките Δf_n за напречните моди и са охарактеризирани дълбочините на нецялостностите. Резултатите са показани в табл. 3. Потвърждава се използваната методика за диагностика на големина на нецялостности в клапани от ДВГ. По-чувствителните моди към изменението на дълбочината на нецялостността осигуряват по-голяма точност на охарактеризиране на нецялостността.



Фиг. 11. Експериментални резултати от изследване на образец 2 от клапан 3 след създаване на изкуствена нецялостност.

Табл. 3. Сравнение на експериментални и теоретични резултати за охарактеризиране на нецялостности в клапан 3.

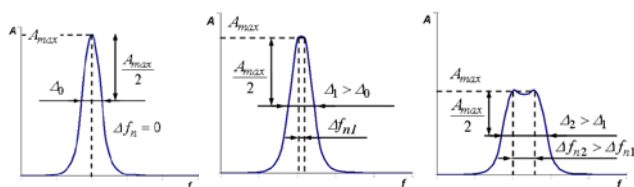
Образец №	Измерени стойности за Δf_n / мода	δ /мода
	мода	
Образец 1	7/2	0.9/2
	10/3	0.55/3
Образец 2	0/2	0/2
	54/3	0.95/3
Образец 3	7/2	0.75/2
	13/3	0.7/3



Фиг. 12. Типични сигнали от спектрограма, препроблеми при отчитане на честотата на модите; а) близко честотно разположение на напречна с надлъжна мода, б) и в) – амплитуди с по-голяма ширина

Типични проблеми при отчитане на модите са показани на фиг. 12. Типичен проблем от близко разположение на напречна и надлъжна мода е показана на фиг. 12 а). Резултатът е получен за част от експериментите при изследване на образци с конструкция на клапан 3. За този клапан теоретичната честотна разлика между честотите на напречна мода 4 и надлъжна мода е 15 – 20 Hz в случай на отсъствие на техническо отклонение. Реалната (регистрираната) разлика е в рамките на 30-100 Hz. Амплитудата от сигнала на надлъжната мода в спектрограмата обикновено е значително по-малка от тази на напречната вълна, но при съвременната чувствителност на измервателната техника двата сигнала се регистрират и е възможно да бъдат объркани.

Друг проблем при отчитане на Δf_n е сливане на сигналите от една напречна мода при малка честотна разлика. Такива случаи са показани на фиг. 12 б) и в). В такива случаи е удачно измерване на широчината на амплитудата и сравняване с еталон, регистриран за клапан с доказано техническо състояние. Проведените многобройни експерименти показаха, че с използваната апаратура, софтуер и методика широчината на един сигнал при липса на технически отклонения е в рамките на 15 – 22 Hz. При близко разположение на амплитудите, те се сливат и в резултат и се затруднява отчитането. Явлението наслагване на две еднакви амплитуди с близки честоти е моделирано и представено на фиг. 13. В резултат на известно сливане на сигналите нараства тяхната широчина. На фиг. 13 широчина на амплитудата е показано, че се измерва на разстояние $A_{max}/2$, но това не ограничава подхода за определяне на разстоянието Δf_{ni} , т.е. възможно е да се използва всяко доказано прагово ниво от спектрограмата. Така например, сигналът от спектрограма за мода 1 от фиг. 12 б) предизвиква сериозни съмнение за $\Delta f_1 \neq 0$ поради по голямата широчина от 29 Hz, измервана в основата на амплитудата.



Фиг. 13. Моделиране на изображение, получено при наслагване на две еднакви амплитуди с близки честоти.

Изображението от спектрограмата на фиг. 12 в) е получена при честота на регистрация на сигналите от 8 Hz при изследване на образец 2 от клапан 2. Тя съответства на изображението за мода 4 от фиг. 9. Ясно се забелязва заглаждане на сигнала от спектрограмата, с което се влошава точността на определяне на Δf_4 .

Чрез апроксимиране е получено, че при честота на дискретизация на 3 - 4 Hz за изпускателен клапан със симетрична форма (без геометрични отклонения на формата) минималната дълбочина на повърхностно разположена нецялостност в стеблото и преходната част на клапана е в рамките на 0.3 – 0.4 mm в зоната на фриксионния шев чрез изследване на широчината на трета напречна мода. За охарактеризиране на нецялостности с дълбочина 0.1 – 0.2 mm е необходимо намаляване на времето на дискретизация на аналоговия сигнал (до честотна дискретизация 1 – 1.5 Hz). Минималната дълбочина на охарактеризиране на повърхностни нецялостности в преходния участък между стеблото и чашата на клапана е примерно около два пъти по-голяма.

Резултатите показват, че несиметрични геометрични отклонения в стеблата на клапаните се регистрират чрез възникване на два сигнала за една напречна мода.

Честотното разстояние между тези сигнали е в пряка връзка с стойности на тези отклонения. Едновременното наличие на нецялостности и геометрични отклонения затруднява дешифрирането на спектрограмата, и е възможна направа на грешни изводи.

4. Изводи

Получените от изследването резултати показват, че чрез вибро-акустически измервания в стеблата на клапаните на ДВГ могат да се охарактеризират повърхностни нецялостности с дълбочина 0.4 – 0.5 mm при честота на дискретизация на аналоговия сигнал в рамките на 3 Hz. При намаляване на честотата на дискретизация до 1 – 1.5 Hz теоретически е възможно охарактеризиране на нецялостности с дълбочина 0.1 – 0.2 mm. За целта може да се изследва честотния спектър на напречните моди. Чрез използване на повече от една напречна мода за охарактеризиране на нецялостност се повишава достоверността на диагностиката.

В близки честотни зони до някои напречни моди (установено е за 4 и 5) се регистрират други моди, което е предпоставка за възникване на фалшиви сигнали на спектрограмата, респективно, груби грешки при охарактеризиране на техническото състояние на клапаните. При използване на тези моди е необходимо прецизно уточняване на произхода на сигналите.

5. Литература

1. Фирмена информация на <http://www.sinusvalves.com>.
2. Ташев П. и кол. Получаване на електросъпротивително заварени кръстови съединения от стоманена тел и арматурна стомана. Инженерни науки, год. LI, 2014, № 4.
3. Коларов И., П. Ташев. Вибро-акустическо изследване на качеството на биметален цилиндричен детайл за нанасяне на маркировка заварен чрез триене – Част I. Предварителен анализ и постановка на изследването. Международна конференция „Безразрушителен контрол в съвременната индустрия“ февруари 2015. Научни известия на НТС XXIII брой 1 (164). ISSN 1310-3946.
4. U. Netzelmann, H. Reiter, Y. Shi, J. Wang and M. Maisl. Ceramic Automotive Valves - Chances and Limitations of Nondestructive Testing. NDTnet - July 1997, Vol.2 No.07.
5. Acoustic Resonance Inspection Systems. Introduction to Electro Magnetic Acoustic Resonance (EMAR) Technology for NDT of Engine Valves. Фирмен материал на Resonic, <http://www.resonic.com/>.
6. Коларов И. Диагностика на повреди в машинни елементи чрез модален анализ. Монография. София 2015 г.
7. The Fundamentals of Modal Testing. Application Note 243 – 3. Agilent Technologies' Test and Measurement Support, Services, and Assistance.
8. Коларов И. Вибро-акустическо изследване на цилиндрични образци с типични отклонения на профила. Конференция „Акустика 2015“. София 2015 г. ISSN 1310-3946.

	АКУСТИКА Национална конференция "Акустика 2015"	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

УЛТРАЗВУКОВО ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАНО-МОДИФИЦИРАНИ С TIN СЛОЕВЕ ПОЛУЧЕНИ ЧРЕЗ НАВАРЯВАНЕ С ТРЪБЕН САМОЗАЩИТЕН ТЕЛ

ULTRASONIC STUDY OF NANO-MODIFIED WITH TIN LAYERS PRODUCED BY PIPED SELF-PROTECTED ELECTRODE

доц.д-р инж. Иван Коларов
катедра „Машинни елементи, материалознание и химия”,
Висше транспортно училище „Тодор Каблешков” – София, България

доц.д-р инж. Пламен Ташев
Секция „Заваряване”
Институт по металознание, съоръжения и технологии „Акад. А. Балевски” - БАН

Abstract: Ultrasonic study of nano-modified with TIN layers produced by piped self-protected electrodes has been studied in paper. Layers produced by sequentially (from two to five times) welding have been used. The samples are studied by means a double ultrasonic sensor with an operating frequency of 5 MHz for excitation and registration of longitudinal waves.

It has been proved that in some localities of samples some clusters with small uncorrelated reflectors are available. The size of reflectors is smaller than the flat-bottomed reflector with diameter 3 mm. There are parts in the samples without significant reflectors. That means the most reason of these technical deviations is the technology for implementation of the layers. It should be give attention for technology specifying in order to diminish the number of discontinuities.

A confirmation of above conclusions has been carried out by polished surface of two time welded sample. The size of discontinuities was measured in CAD environmental. Two types of discontinuities were registered: positioned on line discontinuities with maximum size 0.26 mm that is possible to be created during the layer welding; single discontinuities random positioned with maximum 0.44 mm. The average size between the single discontinuities is 1 – 5 (8) mm.

KEY WORDS: NANO-MODIFIED WITH TIN LAYERS, DISCONTINUITIES, ULTRASONIC STYDY.

1. Въведение

Ултразвуковият метод успешно се използва за бърза диагностика на вътрешни нецялостности в метали, в т.ч. съединени чрез наваряване или покрити с наварени слоеве [1]. За целта се регистрира разсейване на ултразвукова вълна от нецялостностите на амплитудата с 6, 10 и 20 dB (2, 3.3 и 10 пъти) по-голяма в сравнение с условни нива в зависимост от използвания метод на изследване и целевата чувствителност [2].

При наваряване на металите са налице сложни процеси и в резултат на бързо охлаждане на повърхнината са възможни нееднородности на структурата на наварения слой [3]. Експериментално е установено, че при наваряване чрез наномодифицирани електроди в повърхностната и подповърхностната зона на наварения слой са възможни нецялостности с условен диаметър в рамките на 1.07 – 1.4 mm, определен чрез визуално измерване. Те се дължат на технологични несъвършенства или на пропуски в работата на заварчика и успешно се регистрират чрез ултразвукови вълни. В резултат на проведените изследвания са установени препоръчителни отношения на добавъчните наномодификатори с оглед получаване на добра износостойчивост при минимални нецялостности [4]. Установено е, че тези модификатори осигуряват по-висока твърдост на повърхнината, респективно, износостойчивост [5, 6, 7, 8]. В резултат е произведен тръбен самозащитен тел предназначен за полумеханизирано наваряване модифициран чрез добавяне на наноразмерен TiN.

Известно е, че за получаване на наварен метал със структура и свойства с минимално промяна вследствие влиянието от разтопяването и смесването с основния метал,

броят на наварените слоеве трябва да е по-голям. При полагането на първия шев смесването наварен метал основен метал е около 1:1. След седмият слой, състава на получения слой метал е изцяло от наварения метал. Използването на броя слоеве на практика се определя от икономическата изгода (най-евтино е двуслойното наваряване) и свойствата на наварения метал след нанасяне на последния слой. С оглед на съществуването на нецялостности в слоя може да се допусне, че при многопластово наваряване при наличието на получени кухини в материала част от тях ще бъдат запълвани от следващия полаган слой. С разработения тръбен самозащитен тел съдържащ наномодификатор TiN, полумеханизирано са наварени серия образци с 2, 3, 4 и 5 слоя.

Задача на настоящата работа е да направи ултразвуково изследване на наномодифицирани с TiN слоеве получени чрез наваряване с тръбен самозащитен тел и да се охарактеризира състоянието на наварения метал по отношение наличието на нецялостности с оглед получаване плътни покрития при възстановяване на машинни елементи, подложени на значително абразивно износване. За всеки следващ слой, след първия, тока на заваряване нараства с 10-15%, а напрежението се запазва както първоначално избраното.

2. Описание на изследването

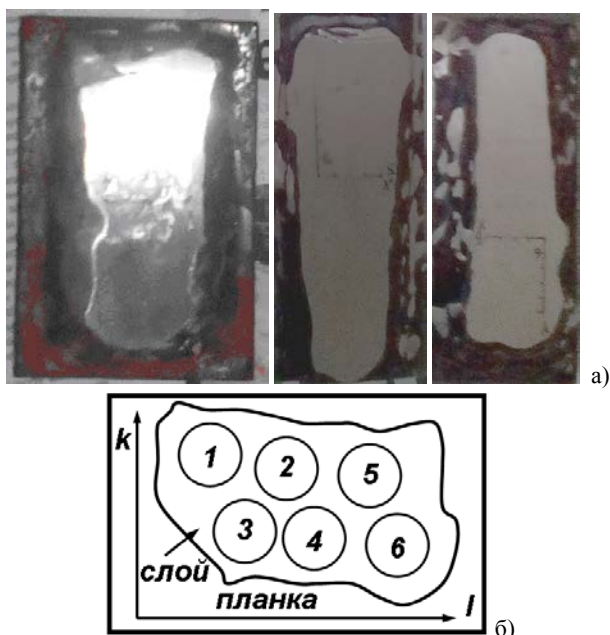
На фиг. 1а) са показани типични шлифовани участъци от двете партии проби с окончателна дебелина на наварения слой (след шлифоване) в рамките на 5-12 mm, получен чрез последователно наваряване в рамките от два до пет слоя. Описание на изследваните на проби е показана в табл. 1.

Пробите са изследвани чрез надлъжни вълни с помощта на двоен преобразувател с работна честота 5 MHz за възбуждане и

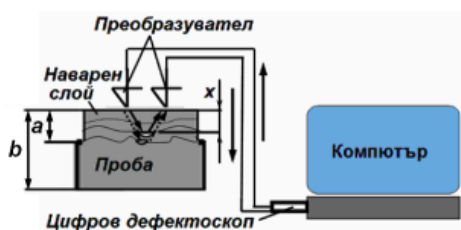
регистриране на надлъжни вълни, работещ съвместно с USB цифров дефектоскоп на фирмата LECOEUR ELECTRONIQUE SARL и подходящ софтуер. Измерена е амплитудата на отразената от наварения слой със стъпка 10 - 12 mm (фиг. 1а), така че е изследвана цялата наварена повърхнина. Определени са местоположенията на отражателите чрез измерване на времената на разпространение на надлъжната вълна на скалата на дефектоскопа. Схема на измерване е показана на фиг. 2.

Табл. 1. Описание на изследваните на проби.

Проба №	Наварени слоеве, бр.	Обща дебелина на наварен слой a , mm	Изследвани точки, бр.
1	2	Около 6	4
2	2	6.5	6
3	2	5	7
4	3	7	4
5	3	8	7
6	4	12	4
7	5	9	4



Фиг. 1. Изображение на типични наварени слоеве (а) и на примерна последователност на изследване на наварения слой (б).



Фиг. 2. Схема за провеждане на експериментите при изследване чрез надлъжни вълни

Нецялостностите са изследвани в четири точки от пробите, показани на фиг. 1а). Като индикатор за коректността на измерването е използвана амплитудата на отразената от границата преобразувател-проба сигнал.

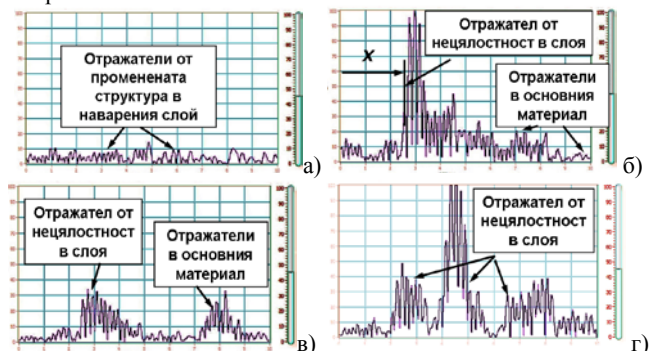
3. Резултати от изследването

Типични резултатите от проведеното ултразвуково изследване на нано-модифицирани с TiN слоеве получени чрез наваряване с тръбен самозащитен тел, получени за различни

участъци от проби с двукратно и трикратно наваряване, са показани, съответно на фиг. 3а – в) и фиг. 3г). Усилването на дефектоскопа е настроено, така че да се регистрират отражатели на надлъжната вълна в резултат на промяна на структурата в слоя, а така също и отражатели в основния наварен материал (планка от конструкционна стомана), получени в процеса на нейното производство. След сравняване на отразени от различни участъци сигнали е установено, че тези с амплитуди A , по-малки от 10 dB, се дължат на структурни промени в наварения слой и на допустими нецялостности в основния материал (фиг. 3а). В някои експерименти са установени отражатели в основния материал с условна амплитуда по-голяма от 10 dB (фиг. 3б и в) в сравнение с плоскодънен контролен отражател с диаметър 3 mm, разположен на разстояние 6.6 mm от повърхността на наварения слой. Те не са взети предвид при регистрация на нецялостностите, тъй като не са плод на настоящото изследване, тъй като подробните допълнителни изследвания показаха, че се дължат на известни структурни изменения в материала. Местоположението на значимите отражатели е определено чрез измерване на времето по скалата на дефектоскопа, а тяхната амплитуда е охарактеризирана с помощта на кривата амплитуда - разстояние (distance amplitude curve – DAC), определена по БДС EN ISO 16810:2014 чрез контролни плоскодънни отражатели с диаметър 3 mm. За ускоряване на процеса на охарактеризиране (DAC) кривата е получена във вид апроксимиращ на полином:

$$\Delta A = 0.4924.a^2 - 6.1776.a + 42.624, \text{ dB}, \quad (1)$$

получен за стойност за коефициент на корелация $R^2 = 1$, което показва, че в случая е налице „много добра“ корелация. В табл. 2 са показани регистрираните значими амплитуди в наварения слой и на границата му с основния материал и дълбочината на отражателите. Налице са проби, за които отражателите са характерни само за някои точки на измерване. Така например, за проба 2 в т. 3, 4 и 5, не са регистрирани значими отражатели, докато в останалите измервания от обекта са регистрирани такива. За всички точки на измерване на проба 6 не са регистрирани отражатели. От данните в табл. 1 се вижда, че отражателите са разположени неравномерно по височина в наварения слой.



Фиг. 3. Типични резултати, получени чрез ултразвуково изследване на наварените слоеве.

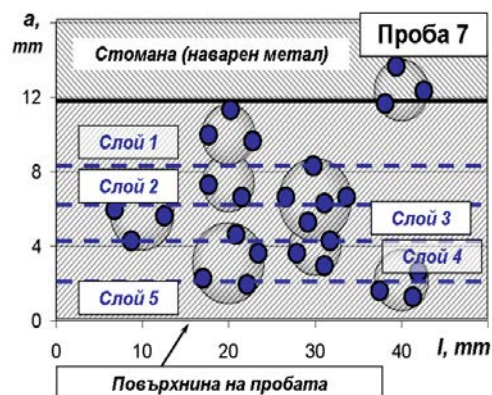
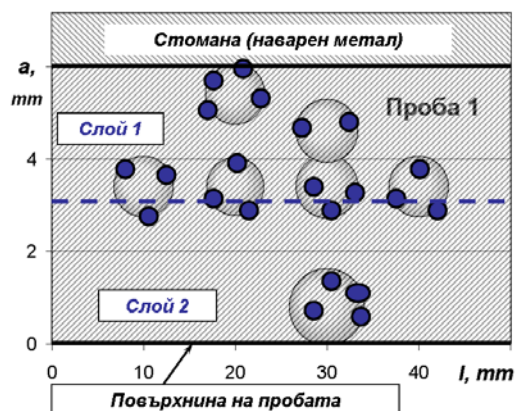
Направен е анализ получените в наварения слой отражатели са със значително по-малък размер от този на използвания контролен отражател (3 mm) и са групирани в клъстери, разположени в различни нива на наварения слой. Това дава основание клъстерите с отражатели условно за проби с два и пет слоя да се изобразят във вида, показан на фиг. 4.

Табл. 2. Описание на експерименталните резултати

Проба №	Условен №	Точка	x , mm	A , dB	x , mm	A , dB	x , mm	A , dB
1	01-2	1	3.4	17.3	-	-	-	-
		2	3.4	15.3	5.4	20.7	-	-
		3	0.8	18.6	3.4	18.6	4.6	21.0
		4	3.4	16.6	-	-	-	-

2	02-2	1	1.54	17.7	2.7	-	3.4	22.2
		2	-	-	3.09	16.9	-	-
		3,5,6	-	-	-	-	-	-
		4	-	-	3.16	17.5	-	-
3	15-2	1	4.3	18.5	-	20.5	7.4	-
		2	3.9	19.6	5.4	-	7.4	15.8
		3	2.8	>25.8	-	-	-	-
		4	-	-	5.4	-	-	-
		5	2.78	14.7	-	21.4	-	-
		6	2.3	17.7	3.86	-	5.56	15.3
4	11-3	1	няма	-	-	16.6	-	-
		2	4.63	17.7	6.18	14.7	-	-
		3	2.78	19.1	4.6	18.5	5.4	14.7
		4*	5.7	21.4	6.6	19.4	8.3	18.7
5	12-3	1*	0.62	20.1	2.62	-	6.8	24.5
		2	1.54	21.9	-	-	5.56	20.1
		3*	1.85	24.7	4.94	19.6	6.18	17.3
		4*	1.54	20.5	4.6	15.8	10	19.7
		5	1.54	17.7	3.7	15.3	-	-
		6	1.54	15.0	3.4	-	-	-
6	14-4	1-4	няма	-	-	-	-	-
7	13-5	1	-	-	5.7	15.8	6.8	-
		2	3.09	20.0	7.4	10.8	10	11.3
		3	4.01	10.8	6.49	20.7	-	-
		4	2.16	11.7	-	18.7	12.34	11.7

* Забележка: освен изложените са забелязани и други отражатели с по-малка амплитуда



Фиг. 4. Условно изобразяване на регистрираните кълъстери с отражатели.

4. Изводи

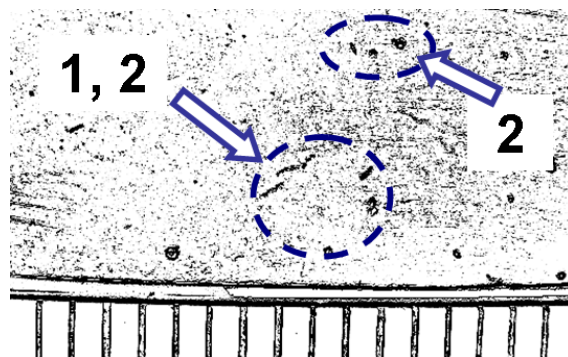
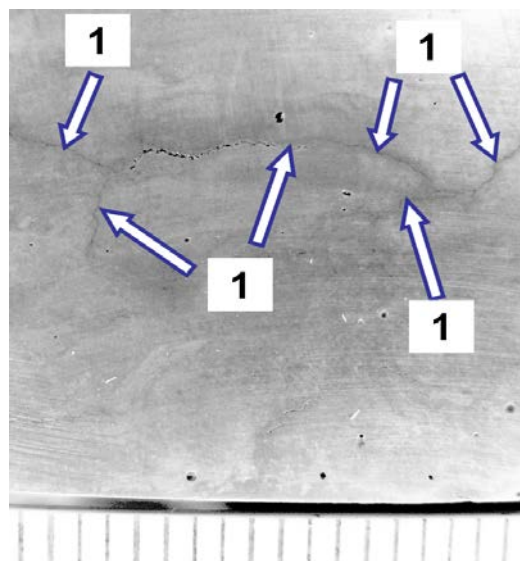
Изследванията показват, че в участъци от наварения слой са налице кълъстери с малки несвързани помежду си отражатели

с условен общ размер значително по-малък от размера на плоскодънен контролен отражател с диаметър 3 mm. Налице са участъци, в т.ч. от цялата изследвана зона на една проба, които са без значими отражатели. Това дава основание да се приеме, че регистрираните отражатели се дължат преди всичко на отклонения в технологията при изпълнение на наварения слой. Удачно е да се вземат мерки за уточняване на технологията на наваряване с оглед намаляване на броя на отражателите.

Направените изследвания показват, че чрез използвания електрод от тръбен нано-модифициран с TiN самозащитен тел могат да се създават чрез наваряване достатъчно плътни слоеве за възстановяване на машинни елементи, подложени на абразивно износване.

За потвърждение на направените изводи за големината на нецялостностите в наварени на нано-модифицирани с TiN слоеве получени чрез наваряване с тръбен самозащитен тел след направа на ултразвуковите изследвания е направен микрошлиф на двукратно наварено покритие. Изображението е показано на фиг. 5. Чрез софтуер за автоматизирано конструиране в компютърна чертожна среда е определена големината на нецялостностите в изследваната повърхнина.

От изображението се установяват два вида нецялостности: нецялостности, подредени по линия, вероятно формирана при нанасянето на покритието от оператора (означени на фигурата с 1), с максимален условен размер 0.26 mm; и единични нецялостности с предимно хаотично разположение (означени с 2), за тях максималният установен размер е 0.44 mm. Средното разстояние между единичните нецялостности е в рамките на 1 – 5 (8) mm.



Фиг. 5. Изображение на микрошлиф, получен от изследване на двуслойно покритие.

Благодарности. Разработката е финансирана от ИАНМСП чрез Националния иновационен фонд чрез Дог. № 6ИФ 02-35/15.12.2012.

5. Литература

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М. Ан СССР, 1957.
2. Ермолов И.Н., Ю. В. Ланге. Неразрушающий контроль. Справочник т.3 Ультразвуковой контроль. Под редакцией Ключева. Машиностроение, М. 2004.
3. WELDING AND COATING METALLURGY. Справочен материал на фирма Castolin Eutectic, 1999.
4. Коларов И. П. Ташев. Ултразвукова оценка на вътрешни нецялостности в наварени наномодифицирани слоеве. Конференция „Акустика 2014”, 2014 г.
5. Трошков А.С. „Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама”, Ползуновский альманах №2 2009
6. Дроздов, В. О., А. Г. Маликов и др. Экспериментальное исследование лазерной сварки металлов с применением нанопорошковых добавок. Докл. V Всероссийской конференций „Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине”. Новосибирск, 26-29 марта, 2013, с. 97-101..
7. Ташев П., Т.Петров, Я. Лукарски, Г.Стефанов „Технологии за внасяне на наноразмерни частици в заваръчни шев при процеси на наваряване”, Инженерни науки, год.L, 2013, № 3, списание на отделение „Инженерни науки” към Българска Академия на Науките, стр. 82-93
8. Plamen Tachev, Hristo Kondov, Mara Kandeve, Elisaveta Tasheva “Wear-resistance study of nano-modified coatings by TIG surfacing process”, Belgrade, Serbia, 13 – 15 May 2015



ВИЗУАЛИЗИРАНЕ НА ХИДРОАКУСТИЧНАТА ИНФОРМАЦИЯ ОТ СЕКТОРЕН ХИДРОЛОКАТОР С МНОГОЛЪЧЕВА ДИАГРАМА НА НАСОЧЕНОСТ

инж. Иван Иванов, инж. Стоян Колев, инж. Мартин Лолов, инж. Васил Косев

Разгледани са предимствата на използването на цветовата гама при визуализиране на хидроакустична информация. Синтезирана е блоково функционална схема на секторен хидролокатор с многолъчева диаграма на насоченост. Приведен е алгоритъма за визуализиране на хидроакустичната информация от такъв хидролокатор. Показани са характерни ехограми от работата на хидролокатора.

Ключови думи: хидролокатор, диаграма на насоченост, цветова гама, хидроакустична информация.

ВЪВЕДЕНИЕ

Хидролокаторът е автономна система, специализирана за подводно наблюдение. Оценката за състоянието на подводното пространство се извършва на базата на получаваната при функционирането му хидроакустична информацията след изобразяването ѝ на индикатора.

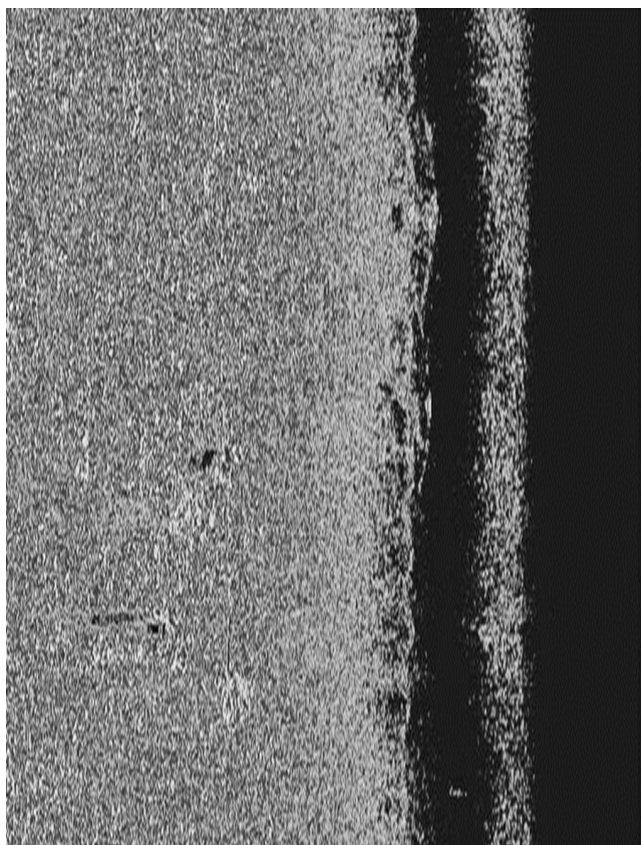
Индикаторите, представящи сигналите в градациите на сивото, осигуряват динамичен диапазон за наблюдаваните сигнали от около 20dB, докато при индикаторите с електрохимична или електротермична хартия той е 16dB. Значително разширяване на този диапазон се

постига чрез цветово кодиране на хидроакустичната информация[1].

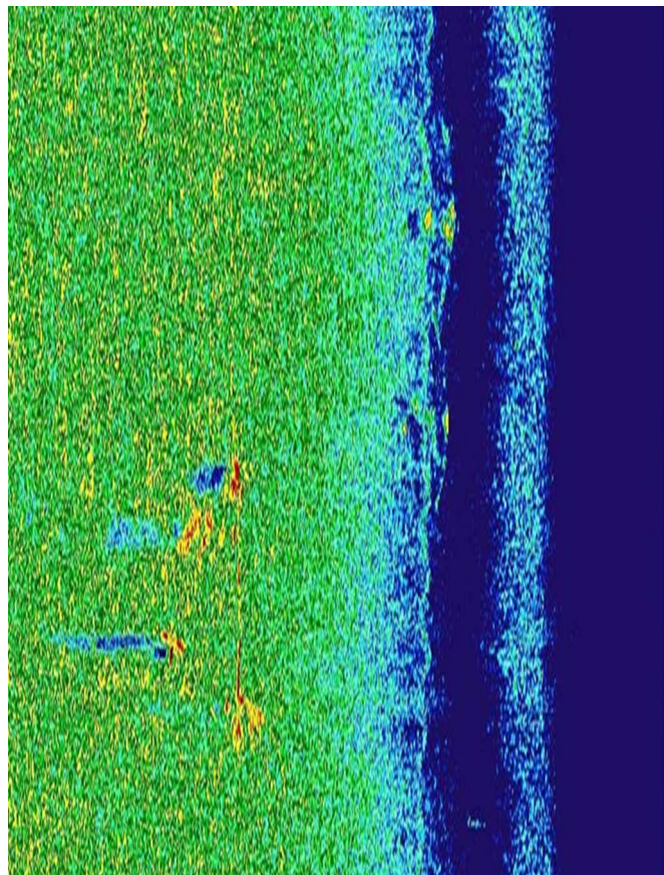
При цветното кодиране на амплитудата на сигнала с използването на осем цвята динамичният диапазон на наблюдаваните сигнали е 42dB [2,3]. Цветното кодиране на амплитудата освен увеличаване на динамичния диапазон на изобразяваните сигнали повишава също и класификационните възможности на индикатора. Цветовият контраст между силните и слабите сигнали позволява по-лесно да се различат: ехосигналите от придънни обекти на фона на изображението на морското дъно, определяне на най – плътните части на рибното ято, структурите на

морското дъно и отделяне на сигналите от обекти на фона на сигналите реверберацията и от звукоразсейващите слоеве.

Потвърждение на изложеното се вижда от сравнението на записаната една и съща хидроакустична информация на ехограма фиг.2. – в цветна гама и на ехограма фиг.1. – в черно бяла гама от работа на хидролокатора за странично



Фиг.1. Черно бяла ехограма от хидролокатора за странично наблюдение SSS-K от обследване K8_30_gr45_20120808



Фиг.2. Цветна ехограма от хидролокатора за странично наблюдение SSS-K от обследване K8_30_gr45_20120808

наблюдение SSS-K при обследване K8_30_gr45_20120808. На ехограмата от фиг.2. добре се различават белезите от пет обекта, докато на ехограмата от фиг.1. можем само да предполагаме, че имаме белези от два обекта.

В настоящата работа се представя визуализирането на хидроакустичната информация, получавана при функционирането на секторен хидролокатор с многолъчева диаграма на насоченост.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Хидролокаторът е реализиран на базата на многоелементната антена с цилиндрична излъчваща повърхност, показана на фиг.3., включваща 96 пиезокерамични елемента обединени в осем групи. Радиусът на излъчващата цилиндричната повърхност е 185mm, а височината 120mm. Всяка група включва три стълба от по четири елемента. Чрез едновременно използване на две съседни групи елементи се формира една диаграма на насоченост. По този начин от $(n+1)$ групи от елементи се формират n диаграми на насоченост [4]. Тази антена осигурява наблюдението на сектор от 70° в хоризонталната плоскост чрез формиране на седем диаграми на насоченост с ширина на ниво минус 3db в хоризонталната плоскост - 10° а във вертикалната - 6° .



Фиг.3.Многоелементна хидроакустична антена с цилиндрична излъчваща повърхност

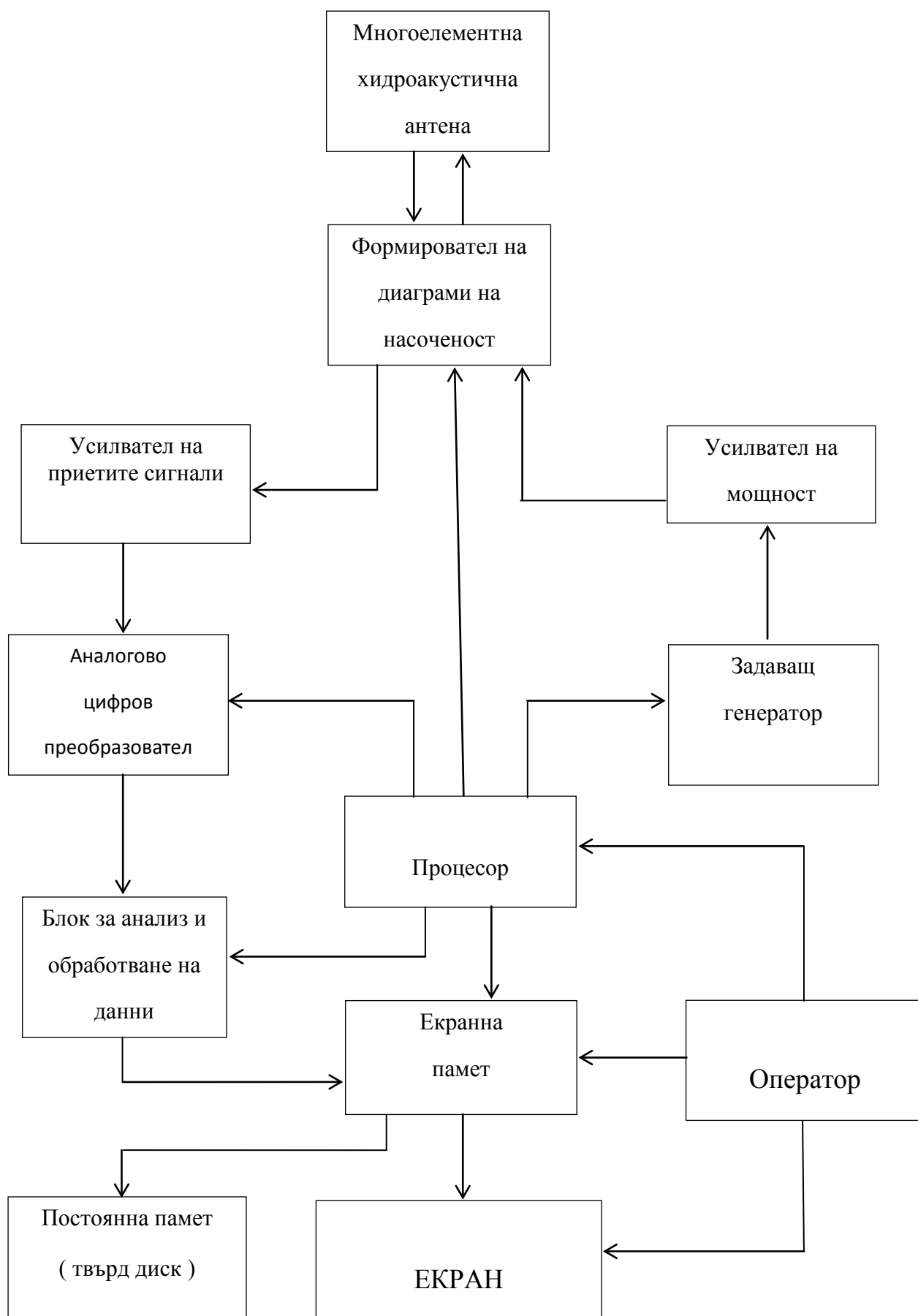
Принципът на действие на хидролокатора се илюстрира от блоково функционалната схема на фиг.4.

Многоелементна хидроакустична антена е свързана с диаграмоформиращия блок, който формира от елементите и необходимите диаграми на насоченост по команди от процесора. Той синхронизира действието на всички блокове на хидролокатора в съответствие с програмното осигуряване и командите от оператора.

За постигане на по-добри възможности за възприемане и анализ на получаваната хидроакустична информация екранът се разделя на части, чийто брой е равен на броя на диаграмите на насоченост, с които се извършва обследването на сектора. Диаграмите на насоченост се формират от определени групи елементи на хидроакустичната антена. В обсега на всяка диаграма се излъчва и получават отразени сигнали за определен сектор на подводното пространство. Във всяка част от екрана се визуализира получаваната от съответната диаграма хидроакустична информация за N -те последователни сондирания, която е дискретизирана по амплитуда и по време на постъпване. По команда от оператора на екрана може да се

визуализира в режим „лупа“
хидроакустична информация от

Фиг. 4. Блоково функционална схема
на секторния хидролокатор

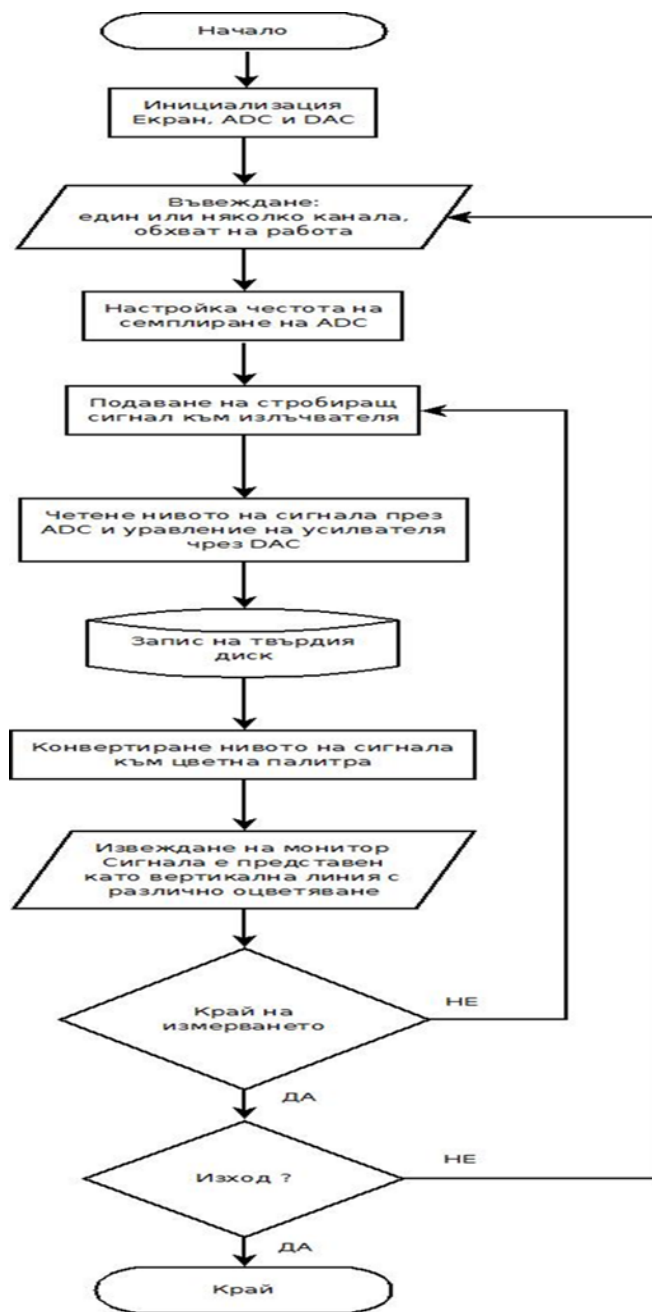


определен сектор по дистанция.

Програмата, осигуряваща функционирането на хидролокатора, отговаря на изискванията на алгоритъма от фиг.5

Обследването на сектора започва от дясната му граница с излъчването на първия сондиращ импулс в пространствения ъгъл на диаграмата на насоченост, формирана от двете най-десни групи на антенната решетка. Времето на приемане на ехо сигнали от този ъгъл зависи от избрания диапазон на работа на хидролокатора. Постъпващата на входа на аналого-цифровия преобразовател на системата информация се дискретизира, обработва и се прехвърля в екранната памет. От там в съответствие с избраната цветова гама се индикира на екрана в частта съответстваща на „осветения (озвучения)“ ъгъл. Следващият сондиращ импулс се излъчва в ъгъла на диаграмата, формирана от втората и третата групи, против часовниковата стрелка на решетката. Получената от този ъгъл информация се индикира съседната част от екрана. По този начин се продължава до достигане на лявата граница на сектора.

След това следва отново излъчване в ъгъла на първата диаграма. На екрана информацията, получена от първото излъчване, се смества с една вертикала в ляво. На нейното място се индицира новата.



Фиг.5. Алгоритъм за визуализиране на хидроакустичната информация от секторен хидролокатор с многолъчева диаграма на насоченост

По същия начин се процедира и със следващия ъгъл. Така нещата продължават докато екрана се запълни. След това най-старата информация от екрана, ако не е предвидено записването ѝ се изтрива.

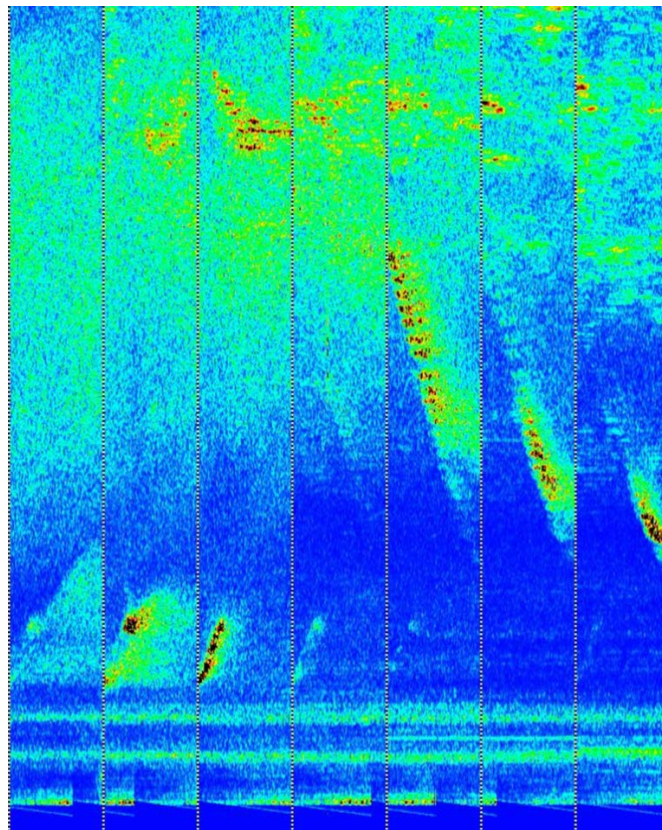
По този начин на екрана наблюдаваме показаната на фиг.6. ехограма, съответстваща на изменението на подводната обстановка в наблюдавания сектор от 70° за интервал от време около 220 секунди, за диапазон – 240m.

В първите три десни сектора на екрана в диапазона от 80÷160m се наблюдават белезите от движението на леководолаз с отворен цикъл на дишане.

В сектор 5 на дистанция около 60m се наблюдават белезите от почти неподвижен леководолаз с отворен цикъл на дишане.

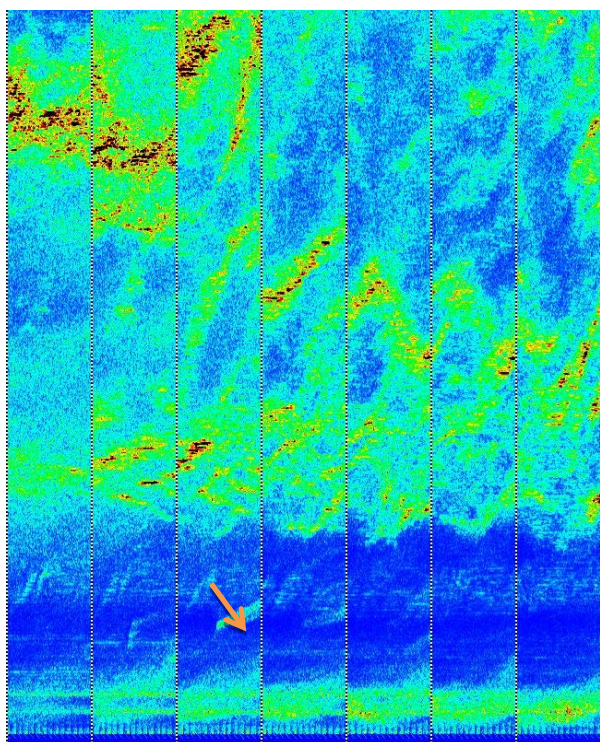
В сектор 6 на дистанция около 70m се наблюдават белезите от рибен пасаж и неговото ядро.

В секторите с изключение на седми на дистанции по-големи от 180m се наблюдават белезите от дънни формироваия



Фиг.6. Ехограма от работата на секторен хидролокатор на диапазон 240m.

На фиг.7 е показана ехограмата от работата на хидролокатора за същия диапазон 240m но в друг сектор на наблюдение. Стрелката показва белега от автономен подводен апарат с диаметър 300mm и дължина 1200mm на разстояние около 50m от антената на хидролокатора. Синята ивица, наблюдавана във всички сектори, е изображението на канала с дълбочина около 10m, в който са проведени експериментите.



Фиг.7. Ехограмата от работата на хидролокатора за същия диапазон 240m но в друг сектор

ИЗВОДИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Визуализираната хидроакустична информация в цветова гама и останала на екрана хидролокатора в

продължение на N броя сондирания (десетки или стотици) осигурява повишаване на ефективността на процесите на откриване на обектите, разпознаването им и определянето на параметрите на техните траектории както и обективния контрол за подводната обстановка в по-следващи периоди от време.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Хребетов А.А., "Судовые эхолоты", изд Суд., Ленинград, 1982г.
2. Иванов И.К., Монеv Б.М., „ Предимства на цифровото кодиране и цветното изобразяване на хидроакустични сигнали“, НТК Варна 1988 г.
3. Color presentation for echosounders and sonars, Simrad Echo, vol.34,1983.
4. И.К.Иванов, " Хидроакустична цилиндрична антена за секторен хидролокатор", Акустика'2014, София.

VISUALIZATION OF HIDROACOUSTIC INFORMATION FROM A SECTOR SONAR WITH MULTI DIRECTIONAL BEAM

eng. Ivan Ivanov, eng. Stojan Kolev, eng. Martin Lolov, eng. Vassil Kossev

Under discussion are the advantages of using a visualization of the hydroacoustic information in color. The development of the functional block diagram of a sector sonar with multi directional beam and the algorithm to display the information from such sonar are shown. Typical diagrams produced by the sonar are displayed.

Keywords: sonar, beam, colors, sonar information

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2015”	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

ВИБРО-АКУСТИЧЕСКО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЦИЛИНДРИЧНИ ОБРАЗЦИ С ТИПИЧНИ ОТКЛОНЕНИЯ НА ПРОФИЛА

ВИБРО- АКУСТИЧЕСКАЯ СЪЕМКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С ТИПИЧНОГО ОТКЛОНЕНИЯ ПРОФИЛЯ

VIBRO-ACOUSTIC STUDY OF CYLINDRICAL SAMPLES WITH TYPICAL DEVIATIONS OF THE PROFILE

доц.д-р инж. Иван Коларов
катедра „Машинни елементи, материалознание и химия”,
Висше транспортно училище „Тодор Каблешков” – София, България

Abstract: Characterization of typical profile deviations of cylindrical samples by vibro-acoustic method is examined in this paper. Theoretical and experimental studies of cylindrical samples with radial eccentricity and roundness are carried out. Availability of deviation of the profile causes a change of the frequencies of the modes, transverse modes incl. Difference in the frequencies of one transverse mode appear when the sample vibrates in orthogonal directions.

There are significant frequency changes of transfer modes and the samples vibrate at different frequencies when a transverse node is excited when the ovality is 0.01-0.06 mm. These frequencies are recorded, statistically validated, and can be used to characterize the roundness of samples. These frequency changes of the transverse modes as a result of deviations of shape should be considered during the vibro-acoustic diagnostics of machine parts, since it is possible to change the accuracy of characterization of the target function of the measurement.

KEY WORDS: *Frequency of transverse modes in case of profile deviation of cylindrical form*

1. Введение

На съвременния етап на развитие на цифровите технологии и възможността за регистрация на повече характеристики за диагностика вибро-акустическият метод намира все по-голямо приложение за оценка на състоянието на отговорни машинни елементи и механизми [1]. За практически нужди честотите на напречните моди на прости прътови конструкции и греди с постоянно сечение се определя с достатъчна точност (установени са отклонения до 20-30%) чрез зависимостта на Релей и на Ритц (Rayleigh и Ritz) [2]:

$$\omega_n = A \sqrt{\frac{E I}{\mu L^4}}, \text{ rad/s}, \quad (1)$$

където E е модул на еластичност при надлъжна деформация (на Юнг), I - инерционен момент на напречното сечение на образца, μ - маса на гредата на единица дължина, ρ - плътност, A - коефициент, който отчита формата на гредата и се отчита в зависимост от модата. В [1] са показани и зависимости за определяне на местоположенията на възлите на конструкциите, а така също и други теоретични методи методи, в т.ч. номограми за изследване на проблема.

Изследванията в [3] показват, че за цилиндрични изделия (без отклонения на профила) е налице съвпадение на честотите на вибрации на образци в различни направления при една напречна мода. Това свойство спомага за по-точно идентифициране на размера на нецялостности в напречното сечение на образца.

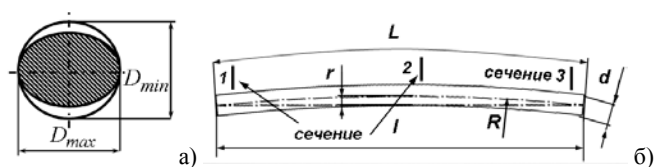
В реални цилиндрични машинни елементи са често срещани отклонения на профила в надлъжно и напречно сечение. В този случай съгласно (1) инерционният момент на напречното сечение ще бъде различен в различните направления, което ще промени честотата на напречните моди.

Проведени са предварителни експерименти с цилиндрични образци с различни отклонения на формата и са установени за напречните моди двойка собствени (резонансни) честоти, с което се доказва горното предположение. От практическа гледна точка е необходимо: доказване на причината за възникване на двойката собствени честоти за една мода в цилиндрични детайли с отклонения (1) и разширяване на приложението на метода за вибро-акустическа диагностика за бързо охарактеризиране на наличието на отклонения от формата (2). Това налага провеждане на допълнителни изследвания на влиянието на типични отклонения на формата на цилиндрични образци върху честотите на напречните моди. Налице са различни отклонения на профила на цилиндрична повърхнина в надлъжно сечение: конусообразност, бъчвообразност, седлообразност и огънатост. Логично е да се допусне, че всичките тези отклонения променят собствените честоти на образците, като симетричните относно осовата линия отклонения променят само местоположението на възлите, респективно, на честотите на напречните моди без да възникват допълнителни сигнали. При изготвянето на настоящата работа са проведени теоретични изследвания на изменението на честотите на модите при наличие на конусност и резултатите потвърдиха настоящето предположение.

Задача на настоящата работа е изследване на вибро-акустическо поведение на цилиндрични образци с някои типични отклонения на профила. Вниманието е отдадено на отклоненията: отклонение в профила от вида „овалност” и на огънатост на образца, при които очакванията за значително изменение на въведената в [3] диагностична характеристика, основаваща се на сравнение на собствените честоти в ортогонални направления.

2. Предварителни изследвания на проблема

Овалността Δ_{ov} на цилиндричния профил и огънатостта Δ_{og} на цилиндричния образец се определят от зависимостите:



Фиг. 1. Схеми за определяне на овалност на цилиндрично сечение и на огънатост на образец.

$$\Delta_{ov} = (D_{max} - D_{min}) / 2, \quad (2)$$

$$\Delta_{og} = r / l$$

където D_{max} и D_{min} са максималния и минималния диаметър на цилиндричния профил, r - максималното радиално отклонение от идеална осева линия (радиално биене), l - измерената дължина на образца; (на фиг. 2 L е действителната дължина на образца, при малки стойности на Δ_{og} $l \rightarrow L$).

Проведени са предварителни теоретични изследвания на честотите на напречните моди с честоти в звуковия спектър на цилиндричен образец с диаметър $d = 5$ mm и дължина $L = 90$ mm с отклонения от профила в напречно и надлъжно сечение на, описани в табл. 1. За целта образците са 3D моделирани в компютърна чертожна среда с описаните отклонения от профила.

Табл.1. Стойности за Δ_{ov} , mm и r при теоретично изследване на честотите на напречните моди на цилиндричен образец с диаметър $d = 5$ mm и дължина $l = 90$ mm.

Δ_{ov} , mm	0.01	0.05	0.1	-	-	-	-	-	-
r , mm	0.34	0.5	0.67	1.01	1.44	2.02	2.52	3.15	3.88

Определени са характеристиките:

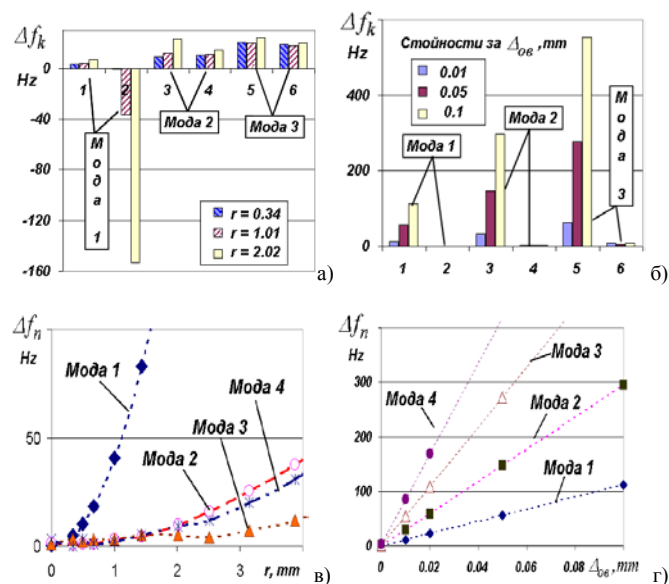
$$\Delta f_k = f_{k_0}(n) - f_k(n) \text{ и}$$

$$\Delta f_n = f_n(\delta) - f_n'(\delta) \quad (3)$$

където, $f_{k_0}(n)$ и $f_k(n)$ са собствени честоти на образец без отклонение ($f_{k_0}(n)$) и с отклонение ($f_k(n)$) на профила за напречна мода n , $f_n(\delta)$ и $f_n'(\delta)$ са собствените честоти в ортогоналните направления за напречна мода n в зависимост от изменението δ на изследваната характеристика (огънатост и овалност).

Теоретичните стойности на характеристиките Δf_k и Δf_n са получени чрез метода на крайни елементи (FEA) за изотропен материал, съответстващ на еластичните характеристики на средно въглеродна стомана. Резултатите са

показани на фиг. 2. Изследваните отклонения предизвикват неравномерно изменение на честотите Δf_k на напречните моди. Наличието на огънатост в образца предизвиква максимално изменение на честотата на първата напречна мода. Това изменение е пропорционално на огънатостта на профила. Изменението на останалите изследвани напречни моди (с номера 2 – 4) е значително по-малко. Значително по-голямо е изменението на честотите на модите Δf_k при наличие на овалност на образца. Измененията на честотите при наличие на овалност е значително по-голямо. Установени са минимално изменение на честотата на мода 1 и значително по-голямо за моди 3 и 4. Удачно е за нуждите на диагностиката да се използва характеристиката Δf_n , като по този начин се намалят грешките за охарактеризиране на изследваното отклонение.



Фиг. 2. Теоретични резултати за характеристиките Δf_k и Δf_n за цилиндричен образец с диаметър $d = 5$ mm и дължина $l = 90$ mm

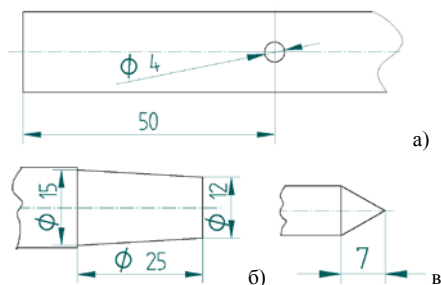
3. Резултати от изследване на лабораторни образци

За провеждане на изследването са използвани стоманени цилиндрични образци геометрични размери D_{max} , D_{min} , l показани в табл. 2. Размерите D_{max} и D_{min} са определени в три сечения, съгласно фиг. 1. Измерено е радиалното биене в образците на база l_b и е означено в таблицата със символа r_b . Част от образците са с конструктивни особености, показани на фиг. 3, а именно: цилиндричен отвор в образец 3 и конусни формования в края на образци 4 и 7.

Табл. 2. Размери на изследваните стоманени цилиндрични образци, mm.

№	Сечение 1		Сечение 2		Сечение 3		l	r_b / l_b
	D_{max}	D_{min}	D_{max}	D_{min}	D_{max}	D_{min}		
1	16.30	16.215	16.263	16.249	16.281	16.273	118	0.01/110
2	15.751	15.746	15.843	15.821	15.932	15.911	140.7	0.02/130
3	15.953	15.953	15.963	15.963	15.983	15.983	230	0.09/210
4	16.185	15.825	16.11	15.825	16.141	15.825	226	0.24/180
5	17.937	17.916	17.902	17.84	17.933	17.932	242	0.115/220
6	17.981	17.976	17.978	17.976	18.005	17.977	308	0.025/220
7	8.028	7.981	8.03	7.998	8.025	7.998	209	0.03/178
8/9 MITKO	13.955	13.954	13.957	13.958	13.955	13.958	150	0.005/140
9/10	13.955	13.955	13.956	13.953	13.960	13.952	150	0.01/140

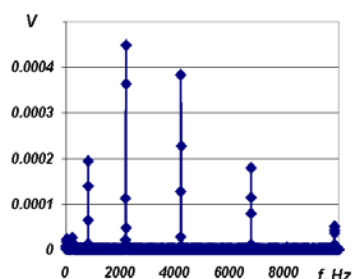
l_b - база за определяне на радиалното отклонение r .



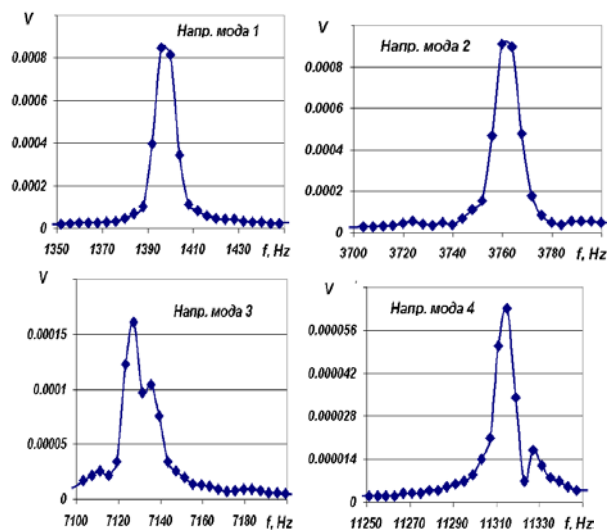
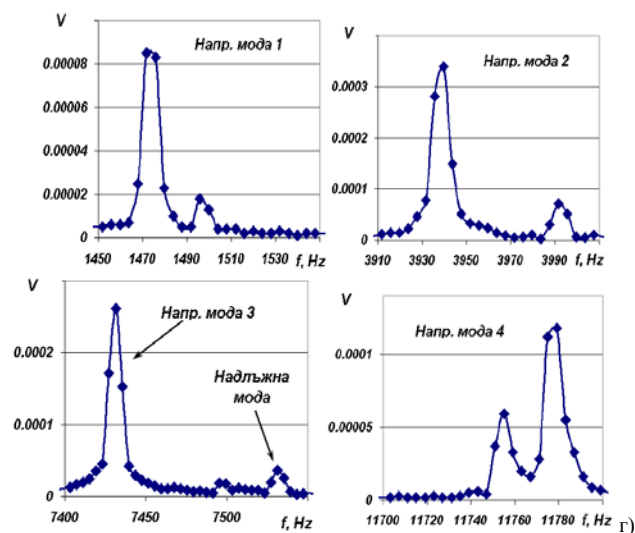
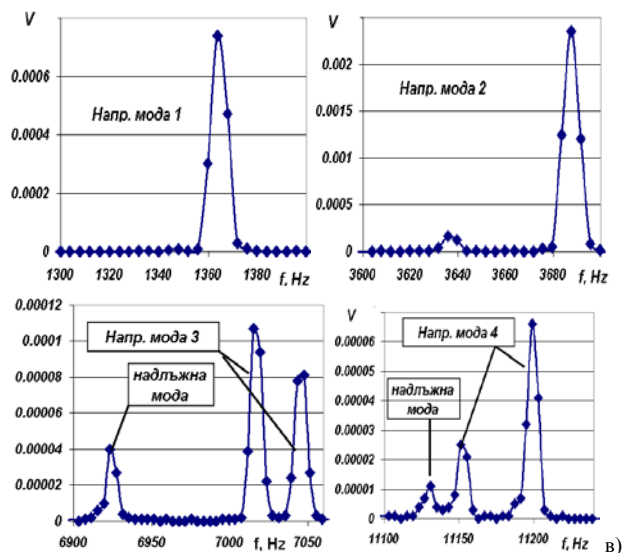
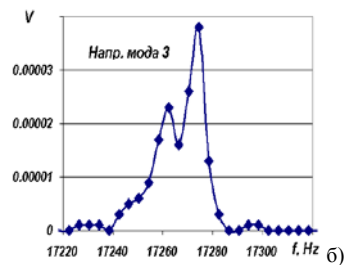
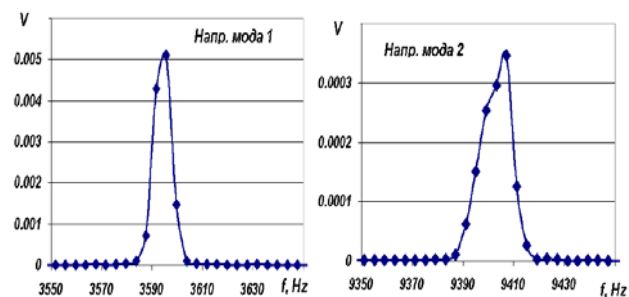
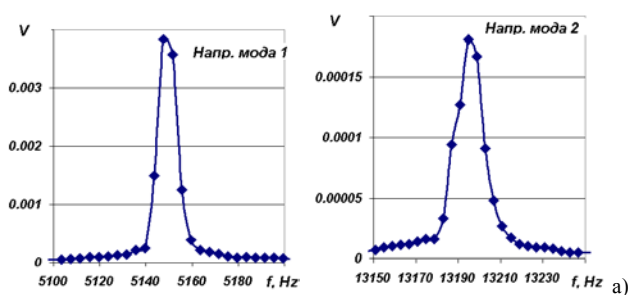
Фиг. 3. Конструктивни особености на някои образци; а) образец 3; б) образец 4; в) образец 7.

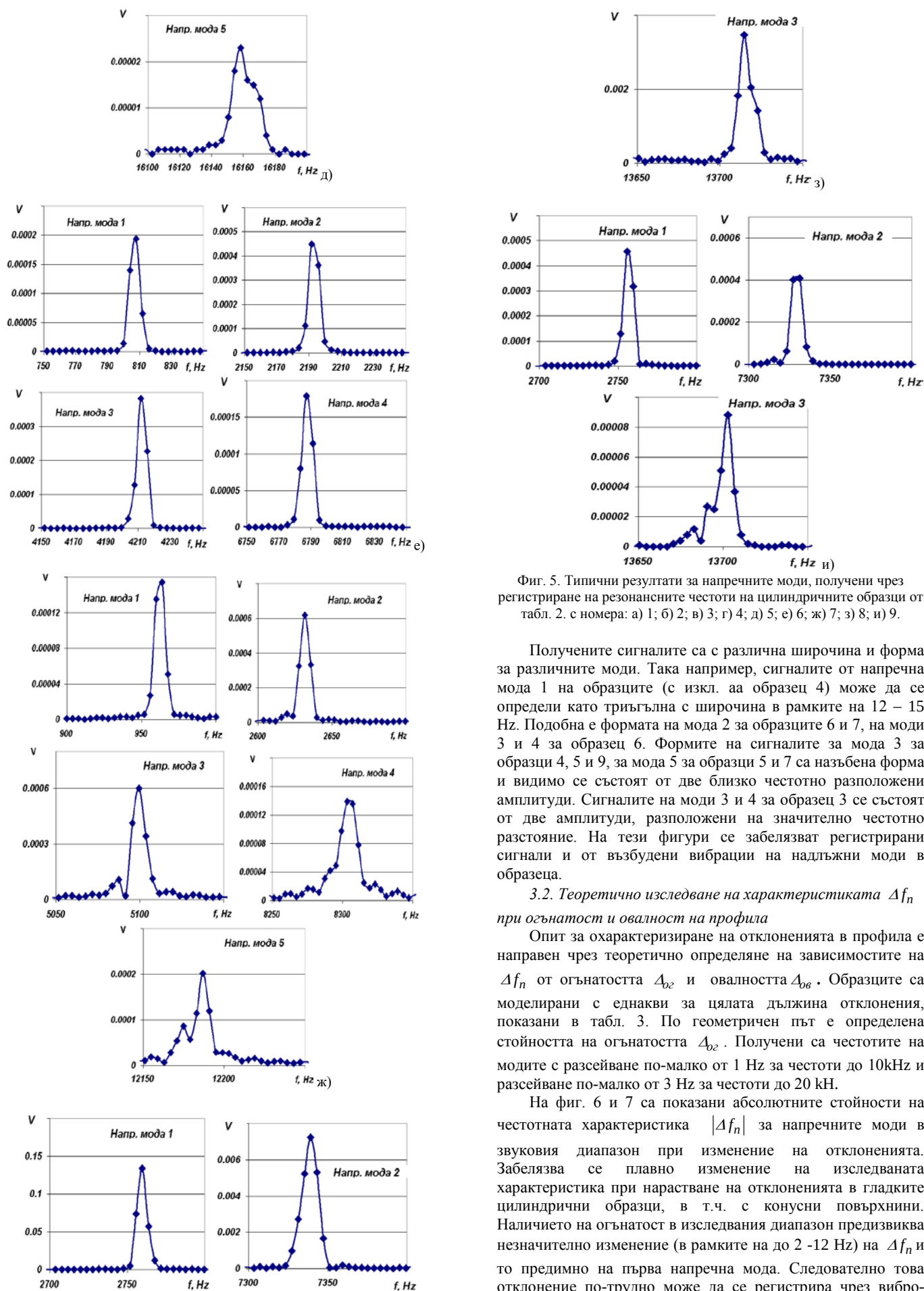
3.1. Експериментални резултати

Проведени са експериментални изследвания на собствената честота на образците от табл. 2 чрез окачване на образците на идеално гъвкава и нерастеглива нишка и импулсно възбуждане на резонансните честоти. Измерени са резонансните честоти чрез акустическа система с цифров запис и с честотна разделителна способност 3 Hz. Проведени са серия експерименти с образците и е получено статистическо потвърждение на спектрограмите за всеки образец. Охарактеризирането на модите е направено след сравнение на теоретични резултати и експериментално получени честоти на честотния спектър на регистрираните сигнали. Типични спектрограми на регистрираните сигнали в момент след затихване на възбудените в началния момент от импулсното въздействие вибрации с честоти, различни от резонансните е показана на фиг. 4. На фиг. 5 са показани типични експериментални резултати за регистрираните сигнали на напречните моди след промяна на мащабния фактор на честотата f .



Фиг. 4. Типични спектрограми на регистрираните сигнали.





Фиг. 5. Типични резултати за напречните моди, получени чрез регистриране на резонансните честоти на цилиндричните образци от табл. 2. с номера: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; д) 5; е) 6; ж) 7; з) 8; и) 9.

Получените сигнали са с различна ширина и форма за различните моди. Така например, сигналите от напречна мода 1 на образците (с изкл. аа образец 4) може да се определи като триъгълна с ширина в рамките на 12 – 15 Hz. Подобна е формата на мода 2 за образците 6 и 7, на моди 3 и 4 за образец 6. Формите на сигналите за мода 3 за образци 4, 5 и 9, за мода 5 за образци 5 и 7 са назъбена форма и видимо се състоят от две близко честотно разположени амплитуди. Сигналите на моди 3 и 4 за образец 3 се състоят от две амплитуди, разположени на значително честотно разстояние. На тези фигури се забелязват регистрирани сигнали и от възбудени вибрации на надлъжни моди в образца.

3.2. Теоретично изследване на характеристиката Δf_n при огънатост и овалност на профила

Опит за охарактеризиране на отклоненията в профила е направен чрез теоретично определяне на зависимостите на Δf_n от огънатостта Δ_{o2} и овалността Δ_{o6} . Образците са моделирани с еднакви за цялата дължина отклонения, показани в табл. 3. По геометричен път е определена стойността на огънатостта Δ_{o2} . Получени са честотите на модите с разсейване по-малко от 1 Hz за честоти до 10 kHz и разсейване по-малко от 3 Hz за честоти до 20 kHz.

На фиг. 6 и 7 са показани абсолютните стойности на честотната характеристика $|\Delta f_n|$ за напречните моди в звуковия диапазон при изменение на отклоненията. Забелязва се плавно изменение на изследваната характеристика при нарастване на отклоненията в гладките цилиндрични образци, в т.ч. с конусни повърхнини. Наличието на огънатост в изследвания диапазон предизвиква незначително изменение (в рамките на до 2 -12 Hz) на Δf_n и то предимно на първа напречна мода. Следователно това отклонение по-трудно може да се регистрира чрез вибро-акустическо изследване на резонансните честоти. Наличието на овалност от 0 до 0.06 mm предизвиква изменение на Δf_n

в рамките на 60 – 100 Hz. Това изменение е неравномерно за напречните моди, по-значително е за модите 3, 4 и 5, по-малко е изменението на Δf_n за модите 1 и 2. На базата на тези резултати може да се въведе зависимостта:

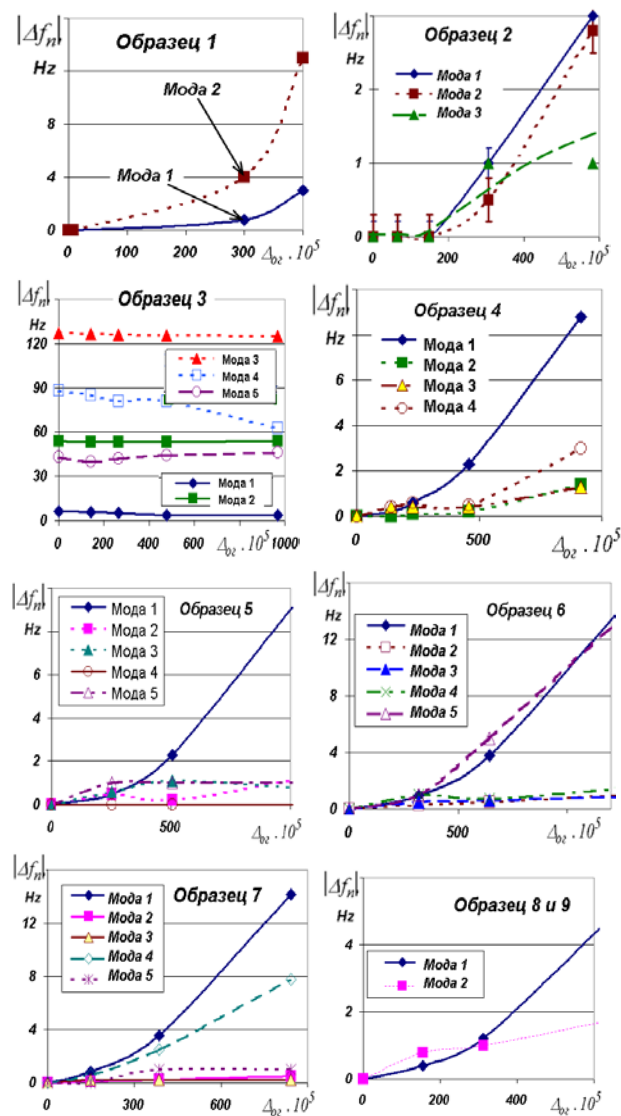
$$\Delta f_n = F_n(\Delta_{ov}), \quad (4)$$

която да се използва за охарактеризиране на еквивалентната овалност на цилиндричните образци.

За образец 3 (с напречен цилиндричен отвор) характеристиката Δf_n се променя непоследователно за изследваните моди, при липса на отклонение тя не се нулира и е по трудно да се определи пряка зависимост между нея и отклоненията и Δ_{oz} и Δ_{ov} .

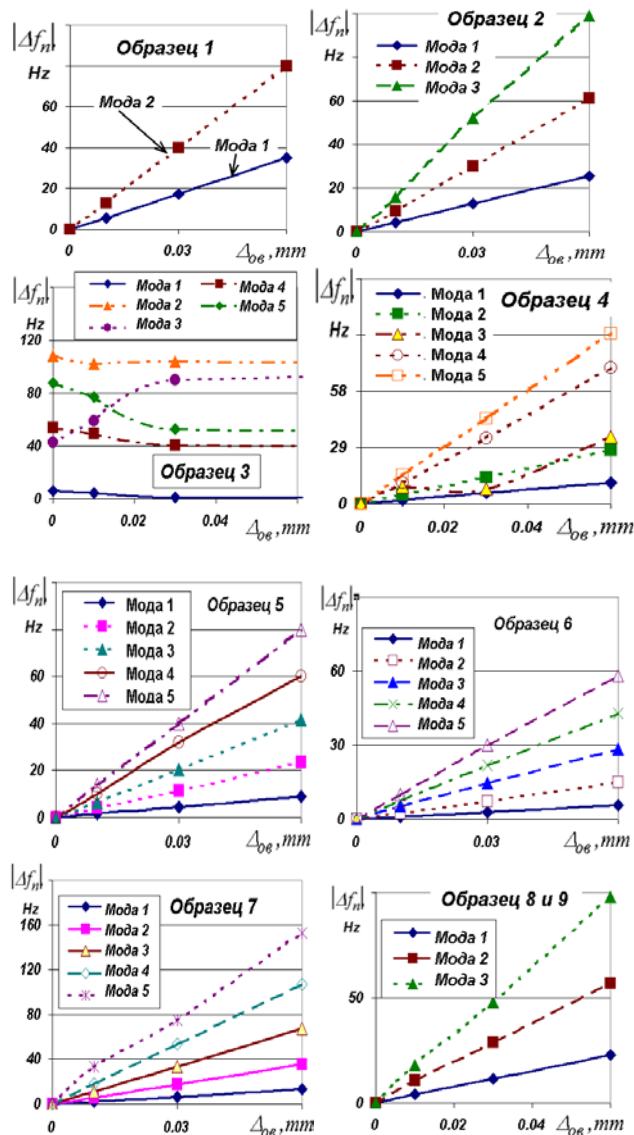
Табл. 3. Стойности за Δ_{ov} и R при теоретично изследване на честотите на напречните моди на цилиндричните образци.

Δ_{ov} , mm	0.01	0.03	0.06
R, mm	3000	6000	12000



Фиг. 6. Теоретични резултати, получени при изследване на зависимостите между стойности огънатостта Δ_{oz} и абсолютната стойност на характеристиката $|\Delta f_n|$; тук стойността на огънатостта

умножена с 10^5 .



фиг. 7. Теоретични резултати, получени при изследване на зависимостите между стойности на овалността Δ_{ov} и абсолютната стойност на характеристиката $|\Delta f_n|$.

3.3. Охарактеризиране на огънатост и овалност на профила

Чрез така изведените теоретични зависимости от фиг. 6 и 7 са охарактеризирани огънатостта Δ_{oz} и на овалността Δ_{ov} на изследваните цилиндрични образци. В таблицата са показани измерените максимални стойности на овалността. Стойностите на характеристиката $|\Delta f_n|$ са измерени от регистрираните експериментални стойности за съответната мода и те са сравнени с теоретичните криви. Получените резултати са показани в табл. 4. За някои образци теоретичните стойности овалността Δ_{ov} са определени чрез използване на повече от една моди, като номера на напречната мода е показана след количествената охарактеризация.

Резултатите показват количествено потвърждение на използвания подход за регистриране на овалност в гладки цилиндрични образци. Налице са логични отклонения между теоретични и експериментални резултати, като причините се отдават на нееднаквост, а така също и на незначителни стойности на Δ_{ov} по цялата дължина на образците. Налице е значителни отклонения за стойностите за огънатостта на образците, които се дължат на незначителното изменение на изследваната характеристика $|\Delta f_n|$.

Табл. 3. Сравнение между експериментално измерени и теоретично определени стойности за A_{b2} и A_{b3} .

№	експеримент		теория	
	$A_{b2} \cdot 10^5$	A_{b2} , mm	$A_{b2} \cdot 10^5$ /мода	A_{b2} , mm/мода
1	10	0.007	200/2	0.015/2
2	15	0.011	>500/3	0.018/3
3	43	0	-	-
4	133	0.18	>800/1	0.16/1 0.55/5 >0.6/2
5	52	0.011	>210/1	0.016/2 0.013/3 0.015/4 0.01/5
6	11	0.013	0	0.016/2
7	17	0.023	0/1 320/4	0.07/2 0.012/3 0.08/4 0.003/5
8	3	0.001	0	0.002/3
9	7	0.004	0	0.005/3

4. Изводи

Наличието на отклонения в профила като огънатост и овалност води до отклонение на собствените честоти на напречните моди в машинните елементи с цилиндрична форма. Овалност на профила със стойности 0.01 - 0.06 mm предизвикват значителни честотни изменения и при възбуждане на една напречна мода е налице честотна разлика при вибриране на образеца в ортогонални направления. Тази честотна разлика се регистрира, статистически се потвърждава и може да бъде използвана за охарактеризиране на овалността на образците. Изменението на честотите на модите в резултат на отклонения на формата трябва да се има предвид при вибро-акустическата измервания на машинни елементи, тъй като е възможно да промени точността за охарактеризиране на целеви функции на измерването.

5. Литература

1. The Fundamentals of Modal Testing. Application Note 243 – 3. Agilent Technologies' Test and Measurement Support, Services, and Assistance
2. Harris' shock and vibration handbook. Allan G. Piersol, editor.—5th ed. McGRAW-HILL. 2002. ISBN 0-07-137081-1.
3. Коларов И. Диагностика на повреди в машинни елементи чрез модален анализ. Монография. София 2015 г.

	АКУСТИКА Национална конференция "Акустика 2015"	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г Декември 2015.
Година XVII	□ Брой 17	

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА СТАБИЛИЗАТОРИ НА НАЛЯГАНЕ В УРЕДБА ЗА КОМПРИМИРАНЕ И УТИЛИЗАЦИЯ НА ФАКЕЛНИ ГАЗОВЕ

STUDY THE EFFECTIVENESS OF PRESSURE STABILIZERS FOR COMPRESSION AND UTILIZATION OF FLARING GASES

Пировски Х. А. , Драганчев Х.С.

Технически Университет – Варна, България, christo.pirovsky@tu-varna.bg, hristo.draganchev@tu-varna.bg

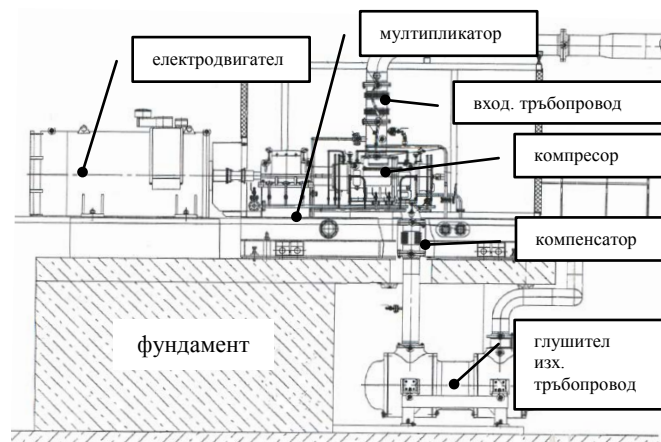
Abstract: This article presents a study of the effectiveness of pressure stabilizers for compression and utilization of flare gases. The pressure stabilizer is designed for reactive principle of operation due to technical reasons related to the utilization of flare gas in the processing of oil. It is proposed that the most effective solution for detuning of acoustic resonances in the outlet pipe of the screw compressors is mounting pressure stabilizer adjacent to the outlet flanges of the compressor unit.

Keywords: oil refinery, flaring gases, compression and utilization, pressure stabilizers

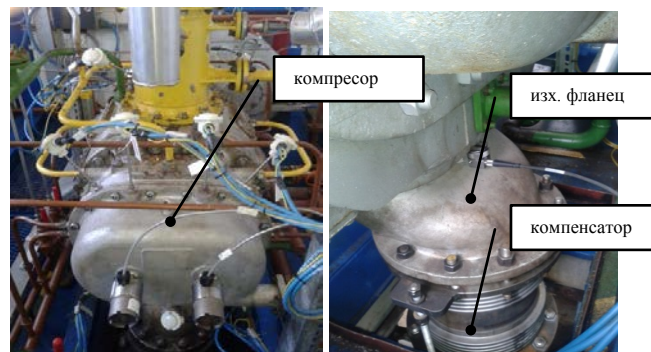
1. Въведение

В изпълнение на програма за реконструкция и модернизация на "ЛУКОЙЛ Нефтохим Бургас" АД, на територията на „Абсорбционна газофракционираща инсталация и факелно стопанство“ бе изградена нова компресорна инсталация, оборудвана със съвременен уникален винтов компресор, предназначен за компримиране и утилизация на факелни газове. Процесът компримиране представлява технология за промишлена обработка на факелните газове чрез съгъстяване. Изграждането на подобни инсталации в нефтепреработвателните предприятия има сериозен екологически ефект с него се осигурява висока степен на утилизация на факелните газове получени от технологичните процеси на обработка и съхранение на горива.

Компресорната уредба ВК-300 за компримиране и утилизация на факелни газове включва два винтови компресора - I-ва и II-ра степен, задвижвани от електродвигатели (1200 ÷ 3000 грт) посредством мултипликатори с предавателни отношения съответно 1.49 и 2.88. На изхода от всеки компресор са монтирани хоризонтално разположени двукамерни стабилизатори на налягане (глушители). На фиг. 1 е показана схема на II-ра степен на компресорната уредба. Честотите на въртене на двете степени на компресорната уредба се регулира самостоятелно за всяка степен - плавно в зависимост от налягането на факелните газове на входа на всяка степен на компресора. Номиналната производителност на уредбата е 15000 nm³.



Фиг.1. Компресорна уредба - общ вид



Фиг. 2. Компресор II-ра степен - връзка към глушител

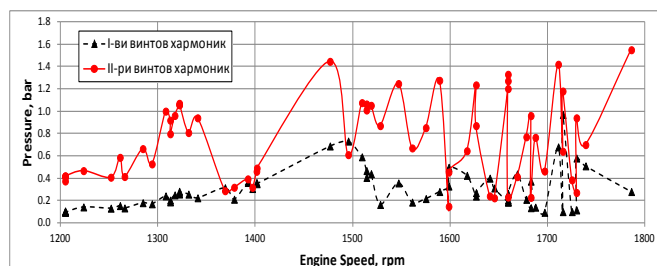
По време на пусковите изпитания на новоизградената компресорна инсталация, в която основното оборудване е съвременни уникални винтови компресори, са установени повишени вибрации на тръбната обвързка на напорните тръбопроводи след първа и втора степен на компресорната уредба. В резултат на това са възникнали аварийни ситуации като скъсване на компенсатор на топлинните разширения, скъсване на фундаментна рама на стабилизатор на налягане след втора степен на компресора, аварийно изключване на уредбата при достигане на честота на въртене 2300 грт, поради обгазяване със сероводород в следствие на разхлабване (саморазвиване) на болтовете на някои фланцови съединения на тръбопроводите.

Проведено е експериментално изследване на вибрационното състояние на компресорната уредба, измерване на пулсациите на налягане на транспортирания флуид и числено изследване на динамичното напрегнато и деформирано състояние на тръбната обвързка на компресорната уредба от научно-производствена лаборатория „Виброконтрол диагностика на машини и съоръжения“ към Технически Университет - Варна. В резултат на проведените изследвания е установено:

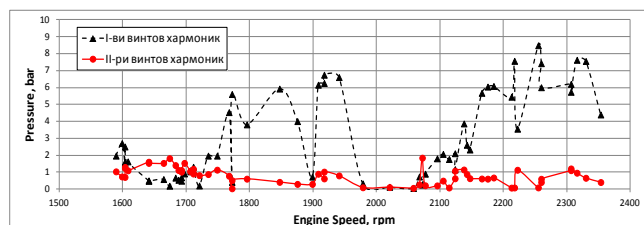
- възникването на газодинамични (акустични) резонанси в тръбните участъци свързващи съответните изходи от компресор I-ва и II-ра степен с глушителите. Установени са пулсации на налягане на компресирания факелен газ значително превишаващи препоръчаните в [1] норми. На фиг. 3 и фиг. 4 е показано изменението на пулсациите на налягане в съответно в тръбопровод изход от I-ва степен на компресора – вход в глушител и изход от II-ра степен на компресора – вход в глушител втора степен;

- хармоничните съставлящи на вибрациите на напорните тръбопроводи на участъците изход от I-ва и II-ра степени на компресора съдържат хармонични съставлящи, съответстващи само на винтовите хармоници на компресорите, т.е. вибрациите са високочестотни и се възбуждат от пулсациите на налягане;
- в диапазона на изменение на честотата на въртене на компресорите се наблюдава възбуждане на механични резонанси в резултат на съвпадение на честотите на свободните трептения на тръбопроводите в честотите на пулсациите на налягане на компресирания газ.

Анализът на резултатите от проведените експериментални и числени изследвания показва, че за постигане на надеждна работа както на тръбната обвръзка на компресорите, така и на роторите от I-ва и II-ра степен на компресора е необходимо разработване на мерки за намаляване на пулсациите на налягане в напорните тръбопроводи и отстраняване на условията за възникване на акустични резонанси на газовите потоци.



Фиг.3. Пулсации на налягане с I-ви и II-ри винтов хармоник на изхода от първа степен на компресорната уредба.



Фиг.4 Пулсации на налягане с I-ви и II-ри винтов хармоник на изхода от втора степен на компресорната уредба.

2. Цели

Целите на настоящото изследване са:

- разработване на мерки за отстраняване на условията за възникване на акустични резонанси в участъците на напорните тръбопроводи към глушителите на I-ва и II-ра степен на компресорната уредба;
- разработване на стабилизатори на налягане с разширена ефективност, покриваща диапазона на изменение на винтовите хармоници на двата компресора.

3. Разработване на мерки за отстраняване на условията за възникване на акустични резонанси

Съгласно проекта, инсталацията за компримиране и утилизация на факелните газове трябва да работи надеждно с газове чиито състав се променя в граници показани в таблица 1. Условно компресорната уредба е проектирана за работа с факелни газове, намиращи се в границите между тежък газ със скорост на звука при температура 20 °C – 283 m/s и лек газ със скорост на звука – 439 m/s. В таблица 2 са показани съответно скоростта на звука и дължината на звуковата вълна при двете крайни стойности на работния флуид при съответните работни температури след 1-ва степен на компресора t = 120 °C и след 2-ра степен на компресора t = 150 °C.

Таблица 1. Състав на факелните газове

Наименование	Химична формула	Обемни дялове в %	
		Мин.	Макс.
Водород	H ₂	10	45
Сероводород	H ₂ S	2	8
Метан	CH ₄	4	20
Етан	C ₂ H ₆	4	12
Пропан	C ₂ H ₃	20	40
i - Бутан	i-C ₄ H ₁₀	4	18
n - Бутан	n-C ₄ H ₁₀	8	20
n - Пентан	n-C ₅ H ₁₂	2	15

Таблица 2. Скорост на звука и дължина на звуковата вълна

	I-ва степен t=120°C		II-ра степен t=150°C	
	тежък	лек	тежък	лек
Скорост на звука, m/s	317	491	336	520
λ [m], при 1200 rpm	2.66	4.11	1.46	2.26
λ [m], при 3000 rpm	1.06	1.64	0.58	0.90

Условието за възникване на акустичен резонанс в изходящия тръбопровод на всяка степен от компресорния агрегат е дължината L на тръбопровода с постоянно напречно сечение да бъде кратна на $\frac{1}{2}$ от дължината на звуковата вълна λ :

$$\frac{L}{\frac{\lambda}{2}} = k = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

или

$$L = k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

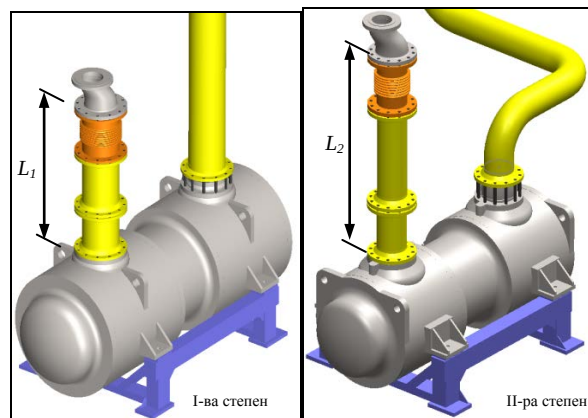
където:

$$\lambda = \frac{c}{f_n} \quad \text{дължината на звуковата вълна, m;}$$

$$c \quad \text{скорост на разпространение на звука в газа, [m/s].}$$

$$f_n \quad \text{честота на пулсациите на налягане, [Hz].}$$

На фиг. 3 са показани изходящите тръбопроводи от компресори I-ва и II-ра степени до глушителите.



Фиг. 3. Дължина на изходящ тръбопровод от компресора към хоризонтално разположен глушител

Пулсациите на налягане се създават от винтовите компресори с честота равна или кратна на първия винтов хармоник:

$$f_n = v \cdot z_v \cdot f_v \quad (3)$$

където:

$$v \quad \text{номер на винтовия хармоник (1, 2, 3...);}$$

$$z_v \quad \text{брой на винтовете на водещия вал;}$$

f_v - честота на въртене на водещия вал, [Hz]

$$f_v = \left(\frac{n_{\text{дв}}}{60} \right) \cdot r_{\text{ред}};$$

- честота на въртене на двигателя, [min^{-1}];

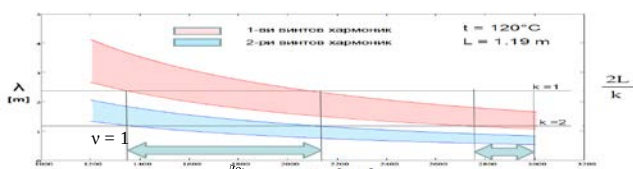
- предавателно число на мултипликатора.

Съгласно формули (2) и (3) честотата на въртене на водещия вал на компресорната степен, при която ще възникне акустичен резонанс в даден тръбопровод с дължина L с v -тия винтов хармоник се определя по зависимостта:

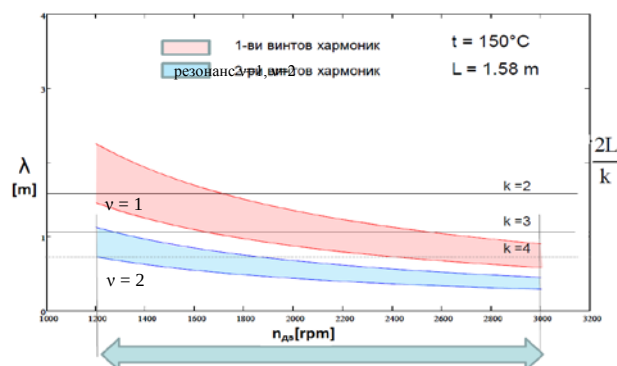
$$f_v = \frac{c \cdot k}{2 \cdot L \cdot v \cdot z_v} \quad (4)$$

Тъй като съставът на факелния газ се променя в широки граници (таблицы 1 и 2) скоростта на звука също ще се изменя. Този факт определя, че честотата на въртене на водещия вал f_v , при която ще възникне акустичен резонанс, ще приема различни стойности в зависимост от състава на газа.

На фиг. 4 и фиг. 5 са показани честотните зони на развитие на акустични резонанси с първи и втори винтов хармоник при съответните дължини на тръбопроводите на I-ва и II-ра степен на компресорната уредба.



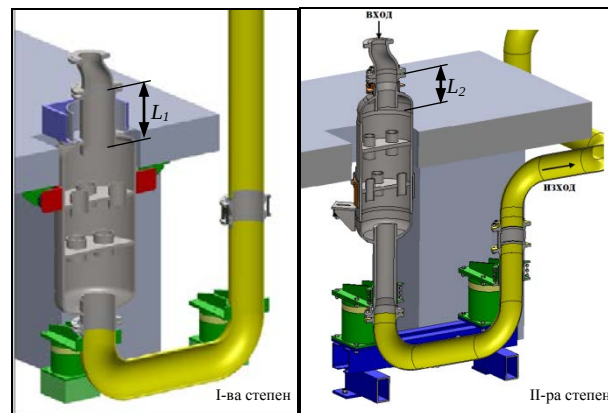
Фиг.4. Зони на развитие на акустичен резонанс в първа степен на компресорната уредба



Фиг.5. Зони на развитие на акустичен резонанс във втора степен на компресорната уредба

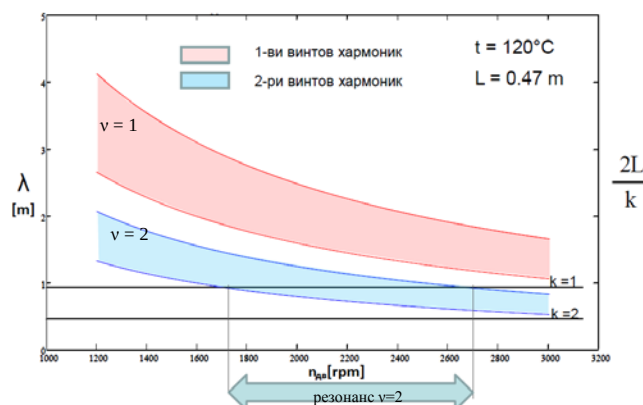
Тъй като дължините на тръбните участъци след I-ва и II-ра степени са съответно $L_1=1.19$ m и $L_2=1.58$ m, то при работа факелен газ, изменящ своя състав между тежък и лек, акустичен резонанс в тръбопроводите след I-ва и II-ра степени ще възникнат с 1-ви и 2-ри винтов хармоник, с кратност $k=1,2$ за I-ва степен и $k=2,3,4$ - за II-ра степен. Това се потвърждава от показаните на фиг.3 и фиг.4 резултати от измерване на пулсациите и налягане в напорните тръбопроводи след I-ва и II-ра степен.

За да се разстрои системата, т.е. да се отстранят условията за възникване на акустичен резонанс в напорните тръбопроводи след I-ва и II-ра степени с първите два винтови хармоника на компресорите е необходимо дължината на тръбните участъци между изход от компресора – вход в глушителя да бъде минимална. На фиг. 8 са показани реконструираният разположение на глушителите за I-ва и II-ра степени.

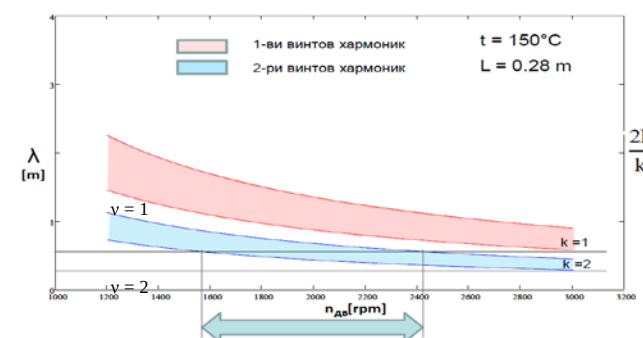


Фиг. 8. Дължина на изходящ тръбопровод от компресора към вертикално разположен глушителя

Дължините L_1 и L_2 са определени като минимално възможни от конструктивни съображения.



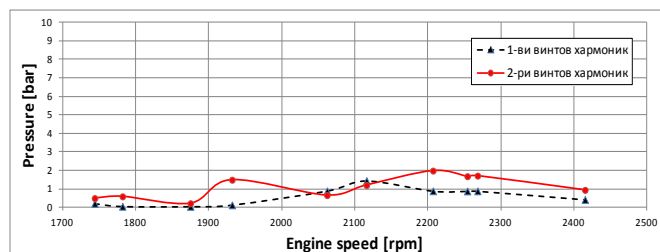
Фиг.9. Зона на развитие на акустичен резонанс в първа степен на компресорната уредба



Фиг.10. Зона на развитие на акустичен резонанс във втора степен на компресорната уредба

На фиг. 9 и фиг. 10 са показани условията за развитие на акустичен резонанс в тръбните участъци след I-ва и II-ра степени при дължини след реконструкцията съответно $L_1=0.47$ m и $L_2=0.28$ m.

Анализът на тези резултати показва, че кратност на полуълната с първи винтов хармоник в двете степени не съществува (линията $k=1$ не пресича областта $v=1$), т.е. с направената реконструкция на системата практически са отстранени условията за възникване на резонанс с първи винтов хармоник. Условието за развитие на резонанс с втори винтов хармоник остава, но поради по-малката амплитуда регистрирана на изхода от компресора, пулсациите са по-слаби, фиг. 11.



Фиг. 11. Пулсации на налягане с I-ви и II-ри винтов хармоник на изхода от втора степен на компресорната уредба след въвеждане на вертикален трикамерен стабилизатор.

4. Изследване на ефективността на стабилизаторите на налягане

Стабилизаторът на налягане е средство за намаляване на въздействието от развитието в тръбопроводните системи на вълнови процеси, хидравлични удари и/или хидроаеродинамични резонанси при транспортирането на различни флуиди, газ, течности, двуфазни среди, т.е. стабилизаторът е средство за намаляване на пулсациите на налягане в тръбопроводите. Стабилизаторът на налягане намалява енергията на колебателния процес чрез поглъщане, отразяване или разсейване. По принципа си на работа стабилизаторите на налягане са идентични с глушителите на шум, но се отличават от последните по стойностите на работното налягане.

При проектиране на стабилизаторите на налягане е избран реактивният принцип на работа поради технологични причини свързани с процеса на усвояване на факелните газове при преработката на нефта.

При подходящи условия, налягане и температура на факелния газ, се образува техногенен аналог на тешемахерит $\text{NH}_4[\text{HCO}_3]$, чиито кристали запушват тръбопроводите и пречат за транспорта на втечените въглеродороди [2]. Следователно, при използване на демпфиращи елементи в демпфиращите камери на стабилизаторите, перфорацията на последните ще се запушва, с което силно ще се понижи тяхната ефективност.

За избрания в разглеждания случай, реактивен принцип на работа ефективността на стабилизатора на налягане при честота над 1500 Hz ще бъде сравнително ниска, т.е. за напорния тръбопровод след I-ва степен ефективността на работа на стабилизатора над 5-ти винтов хармоник ще бъде ниска, а за напорния тръбопровод след II-ра степен ефективността на работа на стабилизатора над 3-ти винтов хармоник ще бъде ниска.

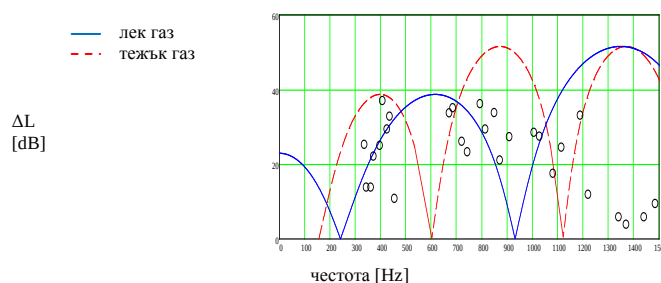
Анализът на публикации [3,4], посветени на изследването на пулсациите на налягане на транспортирания флуид и вибрациите на винтови компресори, както и анализът на резултатите от измерване на пулсациите на налягане в напорните тръбопроводи на компресорната уредба ВК 300 показват, че проектираните стабилизатори на налягане в широк честотен диапазон трябва да осигурят коефициент на стабилизиране на налягането:

$$k = \frac{P_1}{P_2} \geq 16 \quad (5)$$

където: P_1 е налягането след винтовия компресор; P_2 – налягане след стабилизатора.

Условието (5) определя, че ефективността на стабилизатора $\Delta L \geq 24$ dB. Такава висока ефективност на стабилизатора на налягане, предвид ограничените възможности за увеличаване на диаметъра му, може да се постигне единствено чрез използване на трикамерен стабилизатор на налягане. Прогнозното пресмятане на ефективността на стабилизаторите на налягане е извършено по представената в [5], методика за пресмятане на ефективността на многокамерни глушители на шум.

На фиг.12 са показани прогнозните характеристики на коефициент на ефективност ΔL във функция на честотата за двата крайни случая на компримиране на тежък и лек газ.



Фиг. 12. Честотни характеристики на стабилизатора на II-ра степен при тежък и лек газ

Проведеното измерване на пулсациите на налягане на входа и изхода от стабилизатора на налягане на I-ва и II-ра степен потвърждава прогнозните изчисления. По време на измерванията на пулсациите на налягане обаче не е определен съставът на факелните газове и в зависимост от подаването на газ от различни инсталации съставът на газа се е променял, но по-скоро е бил близо до лекия газ.

5. Изводи

- Ефективно разстройване на акустичните резонанси в тръбната обвивка на винтов компресор за компримиране и утилизация на факелни газове се осигурява чрез монтиране на стабилизаторите на налягане в непосредствена близост до изходящите и входните фланци на компресорния агрегат.
- При оразмеряване на стабилизатори на налягане за тръбопроводни системи за транспортиране на газови смеси и природен газ с налягане до 2 МПа ефективно могат да се използват методите на акустиката за оразмеряване на реактивни глушители на шум.
- Неизползването на демпфиращи материали за поглъщане на звуковата енергия в честотния диапазон 1200 ÷ 3000 Hz влошава ефективността на работа на стабилизаторите на налягане, но така се гарантира продължителната му експлоатационна надеждност предвид намаляване на вредното въздействие на техногенния аналог на тешемахерит, който се отлага в тръбопроводите на факелните газове.
- С реализиране на предложенията за разстройване на акустичните резонанси и вграждане на стабилизатори на налягане е постигнато повишаване на надеждната експлоатация на инсталацията за компримиране и утилизация на факелните газове на ЛУКОЙЛ Нефтохим Бургас.

Литература

1. РТМ 38.001 – 94. Указания по расчету на прочность и вибрации технологических стальных трубопроводов, Управление департамента нефтепереработки Минтопэнерго РФ, 1994.
2. Дойнов М., Л. Бозаджиев, Д.Димов, Техногенен аналог на тешемахерит от съоръженията на ЛУКОЙЛ Нефтохим, Бургас, Геохимия, минералогия и петрология, с.161, 2008.
3. Donald R. Smith, "Pulsation, vibration, and noise issues with wet and dry screw compressors" Proceedings of the Fortieth Turbomachinery Symposium, September 12-15, 2011, USA
4. Jürgen Wennemar, "Dry screw compressors performance and application range", Proceedings of thirty-eighth Turbomachinery Symposium" 2009
5. Григорьян Ф.Е., Е.А.Перцовский, Расчет и проектирование глушителей шума энергоустановок, Ленинградское отделение „Энергия“, л.,1980.

LASER-INDUCED ULTRASOUND FOR NDT OF MATERIALS

ЛАЗЕРНЫЙ УЛЬТРАЗВУК ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ

Ph. D. V. V. Kozhushko¹, Ph. D. V. P. Sergienko¹, Ph. D. Y. Mirchev², Prof. M. Mihovski²

¹ V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Belarus

² Institute of Mechanics, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria

E-mail: ¹ kozhushko@laser-ultrasound.com; ² nntdd@abv.bg.

Abstract: The paper considers the features of ultrasound excited by laser pulses and possibilities of broadband detection. The nanosecond pulses of solid-state Nd:YAG laser operating on the wavelength of $1.064 \mu\text{m}$ were employed in the experiments with single-crystal [100] aluminum disc and silicon [100] wafer. The longitudinal ultrasonic pulses with pronounced compression phase were induced owing to optoacoustic conversion in thin layer of black acrylic paint, which covered the surface of specimens. Two types of detectors were employed. The homemade piezoelectric transducer and immersion method were used for detection of the probe pulse at the opposite side of the specimens. The influence of the upper water layer on the spectrum of laser-induced pulse was shown in the experiments with silicon wafer. The presence of the water layer increases the efficiency of the excitation in the low frequency range, without water layer the form of the signal and its spectrum changes according to the established expressions. The obtained spectra of the pulses encompassed more than two decades with the local minimum of the sensitivity at about 100 MHz, which corresponds to the wavelength of ultrasound equaled to the thickness of the piezoelectric film. The homemade pancake coil transducer detected the alternative electromagnetic field induced by eddy-currents in single-crystal aluminum that allowed approach the frequency more than 150 MHz that showed an example of non-contact measurements of broadband ultrasonic pulses.

KEYWORDS: NON-DESTRUCTIVE TESTING; LASER ULTRASOUND; PIEZOELECTRIC TRANSDUCER; NON-CONTACT DETECTION; ELECTROMAGNETIC ACOUSTIC SENSOR.

1. Introduction

The recent advance in application of laser-induced ultrasound for diagnostics of composites attracted the NDT community to the further development of this technique [1, 2]. These methods of ultrasound excitation employ optoacoustic conversion where the absorbed part of the laser pulse energy induces the non-stationary heating, which involves the thermal expansion of the media and launches the pressure pulses. The efficiency of the optoacoustic transformation depends on the optical absorption, thermophysical and mechanical properties of the absorbing and transparent media. In materials with strong optical absorption as, for instance, in metals, the nanosecond laser pulses induce transient pressure pulses with pronounced compression phase of comparable duration and essentially broad spectra encompassing more than two decades. The form of the laser spot on the absorbing surface and the envelope of the pulse intensity define the transient pressure form and the directivity of the ultrasonic beams. There are different schemes for emphasizing the excitation of acoustic modes variety. The focusing of the laser radiation by cylindrical lens on the metal surface provides the conditions for efficient excitation of Rayleigh or guide acoustical pulses, which are sensitive to the near surface mechanical discontinuities [3, 4]. Nevertheless, the longitudinal pulses are widely used for solution of NDT tasks and materials characterization. The power density of nanosecond solid-state lasers can achieve the ablation threshold of 20 MW/cm^2 without focusing, that allows the excitation of longitudinal pulse with initially plane wavefront and the pressure amplitude exceeding hundred bar. A non-contact excitation of the probe ultrasonic pulses simplifies the task of delivering of elastic disturbance to the investigated media since it does not require acoustical contact and sophisticated electronics. The transient form of induced pressure pulses possesses

pronounced compression phase and broad bandwidth, which covers more than two decades that significantly exceeds the bandwidth of the conventional piezoelectric transducers working in pulse-echo mode. The solutions of the NDT tasks require detection of the transmitted probe pulse and/or reflected pulses. All-optical methods of registration are very attractive solution for the industrial applications [3-5]. All the same, broadband piezoelectric transducers can be used only for the detection of the probe pulse since their operational frequency range is competitive with optical methods but it uses immersion of the specimen. The non-contact detection in metals can be carried out by electromagnetic acoustical transducers (EMAT), which are sensitive to the alternative electromagnetic fields induced by propagating ultrasonic pulses and can be used for evaluation of the metals and metallic composites owing to eddy currents or magnetostriction [6]. This paper shows some results of broadband detection of the laser-induced ultrasonic pulses by two types of homemade transducers.

2. Excitation of broadband longitudinal pressure pulses

The laser-induced ultrasound implies the conversion of pulsed laser radiation into an elastic disturbance of a medium in nanosecond time scale. The paper considers the excitation of longitudinal pulses by the laser spot of diameter $> 5 \text{ mm}$. The induced ultrasonic pulse has short transient form and as result the smooth spectrum, which covers the bandwidth of more than two decades. Obviously, the spectral efficiency of conversion and the achieved high frequency depend on the duration of the laser pulse envelope. The transfer function method separates materials' properties and parameters of laser pulse. In considered approximations, the spectrum of the induced pressure or particles' velocity can be written as:

$$\nu(\omega) = K(\omega) I_0 L(\omega), \quad (1)$$

here ω is a cyclic frequency, $K(\omega)$ is a efficiency of the spectral conversion or transfer function depending on the properties of the materials, I_0 is the intensity of the laser pulse and $L(\omega)$ is the spectrum of the laser pulse envelope [7].

The spectrum of the laser-induced pressure pulse depends on the spatial distribution of the heat sources but also on the acoustical properties of the transparent medium. Despite the fact of strong optical absorption $\geq 10^4 \text{ cm}^{-1}$, the metal surface significantly reflects laser radiation of optical range. In order to increase the efficiency of the ultrasound excitation the thin absorbing layer of black acrylic paint can be employed. The water layer over the acrylic paint acoustically loads the surface of absorber that changes the transfer function and the signal form of the induced pressure pulse. Experimental results proved the analytical solution [8].

The expression for the transfer functions for two limit cases of boundary conditions, namely, the acoustically free K_f and rigid K_r can be written as follows:

$$K_r(\omega) = \frac{\beta}{c_h \rho} \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \omega^2 / c_L^2}, \quad (2)$$

$$K_f(\omega) = \frac{\beta}{c_h \rho} \frac{-i\omega\alpha / c_L}{\alpha^2 + \omega^2 / c_L^2}, \quad (3)$$

here β is a thermal expansion coefficient, c_h is a heat capacity, ρ is a density, α is optical absorption and c_L is a longitudinal wave velocity.

These transfer functions are connected by the expression in frequency domain $K_f = -i\omega K_r / \alpha c_L$ or $K_f = \frac{1}{\alpha c_L} \frac{dK_r}{dt}$ in time

domain. The spectral efficiency of the excitation decreases with the frequency in the case of acoustically loaded media but in the case of acoustically free border K_f has a maximum at the frequency $\omega = \alpha c_L$ that corresponds to the case when the acoustical wave length is equal to the depth of optical absorption. The bandwidth of the pulse is broader in the case of acoustically free interface but in the frequency range $\omega < \alpha c_L$ the efficiency of excitation is lower in comparison with the acoustically rigid interface. Therefore, in case of the strong absorbing media and acoustically rigid border, the spectrum of the induced pressure is proportional to the spectrum of the laser pulse envelope, giving the pulse with pronounced compression phase, which seems to be very promising for NDT applications.

The probe pulse propagates in the investigated medium where it attenuates due to the scattering on the grain boundaries and/or due to the interaction with dislocations in case of metals. The decreasing of the amplitude due to the reflection and transmission through the interfaces can be obtained from the well-known expressions:

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}, \quad T = \frac{2z_2}{z_2 + z_1}, \quad (4)$$

where z_1 is the impedance of medium from and z_2 of which propagates acoustical pulse.

The induced pulse diffracts with distance, but the influence of the diffraction is negligible when the product of wavelength λ and the travelled distance x is smaller than the diameter d square of the induced ultrasonic beam that can be written for criteria D as:

$$D = \frac{\lambda x}{d^2}, \quad (5)$$

when $D < 1$, the influence of diffraction is negligible.

3. Broadband detection of laser-induced pressure pulse

3.1. Piezoelectric PVDF foil detector

Different types of sensors such as photodiodes, capacitive or EMATs can detected elastic pulses [1, 4, 6, 9], but it is also possible to employ the traditional piezoelectric transducers, which uses

direct piezoelectric effect. This section deals with piezoelectric foil detector, which sensitive element is 25 μm thick polarized foil of polyvinylidene fluoride (PVDF). A disk of 2 mm diameter of metalized PVDF foil was glued on a backing media, the top surface of the film was covered by protecting aluminium foil. The displaced charge is proportional to the instantaneous mean stress inside the foil [9]:

$$q(t) = \frac{e_{33} A}{h} \int_0^h P(x, t) dx, \quad (6)$$

where e_{33} is the piezoelectric stress constant, A is the area of the transducer, h is the thickness of the foil, $P(x, t)$ is the pressure field, which in the general case combines counter propagating waves. The transducer operates in the current detection mode where the induced charge flows through the low impedance resistor R which defines a time response constant as $T = 2\pi RC$, where C is the capacity of the transducer. The high frequency border of the operating bandwidth should satisfy the condition $f < 1/T$. The measured signal is proportional to the voltage drop and, therefore, it is a derivative of the pressure pulse with respect to time as [9]:

$$U(t) = R \frac{dq}{dt} = R \frac{e_{33} A}{h} \int_0^h \frac{d}{dt} P(x, t) dx. \quad (7)$$

As the foil has defined thickness, the sensitivity varies with the frequency. In the frequency range, the maximum of sensitivity corresponds to ultrasonic wavelength, which is equal to the double foil's thickness. The numerical solution of the task of ultrasonic field calculation in the layered construction of transducer yields the estimation of the spectral sensitivity in the frequency domain.

The relative sensitivity shows local minima at zero frequency and at the resonance frequencies according to the formula $n V_L / h$, where n is an integer, $V_L = 2400 \text{ m/s}$ is the velocity of the longitudinal wave in PVDF and $h = 25 \mu\text{m}$ is the nominal thickness of the film. The first thickness resonance is at 96 MHz. The calculations were carried out without taking into account attenuation of the ultrasound and diffraction, which reduce the high and the low frequency bands of the pulse's spectrum, respectively. In general, the attenuation increases with frequency square in liquids. The attenuation of ultrasound in the coupling water layer naturally decreases the high frequencies according to $\alpha_{att} = 2.17 \times 10^{-3} \text{ dB/MHz}^2/\text{cm}$. The operational amplifier with a gain of 26 dB and the bandwidth up to 100 MHz at the level of -3 dB was used in construction of transducer. The measured root mean noise square was about 2 mV.

3.2. Electromagnetic acoustic transducer

On the whole, the EMATs can induce and detect ultrasonic pulses in the metals and metal-based composites. It is very promising technique since it is completely contact-free but the volume of material's types it can consider is a subset covered by piezoelectric transducers which deal with any kind of material. The combinations of the laser-induced ultrasound and detection coils yield broadening of operational bandwidth.

In the conductive materials, the time-varying electromagnetic fields arise from Lorentz forces on the eddy currents and from the forces on the magnetization vector. The equations governing the coupling of electromagnetic field and the elastic deformation via the displacement vector $\mathbf{u}$ are given [6]:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad (8)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0, \quad (9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mu_0 (\mathbf{H} - \mathbf{M}_0 \nabla \cdot \mathbf{u}) + e \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (10)$$

where ρ is density, $\boldsymbol{\sigma}$ is the stress tensor, $\mathbf{E}$ is the electric field, $\mathbf{v} = \partial \mathbf{u} / \partial t$ is the vector of particles' velocity, $\mathbf{B}_0$ is the bias magnetic flux density, $\mathbf{B}$ is the magnetic flux density, μ_0 is free space permeability, μ is the tensor of differential permeability, $\mathbf{H}$ is the magnetizing field, $\mathbf{M}_0$ denotes the static bias magnetization, e is the tensor of inverse magnetostriction constants and

$\varepsilon_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2$ is the elastic strain tensor. The contribution of the magnetostrictive effect is dominant in the case of ferromagnetic materials where the strain induces alternative electromagnetic field, which can be detected near the surface of the specimen. The high frequency border of the detected probe pulse spectrum can achieve hundreds of MHz that is very difficult to induce via purely electromagnetic excitation by means of discharge of capacitors. Such broad bandwidth is competitive with range of optical detection methods [10]. On the other hand, the sensitivity of the coil sensors depends on the gap between the specimen's surface and the coil that is main drawback of the method.

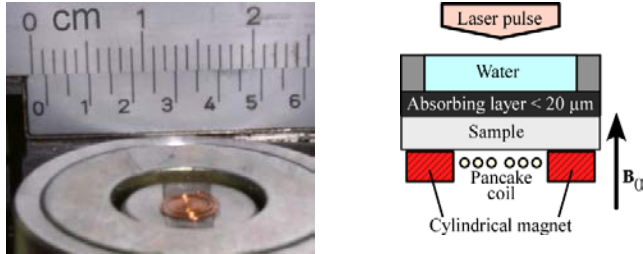


Fig. 1. Top side of EMAT, the pancake coil is in the center of permanent NdFeB magnet (left). The arrangement scheme (right).

The pancake detection coil with 10 windings of lacquered copper wire of 0.15 mm diameter was used. The diameter of coil is about 5 mm and the estimated inductivity L is about 0.2 μH . The coil is mounted on the printed circuit board of a non-inverting operational amplifier with a gain of 25 dB. In the electrical circuit the coil and a serial 50 Ohm chip resistor are set between the positive input of amplifier and the circuit's 'ground'. The quality factor of the pancake coil is estimated from the formulae $Q = \omega L / R$, giving $Q < 10$ for the frequency of 200 MHz. The detection coil is located in the center of cylindrical NdFeB-permanent magnet of 25 mm outer and 13 mm inner diameters with the field B_0 of ~ 0.25 T, please, see the Fig. 1.

4. Experimental results

A pumping pulse of Nd:YAG laser of ~ 5 ns duration, 1064 nm wavelength with an energy of 10 mJ illuminated the layered structure glass – black acrylic paint – water, the inset of the Fig. 2. shows the experimental arrangement, for particular case with the glass plate. The laser spot diameter was ~ 6 mm, that yielded a maximum laser power density of about 10 MW/cm². In experiments the signals were digitized with 2GS/s rate and averaged 256 times to reduce the noise of the electronics by the 8 bit oscilloscope, which was triggered by a photodiode.

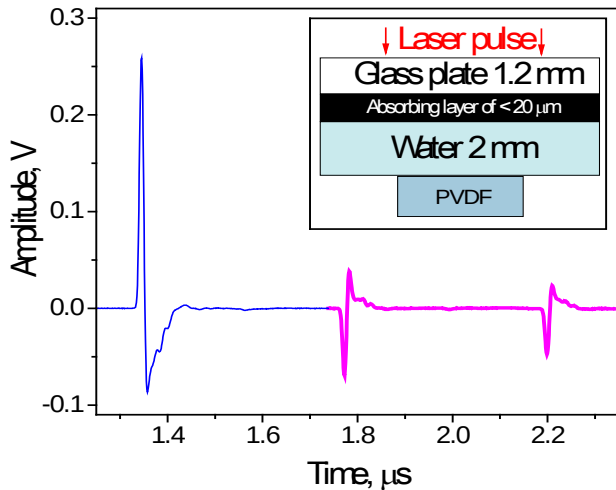


Fig. 2. Thin line denotes primary pulse and thick line shows two reverberations. The inset shows the experimental arrangement for ultrasonic pulse excitation and detection.

As the glass plate is transparent for the near infrared radiation the energy is absorbed by thin black paint layer, which is closer to transducer. The estimated optical absorption of black paint is about 10^3 cm^{-1} , therefore, the paint layer absorbed most part of the laser radiation. Due to the acoustical loading of the paint layer by glass plate, the transient form of the induced pressure pulse approximates the envelope of the laser pulse intensity and the high frequency border of the pressure pulse spectrum should approach 200 MHz. The Fig. 2. shows the detected signal, where the primary pulse arrives at about 1.47 μs and the following reverberations at 1.8 μs and 2.2 μs . Due to the reflection from the glass-air interface, the reverberations have opposite phase in comparison with the primary pulse. Because of the reflection and the attenuation, the amplitudes of the following echoes decay. The pulses propagating towards the transducers keep pronounced compression phase due to the double reflection from the boundaries with lower acoustic impedance media, while the extension pulses propagate in the inverse direction. The ratio of plate double thickness to time delay gave the ultrasound velocity of 5.6 ± 0.2 km/s that is reasonable value for glass. The spectrum of the primary pulse is in the Fig. 3. The dynamic range of the measurements is more than 40 dB. The high frequency border is at about 200 MHz and the local minimum of the transducer's sensitivity is a bit higher 100 MHz that proves our estimations taking into account possible deviation of the nominal PVDF film thickness.

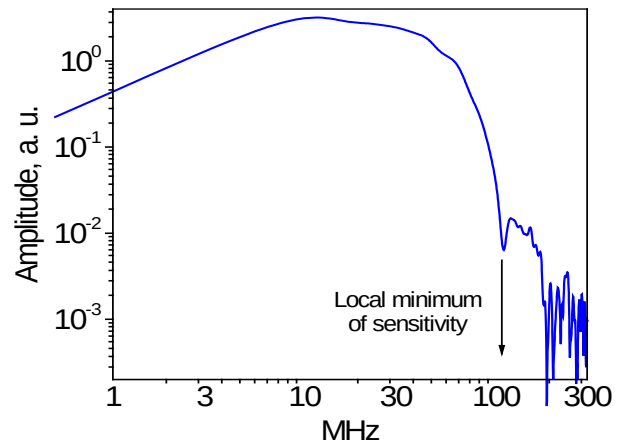


Fig. 3. Spectrum of the primary pulse in 1.2 mm thick glass plate

It was mentioned, that the efficiency of the pressure pulse excitation increases if the absorbing surface is covered by transparent liquid such as water. The Fig. 4. shows two signals obtained at the fixed point for the cases with and without upper water layer covering the acrylic paint layer placed on 0.7 mm thick silicon (100) wafer. The spectra of the signals in the Fig. 5 show shift to the high frequencies.

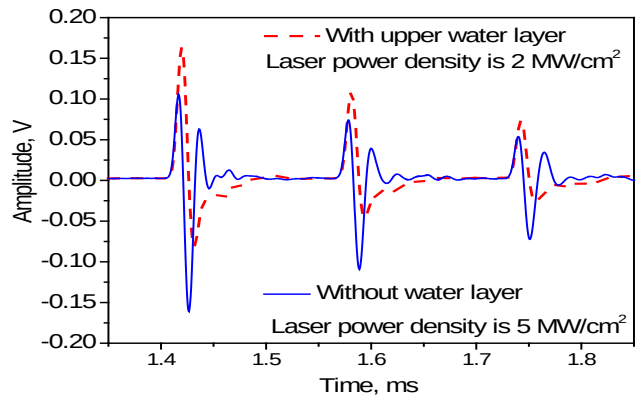


Fig. 4. Signals detected in 0.7 mm thick silicon wafer with an without water layer on the black acrylic paint

When the water layer is absent the peak-to-peak amplitude of the signal decreases that required higher laser power density for compensation. The primary induced longitudinal pulses arrive at about 1.43 μ s. The first reverberation or echo of the longitudinal pulse arrives at about 1.58. The calculated value of the ultrasound velocity is 8.6 ± 0.1 km/s that is in good agreement with the literature.

The signals detected in single-crystal aluminum disk by means of the PVDF sensor and pancake coil are in the Fig. 6 and Fig. 7, respectively. The gap between the sample and the coil was about 0.2 mm. The signal measured in single-crystal aluminum arises from the eddy currents giving the sharp positive peak at about 0.2 μ s due to the arriving of the primary longitudinal pulse. The following reverberations of the primary pulse are evidently seen in the Fig. 7.

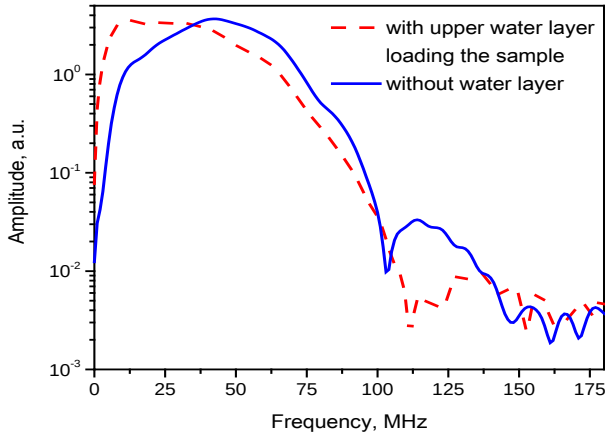


Fig. 5. Signals detected in 0.7 mm thick silicon wafer with an without water layer on the black acrylic paint

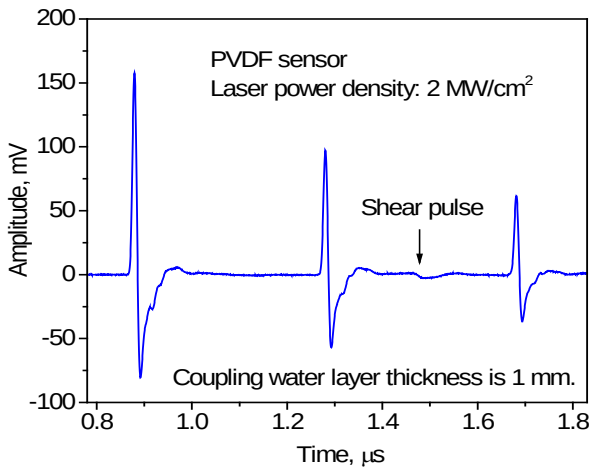


Fig. 6. Signals detected in 1.25 ± 0.01 mm thick disk of single-crystal aluminum by PVDF film transducers

In this arrangement, see Fig.1., the reflection at the air-metal interface only changes the phase to the opposite one while each reflection at the metal-water interface additionally decreases the amplitude of the pressure pulse in specimen according to the formulae (4). The impedances of aluminum and water are ~ 16.8 Mrayl and ~ 1.5 Mrayl, respectively, which yield the pressure reflection coefficient $R_p \sim -0.84$. It is noteworthy, the pulses propagating towards transducers keep pronounced compression phase due to the double reflection from the boundaries with lower acoustic impedance media, while the pulses propagating in the inverse direction are expansive. The duration of the primary pulse is about 9 ns of full width at half maximum level in case of coil detector. The diffraction changes the form of the ultrasonic beam

and the transient profile of the initially longitudinal pulse and the shear pulse appear.

As well as in the previous examples, it is possible to evaluate the velocity of the longitudinal waves. The time interval between echoes is twice longer the arriving time of the primary pulse.

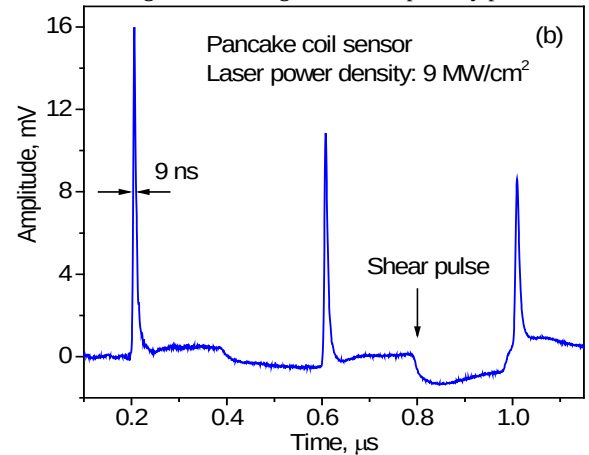


Fig. 7. Signals detected in 1.25 ± 0.01 mm thick disk of single-crystal aluminum by pancake coil sensor

In considered geometry, the cross product of the particle velocity and permanent magnetic field should be equal to zero for the ideal case of the experimental arrangement. The signal arises owing to the non-uniform magnetic and elastic fields with nonzero tangential components. In one dimensional approximation the particle velocities of the counter propagating waves are connected with pressure as $v_{\pm} = \pm P_{\pm} / z$, where the subscript ' $\pm$ ' denotes the direction of propagation along axis, the fields of the particles' velocity and pressure $v_{\pm}, P_{\pm} \propto \exp(i\omega t \mp ikx)$, here k is the wavevector. At the air-aluminum interface the pressure pulse changes the compression phase to the expansion phase, but before and after reflection the vectors of the particle velocities have the same amplitudes and directions. Thus, the direction of the current induced in the coil is conserved according to equation (9). It is noteworthy that only pronounced compression phase of induced pressure pulse occurs such signal shape. The detection of the induced eddy-currents by pancake coil yields advantages due to the much broader band, which includes the low frequency range of the pulse.

5. Conclusion

The paper presented the examples of applications of the laser-induced ultrasound in combination with piezoelectric PVDF foil and electromagnetic coil detectors. The operational bandwidth of the presented techniques is competitive with the range achieved by optical methods. The obtained results confirm the influence of transparent water layer on the spectral efficiency of the optoacoustic conversion. The measured values of the ultrasound velocity in glass, silicon and aluminum are in good agreement with literature. The methods are very promising for further development and solution of NDT tasks and materials evaluation.

The work was supported by INNOPIES-PIRSES-GA-2012 318874

References

1. Pelivanov I., T. Buma, J. Xia, C.-W. Wei, M. O'Donnell, NDT of fiber-reinforced composites with a new fiber-optic pump-probe laser-ultrasound system, *Photoacoustics*, 2(2), p. 63-74 (2014).
2. Pelivanov I., M. O'Donnell, Imaging of porosity in fiber-reinforced composites with a fiber-optic pump-probe laser-ultrasound system, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 79(12), p. 43-51, (2015).
3. Lomonosov A., A. P. Mayer, and P. Hess, Laser-based surface acoustic waves in materials science, in 'Modern acoustical

- techniques for the measurement of mechanical properties', Editors: M. Levy, H. E. Bass, R. Stern, Eds., Academic, San Diego, pp. 65-134, (2001).
4. Krishnaswamy S., Theory and applications of laser-ultrasonic techniques, in 'Ultrasonic nondestructive evaluation: engineering and biological material characterization', Edited by Tribikram Kundu, CRC Press, pp. 435-493, 2003.
 5. Scruby C.B., L.E.Drain, Laser Ultrasonics: Techniques and Applications, Bristol, Adam Hilger, 1990.
 6. Hirao M., H. Ogi, EMATs for science and industry: noncontacting ultrasonic measurements (Boston: Kluwer Academic Publisher 2003).
 7. Gusev V.E., A.A.Karabutov, Laser optoacoustics, New York, AIP, 1993.
 8. Kozhushko V.V., G. Paltauf, H. Krenn, Detection of broadband laser-induced longitudinal ultrasonic pulses in ultrafine grain nickel by pancake coil, AIP Conf. Ser. 1433, pp. 733-735, (2012).
 9. Schoeffmann H., H. Schmidt-Kloider, E. Reichel, Time-resolved investigations of laser-induced shock waves in water by use of polyvinylidene fluoride hydrophones, J. Appl. Phys., 63, p. 46-51 (1988).
 10. Kozhushko V.V., G. Paltauf, H. Krenn, S. Scheriau, R. Pippan, Attenuation in severely plastically deformed nickel, NDT E Int. 44, pp. 261-266 (2011).

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2015”	Варна 09 - 10.10.2015 г. София 27-28.11.2015 г.
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015 .

PHASED ARRAY ULTRASONIC BEAM REFLECTION FROM UNEVEN SURFACES IN IMMERSION MODE

ОТРАЖЕНИЕ НА УЛТРАЗВУКОВО ПОЛЕ ОТ НЕРАВНА ПОВЪРХНИНА С ИЗПОЛЗВАНЕ НА ФАЗИРАЩ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ В ИМЕРСИОНЕН ВАРИАНТ

Assoc. Prof. Ph.D Kozhushko V. V.¹⁾, Ph.D Mirchev Y. N.²⁾, Prof. D.Sc. Mihovski M. M.²⁾, eng. Chukachev P. H.³⁾

- ¹⁾ V. A. Belyi Metal Polymer Research Institute of NAS, Gomel, Belarus
²⁾ Institute of Mechanics- BAS, Sofia, Bulgaria, e-mail: mirchev@imbm.bas.bg,
³⁾ Multitest Ltd, Varna 9009, Bulgaria: p.chukachev@multitest.bg.

Introduction

In recent years, ultrasonic testing of materials more often used technology with phased array probe (PA). It allows software control of the input ultrasonic beam axis angel, the focal length and spot width, which allows control of complex shapes in a shorter time.

Large numbers of publications have for theoretical calculations and practical applications of the technology used PA [1÷3]. In most of these publications are given general information about the basic theory of the method, mainly are presented the results of its practical application.

Effectively and competently using this technology requires deep knowledge of the beam spread of such probes, depending on the characteristics of the elements arranged in an array and their delays emitted in the environment with known acoustic characteristics.

The beam spread of a phased array transducer in this work is represented by the method of modeling the propagation of ultrasonic waves in a liquid medium. It is enough widely used in solving a number of practical issues of non-destructive testing, as well as an experimental method to confirm the number of theoretical results of calculation the characteristics of wave propagation in homogeneous environment [4 ÷ 6].

In theoretical model in a liquid medium are investigated the beam spread that includes emitted pulse-signal with set characteristics, its spread to a reflective surface (discontinuity), reflection of it and forming an information signal that carries information about the liquid medium and discontinuity.

The purpose of the work: study the spread of the ultrasonic waves emitted by the PA in liquid and their reflection (back scattering) on flat or uneven surfaces.

1. Ultrasonic beam emitted by the phased array probe in liquid

For theoretical modeling in a liquid medium it is necessary to consider the particulars given below:

- In liquid are propagated only longitudinal waves.
- The emitted impulse created in the liquid medium sound pressure. The received signal is the result of the interaction of the same sound pressure with the liquid.

- Typically, the process of signal propagation for single-element transducer is regarded as stationary. It is assumed that the length of the pulse is realized by a sufficiently large number of oscillations. In this work the process is investigated as non-stationary, considering the interference signals emitted from any point on single-element probe and signals emitted from individual elements of the PA at a set sequence (delay time) of emitted.

- The models are made for pulse-echo method with bell impulse in the form of sine wave, whereby the sequence (time delays) emitted from the individual elements in the arrays are represented by the following relationship

$$A(r, \Delta t) = A_0 \cdot \exp^{i((\omega_0 \cdot (t - \tau_0)) + \varphi) - (\beta^2 \cdot ((\omega_0 \cdot (t - \tau_0)) + \varphi)^2)}, \quad (1.1)$$

where A_0 is the maximum amplitude of the transmitted pulse (in any case the submitted work in this theoretical models the maximum values of the amplitude of the transmitted pulse signal from the probe conditional accepted for one $A_0=1$), j - imaginary unit, $\omega_0=2\pi \cdot f_0$ – circular resonance frequency, f_0 - linear resonance frequency, t - time of spread impulse, $\varphi_i = (r - H) \cdot k_i$ - phase shift between two waves, spread in one medium, r and H - distance which propagated impulses on first and second waves in medium, from their emitted to received, k_i – wave number of ultrasonic wave, $\tau_0=r/C_{Li}$ - time of impulse received for first wave, corresponding to maximum amplitude, C_{Li} - values of propagated longitudinal ultrasonic wave in medium i , $\beta=\sqrt{\ln(2)}/\pi \cdot n_0$ - coefficient of impulse shape, n_0 - number of impulse oscillations at amplitude level $A=0.5 \cdot A_0$.

- Analysis of the results was carried out taking into account the fact, that the length of the ultrasonic waves in the liquid is almost 4 times less than that of steel.

The values of the ultrasound beam P emitted by transducer, acting on an arbitrary point in space is saved in the following form [4÷6]

$$\frac{P}{P_0} = I \cdot \Phi, \quad (1.2)$$

where P_0 is pressure of emitted impulse, I – change of ultrasonic pressure of beam, spread from probe in axial direction, Φ – beam spread of the probe, give the attenuation of ultrasonic pressure, encounter elementary point receiver, placed on the same distance from probe in dependence of spread angle between acoustical axis and ray toward receiver (beam width).

Schematically in Figure 1 is shown one of the possible focal lows of PA by an active group (aperture) consist from N_a number of elements with length l_a and spacing between center of elements $p=la/N_a$. They are arranged in a linear array with width l_p , equal to the length of the individual element.

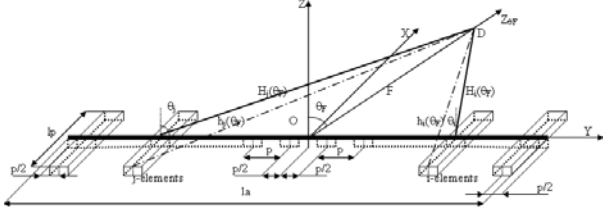


Fig.1. Scheme of virtual aperture with individual pulsing linear array elements.

Ultrasonic beam, emitted from virtual active group of PA and spread along its ultrasonic axis I_{PA} and transverse to it (beam width) Φ_{PA} are written in following form

$$I_{PA}^{Na}(Z_{\theta F}, \theta_F) = \frac{\max \left[\sum A(Z_{\theta F}, \theta_F) \right]}{\max \left[\sum A(F, \theta_F) \right]}, \quad (1.3)$$

$$\Phi_{PA}^{Na}(F, \theta) = \frac{\max \left[\sum A(F, \theta) \right]}{\max \left[\sum A(F, \theta_F) \right]}, \quad (1.4)$$

where

$$\sum A(Z_{\theta}, \theta, t) = \sum_{i=1}^{Na/2} \left[\frac{Z_{\theta} \cdot \cos(\theta)}{H_i^2(\theta)} \cdot A_i(Z_{\theta}, \theta, \Delta t_i) \right], \quad (1.5)$$

$$+ \sum_{j=1}^{Na/2} \left[\frac{Z_{\theta} \cdot \cos(\theta)}{H_j^2(\theta)} \cdot A_j(Z_{\theta}, \theta, \Delta t_j) \right]$$

$$\Delta t_{i(j)}(\theta) = \frac{[H_{i(j)}(\theta) - Z_{\theta F}]}{C} - \Delta t_{i(j)}(Z_{\theta F}, \theta_F), \quad (1.6)$$

$$H_i(\theta) = \sqrt{Z_{\theta F}^2 + p^2 \cdot (i - 0,5)^2} - p \cdot Z_{\theta F} \cdot (2 \cdot i - 1) \cdot \sin(\theta), \quad (1.7)$$

$$H_j(\theta) = \sqrt{Z_{\theta F}^2 + p^2 \cdot (j - 0,5)^2} + p \cdot Z_{\theta F} \cdot (2 \cdot j - 1) \cdot \sin(\theta). \quad (1.8)$$

The values of ultrasonic pressure is shown with $\Sigma A(Z_{\theta}, \theta, t)$, encounter elementary point receiver, placed in plane OYZ in space of ultrasonic beam. In the presented equation (1.3÷1.8) the amplitude is not sensitive to the size l_p of the elements in the passive axis X, as considered that the ratio between the size of the phased array $l_p/l_a=1/100$. It is assumed that the size l_p of PA changing the emitted ultrasonic beam. Further development of the relationships with take into account the size l_p is necessary, for getting close to the real result of emitted ultrasonic beam from PA.

In the registered impulse $\Sigma A(Z_{\theta}, \theta)$ of interfering signals from all individual elements N_a is considering:

- Time delay $\Delta t_{i(j)}(\theta)$, relative to beginning of coordinate axis O on fig.1 according to beam spread angle $\theta_{i(j)}$;
- Amplitude reducing of the signal due to change in wavefront of propagated wave (not investigated attenuation of absorption and scattering of wave in the environment).

We believe that PAs can be presented when working in immersion mode as one rectangular element probe with predefined dimensions and similar emitting characteristics.

According to [4, 5] modulus of the intensity of the spread beam along its axis $I(Z)$ and the characteristic of beam width $\Phi(\theta)$ of rectangular element, is given with dependencies

$$|I(Z)| = \left| A(Z, t) - \frac{Z}{\sqrt{Z^2 + m \left(\frac{la}{2} \right)^2}} \cdot A \left(\sqrt{Z^2 + m \left(\frac{la}{2} \right)^2}, t \right) \right| \text{ and } (1.9)$$

$$|\Phi(\theta)| = \left| \frac{\sin \left[\frac{la}{2} \cdot k \cdot \sin(\theta) \right]}{\frac{la}{2} \cdot k \cdot \sin(\theta)} \right|, \quad (1.10)$$

where $k=2\pi/\lambda$ is wave number, $\lambda=C/f$ - length of propagated in material wave, m - aspect ratio l_p/l_a constant (if $l_p/l_a=0.5$ then $m \approx 1,01$) [1], Z and θ - respectively, beam axis distance and spread angle from center of transducer element to elementary received point, placed in plane OYZ in space of ultrasonic beam.

The ultrasonic waves propagate in a liquid medium (water) with velocity of longitudinal ultrasonic wave $C_v=1.5\text{km/sec}$ and a nominal frequency $f=5\text{MHz}$. The amplitudes of the received signal is referred to emitted signal in relative dimensionless units along the axis are presented in Figures 2a. The amplitudes of beam width are referred to maximum amplitude on axis beam on calculated distance Z in dimensionless unit is presented in Figure 2b. The distance along the ultrasonic axis Z of the probe is applied in mm along the abscissa in Figure 2. Beam width is calculated according to the active axis Y (length l_a) of the phased array probe (Fig.1) and the long length l_a of the rectangular one element probe from beam spread angle θ in deg, along the abscissa of Fig. 2b.

Ultrasonic beam emitted by an active group of PA with characteristics length $l_a=19.2\text{mm}$, width $l_p=10\text{mm}$ (the calculated amplitude is not sensitive to size of l_p), number of elements $N_a=32$, center-to-center distance between two successive elements (pitch) $p=l_a/N_a=0.6\text{mm}$, near field length $N=m \cdot (l_a^2)/4 \cdot \lambda=307\text{mm}$, and orientation of the ultrasonic beam axis to Z axis at $\theta=0\text{deg}$, is calculated by equation (1.3), for unfocused $F=100000\text{mm}$ and focused probe with a dynamic depth focusing (DDF) for $DDF=0.5 \div 1200\text{mm}$. Ultrasonic beam wavefront (width) is calculated with the same characteristic by equation (1.4), for unfocused $F=100000\text{mm}$ and focused probe with $F=30\text{mm}$ and $F=400\text{mm}$.

On fig.2a is also shown, gain coefficient $K=I(DDF)/I(\text{unfocused})$ of amplitude for DDF PA related to unfocused PA.

The beam, emitted by one rectangular element probe, with size similar to those of the active group of PA is calculated by equations (1.9) and (1.10).

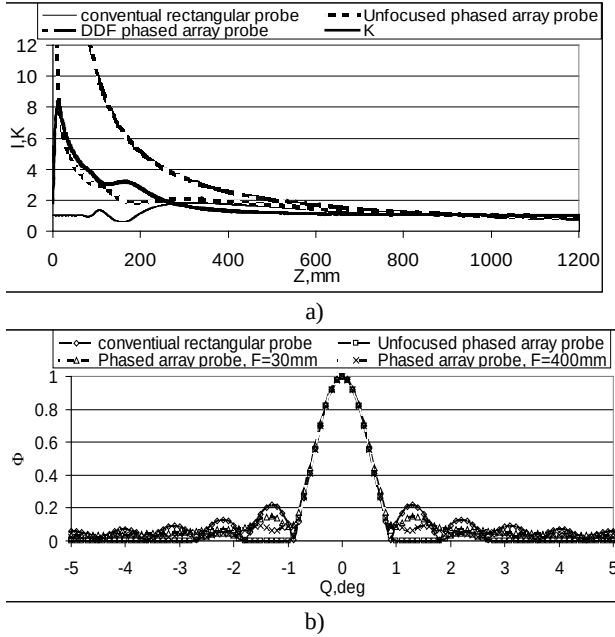


Fig.2. Ultrasonic beam along the axis a) and wavefront (width) b) for PA and conventional rectangular single element pulse probe.

Comparing the results of the conventional single element probe with a PA is conducted under conditions, which are the amplitude of emitted ultrasonic fields from each one element, conditionally accepted for one and dimensions of linear array for PA and of rectangular element for one crystal probe are identical.

On Fig.2a is shown, that the ultrasonic beam for unfocused PA and conventional rectangular one element probe are largely similar after approximately 3 near field in the test media. On Fig.2a also is shown, that gain coefficient $K=1.1$, when ultrasonic axis distance $Z=600\text{mm}$ (approximately two near field for water).

On Fig.2b is shown, that ultrasonic beam wavefront is similar for PA and rectangular single element probe, according to grating lobes. It is necessary to note that similarity is only valid for focus length F of PA and calculation is done only for long side of rectangular element and linear array 1a.

As is well known for PA the greatest distance to which can be used phased delays for focusing is the near-field length N . The near-field length N of PA is equal to the near-field length of single rectangular element transducer, under the same conditions and acoustical environment. Therefore, it is not possible using single element transducer to present work of focused PA in the near field length [1].

We assume that for the study of ultrasonic beam spread in a liquid medium for the far field of the probes, the field of PA can with some approximation be replaced by a field, emitted by the one rectangular element probe.

2. Investigated task

The work is considered theoretically and experimentally cases presented below

2.1. Back scattering echo from infinity plane

This task is solving by using the method of the imaginary source. Each point of the element (converter) 1 can be replaced with an analogous manner, to obtain imaginary element 2 with same emitted characteristics, located mirror at a distance $2.r_w$ from the element 1.

Schematically with solid line in Fig.3 is shown an ultrasonic beam, consist of emitted waves from the probe 1, spreading at

distance r_w in water to the axis O_1Z . The waves propagate normally to the surface of the material (steel) with acoustic impedance $Z_s \approx 45$ acoustical ohms.

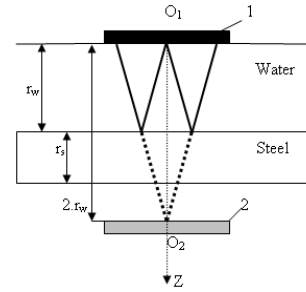


Fig.3. Ultrasonic beam investigated with task 2.1.

Ultrasonic field reflected from infinity plane and received in the probe 1, is replaced by imaginary source. Part of it corresponding to the normal fall down to the surface of the material is denoted by dotted line and. Another part overlaps with the reflection of the boundary liquid-solid medium is marked with a solid line.

Echo signal from upper surface material is written in next form

$$\frac{P}{P_0} = I_{PA}^{Na}(Z_{OF} = 2.r_w, \theta_F = 0 \text{ deg}) R_{ws} \cdot e^{-2\delta_w \cdot r_w}, \quad (2.1)$$

where P_0 is pressure of emitted pulse, P – pressure of received echo, I – value of ultrasonic beam along its axis Z where I_{PA}^{Na} is calculated with equations (1.3) or (1.9), relatively for PA and for single element probe. δ_w is attenuation coefficient in water, r_w is the distance from probe to reflected material surface, R_{ws} is amplitude reflected coefficient of ultrasonic waves normally fall to border liquid-solid body.

The reflection coefficient R_{ws} is written in next form

$$R_{ws} = \frac{\rho_s \cdot C_s - \rho_w \cdot C_w}{\rho_s \cdot C_s + \rho_w \cdot C_w}, \quad (2.2)$$

where ρ_w and ρ_s are relatively, density of liquid and solid, C_w and C_s – relatively velocity of ultrasonic wave in liquid and solid bodies.

2.2. Back scattering echo from infinity plane (steel bottom)

When fall ultrasound field, emitted by the converter element 1, on the top surface of the material (steel), ultrasonic waves partially reflected, as is the case in 2.1 and partially transmitted in the second environment. Transmitted ultrasonic waves, denoted by a double solid line, to the second (bottom) surface reflect and again transmitted the border solid medium-liquid before falling into the converter 1.

The difference in the velocities of ultrasonic waves in both environments modified nature of the orientation of the ultrasound field propagated in the liquid after crossing the border liquid-solid. In this case again is appropriate to use the method of the imaginary source, such ultrasonic field is considered only in a solid medium, a liquid medium is replaced with a solid medium.

Replacement of ultrasonic field, emitted by the transducer 1 in a liquid with a field in solid medium, can be represented as a field emitted by the imaginary converter 3 denoted by a double dashed line in Fig.4. It is situated at a distance from the upper surface of the material equal to $n.r_w$, where $n=C_w/C_s$ is a ratio of the velocities of the ultrasonic wave in the liquid and solid

environments. The characteristics of both the converter 1 and 3 are similar.

The reflection from the bottom surface of the steel can be represented by field, emitted by an imaginary converter 4 indicated in Fig.4 by a dashed single and double lines. It is located symmetrically and mirror of emitting imaginary converter 3 to boundary solid medium-liquid (bottom steel surface). With the single dashed line that overlaps the material with a thick double line and double broken lines, is denoted ultrasonic field of the imaginary converter element 4, which is analogous to the field emitted by the transducer 1 in the liquid which has transmitted in the material, reflected from the bottom and after transmitted from solid medium in the liquid taken again from converter 1.

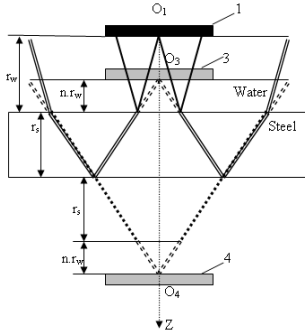


Fig.4. Ultrasonic beam for investigated task 2.2.

Back scattering signal from the bottom infinity plane is written in next form

$$\frac{P}{P_0} = I_{PA}^{Na} (Z_{\theta F} = 2 \cdot n \cdot r_w + 2 \cdot r_s, \theta_F = 0 \text{ deg}), \quad (2.3)$$

$$R_{sw} \cdot e^{-2 \cdot (\delta_w \cdot r_w + \delta_s \cdot r_s)}$$

where

$$R_{ws} = \frac{\rho_w \cdot C_w - \rho_s \cdot C_s}{\rho_w \cdot C_w + \rho_s \cdot C_s}, \quad (2.4)$$

$$D = \frac{4 \cdot \rho_s \cdot C_s \cdot \rho_w \cdot C_w}{(\rho_s \cdot C_s + \rho_w \cdot C_w)^2}, \quad (2.5)$$

r_s is thickness of solid material (steel), δ_s – attenuation coefficient in steel, D – energy transmitting coefficient at boundary liquid-solid body, R_{sw} – reflection amplitude coefficient at boundary solid body-liquid.

2.3. Back scattering echo from uneven surface at boundary liquid-solid body

It is assumed that periodic unevenness is formed from the same type of discontinuity, located in the test medium periodically. They change spread of ultrasonic field, depending on the geometrical characteristics, which modified information characteristics of received pulse-echo, compared with the same characteristics of reflected pulse-echo from free of discontinuity boundary medium [8÷10].

Ultrasonic waves emitted by the element of the probe 1 are propagated in the liquid normally to unevenness same as that of Fig.3. Ultrasonic waves reflected from unevenness are diffracted and change spread of ultrasonic field, marked with solid line in Fig.5. In resulting of that a smaller part of it falls back into the

converter 1 and change the characteristics of the received signal compared to the same from the smooth surface.

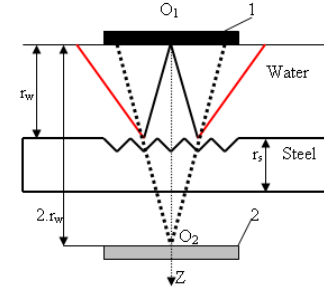


Fig.5. Ultrasonic beam investigated with task 2.3.

The changes of pulse-echo amplitude from uneven surface compare to a smooth surface can be represented by amplitudes reflection coefficient Ru_{ws} . In [9, 10] is shown a possibility of using the values of this coefficient Ru_{ws} for evaluated the geometric characteristics of the reflective uneven surface. The coefficient is defined using two theoretical approaches:

- Modification method of small perturbation and Kirchhoff approximation model, for uneven surface with rms height $Ra < \lambda/16$ and surface correlation length $\Lambda < \lambda/16$, where λ is wave length. In classical theory back scattering signal from uneven surface is not sensitive to the correlation length Λ . In [9] the modified model is shown a possibility to include into equation the correlation length Λ .

- Using Huygens-Fresnel principle of diffraction for development of Kirchhoff approximation model in Geometrical Theory of Diffraction for unevenness with characteristics Rt and Λ more then $0.3/k$, where k is wave number.

Estimations for the case of Fig.5 are obtained as dependence (2.1) multiplied by a reflection coefficient Ru_{ws} from the uneven surface.

2.4. Back scattering echo from uneven surface at boundary solid body-liquid (steel bottom)

This task is solved by dependence (2.3) multiplied by a reflection coefficient of the uneven surface Ru_{sw} at the solid-liquid border. Schematic change the spread ultrasonic field reflected from unevenness in this case, again used the method of imaginary source, is given in Fig.6.

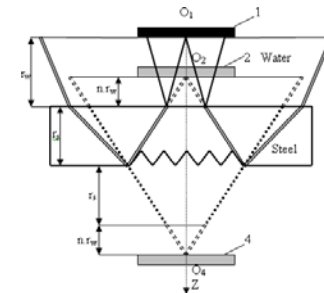


Fig.6. Ultrasonic beam investigated with task 2.4.

3. Experimental investigations

3.1. Experimental samples

Ultrasonic investigations have been done on prepared comparative samples (CS) 4 and 6 of mild steel. On one of their surfaces have uneven areas with triangular notches. The notches are done by a sharpened cutter to set angle. The characteristics of the CS are given in Table1. The surface of the CS without unevenness has a roughness $Ra \approx 6 \mu m$.

Table1. Characteristics of Comparative Samples

CS	Dimensions [mm]	Apex angle of unevenness, γ [°]	Height of unevenness, Rt [mm]	Size of uneven area [mm]
4	165x88x38.8	120	0.2, 0.4, 0.6 0.8, 1 и 1.2	38x38
6	165x88x38.6	60	0.2, 0.4, 0.6 0.8 и 1	38x38

3.2. Ultrasonic equipment and technology for testing

The ultrasonic testing is done in immersion mode with ultrasound equipment OmniScan MX2 and PA 5L64I1 with linear electronic scanning. The incidence angle of the longitudinal ultrasonic wave in water is 0° . Phase delay of the arrays elements is used to focusing the system over unevenness, respectively on the upper and bottom surfaces of the samples. The number of elements in the active group $N=32$, step of electronic linear scanning is 0.6mm equal to the center-to-center distance between two successive elements (pitch) p . The size of the active axis $la=19.2\text{mm}$ (corresponding to 32 number of elements at distance $p=0.6\text{mm}$ each) and passive axis $lp=10\text{mm}$ (length of elements in PA). The position of PA according to reference point to the comparative sample is reporting using an encoder.

The scheme of testing for task 2.1 and 2.3 is shown on fig.8. The ultrasonic system included: 1- PA 5L64I1, 2- encoder, 3 – immersion container with distilled water, 4- comparative sample, 5- reflector type triangular notch. With 6 is shown the ultrasonic equipment.

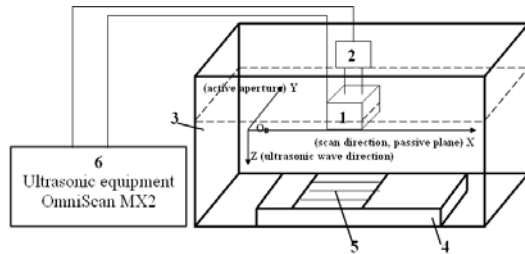


Fig.8. Scheme of semi-automatic ultrasonic immersion testing with phased array probe.

The scheme for task 2.2 and 2.4 are identical, as the top surface of CS is flat. Unevenness identified with 5 is on bottom material surface.

One encoder is used to record the position of the moving PA to axis X, as active Y-axis and Z-axis has no mechanical moving of probe. The size of electronic scanning Y axis is 19.8 mm in 0.6 mm pitch (corresponding to 33 focal low with the same characteristics of focusing). Both CS are placed successively on the X axis, as beginning of CS 4 matches with the reference point O_0 . The length of the scanning X-axis is 360 mm, with step 1mm. The distance of the forehead probe to the upper surface of the sample to Z-axis is 112 mm. Information signals are recorded in digital form and can be represented as A, B and C scan.

3.3. Experimental results

They are recorded many A-scans, as the probe are moved to passive X-axis with step 1mm and to active Y-axis by electronically with step 0.6mm from reference point O_0 . The typically amplitude C-scan (top view) for CS 4 and 6 are recorded and presented on fig.9 in color code. The presented C-scans are for the task 2.4, when unevenness is on the bottom steel surface.

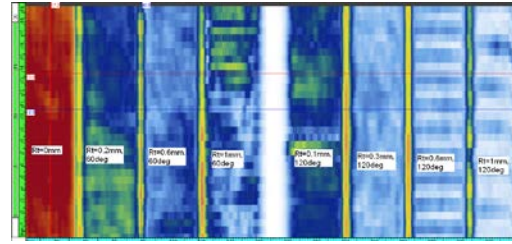


Fig.9. C-scan of CS4 and CS6 for reflection from bottom unevenness surfaces in immersion mode.

From C-scan presented on fig.9 with software TomoVIEWER 2.7R4, are investigated the amplitudes of back scattering echo from uneven surface, related to back scattering echo from flat surface.

The results from investigation of echo amplitudes from upper uneven surface are presented for wave length $\lambda=0.3\text{mm}$ on fig.10 with PA-5L64I1 (60deg) and PA-5L64I1 (120deg), respectively for apex angle of unevenness $\gamma=60\text{deg}$ and $\gamma=120\text{deg}$. The results of echo amplitudes from bottom uneven surface are indicated with PA-5L64I1 (60deg)-b and PA-5L64I1 (120deg)-b for wave length $\lambda=1.18\text{mm}$.

On fig.10 are shown also the results of echo amplitudes from bottom uneven steel surface for wave length $\lambda=1.48\text{mm}$, done in contact mode by ultrasonic equipment EPOCH600 and one crystal normal beam probe K4N ($f=4\text{MHz}$), with diameter of element 10mm. The results are shown with NP-K4N(60deg)-b and NP-K4N(120deg)-b, respectively for apex angle of unevenness $\gamma=60\text{deg}$ and $\gamma=120\text{deg}$ [6].

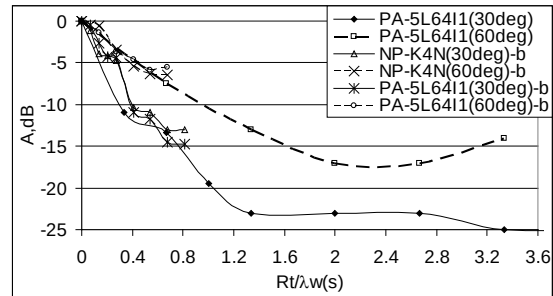


Fig.10. Amplitudes of echoes from reflector type triangular notches with height Rt.

The ordinate indicates the echo amplitudes A in dB, and the abscissa is a ratio of unevenness height Rt to the ultrasonic wave length λ in dimensionless units.

On Fig.10 is observed repeatable of echo amplitude dependence from uneven related to smooth surface for testing with single element probe and PA [10]. It is assumed that small differences in dependences are in result of different form of ultrasound transducers.

Conclusion

Ultrasonic beam of unfocused PA is approximately equally to the ultrasonic beam from single rectangular element probe in far field for material.

In near field on the ultrasonic axis of PA are smoothing the oscillations and higher amplitudes according to single rectangular element probe, which is one of the basic advantages for application in testing with PA in near field in material.

In the work is presented a possibility to calculate the amplitude of echo signal from uneven surface for ultrasonic beam emitted from PA, as used the theoretical approach of beam in liquid and method of the imaginary source.

The C-scan gives opportunity for faster find and evaluation of deviations from set requirements both in the volume and in the surface.

The nature of the echo signal amplitudes dependences from uneven to smooth surface obtained with single crystal probe K4N are confirmed by experimental results obtained with focused PA in immersion mode.

To obtain theoretical results for echo signal from PA closer to real practical testing, must be further developed the relationships and take into account the size l_p .

This work was supported by Marie Curie Actions, International Research Staff Exchange Scheme, grants number: PIRSES-GA-2012-318874 of the FP7, project titles: INNOVATIVE NONDESTRUCTIVE TESTING AND ADVANCED COMPOSITE REPAIR OF PIPELINES WITH VOLUMETRIC SURFACE DEFECTS.

References:

1. 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;
2. 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;
3. Moles M., Labbe S., Zhang J., Improved focusing for thick-wall pipeline girth weld inspection using phased arrays. – Insight, 2005, v.47, № 12, p.769-776;
4. Дюдин Б.В., Жидкосное моделирование отражательных свойств дефектов., Таганрог, 1990;
5. Ермолов И.Н., Теория и практика ультразвукового контроля., Москва, Машиностроение, 1981;
6. Ермолов И.Н., А.Х. Вopilкин, В.Г. Бадалян., Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии., Москва, ООО НПЦ НК “ЭХО+”, 2000;
7. 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;
8. Kolarov. I. Non-destructive testing of surface defects by Rayleigh wave. International virtual journal for science, technics and innovations for the industry YEAR VIII Issue 3 / 2014 ISSN 1313-0226;
9. Mirchev Y.N., Modification of Rayleigh reflection from a bottom uneven surface., 11th EC NDT – Prague 2014, paper 3.4, www.ndt.net, e-Journal & Exhibition of Nondestructive Testing – (ISSN 1435-4934), Dec. 2014;
10. Mirchev Y.N., S.N. Bukharov, V.P. Sergienko, I.G. Lvov, Characterization of damages from general corrosion of metals and alloys with ultrasonic impulse echo-method., Scientific proceeding on STUME (ISSN 1310-3946), Edition XXII, Number 2 (139), International conference “NDT days 2015”, Sozopol, June 2015, pp. 409-412.



MECHANICAL RESPONSE OF A BEARING DEVICE TO A NEAR-FAULT STRONG MOTION

МЕХАНИЧНО ПОВЕДЕНИЕ НА ЛАГЕРНО УСТРОЙСТВО ПРИ СЕИЗМИЧНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ

гл. ас. д-р Т. Желязов¹, S. Ólafsson², R. Sigbjörnsson²

1: Технически университет – София, България

2: University of Iceland- Reykjavik, Iceland

Abstract: in this paper a study aiming at reproducing the mechanical response of a lead core bearing to a near-fault strong motion is presented. The response of a lead-core bearing device is obtained by finite element analysis. The bearing device is viewed as a multiple-component system. It consists of lead-core, rubber layers, separated by steel shims and thick steel plates. For each of the compounding materials, specifically rubber, steel and lead an appropriate constitutive law is chosen. Furthermore, a sequence of load cases is defined. For each load case the response of the bearing device to a change in the boundary conditions is obtained. Variations in boundary conditions are specified by using time series of the accelerations recorded from a near fault strong motion. The mechanical response is obtained by employing transient analysis. Specifically the shear force generated in the lead-core is evaluated throughout the loading history.

Key-words: lead-core bearing device; finite element modeling; constitutive relations; transient analysis.

1. Introduction

Lead-core bearing devices are commonly used for passive seismic isolation. They are mainly employed to decouple the superstructure from the ground and to dissipate the energy imparted by the ground motion. The energy dissipation capacity is mainly due to the material properties of the lead. After yielding of the lead-core, clear hysteresis loops can be identified in the mechanical response of the bearing device. The energy is dissipated through the work done within these loops.

This paper appears in the context of a more complex study aimed at shading light on the mechanical response of a lead-core bearing device. Despite of the fact that this type of devices is well-known and commonly used for some time, degrading mechanisms are still not fully understood. This implies the need of a viable procedure capable to predict the remaining structural capacity after a given period of exploitation which can take into account phenomena due to structural degradation.

2. Assumed approach

The lead-core bearing device is viewed as a multiple-component system. It consists of the following components: lead core, rubber layers, steel shims and thick steel plates. For each material- lead, rubber and steel, an appropriate constitutive law is chosen. The constitutive laws are defined on the meso-scale. At this point an analogy between the representative volume element, introduced in the continuum damage mechanics and finite element is postulated. The stress and the strain fields in the lead-core bearing device are obtained. Furthermore important macro-characteristics of the bearing can be evaluated throughout the loading history. Such macro-characteristics, if observable, can be employed to calibrate the model or to validate the results obtained by finite element analysis.

3. Bearing device

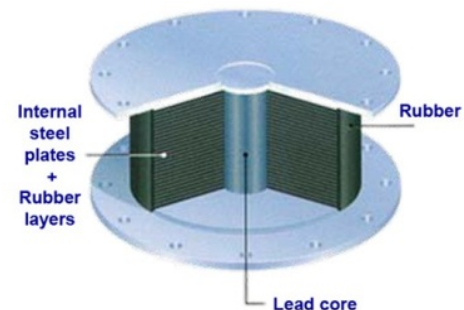


Fig. 1: typical lead-core rubber bearing



Fig. 2: bearing device with an opening for the lead-core [1]

Typical lead-core bearing devices are shown in Fig. 1 and in Fig. 2. The geometry of the bearing which is modelled and analysed in this study is shown in Fig. 3

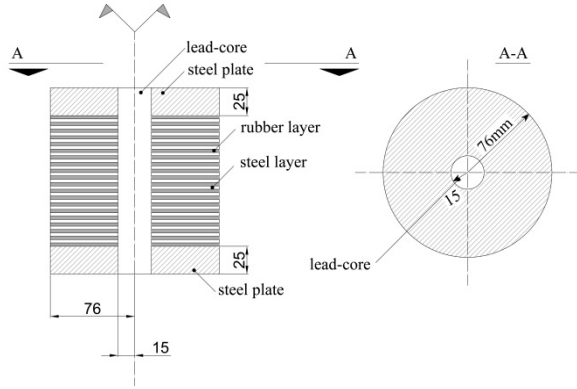


Fig. 3: Geometry of the modelled bearing device

As it can be seen the lead-core bearing device consists of two thick steel plates at the top and at the bottom, rubber layers, separated by steel shims and a lead-core. The thick steel plates are 182mm in diameter and 25mm in thickness with a central cylindrical opening 30mm in diameter. 20 rubber layers are separated by 19 steel shims. Both rubber layers and steel shims are 182mm in diameter and 3mm in thickness. They have also a central opening 30mm in diameter. The diameter of the lead core is 30mm.

4. Constitutive laws

Stresses in the steel shims and in the thick steel plates usually remain lower than the yield stress. Thus, for steel, it is enough to define the initial elasticity modulus and the Poisson's ratio.

The mechanical response of the lead-core is simulated by postulating a bi-linear stress-strain relationship [1, 3]. It is assumed that the material obeys the von Mises yield criterion. The mechanical response of the lead-core after yielding is modelled by defining an isotropic hardening rule.

For rubber, a Neo-Hookean model is retained. A strain energy potential is defined by using the following equation:

$$W = \frac{\mu}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{d} (J - 1)^2$$

In Eq. (1) μ stands for the initial shear modulus of the material; d is the material incompressibility parameter, and $\bar{I}_1$ - is first stress invariant, i.e.:

$$\bar{I}_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

In Eq. (2) λ_1 , λ_2 and λ_3 are the eigenvalues of the Cauchy-Green deformation tensor C . According to [4] and [5], J is the ratio of the deformed elastic volume over the un-deformed reference volume of material. J can be evaluated by calculating the determinant of the Lagrangian strain tensor:

$$J = \det[F_{ij}]. \quad (3)$$

In Eq. (3) F_{ij} denotes the components of the Lagrangian strain tensor. Furthermore, the modified invariants of C can be obtained as follows:

$$\bar{I}_k = I_k J^{-2/3}, k = 1, 2, 3$$

The material incompressibility parameter d is related to the material bulk modulus K as follows:

$$K = \frac{2}{d} \quad (5)$$

and the Young's modulus of the material is defined as:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (6)$$

Based on experimental data, the following values are chosen for the material parameters μ and d [1]:

$\mu = 0.73 \text{ MPa}$ and $d = 0.001 \text{ mm}^2/\text{N}$.

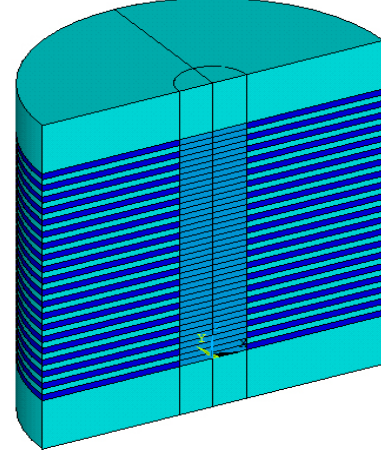


Fig. 4: half-space model of the bearing device: volumes

5. Finite element model

Taking advantage of the existing planes of symmetries only a half-model space is considered (Fig. 4). It can be seen that volumes are defined for the lead-core (light blue), for the rubber layers (dark blue), for the steel shims, separating the rubber layers and for the top and for the bottom thick steel plates. 20-nodes 3-D structural solids are used for the finite element mesh. Components in steel are meshed with Solid 95. The lead-core and the rubber layers are meshed with Solid 185.

The finite element mesh is displayed in Fig. 5. A total of 10290 Solid185 are employed to mesh the volumes of the lead-core, of the thick steel plates, of the rubber layers and of the steel shims.

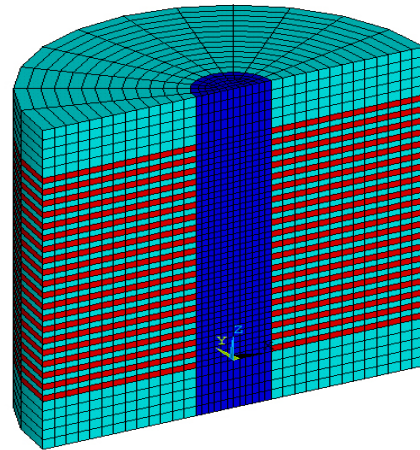


Fig. 5: Half-space model: finite element mesh

6. Finite element simulation

The response of the lead-core bearing device is obtained by performing an explicit dynamic transient analysis. The equation of motion has the form:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (7)$$

In Eq. (7) $[M]$ is the mass matrix; $[D]$ is the damping matrix; $[K]$ is the stiffness matrix; $\{\ddot{u}\}$ is the nodal acceleration vector; $\{\dot{u}\}$ is the nodal velocity vector, and $\{u\}$ is the nodal displacement vector.

Furthermore, the near-fault strong motion acceleration records are employed to define a sequence of load cases. The input for each load case is the displacements of the support. Displacement of the support, obtained by double integration of the $-X$, $-Y$ and $-Z$ components of the acceleration from the recorded acceleration time series. Data from the Icelandic Strong motion network is used [6, 7].

7. Numerical results

Typically, the mechanical response of a lead-core bearing device is defined by the “Shear force- displacement” curve. Here below the evolution of the shear force, generated in the lead-core by the near fault strong motion is monitored. Time appears as a natural tracking parameter. Results obtained by finite element analysis are employed to shed light for example on the stress state in the bearing device throughout the loading history.

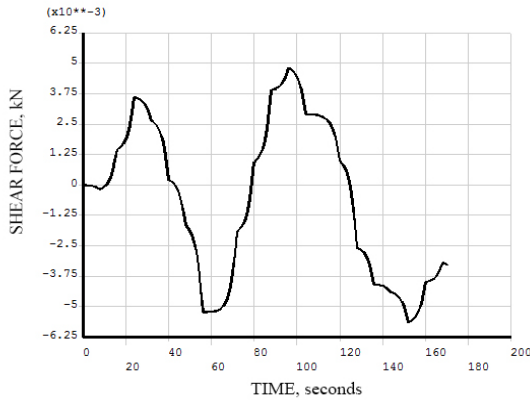


Fig. 6: Response of the bearing device to a near-fault strong motion; Shear force as a function of time.

Stresses in the lead core remain less than the yield stress. For this specific near-fault strong motion and for this bearing device, the lead-core behaviour is linear and elastic.

8. Discussion and further research

Possible issues related to the implementation of the outlined numerical procedure could be related to the reproducibility of results. Upcoming research should be aimed at investigating and, if needed, minimizing the sensibility of results to the characteristics of the finite element mesh. Furthermore, additional calibration of the chosen constitutive laws may be needed based on experimental data or in-situ measurements.

Further research work is related to the definition of damage-based model for the lead-core. By defining the damage variable and by estimating the amount of the accumulated mechanical damage, the remaining resource in load carrying capacity after a given period of exploitation can be rationally assessed.

References

1. Warn G.P. and K.L. Ryan, A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs, *Buildings*, 2(3), 300-325, 2012.
2. Weisman J. and G.P. Warn, Stability of Elastomeric and Lead-Rubber Seismic Isolation Bearings, *Journal of Structural Engineering*, 138(2), 2012, pp.:215-233.
3. Warn G.P. and A.S. Whittaker, A study of the coupled horizontal-vertical behaviour of elastomeric and lead-rubber seismic isolation bearings. MCEER-06-0011, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York 2006.
4. Ogden R.W., *Nonlinear Elastic Deformations*, Dover Publications, Inc., 1984.
5. Crisfield M.A., *Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*, Vol. 2, Advanced Topics, John Wiley & Sons, 1997.
6. Sigbjörnsson R, S. Ólafsson & J. Th. Snæbjörnsson, Macro seismic effects related to strong ground motion: a study of the South Iceland earthquakes in June 2000. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(4), 591-608, 2007.
7. Sigbjörnsson R, J.Th. Snæbjörnsson, S.M. Higgins, B. Halldórsson, S. Ólafsson, A note on the Mw 6.3 earthquake in Iceland on 29 May. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 113-126, 2009.

ЕДИН ПОГЛЕД (и УХО) КЪМ ШУМА НА ДЕТСКИТЕ ИГРАЧКИ

Доц. д-р Данаилов П.

Технически университет - София, България, e-mail: pdanail@tu-sofia.bg

ОДИН ВЗГЛЯД (и УХО) ШУМА ИГРУШКИ

ONE LOOK (and EAR) TO NOISE OF CHILDREN'S TOYS

Assoc. Prof. PhD Danailov, Pancho

Technical University of Sofia, Bulgaria

Summary: In the paper are shown summarized results of acoustic tests of samples of toys, that emitting sounds to assess the impact of noise and the degree of danger of these toys for damage children's hearing. The levels of sound pressure and sound power emitted of tested samples are high and pose a potential risk to hearing damage in children.

Key words: noise, toys, acoustic characteristics and parameters, sound pressure level, sound power level, risk to hearing damage in children.

1. Увод

Повода за тази статия дойде от една класация на опасните детски играчки, извършена от организацията „Human Right Watch“ и информация за проверки за опасни играчки от „Комисията за защита на потребителите“. В тази класация играчките са подредени според риска за настъпване на вреда, както и степента на сериозност на самата вреда.

Тази класация даде началото на едно проучване, касаещо шума, произвеждан от детски играчки. Оказва се, че шумът и неговото въздействие върху човека трябва да се разглеждат **многократно**. От една страна е производственият шум, емитиран от машини и съоръжения в рамките на работния ден, от друга страна са урбанистичният шум – пътен трафик, ж.п. и релсов транспорт, самолети и летища; битовият шум. Има и още една страна – това е шумът, който се емитира от хората, и особено от подрастващите, през **свободното им време**. Различни форми на забавление, игри и играчки могат да формират опасно високи нива на звуковото налягане, като например показаните в таблица 1 [4].

Таблица 1. Емисии на шум от някои разпространени играчки в Германия

Играчки	Разстояние от ухото	
	2,5 cm	25 cm
Пистолет	130 – 135, dBA	113 – 125, dBA
Тромпет	109 – 125, dBA	92 – 110, dBA
Играчки, издаващи звук	128 – 135, dBA	120 – 122, dBA

При оценяване въздействието на шума от детски играчки и други подобни е необходимо да се отчитат и следните допълнителни фактори: [4]

– резултатите, получени от изследвания в лабораторни условия показват, че децата са много по-уязвими от възрастните;

– при много високи нива на звуковото налягане и при внезапно въздействие може да възникне механично увреждане на ухото. Ограниченията за максималната стойност на подобни импулси в производството са $L_{p\text{peak}} \leq 140 \text{ dB}$. Трябва да се има предвид навиците на децата да използват шумни играчки в ситуации, в които често тези стойности се превишават;

– рискът от увреждане на слуха нараства значително при комбинирано въздействие с вибрации, както и при използване на ототоксични лекарствени препарати и някои химикали. В този случай и по-ниските нива на шума могат да бъдат рискови.

Поради това се налага особено внимание към шума, излъчван от детските играчки, тъй като повечето изследва-

ния през последните години са акцентирани върху производствения и урбанистичния шум и неговото нормиране.

2. Предпоставки

След извършено проучване се установи, че Европейският парламент и Съветът на ЕС са приели Директива 2009/48/ЕО относно безопасността на детските играчки, в която точка 27 гласи: „За да се защитят децата от опасността от увреждане на слуха, предизвикана от детски играчки, издаващи звуци, следва да се установят по-строги и по-пълни стандарти за ограничаване на максималните стойности както на импулсния шум, така и на продължително произвеждания шум. Необходимо е да се определят нови съществени изисквания за безопасност по отношение на звуците на такива детски играчки“ [1].

Съществени изисквания за безопасност, предявявани към детските играчки, са разделени на **обща** и **специални** (специфични). Специфичните изисквания за безопасност на играчките са свързани с : **физически** и **механични характеристики**, възпламенимост, химични свойства, хигиена, електрически характеристики и радиоактивност. Точка 10 от физическите и механични характеристики гласи: „Детските играчки, издаващи звуци, се проектират и произвеждат съобразно максималните стойности на импулсния шум и продължително произвеждания шум, така че звукът от тях да не уврежда слуха на децата“ [1, 3].

Въз основа на приетата Директива е упълномощен Европейският комитет по стандартизация (CEN) да разработи и въведе ревизиран стандарт за ограничаване на върховите стойности както на импулсния шум, така и на продължително произвеждания шум от детските играчки, за да се осигури адекватна защита на децата от риска за слухови увреждания.

Целта на настоящата работа е обобщаване и популяризиране на резултатите от изпитвания на акустични характеристики на детски играчки, издаващи звуци, проведени в Изпитвателна лаборатория “Производствена техника, инструменти и екипировка”, към МТФ на ТУ–София. Изпитванията са провеждани по утвърдена методика и условия, включващи:

1. Предназначение на изпитването: **Акустични характеристики** в съответствие с БДС EN 71-1 : 2001.
2. Стандарт за измерване на шума **БДС EN ISO 3746 Акустика: 2002**, въз основа на основни стандарти БДС EN ISO 11202 + AC:2001 и БДС EN 71-1:1998.
3. Показатели: **Ниво на звуково налягане**:

- L'_{pAT} , dB – осреднено по време измерено ниво на звуково налягане по честотна характеристика A;
- L'_{pAmax} , dB – измерено моментно максимално ниво на звуково налягане по честотна характеристика A;
- L'_{pCpeak} , dB – измерено върхово (пиково) ниво на звуково налягане по честотна характеристика C.

4. Използвани измервателни средства:

- Шумомер, тип 2203, кл. 1, Фирма “Bruel & Kjaer”;
- Микрофон, тип 4131; Октавни филтри, тип 1613;
- Пистонфон, тип 4220;
- Секундомер.

5. Акустична околна среда :

- Помещение с размери 10 x 6 x 3,80 m;
- Физическа обработка на стените, пода и тавана: под – паркет; стени – гладки и твърдо измазани; таван – плоча от бетон, гладко измазана. Среден коефициент на звукопоглъщане $\alpha = 0,1$;
- Акустическа годност на помещението за изпитване: отношение на еквивалентната площ $A = 24,16 \text{ m}^2$ на помещението (при коефициент $\alpha = 0,1$) към площта на повърхнината на измерване на образците S_f ($3,65 \div 4,96$), m^2 , като $A / S_f > 1$.

6. Работни условия :

- Позиция на образца – в изправени ръце на оператора;
- Позиция на микрофона – 6 положения върху повърхнината на измерване S_f (стандартен паралелепипед, разположен върху една отразяваща повърхнина), на разстояние $d = 0,5 \text{ m}$ от образца и на височина 1,2 m над пода;
- Еднократно натискане на демо-бутон върху изпитвания образец, при което се възпроизвеждат звуци (мелодии) с определена продължителност, които се възприемат като променлив (тонален, или импулсен) шум, за всяка позиция на микрофона.

Таблица 2. Акустични данни за детска плюшена играчка № 1 “Панда”

Площ на измерване $S_f = 4,76 \text{ m}^2$; При натискане на демо-бутон се изпълнява мелодия с продължителност 18,5 сек.						
Позиция на микрофона	1 (фронтално)	2 (отляво)	3 (отзад)	4 (отдясно)	5 (отгоре)	6 (отдолу)
Измерено ниво на звуково налягане, L'_{pAi}, dB						
L'_{pAT}	71,1	66,9	67,65	69	72,9	65,2
L'_{pAmax}	72	68,5	69,5	70,5	74,5	67
L'_{pCpeak}	70	69	68,5	70,5	73,5	69
Ниво на звуково налягане, осреднено за повърхнината на измерване, L'_{pA}, dB						
L'_{pA}				70		
L'_{pAmax}				71		
L'_{pCpeak}				71		
Корекции :						
1. За фонов шум - K_{1A} , при $L'_{pA} = 27,85 \text{ dB}$				$K_{1A} = 0$, защото $\Delta L = L'_{pA} - L''_{pA} > 10 \text{ dB}$		
2. За околна среда - K_{2A}				$K_{2A} = 2,5 \text{ dB}$		
3. За определено положение - K_{3A}				$K_{3A} = 1,0 \text{ dB}$		
Излъчено ниво на звуково налягане и на звукова мощност за повърхнината на измерване:						
1. Най-високото (върхово) А-претеглено ниво на излъчено звуково налягане и звукова мощност при изпълнение на демо-мелодията е :				$L_{pAmax} = L'_{pAmax} - K_{2A} = 71 - 2,5 = 69 \text{ dB}$ $L_{WAmax} = L_{pAmax} + 10.lg \text{ Sf / So} = 69 + 6,77 = 75 \text{ dB}$		
2. Най-високото (върхово) А-претеглено ниво на излъчено звуково налягане и звукова мощност при определена позиция 1 на микрофона, при изпълнение на демо-мелодията е:				$L_{pAmax}^1 = L'_{pAmax}^1 - K_{3A} = 72 - 1 = 71 \text{ dB}$ $L_{WAmax}^1 = L_{pAmax}^1 + 10.lg \text{ Sf / So} = 71 + 6,77 = 78 \text{ dB}$		
3. Най-високото С-претеглено ниво на излъчено звуково налягане при изпълнение на мелодията е:				$L_{pCpeak} = L'_{pCpeak} = 71 \text{ dB}$.		
4. Най високото С-претеглено ниво на излъчено звуково налягане в определена позиция 1 на микрофона при изпълнение на мелодията е:				$L_{pCpeak}^1 = L'_{pCpeak}^1 = 70 \text{ dB}$.		
Забележки: 1. Дадените стойности за излъченото ниво на звуково налягане са сумата от измерените стойности и съответната неопределеност (несигурност) на измерване $K_{AV} = 5 \text{ dB}$ и представляват горната граница на стойностите, срещани при измерването. Излъчените нива на звуково налягане са записани със закръгление до цял децибел (dB)						
2. Определена позиция на микрофона е позиция 1 , разположена фронтално пред образца.						

С измерените А-претеглени нива на звуково налягане L'_{pAi} , и на фонов шум L'_{pA} , от всяка позиция на микрофона, се изчисляват средните А-претеглени нива на звуково налягане

Изпитани образци на детски играчки:

- № 1 - “Панда”, мелодия с продължителност 18,5 s.;
- № 2 - “Мече”, мелодия с продължителност 17,6 s.;
- № 3 - “Кола спортна”, тонален шум с неограничена продължителност;
- № 4 - “Кола полицейска”, тонален шум с неограничена продължителност;
- № 5 - “Пистолет”, с 8 различни кратки звукови ефекти, импулсен шум;

№ 6 - “Мишка”, мелодия с продължителност 19 s.;

№ 7-“Маймуна”, звукови ефекти с продължителност 7s.;

№ 8 - “Мече с яке”, мелодия с продължителност 22 s.;

№ 9 - “Влакче”, мелодия с неограничена продължителност;

№10 - “Мече”, мелодия с продължителност 25 s.;

№11 - “Бебе”, мелодия с продължителност 4 s.

3. Резултати

В таблица 2 са показани акустичните данни за играчка № 1 – измерените нива на звуково налягане L'_{pi} в 6-те позиции на микрофона; изчислените средни и върхови стойности на звуковото налягане; необходимите корекции и излъчени нива на звуково налягане и звукова мощност за повърхнината на измерване, където:

– L'_{pAT} е измереното осреднено по време А-претеглено ниво на звуково налягане за времетраенето на демо-мелодията, излъчвана от играчката;

– L'_{pAmax} е измерената върхова (максимална) стойност на звуково налягане по характеристика А за съответната позиция на микрофона;

– L'_{pCpeak} е измерената максимална (върхова) стойност на звуково налягане по характеристика С за съответната позиция на микрофона.

за повърхнината на измерване, за фонов шум, както и максималното (върхово) ниво на звуково налягане по характеристики А и С, по уравненията : [2]

$$(1) \bar{L}'_{pA} = 10 \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 L'_{pAi}} \right], \text{ dB}$$

$$(2) \bar{L}''_{pA} = 10 \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 L''_{pAi}} \right], \text{ dB}$$

С измерените стойности на нивата на звуково налягане се определят съответните **корекции** за фонов шум – K_{1A} , за околна среда – K_{2A} и за определено положение на микрофона – K_{3A} : [2]

• Корекция за фонов шум K_{1A}
 $(3) K_{1A} = -10 \lg (1 - 10^{-0,1 \Delta L_A})$,

където $\Delta L_A = \bar{L}'_{pA} - \bar{L}''_{pA}$. При $\Delta L_A > 10$ не се извършва корекция и затова $K_{1A} = 0$.

• Корекция за околна среда
 $(4) K_{2A} = 10 \lg [1 + 4(S/A)] \text{ dB}$,

където : $A = 24,16 \text{ m}^2$ е еквивалентната звукопоглъщаща площ на помещението при 1 kHz; $S_f = 4,76 \text{ m}^2$ е площта на повърхнината за измерване за образца.

При $A/S_f < 7$, $K_{2A} = 2 \div 3 \text{ dB}$ е отчетено от графика в приложение А на стандарта.

• Корекция за определено положение на микрофона
 $K_{3A} = 1,0 \text{ dB}$.

Излъчените максимални А-претеглени нива на звуково налягане и на звукова мощност на повърхнината на измерване, както и за определена позиция на микрофона, се определят чрез коригиране на средните стойности на звуково

налягане с корекциите за фонов шум K_{1A} , за отразен звук K_{2A} и за определена позиция K_{3A} , както следва: [2]

$$(5) L_{pA \max} = L'_{pA \max} - K_{1A} - K_{2A}, \text{ dB}$$

$$(6) L_{pA \max}^{1-5} = L'_{pA \max}^{1-5} - K_{3A}, \text{ dB}$$

Излъчените максимални С-претеглени нива на звуково налягане (по х-ка С) на повърхнината на измерване и за определена позиция на микрофона се определят по :

$$(7) L_{pC \text{ peak}} = L'_{pC \text{ peak}}, \text{ dB}$$

$$(8) L_{pC \text{ peak}}^{1-5} = L'_{pC \text{ peak}}^{1-5}, \text{ dB}$$

А-претегленото ниво на звукова мощност L_{WA} се изчислява по зависимостта : [2]

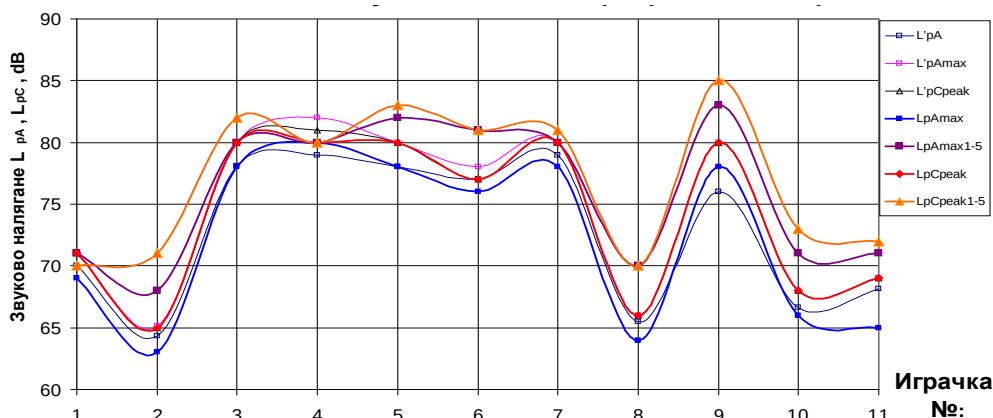
$$(9) L_{WA} = \bar{L}'_{pA} + 10 \lg \frac{S_f}{S_0}, \text{ dB},$$

където $\bar{L}'_{pA}$ е нивото на звуково налягане на повърхнината на измерване след коригиране с корекциите за фонов шум K_{1A} и отразен звук K_{2A} ; $S_f = 4,76 \text{ m}^2$ е площта на повърхнината за измерване; $S_0 = 1 \text{ m}^2$ е т. нар. опорна площ.

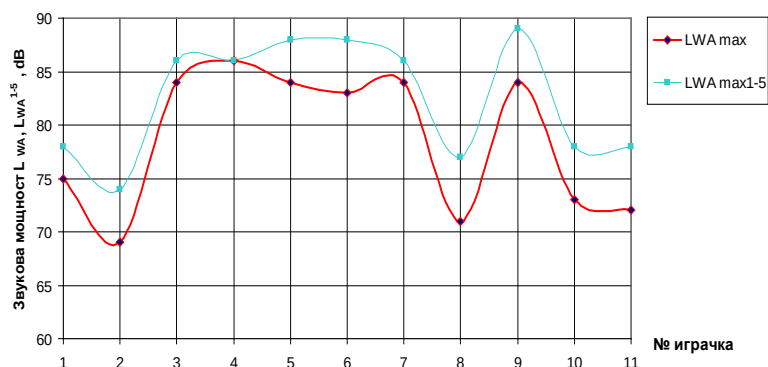
По аналогичен начин са обработени акустичните данни за всички изпитани играчки. В таблица 3 са показани обобщените, измерени и изчислени А-претеглени и С-претеглени излъчени нива на звуково налягане и на звукова мощност за повърхнината на измерване, и за определена позиция на микрофона, за всички изпитани образци играчки.

Таблица 3. Обобщени акустични данни за всички изпитани образци детски играчки

№	Измерено средно ниво на звуково налягане L'_p по повърхнината S_f , dB			Излъчено върхово ниво на звуково налягане $L_{pA \max}, L_{pC \text{ peak}}, \text{ dB}$				Излъчено ниво на звукова мощност $L_{WA}, \text{ dB}$	
	L'_{pA}	$L'_{pA \max}$	$L'_{pC \text{ peak}}$	$L_{pA \max}$	$L_{pA \max}^{1-5}$	$L_{pC \text{ peak}}$	$L_{pC \text{ peak}}^{1-5}$	$L_{WA \max}$	$L_{WA \max}^{1-5}$
1.	70	71	71	69	71 ¹	71	70 ¹	75	78 ¹
2.	64,3	65,12	65	63	68 ⁵	65	71 ⁵	69	74 ⁵
3.	78,10	80	80	78	80 ⁵	80	82 ⁵	84	86 ⁵
4.	79	82	81	80	80 ⁵	80	80 ⁵	86	86 ⁵
5.	78	80	80	78	82 ¹	80	83 ¹	84	88 ¹
6.	77	78	77	76	81 ¹	77	81 ¹	83	88 ¹
7.	79	80	80	78	80 ¹	80	81 ¹	84	86 ¹
8.	65,5	66	66	64	70 ⁴	66	70 ⁴	71	77 ⁴
9.	76	80	80	78	83 ⁵	80	85 ⁵	84	89 ⁵
10.	66,6	68	68	66	71 ⁵	68	73 ⁵	73	78 ⁵
11.	68,13	69	69	65	71 ¹	69	72 ¹	72	78 ¹



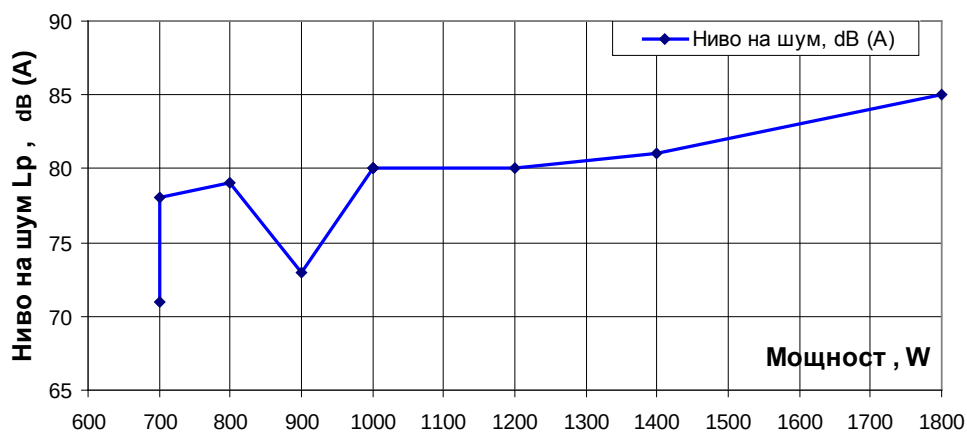
Фиг. 1. Излъчени нива на звуково налягане за повърхнината на измерване и за определена позиция на микрофона ¹⁻⁵ за изпитаните образци детски играчки



Фиг. 2. Излъчени върхови нива на звукова мощност за повърхнината на измерване L_{WA} и за определена позиция на микрофона L_{WA}^{1-5} за изпитаните образци детски играчки

Таблица 4. Излъчван шум от различни модели прахосмукачки

Модел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Мощност, W	700	700	800	900	1000	1000	1000	1200	1400	1800
Ниво на шум, dB(A)	71	78	79	73	80	80	80	80	81	85



Фиг. 3. Излъчени нива на шум L_{pA} при модели на прахосмукачки с различна мощност

За сравнение и по-лесно възприемане на резултатите от изпитаните играчки, в таблица 4 и на фиг. 3 са показани и илюстрирани нивата на шум L_{pA} , излъчвани от модели на прахосмукачки за бита на известна фирма-производител.

4. Дискусия

1. При по-голямата част от изпитаните образци детски играчки - 7 бр. излъчените върхови нива на звуково налягане L_{pAmax} превишават 70 dB, а при тези с тонален и импулсен шум, нивата достигат и превишават 80 dB. Само няколко образци (4 бр.) имат нива под 70 dB.

2. Аналогично, дори по-тревожно е нивото на излъченото звуково налягане при определени положения на микрофона L_{pAmax}^{1-5} , където при почти всички образци има значително превишаване на нивото над 70 dB.

3. Очаквано, при тези резултати на нивата на звуково налягане, и нивата на излъчена звукова мощност L_{WAmax} и L_{WAmax}^{1-5} да бъдат високи - при половината от образците тези нива превишават 80 dB, а при определени положения на микрофона, същите се доближават до 90 dB.

4. При образци 3 и 4 с тонален шум с неограничена продължителност, при образец 5 с импулсен шум, и при образец 9 с неограничена продължителност на излъчване, логично има най-високи стойности на излъчваните нива на звуково налягане и звукова мощност. Тези стойности са съпоставими, дори и по-високи от нивото на шума, излъчван от една мощна (1800 W) прахосмукачка.

5. Ако се приеме, че допустимото А-претеглено ниво на звуково налягане е $L_{Aeq} = 80$ dB, според стандарта за допустимите хигиенни норми БДС 14478-82, то при повишен праг на чувствителност, особено при деца, по време на

експозицията се увеличава риска от увреждане на слуха, дори при нива на шума, по-ниски от стандартните.

5. Заключение

От резултатите, получени при изпитването на образците на детски играчки, може да се прецени, че излъчваните нива на звуково налягане и звукова мощност са високи, особено при образците, излъчващи тонален шум с неограничена продължителност, както и при тези, излъчващи импулсен шум.

Отчитайки особеностите на детската психика и поведение, изследваните образци на детски играчки, при тези нива на излъчване, крият реален риск за увреждане на слуха.

Използвана литература :

1. Директива 2009 / 48 / ЕО;
2. Стандарти БДС EN ISO 3744 и 3746, Акустика. 2001;
3. Процедура за оценяване на съответствието. ЕО Изследване на типа на играчки, Булгарконтрола АД-София, 2011;
4. Шумово замърсяване и влиянието му върху околната среда за подобряване екологичната информираност на обществеността. Изд. на ТУ-Русе, 2012.

За контакти: доц. д-р Панчо Данаилов, ТУ-София, МТФ, кат. ТМММ,

e-mail: pdanail@tu-sofia.bg.

ЗА НЯКОИ АСПЕКТИ НА ВЛИЯНИЕТО НА КУТИЯТА ВЪРХУ ШУМА И ВИБРАЦИИТЕ НА КОМПЮТЪРА

ON SOME ASPECTS OF THE INFLUENCE OF THE COMPUTER CASE ON NOISE AND VIBRATION

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

Abstract: This paper examines the influence of the air duct proposed by Intel in their Chassis Air Guide on the computer fan noise. The conditions necessary to reach such noise reduction are stated. The paper also proposes methods for suppressing the vibration of its case caused by the hard disk drives inside. Graphs of the temperature, the fan speed, and the noise spectra are presented to show how much the noise and the vibration are reduced by using an air duct and applying the proposed vibration reduction methods.

Keywords: acoustic noise, computer fan, computer case, air duct, Chassis air guide, vibration, hard disk drive, HDD, Alubutyl, PEF.

1. Увод

Персоналният компютър вече е част от почти всяко работно място. Постоянният шум и вибрации, на които той е източник, не само понижават комфорта, но в дългосрочен план влияят и върху здравето. Ето защо след 2000 г. производителите започнаха да вземат мерки за намаляване на тези вредни явления. При фирмените компютри всички части на компютъра се проектират комплексно, включително корпусът и системата за охлаждане като интегрирана негова част. Затова при тях бе постигнато сериозно намаление на шума и вибрациите, особено при по-компактните модели.

Но при компютрите, сглобявани от търговци и потребители, това е по-трудно. Ето защо Intel изготви ръководство „CAG“ [1] за поставяне на въздухопровод, от който да постъпва въздух с температурата на околната среда непосредствено към охладителя на процесора. (В преименуваната на „TAC“ версия 2.0 няма въздухопровод.) Но в [1] липсват числови данни за влиянието на въздухопровода и не се предлагат мерки за понижаване и на вибрациите на компютъра. Настоящата статия цели да запълни тези пропуски.

2. Предпоставки за намаляване на шума

За да бъде максимално ефективен предложеният въздухопровод, трябва да се заменят охладителят на процесора и вентилаторите на корпуса с възможно най-безшумните достъпни, които са приложими за дадения цокъл на процесора и кутия на компютъра. Това е абсолютно задължително при замяна на процесора с по-мощен, защото поради повишената мощност във вид на топлина, която той разсейва, се повишава и температурата, което води и до повишаване на оборотите на вентилаторите и оттам до повишаване на нивото на техния шум. Ако пък в компютъра няма автоматично управление на оборотите им, охладителят и вентилаторите трябва да се заменят с по-мощни, за да не стане температурата недопустимо висока за дадения модел процесор.

Ако няма вентилатор за подаване на въздух в предната долна част на кутията, добре е да се добави такъв за подобряване на охлаждането. Ако той е непосредствено зад отворите на панела, възниква шум с тонална съставка с честота

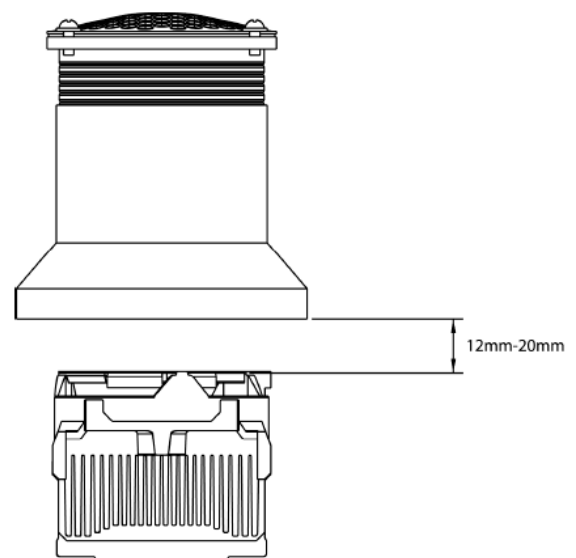
(1)

$$f = r \cdot n$$

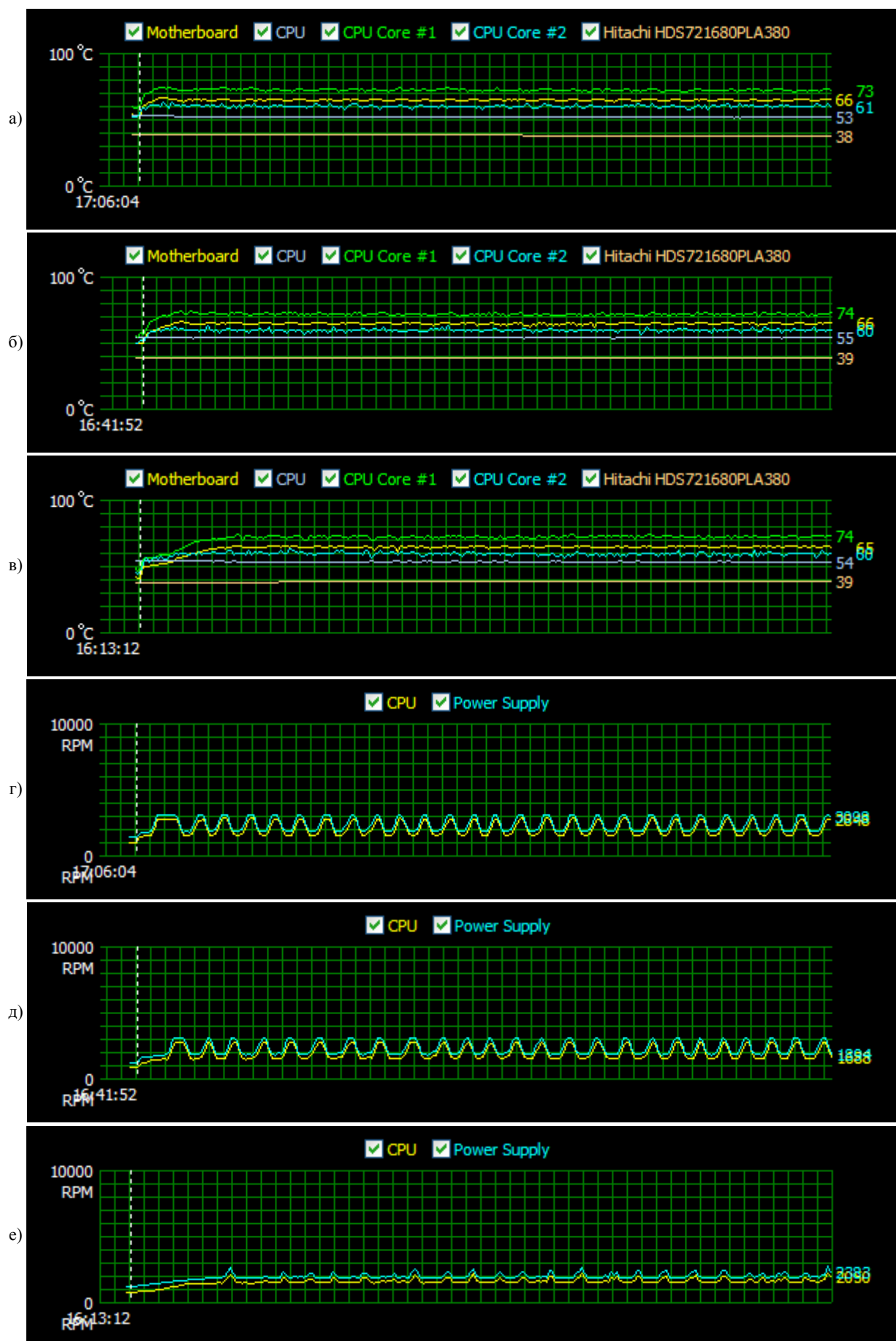
където f е честотата на тона, r са оборотите на вентилатора, а n – броят на перките му. Този шум може да се намали до степен да стане недоловим чрез поставяне на филтър срещу прах между вентилатора и панела, на който той се закрепва.

3. Влияние на въздухопровода върху шума

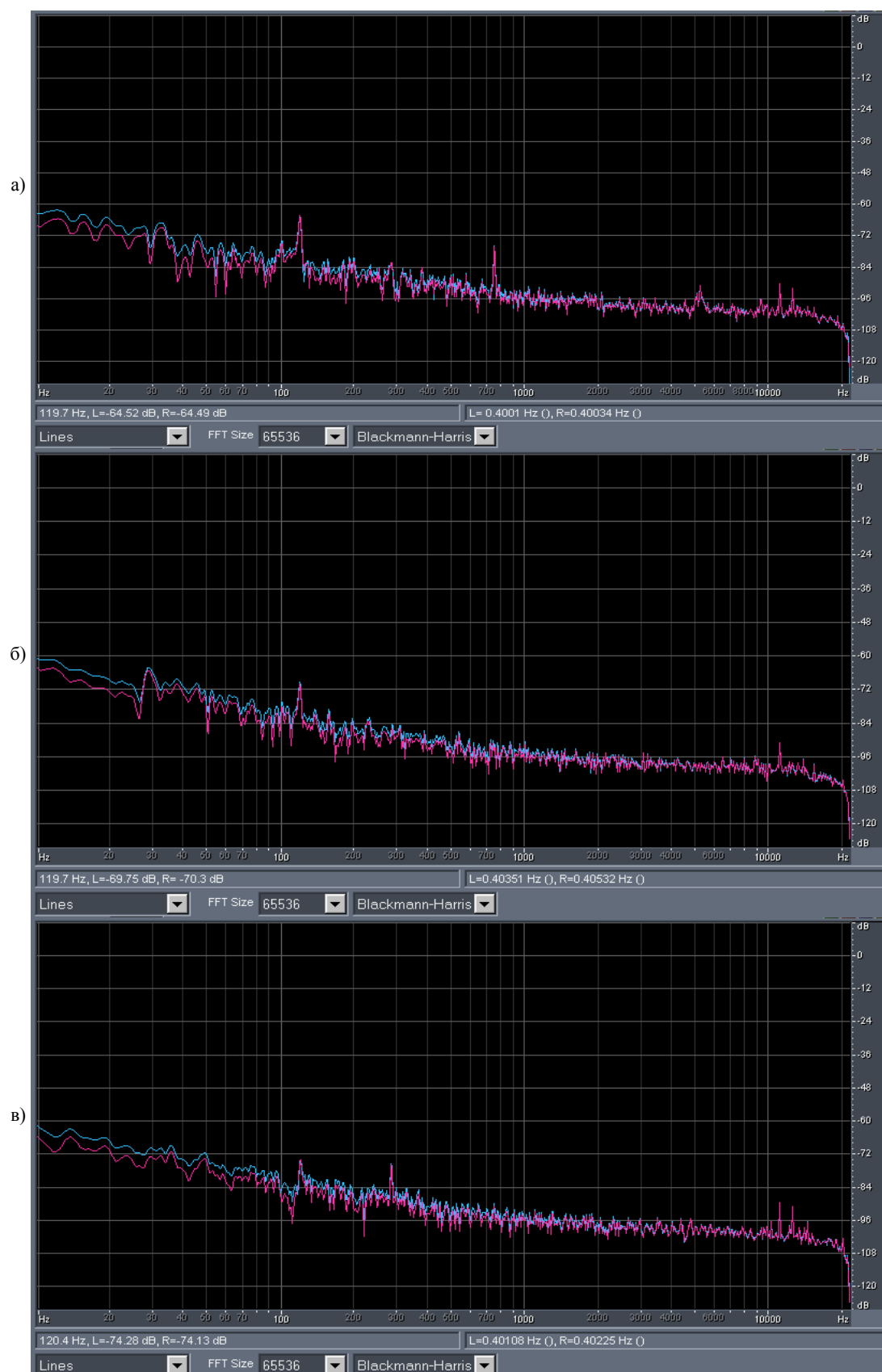
В [1] се препоръчва разстоянието между въздухопровода и охладителя на процесора да бъде 12–20 мм (фиг. 1). Но опитите показаха, че тогава въздухопроводът почти не играе роля, защото голяма част от вече преминалия през охладителя затоплен въздух се засмуква от вентилатора му и преминава повторно, затопляйки се още повече и т.н. За да влиза в охладителя само външен въздух с температурата на околната среда, трябва да се развие подвижната част на въздухопровода, за да се намали гореспоменатото разстояние до възможния минимум. Той се определя от начина на закрепване на капака и на практика е около 1 мм.



Фиг. 1 Разстояние между въздухопровода и охладителя [1]



Фиг. 2 Температури и обороти на вентилаторите: *а, г*: с капак без въздухопровод; *б, д*: без капак; *в, е*: с въздухопровод. Едно деление по хоризонтала отговаря на 25 секунди. Всички тестове са с продължителност 20 минути. Температурните данни за процесора и дънната платка са разменени, вероятно поради недостък в алгоритъма на програмата „AIDA64“.



Фиг. 3 Спектри на шума: *а* – без облепване, *б* – облепване с 1,8 мм „Alubutyl“, *в* – като (б), но с подложка от 10 мм ППЕ.

Измерванията бяха извършени при стайна температура $\approx 23^{\circ}\text{C}$ с компютър „dx5150 MT“. В него процесорът „Sempron 3200+/Palermo“ бе заменен с „Athlon 64 X2 3800+/Manchester“, охладителят му модел „376256-004“ – с „2ZQ99-049“, а вентилаторът на задния панел „PV902512M“ – с „Red Wings Extreme 92H“. Добавен бе

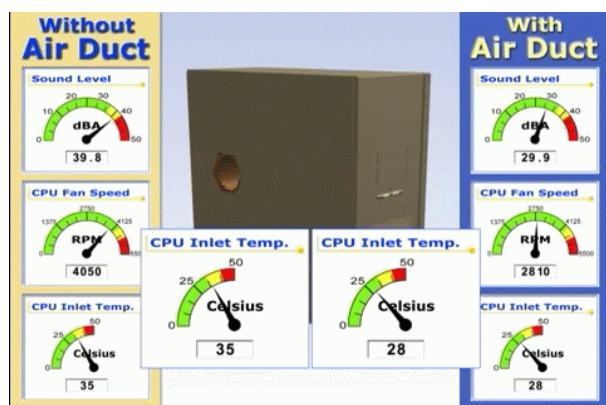
вентилатор на предния панел „F9 TC“ с прахов филтър „FGF-90“. На дънната платка „MS-7050“ има вх.-изх. контролер „LPC47B397“ с автоматично управление на оборотите на вентилаторите според температурата на корпуса на процесора. На фиг. 2 са дадени криви на измерените с вградените датчици температури и обороти на

вентилаторите от момента на преминаване от 0% към 100% натоварване на процесора и паметта с теста за стабилност на диагностичната програма „AIDA64“ до края на 20-минутния период на пълното натоварване.

Както се вижда, температурата с ляв капак без въздухопровод се повишава от 50 до 66°C за ≈30 секунди (фиг. 2а), без ляв капак – за ≈55 секунди (фиг. 2б), и с въздухопровод на левия капак – за ≈160 секунди (фиг. 2в). При достигане на температура на корпуса на процесора 66°C автоматичното управление на вентилаторите ги привежда в режим на пълни обороти. На фиг. 2г и 2д се вижда, че почти няма разлика между работата на вентилаторите с и без капак без въздухопровод – оборотите им периодически достигат максимума си, докато с въздухопровода те повишават пренебрежимо малко и за кратко. В [2] има формула за зависимостта на нивото на шума от оборотите на вентилатора

$$(2) \quad N_2 = N_1 + 50 \cdot \lg(R_2 / R_1)$$

където N_1 е нивото на шум в децибели при обороти R_1 , а N_2 – при обороти R_2 . Имайки предвид съотношението на оборотите при пълни и непълни обороти на вентилаторите на фиг. 2г–д (≈1,6 пъти), по формула (2) се получава разлика в нивата от ≈10 dB. Т.е. въздухопроводът, с който дори при пълно натоварване оборотите се повишават незначително, води до понижаване на нивото на шума именно с такава стойност спрямо максималните обороти (≈10 dB). Тя почти съвпада с разликата от 9,9 dB (фиг. 4) в образователния филм на Intel [3], но там е използван „тегловен“ филтър А:



Фиг. 4: Кадръ от филма „Chassis Air Ducting“ на Intel [3].

За разлика от стаината температура от ≈23°C, при ≈28°C и пълно натоварване на процесора и паметта и в трите описани случая оборотите на вентилаторите постоянно бяха максимални, а разликата в температурата на процесора с и без въздухопровод бе ≈15°C. В [3] тя е само 7°C, но там оборотите на вентилатора с и без въздухопровод са различни и се предполага, че въздухопроводът е на 12–20 мм от охладителя на процесора съгласно [1], а не на ≈1 мм. А от обясненията в края на [3] не става ясно с реален експеримент ли са получени стойностите там или чрез симулация.

4. Предпоставки за борба с вибрациите

Към шума от вентилаторите се прибавят и вибрациите от твърдите дискове на компютъра, особено ако те са повече от един (във въпросния „dx5150 MT“ бе добавен втори). За да не бъдат и вентилаторите на корпуса допълнителен източник на вибрации, те трябва да са закрепени с антивибрационно гумено уплътнение или „гвоздеи“. В конкретния случай за целта бяха използвани гумен буфер „P92“ за вентилатора на предния панел

(откъдето влиза въздухът) и антивибрационни „гвоздеи“ модел „NA-SAV2“ за вентилатора на задния панел (откъдето излиза въздухът от кутията).

5. Резултати от борбата с вибрациите

В „dx5150 MT“ твърдите дискове не са завинтени за отсека на дисковете, а са на „релси“ и не могат да се изолират с антивибрационни гумени шайби. Изходът е да се подтиснат вибрациите на стените на компютърната кутия.

За разлика от вентилаторния шум, който е с по-широк спектър предимно в областта на средните честоти, вибрациите на твърдите дискове имат много тесен спектър в областта на ниските честоти. Има много материали за поглъщане на средночестотния шум. Но за ниските честоти трябва плътен материал, „сковаващ“ вибриращата плоскост. Такива материали има за автомобилите, където вибрациите са много силни. Те са скъпи, но приложими за много по-малките по размери персонални компютри. В случая бе използван самозалепващ се материал „Alubutyl“ (синтетичен бутилкаучук, покрит едностранно с алуминиево фолио) с дебелина 1,8 мм (модел № 800.00.051).

На фиг. 3 са дадени спектрите на стерео-записи от разстояние ≈250 мм срещу левия панел на същия „dx5150 MT“ с продължителност от по 5 секунди. Спектралната линия с честота 120 Hz произхожда именно от твърдите дискове, които се въртят със 7200 мин.⁻¹ (7200 : 60 = 120). Тази линия е най-силна на фиг. 3а, където е спектърът на звука преди облепването. На фиг. 3б същата линия е отслабнала с над 5 dB, защото там е даден спектърът на звукозапис, направен по същия начин, но след облепване отвън на целия горен и десен панел на кутията на компютъра с „Alubutyl“.

Но вибрациите се предават не само по въздуха, а и чрез бюрото, на което е разположен компютърът. За намаляване на това предаване компютърът бе изолиран от бюрото с подложка от пенополиетилен (ППЕ или PEF) с дебелина 10 мм. Спектърът на звука, записан по същия начин след това изолиране, е даден на фиг. 3в. Тук спектралната линия с честота 120 Hz е отслабнала с още ≈4 dB. Или двата метода за борба с вибрациите заедно дават 9,5–10 dB подобрене.

Спектралните линии с честоти от 750 Hz (фиг. 3а) и 290 Hz (фиг. 3в) имат неизяснен произход.

5. Заключение

Опитите показаха, че при пълно натоварване на процесора въздухопроводът на 1 мм от охладителя намалява шума на вентилаторите с до 10 dB при температура на околната среда ≈23°C, а при ≈28°C намалява температурата на процесора с до 15°C. Облепването на кутията с „Alubutyl“ и подлагането на пенополиетилен между нея и бюрото пък намалява вибрациите от твърдите дискове с почти 10 dB.

5. Литература

1. [Chassis Air Guide \(Design Guide\), Revision 1.1](#), September 2003, Intel Corp., Santa Clara, CA, USA.
2. [Establishing Cooling Requirements: Air Flow vs. Pressure](#), January 2010, Comair Rotron Inc., Richardson, TX, USA.
3. [Intel Video: Chassis Air Ducting](#), September 2003, Intel Corp., Santa Clara, CA, USA.



АКУСТИКА

Национална конференция "Акустика 2015"

Година XVII

Брой 17

ISSN 1312-4897

Варна

09 - 10.10.2015 г

София

27 - 28.11.2015 г

Декември 2015.

АВТОМАТИЗИРАНО УЛТРАЗВУКОВО ИЗПИТВАНЕ НА ЗАВАРЕНИ СЪЕДИНЕНИЯ НА ТРЪБОПРОВОДИ

П. Чукачев, * М. Миховски, * Й. Мирчев

p.chukachev@multitest.bg, nntdd@imbm.bas.bg

Мултитест ООД, гр. Варна, 9009, България

*Институт по механика- БАН, София, България

Резюме: Усъвършенстваната ултразвукова технология „фазова решетка“ бе внедрена в механизирани системи при контрол на заварени съединения на тръбопроводи. Методът бе адаптиран към изискванията за контрол свързани с използваните методи на заваряване. Статията представя специфичните особености на механизирани ултразвукови сканиране на заварени съединения на тръбопроводи.

Ключови думи: механизирани системи, фазова решетка, сканираща система, заварено съединение, контрол, AUT.

AUTOMATED ULTRASONIC TESTING OF WELDED JOINT OF PIPELINES

P.Chukachev,*M.Mihovski,*J.Mirchev

Summary: Advanced ultrasonic technology “phased array” was implemented in mechanized systems underinspection of welded joints of pipes. The method was adapted to inspection requirements related to the methods of welding. The article presents the specific features of mechanized ultrasonic scans of welds on pipelines.

Увод

Автоматизирани системи за ултразвуков контрол прилагат основните принципи на ултразвуковия контрол с подобрена технология „фазова решетка“. Използването на фокусирани осезатели и методът за зонното разделяне на завареното съединение дефинира предимствата на този метод пред радиографичните методи на контрол. Методите за контрол на заварени съединения използващи източници на йонизиращи лъчения и рентгенови лъчи бяха основните до 1959г., когато бе създаден първия прототип на механизирана система за ултразвуков контрол с голям брой конвенционални ултразвукови осезатели. Впоследствие големия брой осезатели бе заменен с многоелементни преобразуватели. Възможностите за фокусиране на ултразвуковия сноп в областта на интерес и малкия размер на фокусното петно- 2 mm, подобри технологиите за откриване и оразмеряване на заварени съединения. Механизираният ултразвуков контрол даде тласък и на усъвършенстването на механизирани системи за заваряване. Разработени бяха нов тип критерии за оценка- ЕСА критерии подчиняващи се на принципите на фрактурната механика и определени от височината на несъвършенствата.

Изложение

Приложението на механизирани ултразвукови системи при инспекция на кръгови заварени съединения изисква определен ресурс, осигуряването, на който гарантира точност и възпроизводимост на резултатите. (1-3)

При провеждане на ултразвуково изпитване на заварени съединения 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).(4,5)

Pipe Size	5	10	20	30	40	STD	60	80	XH	100	120	140	160	XXH
1/8	.405	.515	.645	.785	.915	.915	.915	.915	.915	.915	.915	.915	.915	.915
1/4	.540	.680	.840	1.000	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175
3/8	.675	.840	1.040	1.250	1.475	1.475	1.475	1.475	1.475	1.475	1.475	1.475	1.475	1.475
1/2	.840	1.040	1.290	1.540	1.790	1.790	1.790	1.790	1.790	1.790	1.790	1.790	1.790	1.790
3/4	1.040	1.290	1.540	1.790	2.040	2.040	2.040	2.040	2.040	2.040	2.040	2.040	2.040	2.040
1	1.290	1.540	1.790	2.040	2.290	2.290	2.290	2.290	2.290	2.290	2.290	2.290	2.290	2.290
1 1/4	1.540	1.790	2.040	2.290	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540
1 1/2	1.790	2.040	2.290	2.540	2.790	2.790	2.790	2.790	2.790	2.790	2.790	2.790	2.790	2.790
2	2.290	2.540	2.790	3.040	3.290	3.290	3.290	3.290	3.290	3.290	3.290	3.290	3.290	3.290
2 1/2	2.790	3.040	3.290	3.540	3.790	3.790	3.790	3.790	3.790	3.790	3.790	3.790	3.790	3.790
3	3.290	3.540	3.790	4.040	4.290	4.290	4.290	4.290	4.290	4.290	4.290	4.290	4.290	4.290
3 1/2	3.790	4.040	4.290	4.540	4.790	4.790	4.790	4.790	4.790	4.790	4.790	4.790	4.790	4.790
4	4.290	4.540	4.790	5.040	5.290	5.290	5.290	5.290	5.290	5.290	5.290	5.290	5.290	5.290
4 1/2	4.790	5.040	5.290	5.540	5.790	5.790	5.790	5.790	5.790	5.790	5.790	5.790	5.790	5.790
5	5.290	5.540	5.790	6.040	6.290	6.290	6.290	6.290	6.290	6.290	6.290	6.290	6.290	6.290
5 1/2	5.790	6.040	6.290	6.540	6.790	6.790	6.790	6.790	6.790	6.790	6.790	6.790	6.790	6.790
6	6.290	6.540	6.790	7.040	7.290	7.290	7.290	7.290	7.290	7.290	7.290	7.290	7.290	7.290
7	7.290	7.540	7.790	8.040	8.290	8.290	8.290	8.290	8.290	8.290	8.290	8.290	8.290	8.290
8	8.290	8.540	8.790	9.040	9.290	9.290	9.290	9.290	9.290	9.290	9.290	9.290	9.290	9.290
9	9.290	9.540	9.790	10.040	10.290	10.290	10.290	10.290	10.290	10.290	10.290	10.290	10.290	10.290
10	10.290	10.540	10.790	11.040	11.290	11.290	11.290	11.290	11.290	11.290	11.290	11.290	11.290	11.290
11	11.290	11.540	11.790	12.040	12.290	12.290	12.290	12.290	12.290	12.290	12.290	12.290	12.290	12.290
12	12.290	12.540	12.790	13.040	13.290	13.290	13.290	13.290	13.290	13.290	13.290	13.290	13.290	13.290
14	14.290	14.540	14.790	15.040	15.290	15.290	15.290	15.290	15.290	15.290	15.290	15.290	15.290	15.290
16	16.290	16.540	16.790	17.040	17.290	17.290	17.290	17.290	17.290	17.290	17.290	17.290	17.290	17.290
18	18.290	18.540	18.790	19.040	19.290	19.290	19.290	19.290	19.290	19.290	19.290	19.290	19.290	19.290
20	20.290	20.540	20.790	21.040	21.290	21.290	21.290	21.290	21.290	21.290	21.290	21.290	21.290	21.290
22	22.290	22.540	22.790	23.040	23.290	23.290	23.290	23.290	23.290	23.290	23.290	23.290	23.290	23.290
24	24.290	24.540	24.790	25.040	25.290	25.290	25.290	25.290	25.290	25.290	25.290	25.290	25.290	25.290
26	26.290	26.540	26.790	27.040	27.290	27.290	27.290	27.290	27.290	27.290	27.290	27.290	27.290	27.290
28	28.290	28.540	28.790	29.040	29.290	29.290	29.290	29.290	29.290	29.290	29.290	29.290	29.290	29.290
30	30.290	30.540	30.790	31.040	31.290	31.290	31.290	31.290	31.290	31.290	31.290	31.290	31.290	31.290
32	32.290	32.540	32.790	33.040	33.290	33.290	33.290	33.290	33.290	33.290	33.290	33.290	33.290	33.290
34	34.290	34.540	34.790	35.040	35.290	35.290	35.290	35.290	35.290	35.290	35.290	35.290	35.290	35.290
36	36.290	36.540	36.790	37.040	37.290	37.290	37.290	37.290	37.290	37.290	37.290	37.290	37.290	37.290
42	42.290	42.540	42.790	43.040	43.290	43.290	43.290	43.290	43.290	43.290	43.290	43.290	43.290	43.290
48	48.290	48.540	48.790	49.040	49.290	49.290	49.290	49.290	49.290	49.290	49.290	49.290	49.290	49.290

Таблица 1. ANSI Pipe Schedules

Основните стандарти, в които са описани критериите за оценка са:

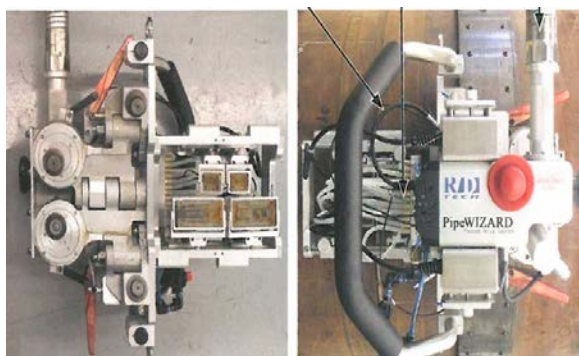
- API 1104 Welding of pipelines and related facilities
- ISO 13847 Petroleum and natural gas industries- pipeline transportation systems- welding of pipelines
- AS 2885.2 Pipelines- gas and liquid petroleum part 2:Welding; clause 22
- CSA Z662

Технологията на изпитването и калибрирането на системата са подробно разписани в ASTM E 1961-06. Въведени в България, Европа и в света са следните стандарти БДС EN ISO 10893-част 9,10,11,12. (6-8). В тях има цитирани норми, както и специфични изисквания касаещи технологията на провеждане на изпитването.

Утвърдените по света сканиращи системи са три основни групи:

- ръчни /време базирани, свободно движещи се/,
- полуавтоматизирани /с енкодер, без мотор/,
- автоматизирани /с енкодер и мотор/.

Основните елементи, които изграждат една механизирана система са глава на скенера, устройства за събиране на данни, визуализация и записи. Главата на скенера включва задвижващ мотор, енкодери за позиция, система за разпределение на контактна течност, пиезо-композитни осезатели и призми, ToFD осезатели. (Снимка 1).



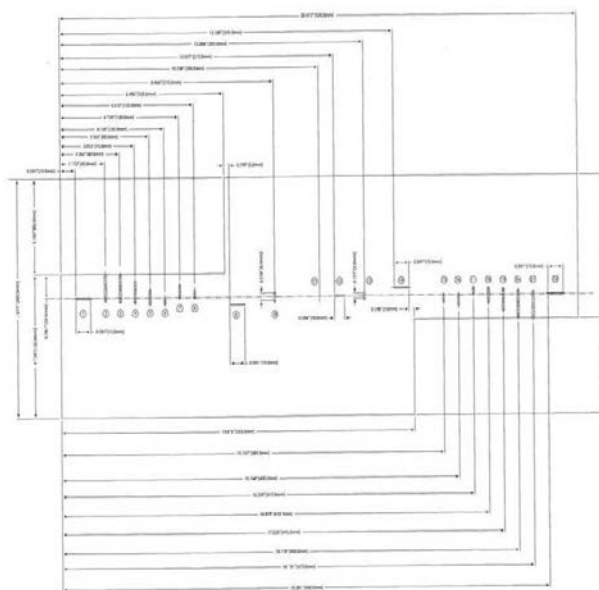
Снимка 1. Глава на скенер

Устройството за събиране на данни включва ултразвукова мултиплицираща система и дигитална система за обработка на сигналите. Чрез системата за мултиплексиране всеки канал може да се наблюдава като отделен апарат /операторът може да конфигурира всеки ултразвуков лъч поотделно, зонален, обемен, ToFD и напречен/. Чрез контролния център могат да бъдат събирани и управлявани и други данни като скоростта на мотора и посоката на движение, както и температурата, наблюдаваните данни, интервалът на дискретизация, калибрирането на енкодера.(10-12)

Системите за AUT предлагат няколко основни вида визуализации:

- лентова диаграма с информация за амплитуда и време за всяка зона,
- идентифициране на зони и позиция по отношение на централната линия- US и DS,
- метод за указване на сигналите над определен оценъчен праг,
- осева позиция от позицията на началната точка на сканиране,
- метод за указване на адекватно свързване с повърхността.

Калибрирането на AUT системите се осъществява чрез блокове изработени от същия материал, който ще се контролира съгласно ASTM E-1961. Основните видове отражатели са: зонов, обемни, по централната линия, напречни и TOFD отражатели. (Фигура 1)



Фигура 1. Схема на блок съгласно ASTM E-1961.

Регистрирането на отделните отражатели се осъществява чрез настроени времеви и амплитудни гейтове.

Оценяването на регистрираните индикации се осъществява на базата на:

- Workmanship критерии,
- ECA критерии.

Съгласно изискванията на нормите касаещи контрола чрез AUT технологията персоналът трябва да бъде квалифициран и сертифициран. Лицата извършващи контрол трябва да притежават опит, обучение и да са преминали успешно сертификационен изпит в изпитен център по AUT метод.

В областта на автоматизирания ултразвуков контрол на заварени съединения Мултитест ООД притежава сертифицирани специалисти от TWI, Англия по сертификационна схема CSWIP.

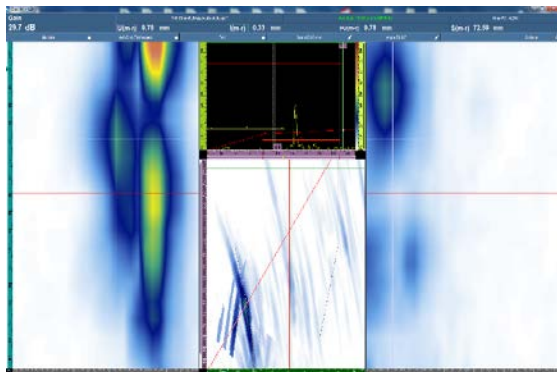
Мултитест ООД притежава богат опит при контрола на заварени съединения чрез автоматизиран ултразвуков метод. Специалисти на компанията са участвали в проекти с национално и международно значение при строителството на морски газопроводи като надзорен персонал при заваряване и при контрол на кръгови челно заварени съединения.

В Мултитест ООД се проектират, произвеждат и внедряват сканиращи системи за автоматизиран ултразвуков контрол.(Снимка 2)

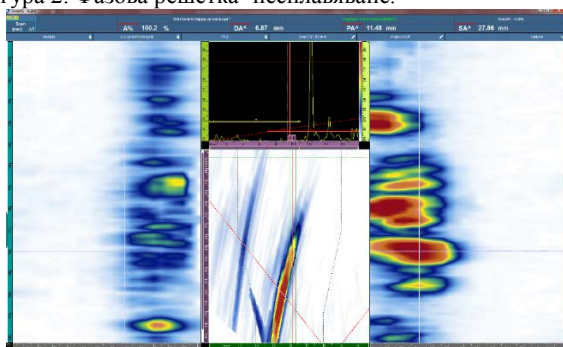


Снимка 2. Автоматизирана система за ултразвуков контрол произведена в Мултитест ООД.

Чрез произведените в компанията системи за контрол, Мултитест ООД доказва експериментално високия процент на откриваемост на дефекти чрез системите работещи по метода на фазовата решетка. Чрез радиографичен контрол проведен на същото заварено съединение, на което предварително е проведен автоматизиран ултразвуков контрол се регистрират критичните несъвършенства- неприяв (Фигура 2, Радиограма 1) и несплавяване (Фигура 3, Радиограма 2).



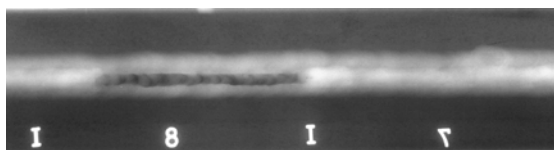
Фигура 2. Фазова решетка- несплавяване.



Фигура 3. Фазова решетка- неприяв.



Радиограма 1. Несплавяване.



Радиограма 2. Неприяв.

Заклучение

Автоматизираните системи за ултразвуков контрол сравнени с радиографичните методи осигуряват по-добри възможности за откриване изключвайки изолираните пори и включения. По тази причина механизирания ултразвуков контрол измества радиографията като метод за инспекция на кръгови заварени съединения в цял свят.

Възможностите на метода за дискриминация на слоевете на завареното съединение е фактора, който прави механизираното ултразвуково изпитване осъществимо.

Усъвършенстваните компютърни технологии, въвеждането на мощни хардуерни и софтуерни компоненти гарантира

бързата и надеждна интерпретация на данните, както и стабилността на системата.

Литература

- 1.ASTM E 1961-06 Standard Practice for mechanized Ultrasonic Testing of Girth Welds Using Zonal Discrimination with Focused Search Units
- 2.Denys R.M. Engineering Critical Assessment (ECA) based on girth weld defect acceptance levels. London UK: IPLOCA, 1999
- 3.Dube N., M.D.C.Moles. Mechanized Ultrasonic inspection of Large Diameter Gas Pipeline Girth Welds, [www.ndt.net-february](http://www.ndt.net-february1999) 1999, vol.4, No.2
- 4.Ginzel E., R.Ginzel. Automated Ultrasonic Inspection of Nozzle Welds using Phased-Array Ultrasonic Testing, part 2- Outside access. Simulation in NDT. Online Workshop in www.ndt.net in September 2010
- 5.Ginzel E., R.Ginzel. Study of acoustic velocity variations in line pipe steel. Materials Evaluation.1995, Vol.53 #5
- 6.Ginzel E., M.Moles. Mechanized Ultrasonic Inspection of large Diameter gas Pipeline Girth Welds, Quebec City, Quebec, Canada: NDT.net, 1999, Vol.4
- 7.Ginzel R. Alliance Pipeline Project. 1998
- 8.Green W.L. The effects of porosity on Mild Steel Welds.s.1.: Welding Journal Supp.,158.No.5
- 9.Gross B. et al. Flaw Sizing using Mechanized inspection on pipeline girth welds
- 10.De Raad J.A., High Speed Ultrasonic inspection of Field Girth welds During Pipeline Construction, Pipeline Technology Conference, ostende, Belgium, 1990
- 11.Mc Master R.C. NDT Handbook – Second Edition- Volume 7, s.1.: American Society for Nondestructive testing, 1991
- 12.Morgan L. The performance of Automated Ultrasonic testing (AUT) of mechanized Pipeline Girth Welds, [www.ndt.net-march](http://www.ndt.net-march2003) 2003, vol.8, No.3

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2015”	Варна 09 - 10.10.2015 г. София 27-28.11.2015 г.
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

ASSESSMENT OF MECHANICALLY STRESSED STATE IN PIPELINES ACCORDING TO RUSSIAN STANDARDS

ОЦЕНКА НА МЕХАНИЧНО НАПРЕГНАТО СЪСТОЯНИЕ НА ТРЪБОПРОВОДИ НА ОСНОВАТА НА РУСКИ НОРМАТИВНИ ДОКУМЕНТИ

Prof. D.Sc. Mihovski M. M.¹⁾ PhD Mirchev Y. N.¹⁾, eng. Chukachev P. H.²⁾, Assoc. Prof. Ph.D Sergienko V. P.³⁾

¹⁾ Institute of Mechanics- BAS, Sofia, Bulgaria, e-mail: mirchev@imbm.bas.bg,

²⁾ Multitest Ltd, Varna 9009, Bulgaria: p.chukachev@multitest.bg,

³⁾ V. A. Belyi Metal Polymer Research Institute of NAS, Gomel, Belarus

Introduction

Serviceability of the materials is determined by the physical and mechanical properties and internal applied or residual stresses in the material. On the basis of a set of data are solves the problem of resource assessment and future process in order to ensure safe working conditions to prevent the destruction of the structure.

There are a significant amount of methods that allow to obtain information data correlated with the values and types of existing or residual stresses. To these methods can be referred the following: X-ray diffraction, neutron diffraction, electromagnetic, magnetostrictive and based on magnetic effect Barkhausen, on magnetic memory, thermoelectric, volume and surface ultrasonic, acoustic emission, strain measurement, speckle interferometry, laser optics, mechanical through holes and others. Most often, in practice using magneto noise methods based on the Barkhausen effect and ultrasonic methods. The main advantages are: high satisfactory accuracy, portability of equipment, ability to realize the method in working condition.

A major influence on the accuracy of these methods have the following factors: microstructure of the material, scale factor and size of the object, residual of plastic deformation, changing temperature conditions during calibration and measurement, inhomogeneity in the distribution of mechanical stresses in the volume and surface of the object, mutual influence of the components under biaxial stress state, macro elastic inhomogeneity and others.

In cases, where the working conditions at the calibration of equipment are not the same, the determination of mechanical stresses in magnitude and type is especially difficult and sometimes unsolvable task.

The purpose of work is: analysis of the basic methods for determining the mechanical stress state (MSS) of pipelines using the change in the velocity of propagation elastics waves or time difference of propagation in

environments with mechanical stress compared to mechanical unstressed materials.

1. Description of the method

In the system of Russian legislation are presented two standards [1,2], which regulate the application of ultrasonic methods for evaluation of the MSS.

ГОСТ 52890-2007 regulates the basic requirements for determining the MSS. Use volume ultrasonic waves that propagate in radius direction on controlled pipes. The standard is applicable to pipes of steel (welded and seamless) with ratio the wall thickness to the outer diameter 20 times and to pipes with a diameter greater than 325mm.

The standard was developed based on research developments Nizhgorodski branch of the Institute of Mechanical Engineering "A.A.Blagonravov" a subsidiary of Russian Academy of Sciences, conducted under the direction of Nikitina N.E. [3].

The main task in research MSS on pipes is determination of axially σ_z and tangentially (perimeter direction) σ_t mechanical stress, which is solved on the basis of existing theoretical relationship between velocity of propagation volume ultrasonic waves in square direction according to direction of mechanical stress. In thin-walled tube radial stresses are relatively small compared with σ_z and σ_t , that warrant MSS of pipes be considered as two-dimensional flat. The determination of the MSS is done by measuring the velocities or times of spread transverse waves, polarized to and across of forming and longitudinal wave that propagates to the radius of the tube. Figure 1 shows the direction of the existing mechanical stresses and polarized transverse and longitudinal waves in the tensile stresses in the pipe.

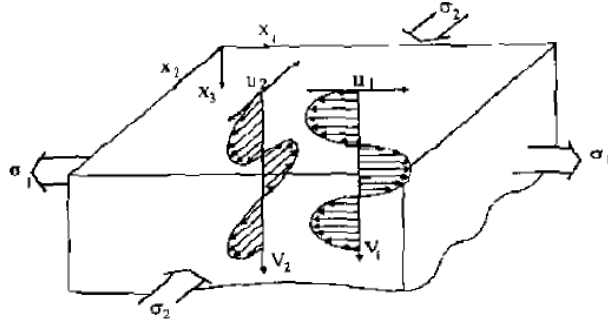


Fig.1. Direction of the existing mechanical stress σ and polarized transverse waves.

Measurements are realized with specialized equipment with high accuracy when measuring the velocity and times of volumetric ultrasonic waves. Emitted and received of the latter is realized with special transducers for transverses polarized waves and normal transducers for longitudinal waves.

In the process of measurement is recorded the initial velocities (time of propagation) in the material in the absence of mechanical stresses, taking into account the acoustic anisotropy of the material, microstructure etc. factors.

Depending on the measurement conditions, the current primary acoustic state of the material is carried on specially prepared samples or on the test pipes.

Coefficients of acoustical-elasticity necessary for the transformation of ultrasound parameters to mechanical stresses are characteristics of materials related to describe the mechanical behavior of materials modules for linear and non-linear elasticity (coefficient of Lamé λ and μ and modules Murnaghan l , m and n). Typically, these acoustical-elastic characteristics of the material are obtained by combining of the loaded mechanical forces on samples and measuring the information ultrasonic parameters. Permissible relative error in measuring according to standards is $\pm 10\%$.

Measurements shall be done with certified measuring equipments. Use normal probe for emitted of longitudinal and transverse ultrasonic waves. The measurements are usually in the echo-pulsed type of the test. The surface in the measuring zone must be a roughness $Ra \approx 2.5 \mu m$. As contact medium is used an epoxy resin. Mandatory is monitoring the temperature of the test material. In order to increase the accuracy of the method is used repeatedly reflected signals received in an area of a plane opposing walls in the pipe and in the absence of signals from a discontinuity in the volume of the tube.

2. Theoretical approach of the method

Based on the theory of linear acoustical-elasticity in the case of the model shown in Figure 1, loaded with mechanical stresses σ_z and σ_t , (flat stressed state) can enroll the following relations:

$$V_1 = V_{01} \cdot (1 + k_1 \cdot \sigma_z + k_2 \cdot \sigma_t), \quad (2.1)$$

$$V_2 = V_{02} \cdot (1 + k_2 \cdot \sigma_z + k_1 \cdot \sigma_t), \quad (2.2)$$

$$V_3 = V_{03} \cdot (1 + k_3 \cdot \sigma_z + k_3 \cdot \sigma_t), \quad (2.3)$$

wherein V_1 and V_2 are respectively the propagation velocity of transverse waves with different polarization, V_3 – propagation velocity of longitudinal wave. All waves propagate in the radius of the tube, k_i are acoustical-elastic coefficients. σ_z and σ_t , are respectively, mechanical stresses to the axial and perimeter direction.

The system of equations for determining the main stress to the axis of symmetry of the pipe, from velocity of propagation ultrasonic waves is present with the follow relationships

$$k_1 \cdot \sigma_z + k_2 \cdot \sigma_t = \frac{L}{t_1} \cdot \frac{t_{01}}{L_0} - 1, \quad (2.4)$$

$$k_2 \cdot \sigma_z + k_1 \cdot \sigma_t = \frac{L}{t_2} \cdot \frac{t_{02}}{L_0} - 1, \quad (2.5)$$

$$k_3 \cdot \sigma_z + k_3 \cdot \sigma_t = \frac{L}{t_3} \cdot \frac{t_{03}}{L_0} - 1, \quad (2.6)$$

wherein L_0 and L are respectively the paths of the spreading wave before and after applying the mechanical stresses, t_{0i} and t_i – times of propagation waves, respectively, before and after applying the stress σ_z and σ_t .

After transformation of dimensionless quantities and the use of values L/L_0 is reached the new formula for elastic-mechanical material characteristics K_1 and K_2 , which depend on the dimensionless evaluation of the propagation times of the elastic waves.

Mechanical stress are recorded in the form

$$\sigma_z = K_1 \cdot \Delta_1 - K_2 \cdot \Delta_2, \quad (2.7)$$

$$\sigma_t = K_1 \cdot \Delta_2 - K_2 \cdot \Delta_1, \quad (2.8)$$

wherein

$$\Delta_1 = \left(\frac{t_3 \cdot t_{01}}{t_1 \cdot t_{03}} - 1 \right), \quad (2.9)$$

$$\Delta_2 = \left(\frac{t_3 \cdot t_{02}}{t_2 \cdot t_{03}} - 1 \right), \quad (2.10)$$

t_1 , t_2 and t_3 indicate, respectively, the times of the distribution of both transverses and longitudinal waves, t_{01} , t_{02} and t_{03} – time distribution in the absence of mechanical stress.

In the case of single axle MSS

$$\sigma_z = D \cdot (\alpha - \alpha_0), \quad (2.11)$$

where $D = K_1 + K_2$, $a = (t_2 - t_1)/t_2$, $a_0 = t_{02} - t_{01}/t_{02}$.

Finally in ГОСТ52890-2007 are recorded the following relation for σ_z и σ_t ,

$$\sigma_z = D \cdot (\alpha - \alpha_0), \quad (2.12)$$

$$\sigma_t = D \cdot (\alpha_0 - \alpha), \quad (2.13)$$

If the material is with strong anisotropy - t_{01} and t_{02} differ by 1.5÷2% then calculations for σ_z and σ_t , are realize with relation

$$\sigma_z = K_1'' \cdot \left(\frac{t_{01} \cdot t_3}{t_{03} \cdot t_1} - 1 \right) - K_2 \cdot \left(\frac{t_{02} \cdot t_3}{t_{03} \cdot t_2} - 1 \right), \quad (2.14)$$

$$\sigma_t = K_1^\perp \cdot \left(\frac{t_{02} \cdot t_3}{t_{03} \cdot t_2} - 1 \right) - K_2 \cdot \left(\frac{t_{01} \cdot t_3}{t_{03} \cdot t_1} - 1 \right), \quad (2.15)$$

where $K_1 \parallel K_1^\perp$ are acoustical-elastic coefficients, obtained in the case of mechanical stresses which applied on and normal to the perimeter of the tube.

In cases where the difference in temperature before and during the test exceed 10°C, the temperature factor is account as the ratio t_3/t_{02} and recorded as $t_3/t_{02} \cdot (1 + k_t \cdot \Delta T)$, wherein ΔT is the temperature difference, k_t - relative change of timing distribution of transverse (longitudinal) wave for 1°C.

3. Investigation of MSS in pipeline

The materials used in technological pipelines are characterized by strong anisotropy, which is associated with structural changes and changes of the MSS, which are comparable in magnitude. Anisotropy of some steels in the form of sheet products used for the manufacture of welded steel tubes with large diameter (800÷1400mm), exceed the mechanical stresses that exist outside of alloying metal. These changes may be within up to 8%, such as steel 10Г2ФБ20, used for welded steel pipe for the pipeline. Definitely influenced the the velocity change of propagation waves for changes in temperature during the testing [3].

Based on experience [3] give the following advice for the realization of research:

- we believe that the material of the pipe is orthotropic and applied mechanical stress on pipe are strength-pressure;
- anisotropy of the material to be considered only the change of values for the velocity of propagation, and not to assess the stresses of the material;
- providing precise measurements of velocity and times of propagated ultrasonic waves.

3.1. Experimentally obtaining of acoustical-elastic coefficients

To obtain the coefficients of the acoustical-elastic are prepared comparative samples simple with parallelepiped shape and rectangular cross-section of the material to be tested. When preparing samples of the test material is taken into account and characteristics- microstructure, preliminary (residual) mechanical stresses and others.

The samples are tensile ore pressure loaded on a test machine with high accuracy. In accordance with the standard is implemented attaching the probes to sample and carry out the necessary determination of the propagation times of transverse and longitudinal waves that propagate in the square direction of the applied load. With the values obtained for the times of the propagated waves are calculated coefficients K_1 and K_2 with following relation

$$K_1'' = \frac{k_1'' - k_3}{(k_1'' - k_3)(k_1^\perp - k_3) - (k_2 - k_3)^2}, \quad (3.1)$$

$$K_1^\perp = \frac{k_1^\perp - k_3}{(k_1'' - k_3)(k_1^\perp - k_3) - (k_2 - k_3)^2}, \quad (3.2)$$

$$K_2 = \frac{k_2 - k_3}{(k_1'' - k_3)(k_1^\perp - k_3) - (k_2 - k_3)^2}. \quad (3.3)$$

In [3] is entered data for acoustical-elastic coefficients for some of the traditional tested steels, which are represented by average values and their uncertainty according to their obtaining (Table 1).

Table1. Values of acoustical-elastic coefficients

Steel grade	$K_1 \cdot 10^{-5}$ MPa	$K_2 \cdot 10^{-5}$ MPa	$D \cdot 10^{-5}$ MPa
Steel 20	-1.05±0.12	-0.21±0.1	-1.27±0.11
38XC	-1.09±0.05	-0.19±0.07	-1.28±0.04
17Г1С	-1.07±0.07	-0.15±0.02	-1.21±0.11
09Г1ФЕ	-1.06±0.03	-0.12±0.04	-1.18±0.03
09Г1ФЕ	-1.06±0.07	-0.16±0.09	-1.22±0.11
X70	-0.8	-0.1	
X70	-1.2	-0.14	

Based on averages for K_1 and K_2 for steel 38XC shown received by us meanings for σ_z and σ_t , in the cases when experimental data are in the range of values for variations to the K_1 and K_2 . The results are presented in Figure 2.

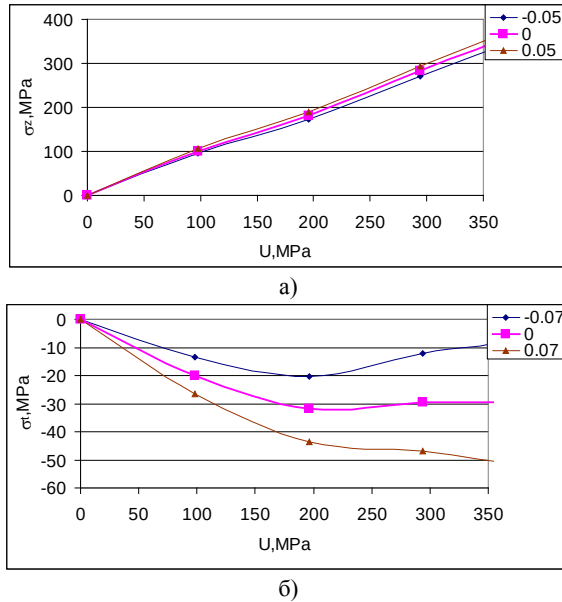


Fig.2. Depending of the mechanical stresses σ_z and σ_t set by ultrasonic waves with an applied mechanical tensile stress σ for steel 38XC.

The values represented by the notation 0 refer to calculations obtained average values for acoustical-elastic coefficients [3]. The remaining values refer to the case where we differ from the average of the propagated times of the waves. The maximum variation reaching 10% of the obtained averages.

Conclusion

The article presents a method for determining the MSS on a plane stress state of the material, which corresponds to the load pipeline. The method opens great opportunities for the study of MSS which gives information on both the axial and tangential stresses. Accuracy is practical acceptable and when preparat suitable comparative samples for determining MSS the accuracy can be increased significantly.

This work was supported by Marie Curie Actions, International Research Staff Exchange Scheme, grants number: PIRSES-GA-2012-318874 of the FP7, project titles: INNOVATIVE NONDESTRUCTIVE TESTING AND ADVANCED COMPOSITE REPAIR OF PIPELINES WITH VOLUMETRIC SURFACE DEFECTS.

References:

- [1]. ГОСТ 52890-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования;
- [2]. ГОСТ 52731-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений;
- [3]. Никитина Н.Е., Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н.Новгород: ТАЛАН, 2005.

	АКУСТИКА Национална конференция "Акустика 2015"	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г Декември 2015.
Година XVII	□ Брой 17	

ХИДРОАКУСТИЧНА ЦИЛИНДРИЧНА АНТЕНА ЗА СЕКТОРЕН ХИДРОЛОКАТОР

инж.Иванов Ив.К.

ИМСТЦХ"А. Балевски" – БАН, София, България, ivo1942@abv.bg

РЕЗЮМЕ: Конструирана е цилиндрична многоелементна хидроакустична антена за секторен хидролокатор. Предложен е и експериментиран метод за формиране на серия диаграми на насоченост в хоризонталната плоскост на базата на конструираната антена. Приведени са ехограми от индикатора на хидролокатора.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: диаграма на насоченост, хидроакустична антена, секторен хидролокатор.

A CYLINDRICAL MULTI-ELEMENT HYDRO-ACOUSTIC ANTENNA FOR SECTORAL SONAR

eng. Ivanov Iv. K.

SUMMARY: A cylindrical multi-element hydro-acoustic antenna for sectoral sonar is designed. An experimental method of forming series of beam charts in the horizontal plane based on the designed antenna is presented. Echograms of sonar indicators are adduced.

KEY WORDS: beam chart, hydro-acoustic antenna, sectoral sonar.

1. УВОД

В хидролокаторите „Морена-М“ и „UWSS-5“ секторът на наблюдение е $(20 \pm 5)^\circ$. Той се осигурява с използването на плоска многоелементна антена решетка, осигуряваща фазова обработка на приеманите отразени сигнали. По този начин се постига определяне на направлението към целта в сектор от 6° .

Увеличаването на сектора на наблюдение може да бъде реализирано чрез използването на многоелементна антена, реализирана върху цилиндрична повърхност. Наблюдението на сектора в този случай може да бъде реализирано по два начина. Първо чрез излъчване в целия сектор и приемане чрез вътрешно импулсно сканиране на няколко синтетични диаграми на насоченост. Второ от елементите на антената се формират няколко диаграми на насоченост, които обхващат целия сектор. Наблюдението на сектора се осъществява чрез последователно излъчване и приемане на отразените ехо сигнали в обхвата на всяка от формираните диаграми.

Характеристиката на насоченост в хоризонталната плоскост на части от цилиндричната многоелементна хидроакустична антена, когато $kR \gg 1$ (k – вълново число, R – радиуса на дъгата) се определя от същото уравнение като за плоска решетка [1.2]:

$$R_\theta = \left| \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda} \cdot \sin\theta\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin\theta\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda} \cdot \sin\theta\right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \cdot \sin\theta} \right| \quad (1)$$

където: n – брой на елементите (колоните) на антената;
 d – разстояние между центровете на елементите;
 a – размер на отделния елемент;

λ – дължина на вълната;

θ – ъгъл на отклонение от нормалата.

2. КОНСТРУКЦИЯ НА АНТЕНАТА И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА УСТАНОВКА

За конструиране на хидроакустична антена разполагаме с два вида пиезокерамични елементи – пластини: ПКЕП 24х16х8 и ПКЕП 26х16х8. И двата вида могат да осигурят работа честота на антената в диапазоните около: 60kHz, когато резонансният размер е 24mm или 26mm, а излъчващата повърхност е 16х8mm, и 100 kHz, когато резонансният размер е 16mm, а излъчващата повърхност е 24х8mm или 26х8mm.

Хидроакустична антена с работна честота около 60kHz, за да осигури сектор на наблюдение 80° , елементите ѝ трябва да бъдат разположени върху цилиндрична повърхност с радиус около 380mm и височина около 250mm. Тези габарити не са приемливи за мобилен хидролокатор за секторно наблюдение, каквато е целта. Поради това избирам работната честота на антената да бъде около 100 kHz.

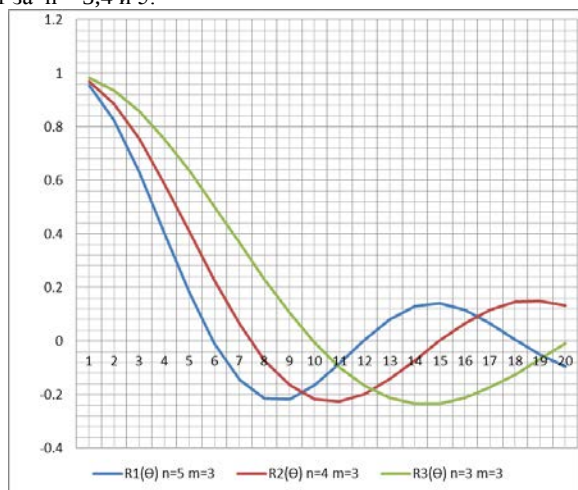
На фиг.1 е показана фотография на излъчващата повърхност на хидроакустична антена за секторен хидролокатор, конструирана на базата пиезокерамични пластини тип ПКЕП26х16х8. Използва се напречния пиезоефект – d_{31} и резонансният им размер 16mm, осигуряващ работна честота около 100 kHz. Антенната решетка съдържа 96 елемента, реализиращи цилиндрична излъчваща повърхност с радиус 185mm.



Фиг.1 Хидроакустична цилиндрична антена излъчваща повърхност

За осигуряване на възможност за откриване на малки обекти със сила на целта около минус 20dB ($R_e = 0.25m$) в райони с дълбочина над 10m, характеристиката на насоченост на хидроакустичната антена на секторния хидролокатор във вертикалната плоскост трябва в максимална степен да намалява маскиращото влияние на повърхностната и дънна реверберация на процеса на откриване.

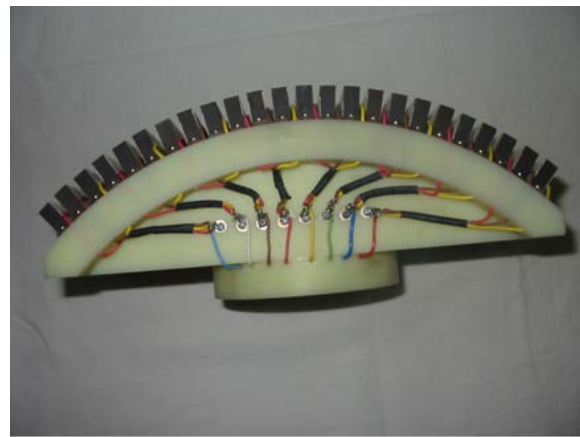
Характеристиката на насоченост в плоскостта включваща оста на цилиндъра (вертикална плоскост) се определя също от уравнение (1) и зависи от броя на елементите в колоните на антенната решетка от фиг. 1. На фиг.2 са показани изчислените характеристики на насоченост във вертикалната плоскост за $n = 3, 4$ и 5 .



Фиг.2 Диаграми на насоченост във вертикалната плоскост за различен брой елементи

От приведените диаграми на насоченост се вижда, че с увеличаване на броя на елементите в колоните, което е равнозначено на увеличаване на линейния размер на антената, намалява разтворът на диаграмата от 20° при три елемента до 10° при пет елемента.

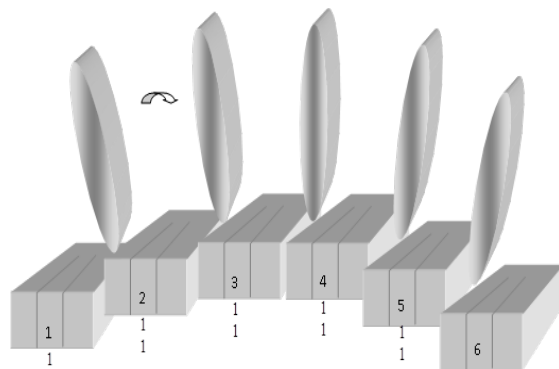
На фиг.3 добре се виждат 24 колони на антенната решетка. Всяка колона съдържа по четири елемента



Фиг.3 Хидроакустична антена вид отгоре

3.ДИСКУСИЯ

Показаната антенна решетка дава възможност чрез подходящо групиране да се реализират няколко диаграми на насоченост, които да осигурят наблюдението на сектора с високо разрешение. Това се постига като с определена част от антената се формира необходимата диаграма. В нейния ъгъл се осъществява излъчване на сондиращ импулс с последвано приемане на ехо сигналите. В следващия момент друга част от антената, в която участва половината от предната, формира идентична характеристика и действието се повтаря до изчерпване на възможностите на решетката. След това цикълът се повтаря фиг.4.



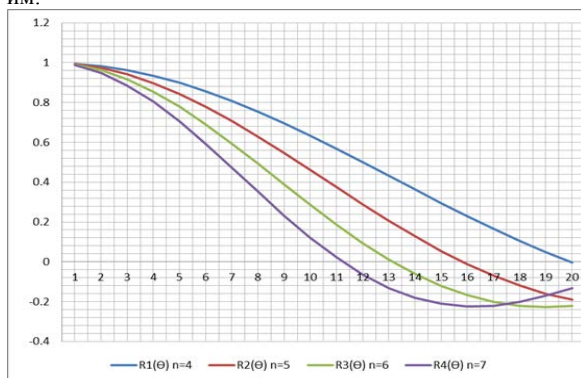
Фиг.4 Графично формиране на диаграми на насоченост от елементите на антенната решетка

За определяне на оптималния брой групи необходими за формиране на диаграма с висока разрешаваща способност и осигуряващ получаването на възможност за последователното развъртане в границите на показаната антенна решетка е извършено изчисление на хоризонталните диаграми на насоченост на части от по 4, 5, 6 и 7 колони. Резултатите за показани на фиг.4. Анализът на резултатите подсказва, че предложената антена е целесъобразно да се раздели на осем групи от по три стълба. По този начин се създава възможност секторът на наблюдение да се обследва чрез последователното превключване на седем диаграми с ширина на ниво минус три децибела около 10° .

При този вариант антенната система е разработена като една антена, състояща се от много пиезокерамични елемента, разположени по цилиндрична повърхност с радиус, който да осигури необходимото ъглово преориентиране на статичната диаграма на насоченост.

Излъчването, респ. приемането, се осъществява чрез едновременно използване на две групи елементи, както е илюстрирано на фиг. 4. По този начин от $(n+1)$ групи елементи се формират n насочени диаграми.

При изработването на хидроакустичните антени е необходимо да се контролират параметрите на пиезоелементите: геометричните им размери, външния вид (състояние на електродите, наличие на пукнатини, отчупвания), полярността, резонансната честота, капацитета и др. Кои точно определя конструктора. Освен това той определя и допуските им.



Фиг.5 Хоризонтални диаграми на насоченост на групи от по 4, 5, 6 и 7 колони

След измерване на резонансните и антирезонансните честоти на пиезоелементите и значенията на напреженията на тези честоти се определят местата на пиезоелементите в колоната, състояща се от четири елемента. Подбират се елементи, чиито резонансните честоти са в границите ± 750 Hz спрямо резонансната честота на антената. Елементите се залепват върху стъклотекстолитова лента с дебелина 3mm. В средата се поставят два елемента от тези с най- високи стойности на Δf и най-малко отклонение от определената за дадената антена честота. От двете страни на тези елементи се поставят елементи, чиято стойност на Δf е по-малка и с по-голямо отклонение от резонансната честота. Лентите със залепените елементи се монтират на предварително определените места върху полиамидната носеща основа. След това електродите на пиезоелементите се свързват и обединяват по три в групи.

След това се проверява капацитета на отделните групи и съпротивлението на изолацията между тях. Следващата процедура от технологичния цикъл е херметизацията на антенната решетка. Най-подходящи са полиуретановите системи, тъй като акустичните им характеристики са близки до тези на водата. Освен това осигуряват надеждна херметизация и електроизолация на антената. Самата херметизация се осъществява чрез монтиране на подготвената заготовка в специално разработено за целта приспособление (приложение 2), така че пред излъчващата повърхност на пиезоелементите на решетката да се получи слой от полиуретана с дебелина не $(3\div 3.5)$ mm. Приспособлението с монтираната в него антенна решетка се загряват до 80°C , след което се запълва с полиуретан като се вземат технологични мерки да не останат въздушни мехурчета пред излъчващата повърхности на пиезоелементите. След полимеризацията на

полиуретана антената е готова за изследване и експлоатация.



Фиг.6. Херметизирана с полиуретан антена

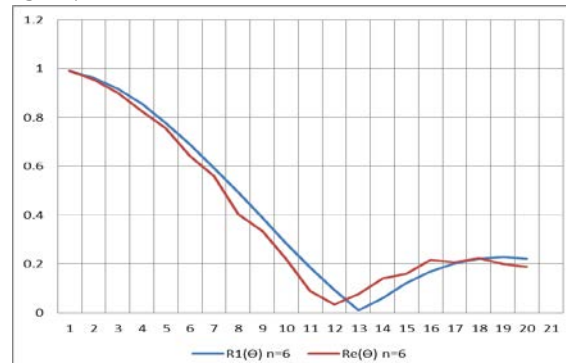
4. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За проверка на параметрите на изработената по описания по-горе технологичен цикъл антена е конструирано и изработено приспособление фиг.7, осигуряващо измерване на параметрите на антената: ефективност в режим на излъчване, чувствителност в режим на приемане и характеристиките на насоченост в двете плоскости. Приспособлението осигурява развъртане: в хоризонталната плоскост - $\pm 20^{\circ}$; във вертикалната - на 3° над хоризонта и на 10° под хоризонта.



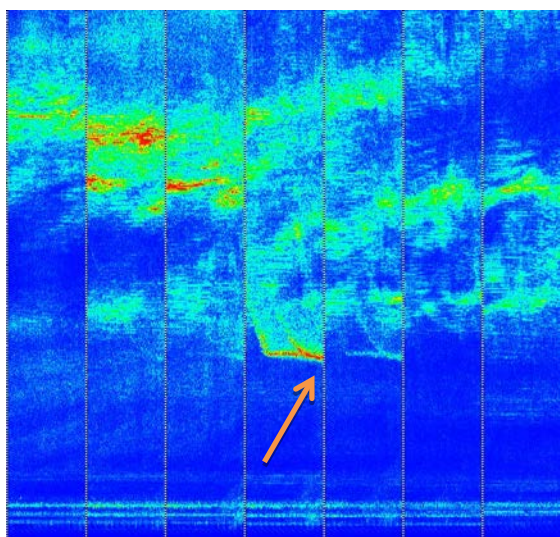
Фиг.7 Херметизираната антена на приспособлението за измерване на диаграмата на насоченост

На фиг. 8 са приведени диаграмите на насоченост на линейна антена състояща се от четири елемента с дължина 16mm и разстояние между центровете на елементите $m = 3$ mm за честота $\lambda = 15$ mm.

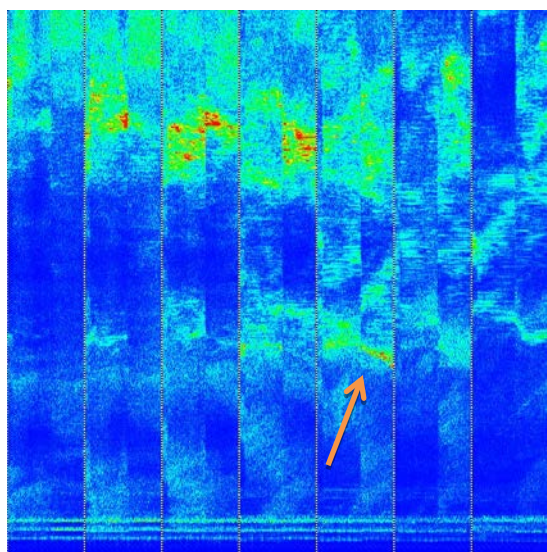


Фиг.8. Хоризонтални диаграми теоретична и експериментална при $m=3$ mm

На фиг.9 е приведена ехограмата от индикатора на хидролокатор, използващ разгледаната по-горе хидроакустична антена. В централния сектор със стрелката е показан белега от двама водолази, намиращи се на 80m от антената на хидролокатора.



Фиг.9. Ехограма от индикатора на хидролокатора ,когато той е ориентиран, така че белегът от водолазите е в централния сектор



Фиг.10. Ехограма от индикатора на хидролокатора , след завъртване на антената на 10° в дясно спрямо положението от фиг. 9.

След завъртане на антената на хидролокатора на 10° спрямо предходното положение фиг.10, белегът от водолазите се измества в съседния сектор (стрелката е насочена към него).

Получените при експериментите резултати доказват правилността на предложениия метод на формиране на диаграми на насоченост в хоризонталната плоскост на базата на цилиндрична многоелементна хидроакустична антена. С такъв тип антена е възможна

реализацията на хидролокатори със сектор на наблюдение от 70° до 140°.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евтютов А. П., „Инженерные расчеты в гидроакустике“, изд. Судостроение, Ленинград , 1988г.
2. Орлов Л. В., Шабров А. А. „Расчет и проектирование антенн гидроакустических рыбопоисковых станции“ Москва, 1974.

	АКУСТИКА Национална конференция "Акустика 2015"	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

СРАВНИТЕЛНИ ОБРАЗЦИ ЗА ОЦЕНКА НА МЕХАНИЧНОТО НАПРЕГНАТО СЪСТОЯНИЕ НА МАТЕРИАЛИ

Й. Мирчев Й., П. Чукачев, М. Миховски

При безразрушителните измервания на механично напрегнато състояние (МНС) на материали и изделия с използване на безразрушителни методи за изследване в значителна степен получените стойности зависят от редица трудно контролирани фактори. Към тях се отнасят: отклонения в химическия състав, в микроструктурата, наличие на остатъчни пластични деформации, взаимно пряко влияния на главните напрежения при двуосно напрегнато състояние, текстура на материала и др.

Тези фактори внасят неопределеност в резултатите. Влиянието, понякога е толкова силно изразено, че се получават грешки даже при определяне на вида и стойността на измерваните напрежения.

Основа за приложението на методите и средствата за безразрушителен контрол е построяването на калибровъчни зависимости между безразрушителните информационни параметри и механичните напрежения σ . Измерванията са косвени. Значителна част от методите осигуряват необходимата висока точност и чувствителност, както при определяне на повърхност напрежения, така и на напрежения, разпределени в обема. Зависимостта между измерения по безразрушителен метод информационен параметър и σ е обикновено нелинейна и зависи от използвания метод и степента на отчитане на влияещите фактори. В резултат на измерванията се получават данни за решаване на некоректната обратна задача за определяне на σ . [1, 4] За решаването на тези задачи е необходим еталонен метод за независима оценка на σ и еталон за създаване на механични напрежения, които да бъдат регламентирани посредством стандарти.

Отсъствието на еталони за механични напрежения, посредством които да могат да бъде осъществена действителна калибровка на средствата за безразрушителни измервания на σ , в значителна степен затруднява прилагането им. В американските стандарти ASTM в подкомитет E-28-13 по измерване на остатъчни напрежения, само в два стандарта се разглежда ултразвуков метод за измерване на затихването на ултразвукови вълни (E1544-99 и E1685-00) [12].

Цел на настоящата работа е да се представят няколко от традиционно използваните средства за метрологично осигуряване, използвани за оценка на механични напрежения, при прилагане на ултразвукови методи и методи, основани на ефекта на Баркхаузен и на електромагнитни методи [3, 4, 5].

В [4], на основата на значителния опит на ВНИИ по метрология Д.М. Менделеев в Санкт Петербург, са формулирани най-съществените изисквания които трябва да бъдат изпълнени при работа на системи за експлоатиране на средства за безразрушителен контрол при измерване на механичното напрегнато състояние (МНС). По-долу са представени най-важните изисквания към тях:

- отсъствие на остатъчни механични напрежения в използваното еластично твърдо тяло, което се постига чрез целева пластична и температурна обработки или посредством специална химична обработка на повърхностния слой,
- еднородност на механичните свойства (плътност, модули на еластичност) по целия обем,
- еднородност на магнитните и акустични свойства и отсъствие на остатъчно намагнитване,
- еднородност на акустикоеластичните коефициенти,

- определяне на геометричните размери на образца и формата на повърхността му с цел оптимално базиране на преобразувателите спрямо образца,
- отсъствие на влияещи фактори върху измерването на МНС,
- разработка на стандартизационни изисквания към образца и начина за работа с него,
- създаване на сравнителни образци, като вторични еталони които да могат да съчетават предаването на единиците за измерване на σ към съответния метод и обект.

В страната има значително количество уреди за контрол (например ултразвукови дефектоскопи) които всяка година подлежат на проверка по отношение на принципа на действие и регистрираните параметри. Но за да преминат в експлоатация като средства за измерване трябва да им бъде извършена атестация за съответствие на информационните параметри с механичните напрежения, което понякога е трудна задача. Това е и основната причина за сравнително слабото използване на методите за БК в безразрушителната тензометрия.

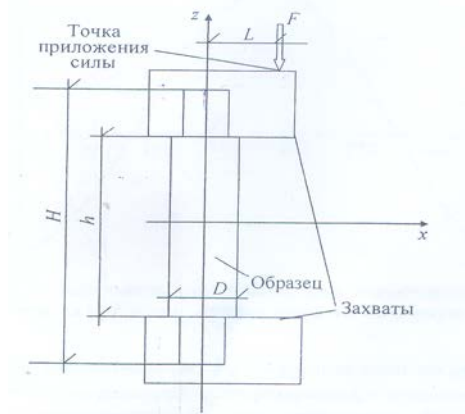
По-долу са представени 3 сравнителни образци за решаване на въпросите с построяването на калибровъчни зависимости при безразрушителните измервания. Образците представляват еластични твърди тела със зададени геометрични характеристики които се натоварват с механична сила. Силовите механизми за създаване на действащото усилие в образците трябва да са съответно атестирани от национални институти по метрология. Средствата за измерване на геометричните размери с необходимата точност също трябва да са преминали държавна проверка.

1. Еталон за механични напрежения, разработен в ВНИИМ „Д. Менделеев“.

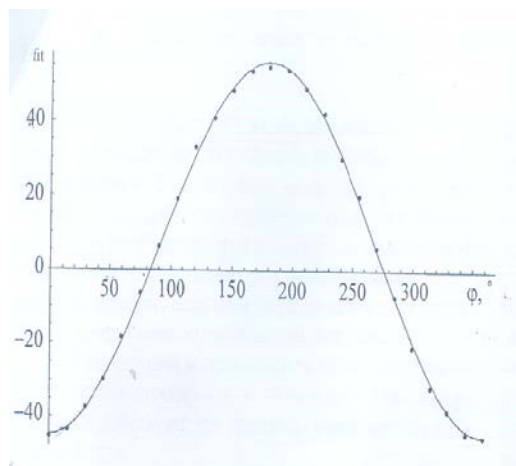
Колектив от сътрудници на ВНИИМ „Д. Менделеев“ и Института по приложна физика на НАН на Белорусия предлагат следното решение за еталон за създаване на механични напрежения, чиято форма е показана на фиг. 1 [4, 5].

Геометричните размери на еталона са $D = 80$ mm, $h = 180$ mm, $H = 140$ mm.

При работа с еталона цилиндричният образец, се натоварва на опън или натиск. Образецът се натоварва нецентрално със сила F като точката на прилагане на силата е на разстояние L от центъра на образца. На повърхността на цилиндъра възниква непрекъснато изменение на разпределението на механичните напрежения. Диапазонът на техните изменения зависи от F и L .



Фиг. 1 Еталон за създаване на МНС в повърхностния слой на материала



Фиг. 2 Относително изменение на σ от ъгъла φ в образца

Теоретична основа, която описва работата на еталона е аналитичното решение за пръти, подлежи на нецентрално натоварване с момент на сила. Решението е предложено от Сен Венан [5]. Тензорът на напрежението има една компонента $\sigma_{zz}(x)$, която се променя линейно в равнината където е приложена силата по зависимостта

$$\sigma(x) = -\frac{F}{\pi R^2} \left(1 + \frac{4L}{R^2} x\right) = -\frac{F}{\pi R^2} \left(1 + \frac{4L}{R} \cos \varphi\right), \quad (1)$$

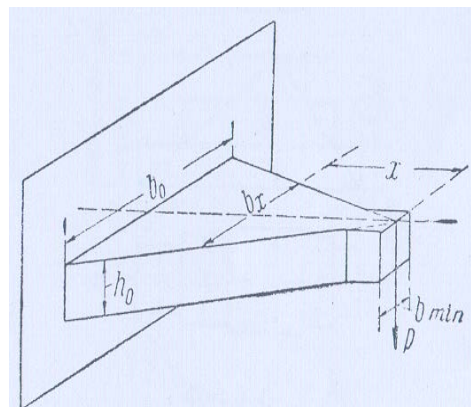
където R е радиуса на цилиндъра.

При експерименталната проверка, с използване на система от тензодатчици е получена зависимостта на σ (в отн. единици) от ъгъла φ (фиг. 2). Коефициентът на корелация между теоретичните и експериментални данни е 0.9997. При многократни изследвания е получено, че полето на механични напрежения се възпроизвежда с грешка $\leq 1\%$ [4].

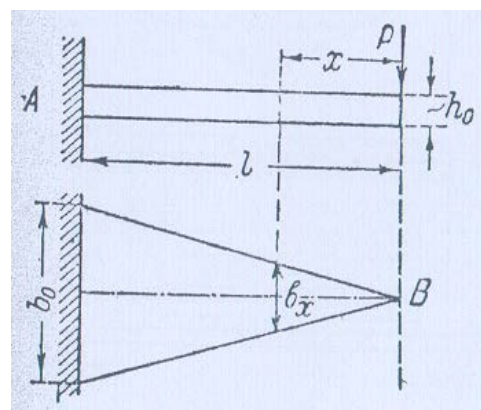
Еталонът е подходящ при калибриране на системи за определяне на механични напрежения с използване на методи, основани на ефекта на Баркхаузен и на електромагнитни методи както и при ултразвукови методи с използване на повърхностни вълни на Релей.

2. Сравнителен образец с равно съпротивление (еднаква якост), натоварен на огъване

Под гредата с равно съпротивление се разбира гредата в която във всяко сечение най-големите нормални напрежения са еднакви и равни на допустимото (или не го превишават). Външният вид и начина на конзолно закрепване са представени на фиг. 3. и фиг. 4.



Фиг. 3 Образец с равно съпротивление (външен вид)



Фиг. 4 Образец с равно съпротивление (геометрични размери)

На тези фигури са представени и интересувашите ни размери. Те са определят на основата на използване на условието, че огъващия момент и съпротивителния моменти на гредата се променят пропорционално на огъващия момент който е приложен [7].

Приема се, че височината на гредата $h = h_0$ е

постоянна, $b(x) = b_0 \frac{x}{l}$, където при $x = l$ $b(l) = b_0$,

$b_{min} = \frac{3P}{2h(\tau)}$. Моментът на съпротивление на

опорното сечение $W_0 = \frac{b_0 h^2}{6}$. Най-големият

огъващ момент $M_{max} = P.l$. Съпротивителният

момент в сечение, на разстояние x от свободния край

$W_x = \frac{b(x)h^2}{6}$. В зависимостите по-горе P е силата на натоварване, τ е стойността на тангенциалните напрежения, а σ – стойността на нормалните напрежения. Кривината на гредата е постоянна и тя се деформира като дъга от окръжност.

Най-голямото провисване на гредата на свободния край

$$f_{max} = -\frac{Pl^3}{2EJ}, \quad (2)$$

където J е инерционния момент на гредата, E – модула на еластичност.

Преместванията по оста y се представят със зависимостта

$$y = -\frac{Pl^3}{2EJ} \left(1 - 2\frac{x}{l} + \frac{x^2}{l^2} \right)$$

Теоретичната форма на сравнителен образец тип гредя с равно съпротивление (еднаква якост) е дадена на фиг. 4 с плътни линии.

В [1] авторите изследват с използване на метод, на пропускане на вълни на Релей анизотропията на сравнителен образец в състояни на доставка с изявена анизотропия на свойствата в зависимост от ъгъла на разпространение на вълните по отношение на посоката на проката. Определянето на скоростите (времето на разпространение) на вълните на Релей се реализира с използване на метода на cross-spectrum analysis на информационния сигнал. Изследванията са проведени на честоти 2 и 4 MHz на сравнителни образци с дебелина 5 и 10 mm. Експериментите показват че относителни промени на системите на разпространение между осезатели в посока по и перпендикулярна на проката може да 0.2% при натоварване на образца със сила до 400 N.

Получените резултати показват, че е необходимо предварително подготвеният материал за сравнителен образец да бъде с минимална анизотропия или да се получават скоростите на разпространение в образца в различните направления.

3. Образец натоварен на опън (натиск)

Сравнителният образец има форма на паралелепипед. Може да бъде изработен и с удължения за захващане в машината за изпитване. Напречното сечение е квадратно. Образецът се натоварва на чист опън (натиск) с нормално усилие $N = P = \text{const}$. При опън нормалното усилие $N > 0$, а при натиск $N < 0$. Натоварването в равнина, перпендикулярна на оста x са $\sigma_x > 0$ или $\sigma_x < 0$. При натоварване прътът се деформира равномерно. Ако размерите на пръта преди деформация са, съответно, $l \times d \times d$, то след прилагане на усилията размерите ще бъдат $l_1 \times d_1 \times d_1$ като деформациите са $\Delta l_1 = l_1 - l$, $\Delta d_1 = d_1 - d$, а относителните деформации

$\epsilon_x = \Delta l_1/l$, $\epsilon_y = \epsilon_z = \Delta d_1/d$. По закона на Хук и след въвеждане на коефициента на Поасон механичните напрежения се записват във вида $\sigma_x = E \epsilon_x = P/d^2$, $\epsilon_y = -\mu \epsilon_x$, $\Delta d/d = -\mu \Delta l/l$, където E е модул на Юнг, μ – коефициента на Поасон.

За да се постигне равномерно разпределяне на механичните напрежения, съгласно изследванията на Сен Вендн, трябва да бъдат изпълнени следните условия:

- прътът трябва да е централно опънат (натиснат),
- сечението което се разглежда е достатъчно отдалечено от мястото на действие на приложените външни условия.
- в близост до сечението няма резки геометрични промени, и промени в механичните свойства.

Този сравнителен образец е особено подходящ за работа при получаване на калибровъчни зависимости за материалите преди измерване по методиката, регламентирана от ГОСТ 52890 [7], при която се измерват скоростите (времената) на разпространение на ултразвукови надлъжни и напречни вълни, разпространяващи се в сечение перпендикулярно на приложените усилия в материала на

образца. Възможно е и неговото използване и при измерване с използване на вълни на Релей и на метода на магнитното шумово напрежение на Баркхаузен. Възможно е и използване на образците при оценката на механични напрежения с използване на подповърхностни вълни, разпространяващи се по посока на приложните усилия.

Заклучение

В работата са представени три сравнителни образца които могат успешно да се използват за построяване на калибровъчни зависимости от вида информационни безразрушителни параметри (скорост на разпространение на ултразвукови вълни и магнитошумово напрежение) от действащите в сравнителния образец механични напрежения в условията на натоварване.

Предвижда се задължителна проверка на използването на материали да удовлетворяват изискванията в уводната част на работата.

Работата е изпълнена по проект INNOPIPES.

Литература

1. Ivanova Y., T. Partalin, Investigation of stress – state in rolled sheets by ultrasonic techniques. Ultrasound, v. 66, N 1, 2011, 7-15.
2. ASTM 1544(2004) Standard practice for construction of a stepped block and its use to estimate errors produced by speed-of-sound measurement systems for use on solid.
3. ASTM 1685-00(2006) Standard practice for measuring the change in length of fasteners using the ultrasonic pulse-echo technique.
4. Венгринович В.Л., Принципы и практика диагностики напряжений состояния конструкций, изделий и сварки в мире неразрушающего контроля 1(27) март 2005, 4-9.
5. Остривной А.Ф., С.Ю. Иванов, А.А. Лобашев, Эталон механических напряжений и переход от неразрушающего контроля напряжений к их измерениям, Контроль, Диагностика, № 6, 2001, 44-51.
6. Сен Венан Б., Мемуар о кручении призм М. Физматгиз 1961, 518.
7. Беляев Н.М., Сопротивление материалов, ГНФМЛ, М., 1962.
8. ГОСТ 52891-2007, Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов.

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2015”	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

НЯКОИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ИЗПИТВАНЕ НА ТРЪБОПРОВОДИ С НОРМАЛНИ ВЪЛНИ ЧРЕЗ ЕМАТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

SOME LIMITATION OF GUIDED WAVES INSPECTION OF TUBES USING EMAT'S

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

Abstract: The paper considers some limitations of EMATs for inspection of steel pipes using guided waves. The technique covers shorter distances from the pipe (0.1-5m) than the long range UT, typically works with frequencies from 100kHz to 1MHz and can detect small pits (x10 more sensitivity than LRUT.) Discussion includes limitations on guided wave mode selection and limitations as a result of lift-off effect and deviation from geometrical parameters of the pipes. Conclusions and guidelines for practical application of the method are made.

KEY WORDS: GUIDED WAVES, STEEL PIPES, LOCAL CORROSION, EMAT, MEDIUM RANGE, MEANDER COIL.

1. Увод

През последните 15 години голяма част от изследователската работа в сферата на контрола без разрушаване беше насочена върху приложимостта на нормалните вълни за контрол на тръбопроводи. Това доведе до разработването и внедряването на първите комерсиални системи за контрол и мониторинг на тръбопроводи с нормални вълни с голямо далекодействие, опериращи в нискочестотния обхват (до 200 KHz) [1]. Напоследък се наблюдава повишен интерес върху приложението на нормалните вълни за изпитване на стоманени тръби в диапазона 200 KHz - 1 MHz. Този подход води до няколкократно по-висока чувствителност на вълните към несъвършенствата, макар и за сметка на пониженото далекодействие, и прави възможен контролът на някои специфични участъци от тръбопроводите, в които използването на системите с голямо далекодействие е ограничено. Електромагнитното възбуждане и приемане на нормалните вълни дава следните допълнителни преимущества на технологията:

- безконтактно възбуждане и приемане на нормалните вълни, което води до висока прецизност и повторемост на резултатите и понижаване на субективния фактор в процеса на изпитване;
- контрол на изделия с по-груба и корозирала повърхност, както и на изделия, върху които са нанесени покрития (с дебелина до 4 мм);
- малка мъртва зона;
- добра модална селективност, вследствие на фиксираната дължина на вълната и възможността за регулиране на честотата [2,3].

Най-често използваната конфигурация на ЕМАТ за възбуждане на нормални и повърхностни вълни се състои от постоянен магнит и намотка. Посредством намотката в изделието се индуцират вихрови токове, които при взаимодействието си със статичното магнитно поле образуват движеща сила, която се преобразува в акустични вълни. Дължината на вълната на дадена мода на нормалните вълни се определя от разстоянието между пистите на намотката, като по този начин се ограничава възбуждането на други моди при определена честота. При по-дебели изделия с тази конфигурация могат да се възбуждат повърхностни вълни.

Обикновено магнита и намотките се монтират върху ролков скенер, снабден с механичен енкодер [2,3].



Фиг.1 Аксиално сканиране на тръба по метода на пропускане



Фиг.2 Периферно сканиране на тръба по импулсния-ехо метод

Технологията позволява сканиране на тръби в аксиално и периферно направление с далекодействие до 5m. При аксиално сканиране на тръби вълните се разпространяват по периферията на тръбата (фиг. 1), докато при периферното сканиране се разпространяват по дължина на тръбата (фиг. 2) [3]. За постигане на максимална чувствителност технологията

се използва при разстояние до 1m до зоната с евентуални несъвършенства. Тя може да се използва основно за откриване на различни корозионни дефекти и пукнатини. Сканирането може да се провежда както по импулсния ехо метод, така и по метода на пропускането. Основните области на приложение на аксиалното сканиране са откриване на корозия във опорите на тръбопроводи и бързо сканиране на големи участъци от тръбопроводи. Периферното сканиране се използва предимно за контрол на участъци от тръби с ограничен достъп, като например тръби, които навлизат или преминават през почва, сгради, стоманобетонни конструкции и др. [3].

В световен мащаб съществуват няколко разработени системи за контрол на тръби с нормални вълни посредством електромагнитно акустични възбуждане, като по-голямата част от тях се използват само в лабораторни условия за научно-изследователски цели. Методът не е стандартизиран, а производителите на оборудване, обикновено с комерсиална цел, не дават данни за ограниченията и недостатъците на технологията, произтичащи най-вече от сложния физичен характер на нормалните вълни. Такава информация липсва и в специализираната научна литература, а отсъствието и води до затруднена оценка на риска от приложение на технологията в практиката [4].

Целта на настоящата работа е да се направи обобщение на по-съществените ограничения на контрола на стоманени тръби с нормални вълни посредством EMAT преобразуватели. Представената информация е следствие на няколкогодишната научно-изследователска работа на автора в областта на контрола без разрушаване с нормални вълни посредством електромагнитно и пиезо-електрично възбуждане и приемане.

2. Използвани образци, апаратура и експериментална методика

При изследванията е използвана апаратура на фирмата Innerspec Technologies, Inc. [3] състояща се от:

- Електромагнитен преобразувател за възбуждане и приемане на нормални вълни;
- Ролков скенер, снабден с механичен енкодер;
- Мобилен ултразвуков дефектоскоп.

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 образеца (фиг. 2). С помощта на енкодера могат да се записват ултразвукови А-изображения през 0.25 mm от обиколката на тръбата. Софтуерът на дефектоскопа конвертира записаните А-изображения в Б-изображение, които дава цялостна картина за наличието на дефекти в изследваната зона.

За експериментални образци са използвани шевни и безшевни тръби с външен диаметър от 130 mm до 160 mm и дебелина на стената от 4 mm до 6 mm. В някои от тръбите са изработени различни типове изкуствени несъвършенства. Представеният анализ е базиран основно на резултати, получени при периферно сканиране на тръби по импулсния-ехо метод, но направените изводи са до голяма степен са валидни и при аксиално сканиране.

3. Резултати и дискусия

• Ограничения при избор на мода и работна честота

Една от основните предпоставки за надеждност на контрола с нормални вълни е възбуждането на самостоятелна мода. Предвид това, изборът на мода и работна честота за изпитване на тръби с нормални вълни с представената технология е ограничен от два основни фактора. Първият произтича от това,

че поради аксиално-несиметричното възбуждане на вълните, използването на модите от нисък порядък при ниски честоти може да предизвика и възбуждане на флексурални моди. Присъствието на сигнали от тези моди в А-изображенията съществено биха затруднили интерпретацията на резултатите от изпитването. Възбуждането на флексурални моди заедно с основната мода зависи основно от честотата и диаметъра на тръбата. При тръби с относително голям диаметър и при малки дължини на вълната, тръбата може да се разгледа като пластина и флексурални моди не се възбуждат. Например когато диаметърът на тръбата е 20 пъти по голям от дебелината на стената, съществена разлика в дисперсионните криви спрямо тези на пластина се наблюдава само при произведение на дебелина и честота под 0.5 MHz.mm. Като цяло, за определяне на минималната честота, при която могат да се използват модите от нулев порядък без възбуждане на флексурални моди може да се използва следната зависимост:

$$f_{\min} = \frac{c_l}{r_{\text{inner}}} \quad (1)$$

където c_l е скоростта на надлъжните вълни в тръбата, а r_{inner} е вътрешния диаметър на тръбата [5]. Ако този критерий се спазва, при приложението на технологията е възможно да се използва означението на модите на нормалните вълни в пластини, тъй като разликата в параметрите на модите между тръби и пластини е незначителна.

От друга страна използването на моди от висок порядък също е ограничено, тъй като поради големия брой на модите, които могат да се възбудят е затруднено възбуждането на самостоятелна мода и изолирането на другите моди. Освен това модите от висок порядък се възбуждат при високи честоти, което силно понижава далекодействието на контрола, особено при тръби с напреднала обща корозия.

От гореизложеното и от натрупания практически опит може да се заключи, че при изпитването на стоманени тръби с разглежданата технология са най-подходящи моди S0 в диапазона 1.2 – 1.8 MHz.mm, A0 в диапазона 0.6 – 1.6 MHz.mm и S1 в диапазона 3.5 – 5.5 MHz.mm. Тези три моди имат следните основни предимства и ограничения:

- **Мода A0** се възбужда лесно самостоятелно и притежава задоволителна чувствителност към локална корозия. Едно от основните предимства е, че може да се използва при тръби с по-груба и корозирала повърхност. Основния и недостатък е, че затихва силно при наличие на заобикаляща среда, като почва, вода, бетон и др.

- **Мода S1** има повишена чувствителност към несъвършенства поради по-високата си честота, при която се възбужда. От друга страна отклонения в дебелината на тръбата и груби и корозирани повърхности на тръбите водят до бързо затихване на вълните. Затихването може да се компенсира с допълнително увеличаване на усилването от апаратурата, но това води и до покачване на амплитудата на шумовете. Друго ограничение при използването на тази мода е, че заедно с нея често се възбужда и мода A1, което затруднява интерпретацията на резултатите. Ограничаването на възбуждането и може осъществи посредством цифрови филтри, с които производителите обикновено оборудват софтуера на системите си, но това води до допълнително понижаване на съотношението сигнал шум.

- **Мода S0** се възбужда при ниски честоти, което води до голямо далекодействие на контрола за сметка на ниската чувствителност към несъвършенства и голямата мъртва зона. Освен това използването и е много често съпроводено с възбуждане на флексурални моди. Основното и преимущество е, че не се влияе от наличие на заобикаляща среда поради доминиращата и надлъжна компонента на преместванията.

Сравнение на трите моди в зависимост от някои по-важни изходните параметри на контрола и особеностите на изпитваните обекти е направено в табл. 1. Тя може да бъде използвана, като отправна точка при избор на мода в

зависимост от особеностите на изпитваното изделие и характеристиките на очакваните несъвършенства.

Табл. 1 Избор на мода в зависимост от в зависимост от някои параметри на контрола и изпитваното изделие

	S0	A0	S1
Чувствителност към несъвършенства	-	0	+
Далекодействие	+	+	-
Самостоятелно възбуждане	0	+	-
Изпитване на груби и корозирани повърхности	+	+	-
Лъчева разрешаваща способност	-	0	+
Изпитване при наличие на заобикаляща среда	+	-	0
Изпитване на тръби с покрития	+	0	-
+ - добро 0 – задоволително - - не препоръчително			

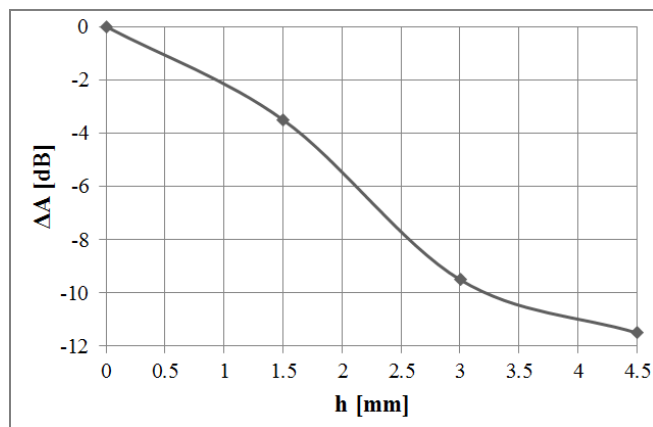
• **Ограничения на безконтактното възбуждане на вълните**

Едно от най-големите предимства на технологията е безконтактното възбуждане и приемане на нормалните вълни, което води до висока прецизност и повторимост на резултатите. То съществено понижава субективният фактор и косвено води до увеличаване на производителността на контрола. Безконтактната технология дава също възможност контролът да се провежда от дефектоскописти с по-ниска квалификация при наличие на документирана процедура за контрол, като е възможно характеризацията и оценката на индикациите да става в последствие в лабораторна среда от персонал с по-висока квалификация.

Липсата на акустичен контакт дава значително предимство на технологията за контрол на тръби с по-груба и корозирала повърхност, както и прави възможно изпитването на изделия, върху които са нанесени тънки покрития. Трябва да се има предвид обаче, че разстоянието, на което може да се отмести магнитът на преобразувателя от изпитваното изделие влияе силно на съотношението сигнал-шум е ограничено до няколко милиметра (т.нар. “lift-off effect”).



Фиг. 3 Изкуствена локална корозия (Corrosion pit cluster) в тръба (дебелина на стената 4 mm и външен д-р 133 mm)



Фиг. 4 Влиянието на отстоянието на преобразувателя h от тръбата върху амплитудата на отражението на мода A0 от изкуствен отражател

Например на графиката на фиг. 4 е представено влиянието на отстоянието на преобразувателя h от тръба (дебелина на стената 4 mm и външен диаметър 133 mm) върху амплитудата на отражението на мода A0 от изкуствен отражател, който имитира клъстер от локални корозионни язви (фиг. 3). Изкуствения дефект представлява конфигурация от 7 конусни отвора със средна дълбочина 45% от дебелината (1.8 mm), изработени със стандартно свредло с ъгъл на върха 120°. Разстоянието между преобразувателя и отражателя е 300 mm. Функцията е монотонна, като при отстояние между преобразувателя и образаца от 4.5 mm се наблюдава спад на амплитудата и респективно на съотношението сигнал-шум от почти 12 dB. По-голямо отстояние между преобразувателя и магнита ще доведе до значително понижаване на чувствителността на метода и евентуално пропускане на недопустими индикации. При пролъчване на отражателя с мода S1, при разстояние между преобразувателя и образаца по-големи от 3 mm, спада на амплитудата е толкова голям, че отражението от несъвършенството става съизмеримо с шумовете и не може да бъде надеждно регистрирано.

От гореизложеното следва, че в общия случай е препоръчително отстоянието между преобразувателя и изпитвания обект да е минимално. При изпитване на тръби с покрития или с обща корозия е необходимо повишаване на това отстояние. Повишаването му винаги води до понижаване на съотношението сигнал-шум и съответно до понижаване на далекодействието и чувствителността на метода и това трябва да бъде взето под внимание при изготвяне на процедурите за контрол.

• **Ограничения от отклонения във формата и размерите на тръбите**

В по-голямата част от стоманените тръби, които се използват в индустрията се наблюдава известно отклонение от номиналната дебелина на стената. Тъй като възбуждането на определена мода с определена намотка с фиксирана дължина на вълната в тръба с определена дебелина на стената се осъществява при точно определена честота, дори малки разлики в дебелината на стената предизвикват изместване от избраната работната точка и спад в амплитудата на сигнала. При периферно сканиране на тръби отклонения от номиналната дебелина би предизвикало разлики в амплитудата на отразения сигнал от отражателя с еднаква геометрия т.е. различна чувствителност по периферията на тръбата.



Фиг. 5 Амплитуда на отражението на мода A0 от края на тръба (дебелина на стената 4 mm и външен д-р 133 mm) при периферно сканиране на тръба

Например на фиг. 5 е представена амплитудата на отражението на мода A0 от края на шевна стоманена тръба (дебелина на стената 4 mm и външен диаметър 133 mm) при периферно сканиране при разстояние до преобразувателя 300 mm. Дебелината на тръбата се изменя от 3.8 mm до 4.1 mm. Като се изключи значителния спад на амплитудата на сигнала в началото на сканирането (при 10 mm от разгъвката на тръбата), породен от заваръчния шев, амплитудата на сигнала варира 20 dB. Тази значителна разлика ще доведе до голямо нееднаквост в прага на чувствителност по периферията на тръбата и към невъзможност за оценка на несъвършенствата по амплитуда. Освен това при някои стоманени образци се наблюдава отклонение от кръглост на напречното сечение на тръбата (напр. овалност). При това отклонение от формата в процеса на сканиране се изменя разстоянието между преобразувателя и тръбата, което допълнително дава отклонения в амплитудата на сигнала, както беше дискутирано по-рано.

При аксиално сканиране на тръби, отклоненията в дебелината на тръбата ще доведат до по-бързо затихване на вълните и до трансформации на възбудената мода. Подобен ефект върху разпространението на вълните би се получил при тръби с обща корозия в напреднал стадий. В този случай е препоръчително използването на намотки с по-голяма дължина на вълната и респективно по-ниска честота.

4. Заключение

Една от същностните цели на квалификацията при контрола без разрушаване е определяне на ограниченията на метода и на документираните процедури. В доклада е направен опит за обобщаване на някои от съществените ограничения и недостатъци на метода за контрол на тръби с нормални вълни посредством EMAT преобразуватели. Поради новостта на метода все още не съществуват стандарти, а информацията в научните бази данни или от страна на производителите за тези ограничения липсва, което до голяма степен затруднява оценката на риска от прилагането му. Представената информация може да се използва при изготвяне на процедури за контрол с EMAT технологията. Тя е базирана на опита на автора от научно-изследователската му работа с такъв тип оборудване.

5. Литература

- [1] Lowe, M., Cawley, P., Long Range Guided Wave Inspection Usage – Current Commercial Capabilities and Research Directions, Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, London, 2006
- [2] Salzburger H.J., F. Niese, G. Dobmann, EMAT pipe inspection with guided waves, *Welding in the World* 56, 2012
- [3] <http://innerspec.com/knowledge>
- [4] Скордев, А., Ограничения на приложенията на методите и документираните процедури за контрол без разрушаване на нецялостности, Научни известия на НТСМ, Година XXI, Брой 2(139), Юни, 2013
- [5] Pavlakovic B. N., Leaky Guided Ultrasonic Waves in NDT, PhD Thesis, PhD thesis, Mechanical Engineering Department, Imperial College London, 1998

ИЗСЛЕДВАНЕ И СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ФОРМАТИТЕ ЗА ВИДЕО КОМПРЕСИЯ H.264 H.265/HEVC

Investigation and Performance Comparison of H.265/MPEG-HEVC and H.264/MPEG-AVC Standards

д-р инж. Б. Николов, д-р инж. М. Шотова

Технически университет – Варна; boris.nikolov@yahoo.com; marianashotova@gmail.com

Abstract

In this paper a performance comparison of the two latest video coding standards H.264/MPEG-AVC and H.265/MPEG-HEVC (High-Efficiency Video Coding) is presented. The scope of this work is to compare the compression and encoding efficiency of the H.265/HEVC encoder in comparison to its predecessor H.264/AVC. The experimental results confirm the advantage of the new standard, which is double the compression efficiency of the bit stream without decreasing the quality of the picture.

Keywords: H.265, High Efficiency Video Coding, H.264, HEVC, AVC, PSNR, Video coding

1. Увод

През последните години потокът от видео информация предаван през глобалните информационни мрежи рязко се увеличи. Причина за това са увеличаващият се брой телевизионни програми с висока разделителна способност, интернет сайтовете за видео споделяне, отдалеченият достъп до охранителни системи за видео наблюдение и др. Това наложи разработването и внедряването последователно във времето на двата нови стандарта за видео компресия - H.264/AVC (Advanced Video Coding), [1-4] и H.265/HEVC (High Efficiency Video Coding), [5-7].

Настоящата публикация изследва и анализира разликите в качествените параметри на тези формати за видео компресия. Показателите по които са оценявани двата стандарта са: PSNR – отношение сигнал шум, MSE – средно квадратична грешка и SSIM – показател за структурно подобие.

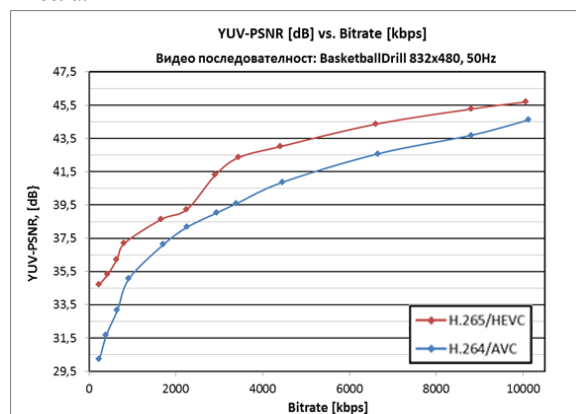
AVC и HEVC са разработени в отговор на нарастващата нужда от видео компресия за различните приложения и устройства. Задачата им е да съкратят цифровата информация на видеосигнала, като същевременно се запази качеството му.

HEVC е по-новият от двата стандарта, разработен, за да измести широко използваното днес AVC кодиране. Тенденцията му е да увеличи два пъти ефективността на видео компресията в сравнение с по-старият стандарт, при запазване на същото или по-добро качество на кодираното изображение. С цел изследване и анализ на предимствата на HEVC пред AVC са проведени сродни изследвания [8-10], които потвърждават предимствата на новия формат за видео компресия.

2. Резултати и дискусия

За целта на анализа е компилиран HEVC опорен кодек (HM rev.3.561), състоящ се от кодер (TAppEncoder) и декодер (TAppDecoder). С помощта му суровият (RAW)

видео материал представен в YUV цветово пространство се кодира, като H.265/HEVC цифров поток. Кодираното видео се декодира, за да бъде получен реконструиранят YUV материал. По аналогичен начин се създава и H.264/AVC цифровият поток, чрез опорният кодек (JM v.18.5). Отчита се PSNR за реконструираната последователност по отношение на оригиналната при различни скорости на цифровия поток. Разделителната способност на изследваното изображение е 832x480 пиксела.

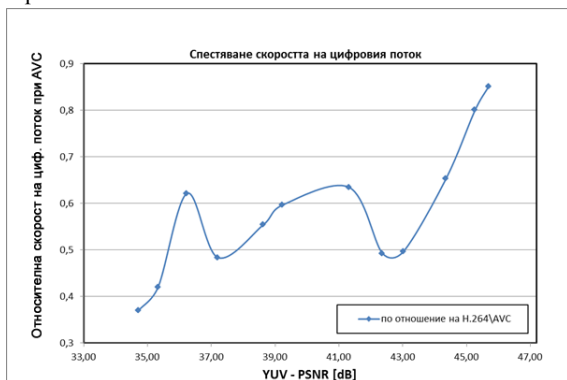


Фиг.1 Изследване влиянието на скоростта на цифровия поток върху PSNR при H.264/AVC и H.265/HEVC

На графиката на фиг.1 са показани отчетените стойности за PSNR при различна скорост на цифровия поток. Използван е квантуващ параметър равен на 22. При активиран контурен филтър за AVC и контурен, и SAO (Sample Adaptive Offset) за HEVC. От получените резултати се вижда, че PSNR показателят при отделните скорости е с по-големи стойности, т.е. качеството на изображението е по-добро.

Графиката на фиг.2 изобразява каква част от скоростта на цифровия поток H.264/AVC се достига при съответно ниво качеството на изображението при H.265/HEVC отчетено чрез PSNR. Резултатите от изследването показват, че на места по-новият стандарт

достига качеството на AVC при два пъти по-ниска битова скорост.



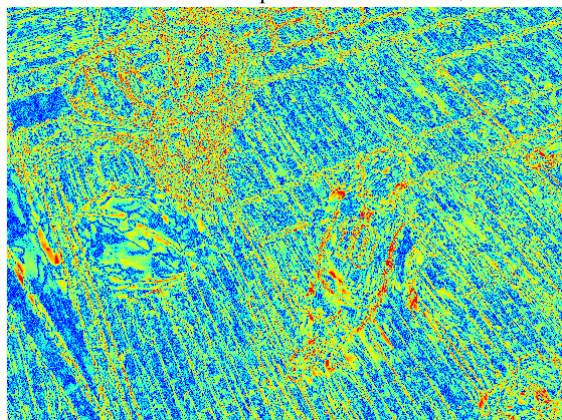
Фиг.2 Относителна стойност на скоростта на цифровия поток при запазване на PSNR

Компресиран е RGB видео записа BasketballDrill. Параметрите на кодиране, които са от съществено значение за процеса са нанесени в Таблица 1. При компресирането те се записват конфигурационен файл.

Табл.1 Параметри за кодирането

Параметри на тестова последователност: BasketballDrill 832x480, 50Hz						
Стандарт	H.265/HEVC			H.264/AVC		
Брой кодирани кадри	200			200		
Цветови формат	YUV 4:2:0			YUV 4:2:0		
Профил	Главен (main)			Главен (main)		
Метод на ентропно кодиране	CABAC			CABAC		
Параметър на квантуване (QP)	QP=22			QP=22		
Скорост на цифровия поток, [kbps]	3477.95			3556.64		
Контурен филтър	Да			Да		
SAO филтър	Да			-		
Осреднена стойност на PSNR	Y	U	V	Y	U	V
	40.45	43.04	43.6	38.36	37.48	41.06

При анализа на резултатите от изследванията е използвана и визуализация на стойностите на PSNR посредством цветови код. На фигурите по-долу високите стойности на PSNR отговарят на по-топлите цветове.



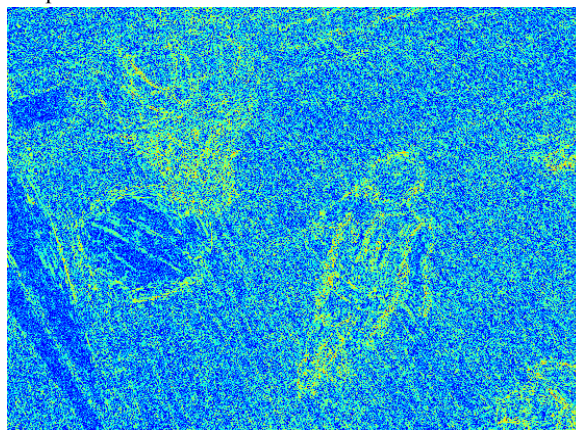
Фиг.3 Кадър с разликата между оригиналното и реконструирано H.264/AVC изображение

PSNR на текущия кадър: 36.25 dB

PSNR Y - 32.80 dB; U - 37.00 dB; V - 36.93 dB

След анализиране на двете изображения се установява, че качеството на HEVC, при същата битова скорост и квантуващ параметър е значително по-добро от това на AVC. Осреднената разлика в стойността на PSNR

е 7 dB. Това се дължи на по-доброто адаптиране на кодиращите дървовидни единици според характера на изображението.

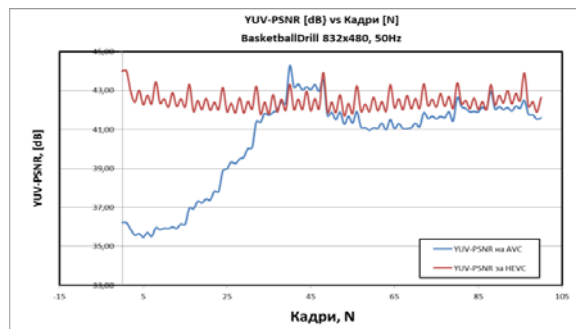


Фиг.4 Кадър с разликата между оригиналното и реконструирано H.265/HEVC изображение

PSNR на текущия кадър: 42.97 - dB

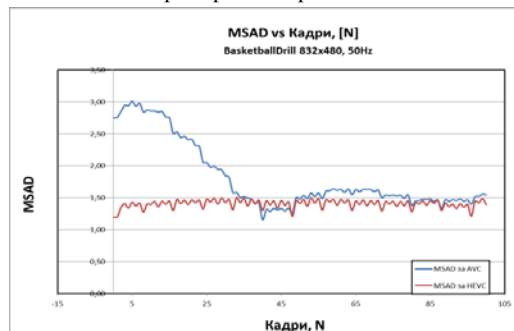
PSNR Y - 40.20 dB; U - 43.09 dB; V - 43.91 dB

Изследвано е и поведението на качествените параметри във времето т. е. в зависимост от номера на кадъра. Изследвани са: PSNR, MSAD, MSE и SSIM. От резултатите показани на фигурите по-долу в текста може да се заключи че, HEVC стандарта демонстрира забележително по-добра устойчивост и стабилност на качествените параметри във времето. Въпреки че, на места AVC кодека показва мигновени по добри резултати, повишената стабилност на HEVC във времето се оказва по-важна при практическото му приложение за видео компресия на разнообразни по съдържание видео сигнали.

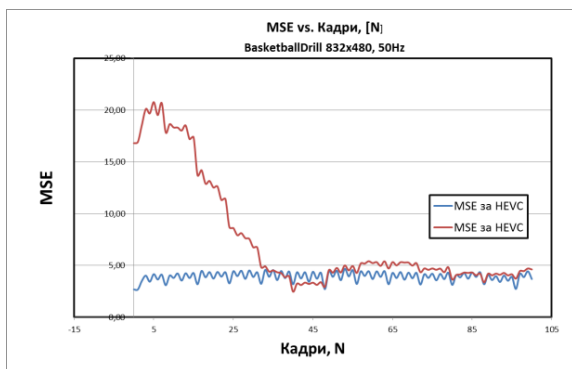


Фиг.5 Стойности на PSNR спрямо номера на кадъра

От графиката, отчитайки параметъра PSNR за поредните кадри N=0-100 се вижда, че през първите 45 кадра последователността кодирана чрез HEVC е със значително по-добро и равномерно качество.

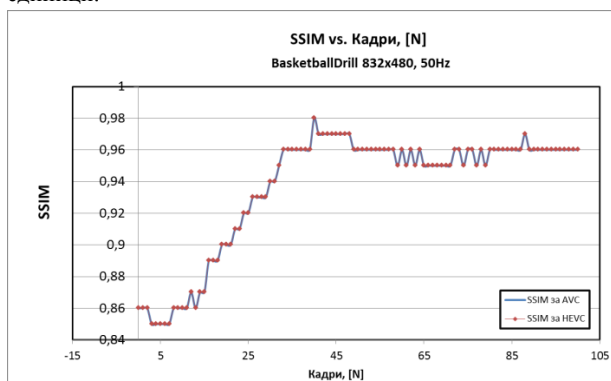


Фиг.6 Стойности на MSAD спрямо номера на кадъра



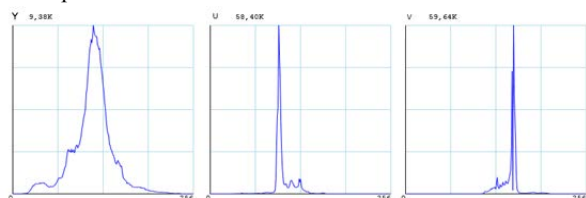
Фиг.7 Стойности на MSE спрямо номера на кадъра

Резултатите за средно квадратична грешка и средната абсолютна разлика са идентични, като изключим началната част от видео последователността. Причината се дължи на по-трудната адаптация на H.264/AVC стандарта към изображения с по-комплексни движения. При HEVC този проблем е решен чрез замяна на макро блоковете с CTU – кодиращи дървовидни единици.

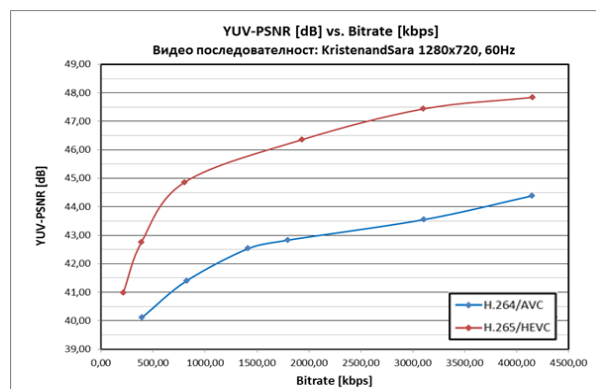


Фиг.8 Стойности на SSIM спрямо номера на кадъра

Отчетените средни стойности за яркостните индекси на структурно подобие при AVC и HEVC са съответно: 0,94 и 0,96. Сходството между двата резултата се дължи на това, че са отчетени приблизително еднакви стойности за PSNR. Хистограмите използвани при оценяване качествени характеристики на изображението чрез SSIM са показани на фиг.9. Те показват кои са най-често използваните нива за представяне на битовите в изследвания видео запис. В случая преобладават сивите тонове и средни по стойност цвето разликови сигнали.



Фиг.9 Хистограми на YUV компонентите на изображението



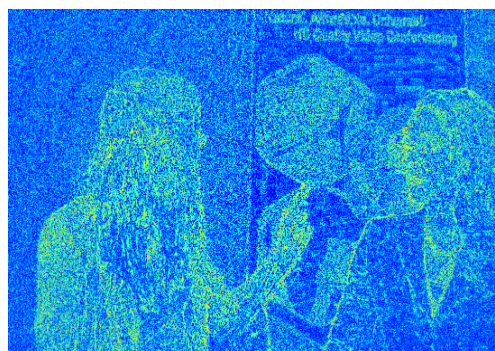
Фиг.10 Изследване влиянието на скоростта на цифровия поток върху PSNR при H.264/AVC и H.265/HEVC

Проведено е и изследване на видео запис с Full HD разделителна способност, което не съдържа комплексни движения (KristenandSara). Видео последователността е кодирана, прилагайки адаптивен квантуващ параметър, зададените граници на който варират от 22 до 32. Обект на наблюдение тук са PSNR спрямо битова скорост. Вижда се, че HEVC спестява повече от два пъти скоростта за определено качество на изображението.

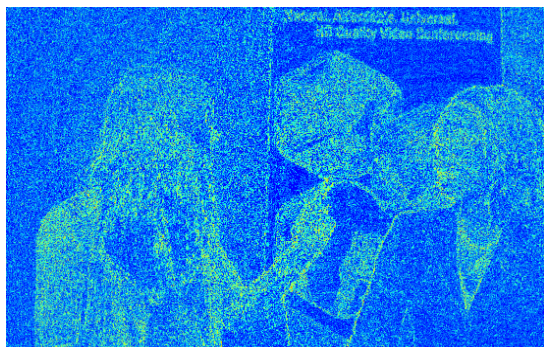
Получените крайни резултати са отчетени чрез кодерите TAppEncoder за H.264/AVC и Lencod за H.265/HEVC.

Табл.2 Отчетени резултати

	AVC			HEVC		
Битова скорост, [kbps]	12678			6850		
Време за кодиране, [сек.]	2011.72			1932.43		
PSNR, [dB]	Y	U	V	Y	U	V
	42.6	46.5	47.3	43.3	47.4	48.4



Фиг.11 Кадър с разликата между оригиналното и реконструирано H.265/HEVC изображение
PSNR на текущия кадър: 45.84 dB
PSNR Y - 42.03 dB; U - 46.32 dB; V - 47.07 dB



Фиг.12 Кадър с разликата между оригиналното и реконструирано H.264/AVC изображение

PSNR на текущият кадър: 46.8 dB

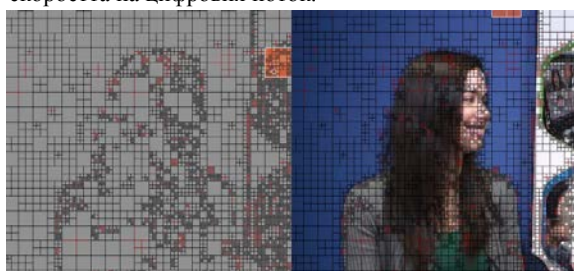
PSNR Y - 42.72 dB; U - 47.29 dB; V - 48.24 dB

При изключване на контурния и SAO филтъра, както и адаптивното разделяне на движенията се наблюдава, че качеството на изображението се влошава. Това се дължи на неизравнените чрез филтрация постоянни съставни на съседните кодиращи блокове. Резултатите са отчетени с помощта на HM кодера.

Табл.3 Отчетени резултати в зависимост от HEVC филтрацията

	HEVC+DBF,SAO,AMP			HEVC без филтрация		
Битова скорост [kbps]	2318,6			2320,89		
PSNR, [dB]	Y	U	V	Y	U	V
	43.3	47.5	48.4	42.5	47.1	47.2

Използвайки Elecard HEVC Analyzer е анализирана структурата на кодиращия H.265 поток. На фиг.13 се вижда, че където изображението е по-детайлно и има вероятност от загуба на данни, то се разделя на по-малки кодиращи блокове. Където няма вероятност от загуба на съществена информация алгоритмът взема решение да бъдат използвани по-големи блокове. Това се прави с цел намаляване скоростта на цифровия поток.



Фиг.13 Визуализация на размера на блоковете на изображението в зависимост от детайлността на картината.

3. Заключение

В публикацията бе направено изследване и сравнителен анализ на два съвременни метода за видео компресия - H.264/AVC и H.265/HEVC. На базата на проведените експерименти и получени резултати от изследванията могат да бъдат направени следните изводи.

Отчетените стойности показват, че HEVC достига качеството на AVC за два пъти по-малки скорости на цифровия поток.

Необходимото време за извършване на кодирането при по-новият стандарт е съкратено.

Използвайки новата структура за разделяне на изображението HEVC кодекът по-лесно е адаптира към неговият характер.

4. Литература

- [1] T. Wiegand, G.J. Sullivan, G. Bjontegaard, and A. Luthra, "Overview of the H.264/AVC video coding standard," *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol.13, no.7, pp.560-576, Jul. 2003.
- [2] H.264/AVC Software Coordination, JM Reference Software, Online:<http://iphome.hhi.de/suehring/tml>
- [3] Richardson, Iain E. The H.264 Advanced Video Compression Standard. UK : A John Wiley and Sons, Ltd., Publication, 2010.
- [4] Schwarz, H.; Marpe, D.; Wiegand, T., "Overview of the Scalable Video Coding Extension of the H.264/AVC Standard," in *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol.17, no.9, pp.1103-1120, Sept. 2007
- [5] ITU-T, Recommendation H.265 (04/13), Series H: Audiovisual and Multimedia Systems, Infrastructure of audiovisual services – Coding of Moving Video, High Efficiency Video Coding, Online:<http://www.itu.int/rec/T-REC-H.265-201304-I>.
- [6] Sullivan, G.J.; Ohm, J.; Woo-Jin Han; Wiegand, T., "Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard," in *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol.22, no.12, pp.1649-1668, Dec. 2012
- [7] Richardson, Iain E., "HEVC: An introduction to High Efficiency Video Coding". s.l. : Vcodex, 2013.
- [8] Grois, D., Marpe, D., et al., "Performance comparison of H.265/MPEG-HEVC, VP9, and H.264/MPEG-AVC encoders," in *Picture Coding Symposium (PCS), 2013*, vol., no., pp.394-397, 8-11 Dec. 2013
- [9] M. Horowitz, F. Kossentini, et al., "Informal subjective quality comparison of video compression performance of the HEVC and H.264/MPEG-4 AVC standards for low-delay applications," *Proc. SPIE 8499, Applications of Digital Image Processing XXXV*, 84990W, Oct. 15, 2012.
- [10] Koumaras, H., Kourtis, M., et al., "Benchmarking the encoding efficiency of H.265/HEVC and H.264/AVC," in *Future Network & Mobile Summit (FutureNetw), 2012*, vol., no., pp.1-7, 4-6 July 2012.

	АКУСТИКА Национална конференция "Акустика 2015"	Варна 09 - 10.10.2015 г София 27 - 28.11.2015 г
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

УЛТРАЗВУКОВО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АХАТИ

Доц. д-р Александър Попов

Институт по механика - БАН – София, България
Направление «Механика на деформируемое твёрдое тело»

ВЪВЕДЕНИЕ

Разгледани са концентрично ивичести ахати - бразилски тип. Състав Si_2O и други минерали. Възраст ~ 62 млн.години [1].

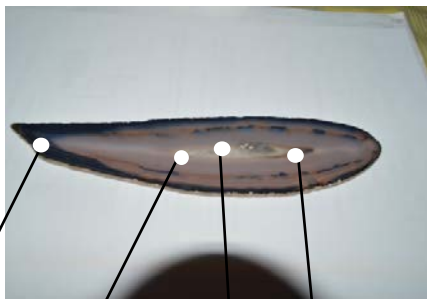
Измерени са скоростите на разпространение надлъжни и напречни на ултразвуковите вълни съответно V_L и V_T в различни области от напречното сечение на ахатовата минерализация. Изчислени са $(\lambda; \mu)$ - константи на Ламе за всяка от областите [Сокольников].

Получените резултати представляват интерес за минерологията, тъй като там за физически свойства на ахати се дават само плътност и твърдост по Мост (получена чрез надраскване) на ахата.

УЛТРАЗВУКОВО ИЗМЕРВАНЕ

Измерени са скоростите V_L и V_T в точки т.1, т.2, т.3, т.4., фиг.1., съгласно ASTM E 494:2010. От гледна точка на геологията се разглежда времеви интервал ($t_0 > t_1 > \dots > t_N$), където т.1 и т.4 съответстват на области на най-ранна кристализация - $t_1 \sim t_4$, т.2 – област на следващ период на кристализация t_2 , т.4 – област на най-късна кристализация - t_3 .

Таблица 1



Фиг.1

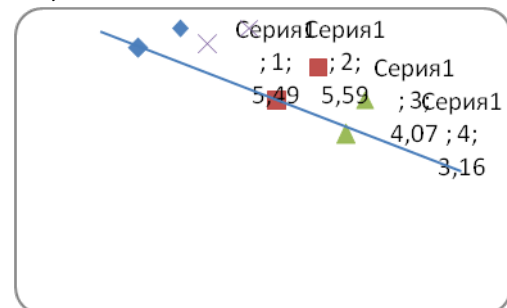
T.1	T.2	T.3	T.4
$V_L, \text{mm} / \mu\text{s}$			
5.49	4.07	3.16	5.59
$V_T, \text{mm} / \mu\text{s}$			
3.25	2.41	1.87	3.31

Ако с t са означени условни времеви интервали от геологични периоди, то $t_4 \approx t_1 < t_2 < t_3$ (т.4, т.3, т.2, т.1 от фиг.1.). Зависимостта $V_L(t)$ е

$$(1) \quad V_L, \text{mm} / \mu\text{s} = m \cdot t + b$$

където $m = -0.851$; $b = 6.705$; $R \sim 0.99$.

$V_L, \text{mm} / \mu\text{s}$



Фиг.2.

t

ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА

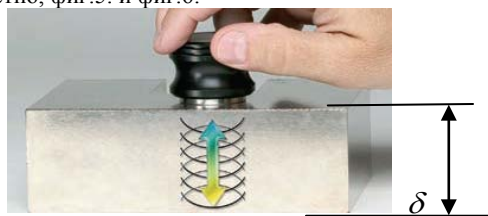
Използват се следните технически средства, фиг.3. до фиг.7.:

- Ултразвуково устройство US-Key, LECOEUR Electronique, Франция. Точността на измерване на времето на разпространение на ултразвуковите вълни е $0.001 \mu\text{s}$.

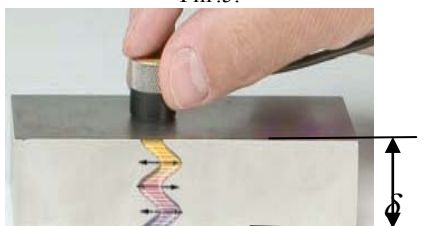


Фиг.3., Фиг.4.

- Нормални осезатели с X – срез и Y – срез на пиезопластината за измерване на V_L и V_T съответно, фиг.5. и фиг.6.



Фиг.5.



Фиг.6.

Цифров микрометър Digimatic Micrometer, ф.МІТUТОУО, Япония Обхват:0 - 30mm; Отчет: 0.0001 mm; Точност: $\Delta S \pm 0.5 \mu m$.



Фиг.7.

Измерените скорости се оценяват по

$$(2) \quad V_L = \frac{2 \cdot \delta, mm}{(t_L), \mu s}; \quad V_T = \frac{2 \cdot \delta, mm}{(t_T), \mu s}$$

където $(t_L; t_T), \mu s$ и $(V_L; V_T)$ са съответно стойностите на времената и скоростите на разпространение за надлъжни и напречни ултразвукови вълни, δ - дебелина на изпитвания образец.

Относителната грешка при измерване на скоростите е

$$(3) \quad \frac{\Delta V_{L,T}}{V_{L,T}} e = 2 \cdot \left(\frac{\Delta \delta}{\delta} + \frac{\Delta t_{L,T}}{t_{L,T}} \right)$$

където $\Delta V_{L,T}; \Delta \delta; \Delta t_{L,T}$ са абсолютните грешки при измерването съответно на скорости, дебелини и времена.

Толерантния интервал за измерените стойности за $(V_L; V_T) e$

$$(4) \quad \overline{V_{L,T}} \pm \left(1 + \frac{1}{n} \right) T(n; \alpha) S_{V_{L,T}}$$

където $\overline{V_{L,T}}$ и $S_{V_{L,T}}$ са съответно средните стойности и стандартното отклонение при

измерване на скоростите, n обем на извадката, $T(n; \alpha)$ - разпределение на Стьюдент при вероятност $Pr = 1 - \alpha$.

КОЕФИЦИЕНТИ НА ЛАМЕ И МОДУЛИ НА ЕЛАСТИЧНОСТ

За плътността на ахатите е известно, че $\rho, kg/cm^3 \in (2.60 - 2.64)$.

В механика на еластичнине среди се въвеждат физически модули на еластичност $(\lambda; \mu)$ - константи на Ламе [2]

$$(5) \quad \lambda + 2 \cdot \mu = \rho \cdot V_L^2, \quad \mu = \rho \cdot V_T^2.$$

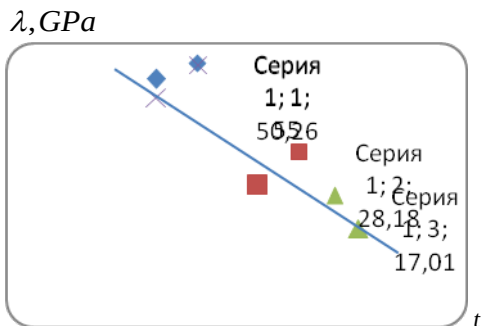
По измерените V_L и V_T (Таблица 1) се определят константите на Ламе $(\lambda; \mu)$.

Таблица 2.

T.1	T.2	T.3	T.4
$\lambda, GPa = \rho \cdot (V_L^2 - 2 \cdot V_T^2)$			
51.29	28.18	17.00	50.26
$\mu, GPa = \rho \cdot V_T^2$			
27.67	15.22	7.69	28.71

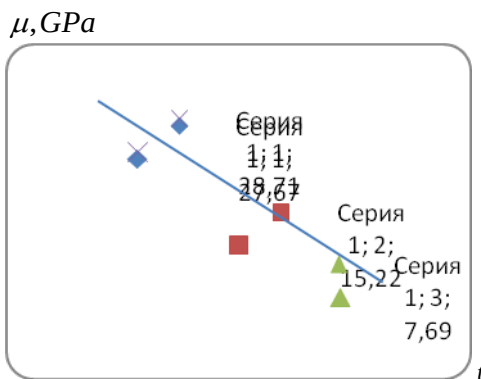
Зависимостите (λ, μ, GPa) - t са дадени на фиг.8. и фиг.9.

$$(6) \quad (\lambda, \mu, GPa) = m \cdot t + b$$



Фиг.8.

$$m = - .17.402 ; b = 67.138; R \sim 0.986.$$

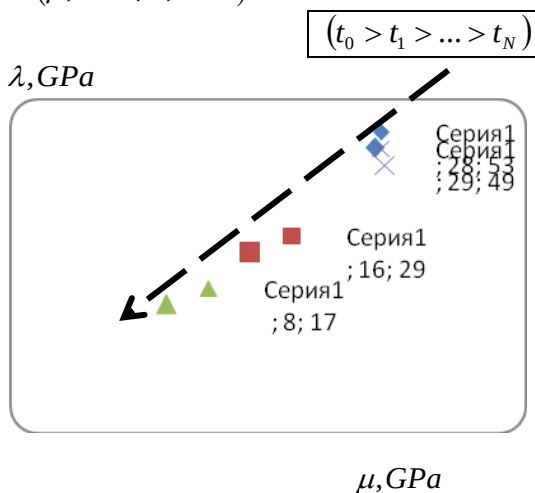


Фиг.9.

$$m = - 10.497 ; b = 38.193; R \sim 0.990.$$

Разпознаване на етапа на минерализация по веригата $(t_0 > t_1 > \dots > t_N)$ в пространството

$$R^{(2)} = (\mu, GPa; \lambda, GPa).$$



Фиг.10.

В техническите приложения по-често се използват модулите на еластичност (E, ν, G, K) .

Връзките им с $(\lambda; \mu)$ - физически модули на

еластичност (константи на Ламе) са [2]

$$(7) \quad E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}; G = \frac{\lambda(1 - 2\nu)}{2\nu};$$

$$(8) \quad K = \lambda + \frac{2}{3}\mu; \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

Тези зависимости дават възможност да се оценят техническите модули на еластичност - (E, ν, G, K) чрез измерване на скоростите на разпространение на ултразвуковите вълни V_L и V_T , съгласно ASTM E 494:2010.

ТЕРМОДИНАМИЧЕН МОДЕЛ НА АХАТОВА ГЕОДА

Геодите са скални геоложки образувания, срещащи се най-често в кухините на магмени и седиментни скали, фиг.11.

Сечение на геодата



Геода

Фиг.11

Геодите излизат на повърхността, когато тези скали биват разрушени от изветрянето и ерозията. При образуването на магмените и седиментните скали в тях често остават кухини от газови мехури. Впоследствие на това място проникват богати разтвори на вода, съдържаща минерали. По стените на кухината се отлагат концентрични слоеве от миниатюрни минерални кристали. Този процес трае милиони години. Всеки слой може да бъде с различен цвят. Формата на скалните мехури може да бъде най-разнообразна, но най-често срещани са сферичните и елипсовидните области, фиг.1.

Ахатовата минерализация се разглежда като се използват термодинамичен процес при който име:

1/ Закон на Хук

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \vartheta \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{ij} - \alpha \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot \mu) (T^0 C) \cdot \delta_{ij}$$

където $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ - напрежение и деформация, $\vartheta = \varepsilon_{jj}$,
 $\alpha, (T^0 C)$ - температурен коефициент и температура, δ_{ij} -
символ на Кронекер.

$$2/ \text{ Вътрешна енергия е } \overline{W_{INT}} = \int_{\varepsilon_{ij}=0}^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d(\varepsilon_{ij}) \text{ Следователно}$$

$$\overline{W_{INT}} \sim 2 \cdot \mu + \varphi(\lambda, \mu)(p) + \psi(\lambda, \mu)(T^0 C)$$

където $\psi(\lambda; \mu) = \{-\alpha \cdot (3 \cdot \lambda + 2 \cdot \mu)\}$,

$$\varphi(\lambda; \mu) = \left\{ \lambda \left(\lambda + \frac{2}{3} \mu \right)^{-1} \right\}, p - \text{налягане}$$

3/ Условия на протичане на термодинамичния процес:

$$p, GPa = 10^5, T^0 C \approx 270.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За времеви интервал $t_0 > t_1 > \dots > t_N$, имаме

$$(\lambda_0; \mu_0) \geq (\lambda_1; \mu_1) \geq \dots \geq (\lambda_N; \mu_N).$$

Следователно

$$(9) \quad \overline{W_{INT}}(0) > \overline{W_{INT}}(1) > \dots > \overline{W_{INT}}(N).$$

Това е I-ви принцип на термодинамиката.

Вътрешната енергия $\overline{W_{INT}}$ намалява за времевата верига

$t_0 > t_1 > \dots > t_N$ - от начален момент t_0 до момент t_N
наблюдаван днес т.е. до стабилизиране на процеса на ахатна
минерализация.

Измерването на $V_L, mm / \mu s$, съответно на
 $(\lambda, GPa; \mu, GPa)$, в различните области на ахата дава
възможност да се датират областите една спрямо друга, с
коефициент на корелация 99.99%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харизанов Х., Ахатовите минерализации, БУЛГЕД, София, 2012.
2. Сокольников И.В., Математическа теория на еластичността, Наука и изкуство, София, 1972.

МЕТОДИ ЗА ПРЕСМЯТАНЕ НА УМОРНА ДЪЛГОТРАЙНОСТ ЗА МОРСКИ КОНСТРУКЦИИ

CALCULATION METHODS FOR FATIGUE LIFE OF MARINE STRUCTURES

Методи расчета усталостной долговечности морских конструкций

доц. д-р Виктор Чириков¹, гл.ас. д-р Диян М. Димитров¹, ас. д-р Йордан Бояджиев¹
¹-кат. Техническа механика, Технически Университет – Варна, България

Abstract: In present the paper methods for calculation of fatigue life of marine offshore structures are discussed. First, the method for calculation of the dynamic load on the structure using the energy wave spectrum is presented. Second, the most popular methods for fatigue life calculation in time and frequency domains are explained. Since, in frequency domain (spectral) methods the realisation of loading signal in time domain is not necessary, the spectral methods are more suitable for application. On a simple numerical example, the differences between narrow band solution (NB) with a Wirsching-Light (WL) correction and Dirlik empirical formula are shown. It is clear that, especially for a wide band (WB) loading spectra, WL solution is more conservative in compare with Dirlik formula.

KEY WORDS: offshore structures, fatigue life, wave spectra, spectral fatigue,

1. Въведение

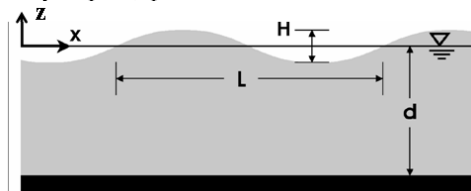
Морските конструкции, в процеса на експлоатация, са подложени на действието на променливи натоварвания, породени от теченията и морските вълни. В резултат на което в отделни точки на конструкцията могат да се зародят уморни пукнатини, които се разрастват и в крайна сметка водят до разрушение.

В настоящия доклад вниманието е съсредоточено върху методиките за пресмятане на уморната дълготрайност на закрепени морски конструкции в дълбоки води.

2. Изложение

2.1. Моделиране на натоварването на морски конструкции

Повърхностните морски вълни се образуват от вятъра над тях, който чрез кохезионни и адхезионни сили увлича водните частици и ги ускорява, фиг.1.



L - дължина на вълната [m], H - височина на вълната,
 $H = 2z$ [m]; T - период на вълната [s] d - дълбочина [m].

Фиг.1. Онагледяване параметрите на вълната

Закрепените морски конструкции се състоят от най-често от елементи с тръбно сечение (масивни колони или фермени конструкции). За да се определи силата с която вълната действа на елементите конструкцията се използва уравнението на Morison (1).

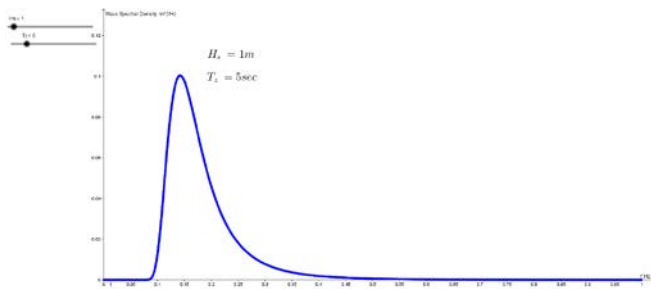
$$(1) \quad dF_x = c_m \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \cdot dz \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + c_d \cdot \frac{\rho}{2} \cdot D_s \cdot dz \cdot |u| \cdot u$$

,където dF_x - хоризонталната сила, действаща върху

елемент с размери dz и D_s в следствие на вълната [N],
 c_m - коефициент, отчитащ инерционността, ($c_m = 1 + c_a$ [-]),
 c_a - коефициент, отчитащ хидродинамичната маса [-],
 c_m - е в граници 0,95 – 2,0
 $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ - средна плътност на морската вода,
 c_d - коефициент, отчитащ вискозността [-], коефициентът c_d е в граници 0,8 – 1,4
 D_s - диаметър на цилиндричния елемент [m],
 dz - размер на хоризонталната шайба [m],
 t - време [s],
 u - хоризонтална скорост на вълната [m/s],
 z - координата, перпендикулярна на морското ниво [m].

Вълнението на морето е случаен (стохастичен) процес. В рамките на кратки интервали вълнението може да се моделира като стационарен, ергодичен случаен процес от Гаусов тип, който може да се опише чрез построяване на функцията на спектралната плътност на мощността показваща разпределението на енергията на процеса по хармоници. Такъв енергетичен спектър за открито море, описващ състоянието на морето в резултат на продължително действие на вятър с определена скорост е синтезиран през 1964г. в резултат на систематични измервания от Pierson и Moskowitz[1]. Спектърът обикновено се задава чрез параметрите – височина на значима вълна „ H_s “ и период T на вълната. Значимата вълна се дефинира като средна стойност на горната 1/3 от най-високите вълни за наблюдавания времеви период. На фиг.2 е показан енергетичният Pierson-Moskowitz спектър при значима вълна 1m и среден период да пресичане на нулевото ниво $T_z=5s$ съгласно (2).

$$(2) \quad S_{nn}(f) = \frac{H_s^2 \cdot T_z}{8\pi^2} \cdot (f \cdot T_z)^{-5} \cdot e^{-\frac{1}{\pi} (f \cdot T_z)^4}$$



Фиг. 2. Енергетичен спектър на Pierson-Moskowitz ($S_m(f)$) за открито море

През 1973г. след анализиране на данните от проекта JONSWAP в Северно море е предложена корекция на спектъра на Pierson-Moskowitz важаща за Северно море. На база на спектралната теория, вълнението за дълъг период, напр. 1 година, може да се отчете като се построи хистограма на средния брой появявания на дадено енергетично състояние (H_s , T_z).

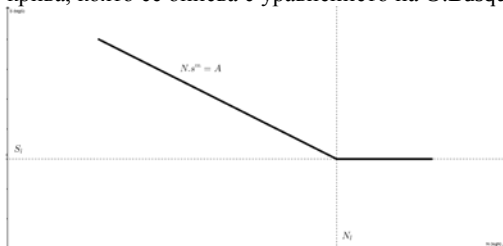
Познавайки вълновия спектър могат да се пресметнат предавателните функции и да се получат спектъра на натоварването $S_{FF}(f)$ (3а) и спектъра на напрежението $S_{\sigma\sigma}(f)$ (3б) в критичните за конструкцията точки.

$$(3) \quad \begin{aligned} \text{а)} \quad S_{FF}(f) &= |H_{nF}(f)|^2 \cdot S_{nn} \\ \text{б)} \quad S_{\sigma\sigma}(f) &= |H_{F\sigma}(f)|^2 \cdot S_{FF} \end{aligned}$$

, където $H_{nF}(f)$, $H_{F\sigma}(f)$ - предавателни функции.

2.2. Умора на материала. Построяване на S-N криви.

Изследванията на умора за различни материали и съединения се извършват като специално подготвен образец се поставя в условия на циклично променящо се натоварване (ротационно огъване, циклично огъване, опън-натиск, усукване и др.) и се отчитат циклите до разрушаване. Основните параметри на цикъла на натоварване са: S_a - амплитудна стойност на напрежението; S_m - статично (средно) напрежение. Изпитванията се провеждат като се варира S_a при постоянно статично напрежение (S_m). По получените данни се построява т. нар S-N крива, която се описва с уравнението на O.Basquin (4).



Фиг.3. S-N крива в двойнологаритмичен мащаб (S_1 - граница на умора)

$$(4) \quad N \cdot S^m = A$$

, където m , A - константи зависещи от материала; S_m - максимално напрежение на цикъла (при $S_m = 0 \rightarrow S = S_a$), N - брой цикли,

Типичната S-N крива се представя като права линия с наклон равен на " m " в логаритмични координати $\log S - \log N$, фиг.3. Амплитудата „ S_1 “ се нарича граница на умора при базов брой цикли N_1 (най-често 2.10^6). Обикновено експериментите се провеждат при симетричен цикъл на натоварване ($S_m = 0$), а кривите при несиметричен цикъл на натоварване се получават по емпирични зависимости, като например формулата на Gerber (5).

$$(5) \quad s_a(s_m) = s_a(0) \left(1 - \frac{s_m}{s_b} \right)^2$$

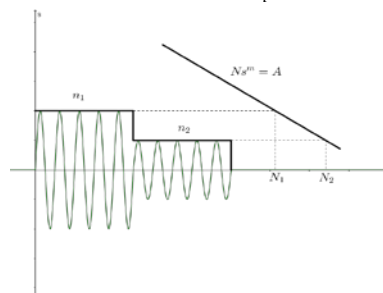
, където $s_a(0)$ - амплитудно напрежение на симетричен

цикъл; S_b - якост на опън на материала.

2.3. Повреждане. Линеинно правило за сумиране на повреждания.

Уморната повреда се дефинира като относително повреждане при n цикъла ($D = n/N$). Ако натоварването не е с постоянна амплитуда уморното повреждане се сумира по линейното правило на Palmgren-Miner (6). Приема се, че когато D достигне 1 (100%), конструкцията ще загуби работоспособност.

$$(6) \quad D = \sum \frac{n_i}{N_i}$$



Фиг.4. Определяне на уморна повреда (правило на Палмгрен-Майнър)

2.4. Методики за пресмятане на уморно повреждане при детерминирано нециклично натоварване

Ако се разполага със записани реални данни за изменението на напрежението в определена критична точка от конструкцията следва те да се приведът към еквивалентен брой цикли със съответните амплитуди и средни стойности. Най-разпространения метод за броене на цикли е методът на „дъждовния поток“ (rainflow counting), предложен от Японските изследователи Matsuishi and Endo (1968) [2]. Този метод е залегнал и в повечето стандарти за уморна дълготрайност и обикновено се ползва като база за сравнение. Принципно различен метод наречен „Интегриране на диференциалите на умора“ (ИДУ) е предложен и развит от доц. дн Стефан Христов Стефанов [3]. Методът е признат от редица световни авторитети по умора на материалите. При този метод не се изисква броене на цикли и е приложим при всякакво натоварване. Въвежда се следното основно уравнение (7):

$$(7) \quad dD(s) = R(s)ds,$$

където $dD(s)$ е диференциал на повреждането при умора, а $R(s)$ е интензивност на повреждането. ds - елементарна промяна на напрежението.

Натрупаната повреда $D_{\Sigma, T}$ за представителния интервал от време T се определя от (8).

$$(8) \quad D_{\Sigma, T} = \int dD$$

Чрез директно интегриране на диференциалите на повреда се следва непосредствено самата траектория на съвместното изменение на компонентите на напрегнатото състояние. Чрез $D_{\Sigma, T}$ се изчислява дълготрайността N (9), която представлява броя повторения на представителния интервал T .

$$(9) \quad N = \frac{1}{D_{\Sigma, T}}$$

2.5. Спектрални методики за пресмятане на уморно повреждане.

Описаните по-горе методики изискват да се разполага с реализация на случайното натоварване във времевата област. Спектралните методи се основават на теорията на случайните процеси и използват само спектъра на натоварването и неговите моменти. Изведената от Rice [4] функция на разпределението на пиковите в стационарен случаен процес в зависимост от

спектралните моменти (10) и ширината на честотната лента (12) на процеса дава възможност за развитие на тези методи.

$$(10) \quad m_i = \int_0^{\infty} f^i \cdot G(f) df,$$

където m_i - i -ти спектрален момент на спектъра $G(f)$.

Нулевият спектрален момент m_0 представлява площта под спектъра и задава дисперсията на процеса, съответно средно квадратичното отклонение е $\sigma_X = \sqrt{m_0}$. Очакваният период на поява на пик „ T_p “ и очакваният период на пресичане на нулевото ниво „ T_z “ се дефинират както следва:

$$(11) \quad T_p = \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}, \quad T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

, където m_2, m_4 - 2ри и 4ти спектрален момент на спектъра $G(f)$

Ширината на честотната лента на спектъра γ се дефинира чрез периодите или спектралните моменти (12).

$$(12) \quad \gamma = \frac{T_p}{T_z} = \sqrt{\frac{m_2^2}{m_0 m_4}}$$

Ако $\gamma \rightarrow 1$ то процеса се дефинира като тясноспектърен (NB), а ако $\gamma \rightarrow 0$ той е широкоспектърен (WB).

Очакваната повреда D за представителен времеви период T се пресмята по (13).

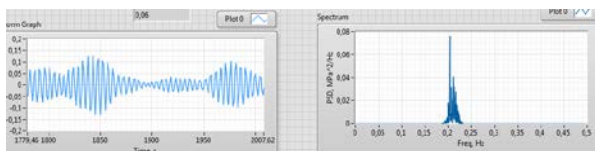
$$(13) \quad D = \frac{T_p}{A} \int_0^{\infty} s^m \cdot p(s) ds,$$

където $p(s)$ - плътност на разпределението на размаха на напрежението.

Трябва да се обърне внимание, че стойностите „ s “ в (13) представляват не амплитудните стойности, а размаха на съответния цикъл. Това следва директно от спектъра на натоварването (36), тъй като в енергетичният спектър от който той се получава, (фиг.2) се задава височина на вълната „ H “ от пик до пик, фиг.1. Съответно проектите криви на умора дадени в указанията за проектиране на морски конструкции [5] са построени, така че „ s “ в уравнението на O.Basquin (4) е размаха на съответния цикъл, а не амплитудната му стойност.

2.5.1 Пресмятане на уморното повреждане при тясноспектърен процес

Ако спектъра на натоварването е с тясна честотна лента, фиг.5, то пиковите амплитуди са подчиняват на разпределението на Rayleigh (14). Тъй като на всеки пик отговаря съответната падина може да се приеме, че всеки пик формира цикъл на натоварване с размах равен на 2 пъти пиковата стойност. Тогава очакваната повреда D_{NB} за определен времеви интервал T се пресмята съгласно (15), Bendat (1964)[6].



Фиг.5 Реализация на тясно спектърен сигнал

$$(14) \quad p(s) = \frac{s}{4\sigma_X^2} e^{-\frac{s^2}{8\sigma_X^2}},$$

където $p(s)$ - функция на плътността на разпределението на натоварването

$$(15) \quad D_{NB} = \frac{T_p}{A} \cdot (2\sqrt{2m_0})^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right),$$

където $\Gamma(\cdot)$ е гама функция.

2.5.2 Пресмятане на уморното повреждане при широкоспектърен процес

Получената оценка на повреждането при тясноспектърен процес обикновено се оказва консервативна с увеличаване на ширината на честотната лента на спектъра, тъй като не на всеки пик отговаря съответната падина. В тази връзка са разработени различни методи за оценка на повреждането при широкоспектърен сигнал. Подробно описание на различните методи може да се намери например в [7]. Основният метод използван в указанията за проектиране на морски конструкции в предложен от Wirsching and Light (1980) [8]. Те предлагат емпирична зависимост (16) за пресмятане на корекционен коефициент на полученото решение при теснолентов спектър.

$$(16) \quad \lambda = a(m) + [1 - a(m)](1 - \varepsilon)^{b(m)}$$

, където λ - корекционен коефициент;

$$a(m) = 0.926 - 0.033m; \quad b(m) = 1.587m - 2.323; \quad \varepsilon = \sqrt{1 - \gamma^2}$$

$$(17) \quad D_{WL} = D_{NB} \cdot \lambda$$

Според [9] по-добри резултати дава решението на Dirlik(1985) [10] изведено на база симулационни анализи на различни по вид спектри на натоварване. Съгласно това решение плътността на разпределението на размаха на напреженията се пресмята съгласно (18). Емпиричното решение на Dirlik е верифицирано в дисертацията на Bishop (1988) [11], който извежда теоретични зависимости за пресмятане на плътността на разпределението на размаха на напреженията на циклите на натоварване чрез спектралните моменти като за сравнение използва методът на „дъждовния поток“. Неговото решение е доста сложно и показва малко подобрене в сравнение с решението на Dirlik.

$$(18) \quad p(s) = \frac{\frac{D_1}{Q} \cdot e^{-\frac{Z}{Q}} + \frac{D_2}{R^2} \cdot e^{-\frac{Z^2}{R^2}} + D_3 \cdot Z \cdot e^{-\frac{Z^2}{2}}}{2 \cdot \sqrt{m_0}}$$

, където D_1, D_2, D_3, Q, R, Z - функции на спектралните моменти и параметъра γ както следва:

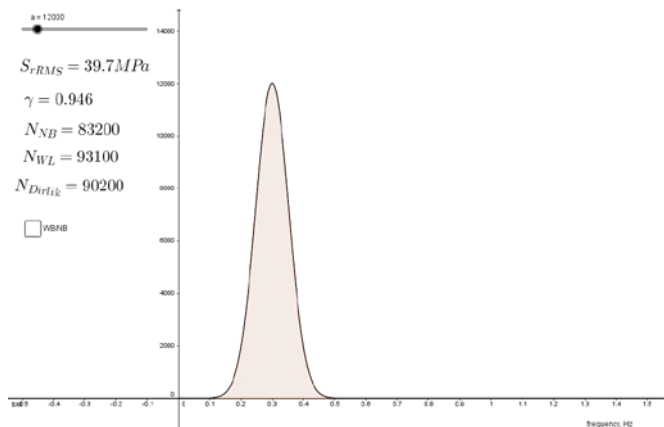
$$D_1 = \frac{2 \cdot (x_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2}, \quad D_2 = \frac{1 - \gamma - D_1 = D_1^2}{1 - R}, \quad D_3 = 1 - D_1 - D_2,$$

$$Z = \frac{S}{2\sqrt{m_0}}, \quad Q = \frac{1.25 \cdot (\gamma - D_3 - D_2 \cdot R)}{D_1}, \quad R = \frac{\gamma - x_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 + D_1^2},$$

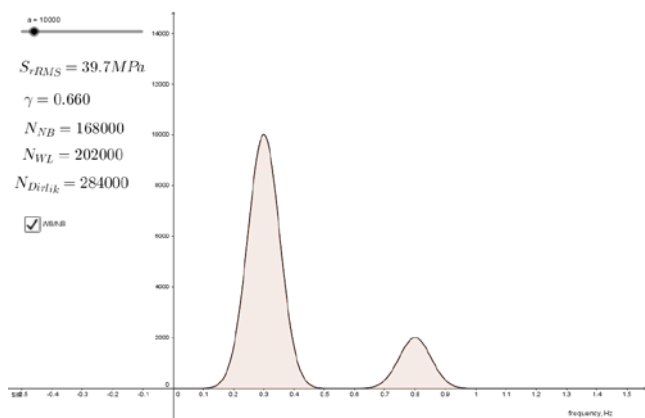
$$x_m = \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}, \quad \gamma - \text{виж (12)}$$

2.5. Числен пример за пресмятане на дълготрайност

Ще приемем, че в резултат на възникване на i -то енергетично състояние на морето в определен период T сме пресметнали спектъра на напреженията в критичната за конструкцията точка. Ще зададем два примерни спектъра на напреженията с еднаква средно квадратична стойност (39,7MPa), съответно едномодален т.е с тясна честотна лента, фиг.6, и двумодален т.е с широка честотна лента, фиг.7.

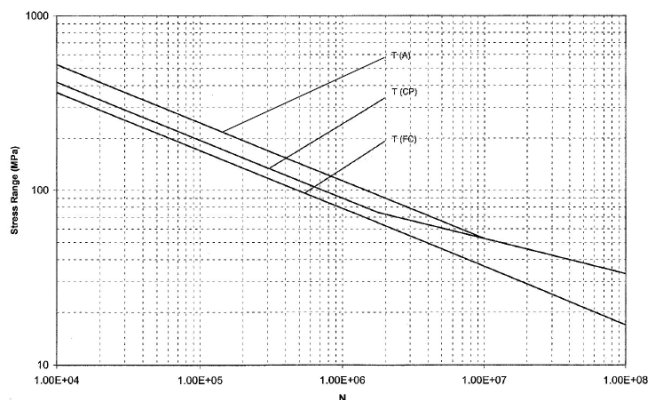


Фиг.6 Спектър на напреженията с тясна честотна лента NB ($\gamma=0.946$, $\sigma_x=39.7\text{MPa}$)

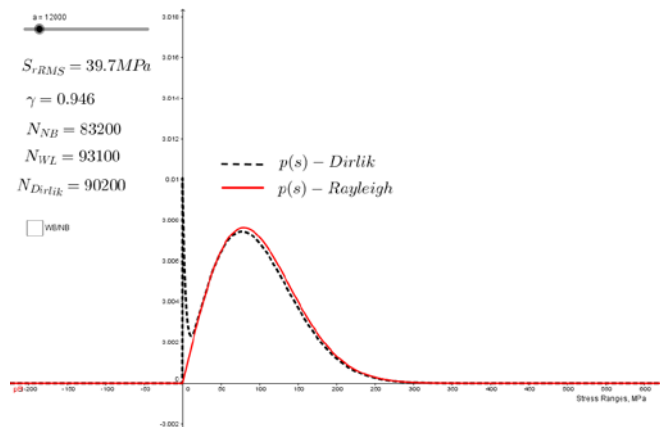


Фиг.7 Спектър на напреженията с широка честотна лента WB ($\gamma=0.660$, $\sigma_x=39.7\text{MPa}$)

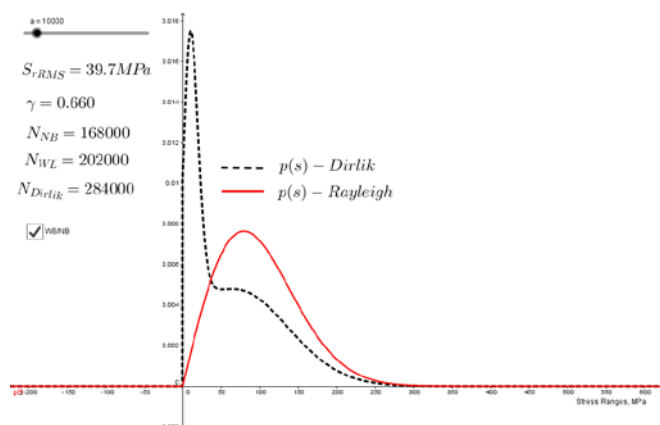
Използваме проектна крива на умора за заварени тръбни съединения в морска вода без катодна защита от корозия, със следните параметри $A=4,87 \cdot 10^{11}$ и $m=3$, фиг.8. Пресметнатите по (14) и (18) плътности на разпределението на размаха на напреженията съответно по разпределението на Rayleigh и Dirlik са дадени на фиг. 9 и 10. Вижда се, че при NB спектъра разпределенията практически съвпадат, докато при WB спектъра има значителна разлика. Резултатите за дълготрайността пресметната като брой повторения $N=1/D$, на времеви интервал T , показани в табл.1, потвърждават консервативността на решението на Bendat за NB спектър.



Фиг.8 Проектни криви на умора за тръбни съединения [5] T(A) – на въздух; T(CP) – в морска вода с катодна защита; T(FC) – в морска вода без катодна защита (свободна корозия).



Фиг.9 Плътност на разпределението на размаха на напрежението при NB спектър



Фиг.10 Плътност на разпределението на размаха на напрежението при WB спектър

3.Изводи и заключение

В настоящия доклад е описана последователността на определяне на вълновото натоварване на морски конструкции чрез използване на енергетични спектри. Описани са основните методики за пресмятане на уморната дълготрайност при детерминирано нерегулярно натоварване (метод на "дъждовния поток" и интегриране на диференциалите на умора ИДУ). По-подробно са разгледани спектралните методи за пресмятане на уморна дълготрайност, при спектър на натоварване с тясна и широка лента, тъй като те не изискват генериране на случаен сигнал във времевата област. Чрез численият пример е показана консервативността на основната използвана методика - решението на Bendat при NB спектър.

Табл.1 Дълготрайност $N=1/D$ (където D е пресметната съгласно (13)) спектър на натоварване с параметър γ , пресметната по методиките: - на Behdat(NB); -с отчитане на корекцията на Wirsching and Light (WL); -на Dirlik.

Спектър (γ)	N (NB)	N (WL)	N (Dirlik)
0.946	83 200	93 100	90 200
0.660	168 000	202 000	284 000

Благодарности

Докладът е финансиран от ТУ-Варна в рамките на присъщата му научна дейност по проект НП117/2015

Литература

1. Moskowitz, L. and W.J. Pierson, 1964. A Proposed Stress Spectrum Form for a Fully Developed Wind Sea Joints. Based on the Similarity Theory of S.A. Kitaigorodskii.

- Journal of Geophysical Research, 69: 24.
2. Matsuishi, M. and Endo, T., Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress, Proceedings of the Kyushu Branch of Japan Society of Mechanics Engineering, Fukuoka, Japan, 1968, pp. 37-40.
 3. Стефанов С. Интегриране на диференциалите на умората (ИДУ) за оценка на дълготрайността при всякакво променливо натоварване. Дисертация за „доктор на науките”, ЛТУ-София, 2011 г.
 4. S. O. Rice. Mathematical analysis of random noise. Bell Syst. Tech. J., 23(3), 1944.
 5. ABS, GUIDE FOR THE FATIGUE ASSESSMENT OF OFFSHORE STRUCTURES , 2003
 6. J. Bendat. Probability functions for random responses. In NASA report. 1964.
 7. Matjaz Msrnik, Janko Slavic and Miha Boltezar, Frequency-domain methods for a vibration-fatigue-life estimation - Application to real data. International Journal of Fatigue, Vol. 47, p. 8-17, 2013. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.07.005
 8. P.H.Wirsching and M.C.Light, Fatigue under wide band random loading, J Struct. Div., ASCE, 1593-1607, (1980).
 9. Andrew Halfpenny, A frequency domain approach for fatigue life estimation from Finite Element Analysis, Presented at International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 99) Dublin, 1999
 10. T.Dirlik, Application of computers in Fatigue Analysis, University of Warwick Thesis, (1985).
 11. N.W.M.Bishop, The use of frequency domain parameters to predict structural fatigue, PhD thesis, Warwick University, (1988).

	АКУСТИКА Национална конференция "Акустика 2015"	Варна 09 - 10.10.2015 г. София 27-28.11.2015 г.
Година XVII	□ Брой 17	Декември 2015.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОЧНОСТТА, КАЛИБРИРАНЕТО И ФУНКЦИОНАЛНОСТТА НА СРЕДСТВАТА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ШУМА В ОКОЛНАТА СРЕДА

Маг. инж. Татяна Иванова Георгиева

Технически университет София, МФ, Кат. ПТУ, tgeorgieva03@gmail.com

Резюме: Целта на публикацията е да се направи изследване на точността, калибрирането и функционалността на средствата за измерване на шума в околната среда и да се дефинира методика за оценка на измерваните показатели и периодичността на калибриране, както и влиянието на показателите на околната среда.

В изследването се обхващат ръчните инструменти за измерване на показателите на шум в околната среда използвани от органите за контрол в Р. България.

Ключови думи: оценка на точността, калибриране, функционалност на средствата за измерване, показатели на шума в околната среда.

1. Въведение

Високите нива на вибрации и акустичен шум оказват неблагоприятно въздействие върху здравето на хората. Те смущават основните човешки дейности в работната, битовата и околната среда (съня, почивката, ученето, общуването, работата), действат като стресов фактор и водят до сериозни здравословни проблеми. Затова от изключително значение е точния контрол на техните параметри, което изисква периодични точни и унифицирани процедури при калибрирането на измервателните средства. На пазара съществуват множество разнообразни производители на уреди и измервателни системи за шум и вибрации. Изискванията към измервателните средства са заложили в редица международни, регионални и национални нормативи. Националната и международната нормативна уредба е обширна и разнородна и затова е необходима унифицирана методика за оценка на точността на измервателните системи за шум. Целта на предлагания проект е да извърши анализ и оценка на унифицираните измервателни средства (ръчни преносими измерители на нива на шум и вибрации – (hand held sound level meter).

В резултат на провеждане на планирани натурни и числени експерименти да се формулира подход за оценка на точността на измервателните средства посочени по-горе. В резултат на проведени експериментални и числени изследвания се предлага унифициран подход за оценка на точността на измервателните средства и оценка на влиянието на показателите на околната среда.

2. Технически параметри на ръчните измервателни средства на шум, клас 1, използвани в Р. България.

B&K Sound Level Meter - тип 2270 (2 канален), 2250, 2250-L (1 канален, 1/1 октава, 16 Hz-8 kHz 1/3 октава 12.5 – 16 kHz) с микрофон тип 4189 Prepolarized Free-field 1/2" кондензаторен микрофон и ветрозащитен калпак, честотно претегляне A-, B-, C- и Z-, времево претегляне F- и S-, звукова експозиция L_{XE}(T), спектрален анализ. Вътрешно

калибриране, звуков запис: Софтуер Measurement Partner Suite BZ-5503 за трансфер на измерванията към PC, USB Mini-B и LAN интерфейси, динамичен обхват от 135 dB. Диапазон на работната температура: -10 до + 50°C, работна влажност: 0% <RH <90%.



Sound Level Meter - Type 2240, LAeq, LAF_{max}, LC_{peak}, LAF, Dynamic range: 30 - 140 dB в два обхвата 80 dB.

B&K Integrating Sound Level Meter 2239A, история на калибрирането, съхранение на последните 20 калибрания, честотно претегляне, LCeq-LAeq, LAeq-LAeq, LAFTm5-LAeq, RMS/Peak, времево претегляне, (F,S,I), съхранение на измерванията на 12 параметри, 1 s до 1 h интервал, 1/1- и 1/3-октавни ленти.

B&K Sound Calibrator 4231, клас 1 с честота 1 kHz и ниво 94 /104 dB, IEC 60942. Точност на калибрирането ± 0.2 dB, 94 dB SPL, или 114 dB SPL. 1" и 1/2" микрофони (1/4" и 1/8" микрофони с адаптер) изключване при премахване на микрофона.



Cirrus Research Sound Level Meter CR:1710 с микрофон МК224, клас 1, Leq/Peak, обхват 20 - 140dB, честотно претегляне, съхранение на данните по време на измерването, звуков запис, (1 канален, 1/1 октава, 31.5Hz-16kHz, 1/3 октава, 6.3Hz - 12.5kHz).

Cirrus Research Sound Calibrator CR:515 - Class 1, 94dB±0.2dB Frequency 1kHz ± 1%, Reference conditions 23oC, 101.3kPa, 65% RH, IEC60942:2003.



SINUS Messtechnik GmbH, Шумомер Tango™ Клас 1 в съответствие с IEC 61672, измервателен обхват от 110 dB, поляризиран ½“ микрофон електретен, 50 mV/Pa (с вграден предусилвател), едновременно честотно претегляне по А и С, Бързо (125ms) и Бавно (1s) времепретегляне, LAeq, максимално звуково ниво за даден период (LAF_{max}, LAS_{max} и LC_{peak}), LA_{tm5} стойности за даден (интеграционен) период. Разделителна способност – 0,1 dB.

SINUS
Messtechnik GmbH



KIMO DB300/1 интегриращ шумомер клас 1 с микрофон - Електретен ICP – ½“; Чувствителност 45 mV/Pa, с обхват 25 - 140 dB, USB интерфейс, Претеглено ниво на шум: LX_Y; Еквивалентно продължително ниво на шум: LX_{eq}; Пиково ниво на звуково налягане: L_{peak}; Ниво на експозиция на шум: LX_E; Максимални и минимални стойности, пикови стойности, L01-L10-L50-L90-L95 статистики за разпределение, Leq : 15-137dB (филтриране по октави 16 Hz-16 kHz), честотно претегляне F (бързо) – S (бавно) – I (импулсно) – U (пиково), Работни условия - 10°C ~ +50°C / 0 ~ 90% относителна влажност.



KIMO CAL300 Звуков калибратор за шумомери ниво клас 1 за калибриране на звукови измервателни системи. Отговаря на стандартите EN 60942: 2003 и CEI 60942: 2003 клас 1. Осигурява две акустични нива на налягане: 94 dB или 114dB при 1000 Hz, 1 инч микрофон без адаптер (съгласно CEI 61094-4 стандарт) Ниво на акустично налягане 94dB ±0.25dB и 114 dB ±0.25dB при честота 1kHz ± 2 Hz.



Casella CEL-630 интегриращ шумомер клас 1. Измервателен обхват: 20- 140dB RMS (143.3 dB peak), честотно претегляне А, С и Z едновременно, времево претегляне Бързо / Бавно / Импулсно едновременно. 11 октавни ленти 16 Hz-16 kHz (B&C модели), 33 октавни ленти 12.5Hz- 20kHz (C модели), Относителна влажност 5 до 90% (без кондензация): Температура – 10 до 500 C (Клас 1).



Casella Акустичен калибратор Клас 1 CEL-120/1, Съответства на стандартите IEC 60942 : 2003 и ANSI SI.40:2006 • Клас на точност 1 Две нива на калибриране) 94 dB и 114 dB при 1 kHz.

3. Резултати

Източници на неопределеност, които имат основно влияние при измерването са следните:

- Температура на въздуха;
- Прецизност на отчитане на атмосферното налягане;
- Относителна влажност на въздуха (влиянието на влажността при измерванията в нормални условия е малко и обикновено не се прилага корекция към резултата);
- Повторяемост на измерванията.
- Неопределеност при въвеждане на корекциите за привеждане на резултата към стандартните условия.

Метод (методика) за калибриране:

Метод на сравнение по методика за калибриране на звукови калибратори ИАВ- МК-13-03/2015-dB Lp.

Метрологична проследимост:

Еталонен микрофон LS2P тип 4180, № 2488294, В&К-Дания, свидетелство за калибриране № 170-ИАВ/ 05.09.2013 от ГД НЦМ.

Еталонен звуков калибратор тип 4226, № 2433728, В&К-Дания, свидетелство за калибриране № 171-ИАВ/ 05.09.2013 от ГД НЦМ.

Резултати от проведени калибrierания за различни модели:

Интегриращ шумомер В&К – Дания, 2239А

Условия, при които е извършено калибрирането: температура на средата: 23 °C ± 2 °C; относителна влажност: 33 % ± 5 % rh; атмосферно налягане: 94,3 kPa ± 1 kPa.

Отклонение в Отклонение в dB от стандартните “А” и “С” характеристики (за свободно звуково поле Lo=80 dB) с микрофон тип 4188 № 2580920

Средна честота на октавен спектър, Hz	Отклонение по ниво, dB		Неопределеност, dB
	A	C	
31,5	-0,3	0	0,4
63	0,1	0,2	0,4
125	0,1	0,2	0,4
250	0,1	0,2	0,4
500	-0,1	0,1	0,4
1000	0	0	0,4
2000	0,1	0,2	0,4
4000	0,2	0,3	0,4
8000	0,5	0,7	0,8
12500	0,4	0,5	0,8
бял шум	0,1	0,2	0,5

Линейност по обхвати: Максимално отклонение по ниво за обхвати от 20 dB до 140 dB (стъпка 10 dB) при честоти 31,5 Hz; 1 kHz; 8 kHz.

Честота, Hz	31,5	1 000	8 000
Макс.откл., dB	0,5	0,4	0,4
Неопределеност, dB	0,4	0,4	0,8

Отклонение на Leq. за време на измерване 10 min и Lc Peak.

	Еталон	Шумо-мер	Откло-нение	Неопределеност, dB
Leq. dB(A)	85,0	85,1	0,1	0,3
Lc Peak, dB(C)	100,0	100,2	0,2	0,5

Интегриращ шумомер В&К-Дания 2250.

Условия, при които е извършено калибрирането: температура на средата: 23 °C ± 2 °C; относителна влажност: 32 % ± 5 % rh; атмосферно налягане: 95,2 kPa ± 1 kPa.

Отклонение в Отклонение в dB от стандартните “А” и “С” характеристики (за свободно звуково поле Lo=80 dB) с микрофон тип 4950 № 2640545.

Средна честота на октавен спектър, Hz	Отклонение по ниво, dB			Неопределеност, dB
	A	C	Lin	
31,5	-0,2	0	0,1	0,4
63	0	0,1	0,3	0,4
125	0,1	0,2	0,2	0,4
250	-0,1	0,1	0,2	0,4
500	-0,1	0,1	0,1	0,4
1 000	0	0	0	0,4
2 000	-0,1	0,1	0,2	0,4
4 000	0,2	0,2	0,3	0,4
8 000	0,4	0,5	0,7	0,8

12 500	0,3	0,4	0,5	0,8
бял шум	0,1	0,1	0,2	0,5

Линейност по обхвати: Максимално отклонение по ниво за обхвати от 20 dB до 140 dB (стъпка 10 dB) при честоти 31,5 Hz; 1 kHz; 8 kHz (сл. измервания).

Честота, Hz	31,5	1 000	8 000
Макс.откл., dB	0,4	0,3	0,4
Неопределеност, dB	0,4	0,4	0,8

Отклонение на Leq. за време на измерване 10 min и Lc Peak (бял шум).

	Еталон	Шумо-мер	Откло-нение	Неопределе-ност, dB
Leq. dB(A)	85,0	84,9	-0,1	0,3
Lc Peak, dB(C)	100,0	100,3	0,3	0,5

Шумомер Voltcraft Voltcraft 33-2050

Условия, при които е извършено калибрирането: температура на средата: 23 °C ± 2 °C; относителна влажност: 39 % ± 5 % rh; атмосферно налягане: 94,8 kPa ± 1 kPa.

Отклонение в dB от стандартните “А” и “С” характеристики (за свободно звуково поле Lo=80 dB).

Средна честота на октавен спектър, Hz	Отклонение по ниво, dB		Неопределеност, dB
	A	C	
31,5	1,0	-0,7	0,4
63	0,7	-0,5	0,4
125	0,2	-0,2	0,4
250	-0,3	0,3	0,4
500	-0,3	0,2	0,4
1000	0	0	0,4
2000	0,6	0,8	0,4
4000	2,2	2,4	0,4
8000	5,7	6,0	0,8
бял шум	1,2	1,0	0,5

Линейност по обхвати: Максимално отклонение по ниво за обхвати от 60 dB до 120 dB (стъпка 10 dB) при честоти 31,5 Hz; 1 kHz; 8 kHz.

Честота, Hz	31,5	1 000	8 000
Макс.откл., dB	0,5	0,3	0,4
Неопределеност, dB	0,4	0,4	0,8

Шумомер Testo – Германия Testo 816

Условия, при които е извършено калибрирането: температура на средата: 23 °C ± 2 °C; относителна влажност: 37 % ± 5 % rh; атмосферно налягане: 94,7 kPa ± 1 kPa.

Отклонение в Отклонение в dB от стандартните “А” и “С” характеристики (за свободно звуково поле Lo=80 dB).

Средна честота на октавен спектър, Hz	Отклонение по ниво, dB		Неопределеност, dB
	A	C	
31,5	-0,5	0	0,4
63	-0,2	0,2	0,4
125	-0,2	0,3	0,4
250	-0,1	0,3	0,4
500	0,1	0,2	0,4
1000	0	0	0,4
2000	-0,2	-0,1	0,4
4000	0,3	0,4	0,4
8000	1,0	0,9	0,8
12500	0,4	0,5	0,8
бял шум	-0,1	0,3	0,5

Линейност по обхвати: Максимално отклонение по ниво за обхвати от 30 dB до 130 dB (стъпка 10 dB) при честоти 31,5 Hz; 1 kHz; 8 kHz.

Честота, Hz	31,5	1 000	8 000
Макс.откл., dB	0,5	0,3	0,4
Неопределеност, dB	0,4	0,4	0,8

Интегриращ шумомер CASELLA – Англия CEL 430/2.

Условия, при които е извършено калибрирането: температура на средата: $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; относителна влажност: $30\text{ } \% \pm 5\text{ } \%$ rh; атмосферно налягане: $94,8\text{ kPa} \pm 1\text{ kPa}$.

Отклонение в Отклонение в dB от стандартните “А” и “С” характеристики (за свободно звуково поле $L_0=80\text{ dB}$) с микрофон CEL 252 № 011579.

Средна честота на октавен спектър, Hz	Отклонение по ниво, dB		Неопределеност, dB
	A	C	
31,5	-	0,2	0,4
63	0,2	0,4	0,4
125	0,3	0,3	0,4
250	0,2	0,2	0,4
500	0,1	0,1	0,4
1000	-	0	0,4
2000	0,2	0,3	0,4
4000	0,5	0,6	0,4
8000	0,7	0,9	0,8
12500	-	-0,2	0,8
бял шум	0,3	0,4	0,5

Линейност по обхвати: Максимално отклонение по ниво за обхвати от 30 dB до 130 dB (стъпка 10 dB) при честоти 31,5 Hz; 1 kHz; 8 kHz.

Честота, Hz	31,5	1 000	8 000
Макс.откл., dB	0,5	0,4	0,4
Неопределеност, dB	0,4	0,4	0,8

Отклонение на L_{eq} за време на измерване 10 min и L_c Peak (бял шум).

	Еталон	Шумомер	Отклонение	Неопределеност dB
L_{eq} , dB(A)	5,0	5,2	0,2	0,3
L_c Peak, dB(C)	00,0	00,4	0,4	0,5

Звуков калибратор B&K – Дания, 4231

Условия, при които е извършено калибрирането: температура на средата: $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; относителна влажност: $33\text{ } \% \pm 5\text{ } \%$ rh; атмосферно налягане: $94,3\text{ kPa} \pm 1\text{ kPa}$.

4. Заключение

Резултатите от проведените калибrierания предполагат необходимост от калибриране на калибраторите на 1 год. и на шумомерите на 2 години.

Ниво на звуковото налягане в камерата на калибратора: 93,99 dB относно 20 μPa с честота 1000,0 Hz $\pm 0,5\text{ } \%$; 114,01 dB относно 20 μPa с честота 1000,0 Hz $\pm 0,5\text{ } \%$.

Звуков калибратор Cirrus – Англия, CR 513A.

Условия, при които е извършено калибрирането: температура на въздуха: $(23 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$; относителна влажност на въздуха: $(40 \pm 5)\text{ } \%$ rh; атмосферно налягане: $(94,3 \pm 1)\text{ kPa}$.

Резултати и неопределеност на измерването: Ниво на звуковото налягане в камерата на калибратора: 93,80 dB относно 20 μPa с честота 1000,7 Hz $\pm 0,5\text{ } \%$; 103,86 dB относно 20 μPa с честота 1000,7 Hz $\pm 0,5\text{ } \%$.

Звуков калибратор, CASELLA – Англия, CEL 110 / 2.

Условия, при които е извършено калибрирането: температура на средата: $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; относителна влажност: $34\text{ } \% \pm 5\text{ } \%$ rh; атмосферно налягане: $95,4\text{ kPa} \pm 1\text{ kPa}$.

Ниво на звуковото налягане в камерата на калибратора: 113,85 dB относно 20 μPa с честота 1000,0 Hz $\pm 0,5\text{ } \%$.

Неопределеност по ниво: 0,11 dB ($k=2$) (Резултатът е приведен за атмосферно налягане 101,3 kPa).

Обявената разширена неопределеност на измерване е получена като произведение на комбинираната стандартна неопределеност и множителя на покритие $k = 2$, което за нормално разпределение съответства на вероятност на покритие приблизително 95 %. Стандартната неопределеност на измерване е определена в съответствие с ръководството за изразяване на неопределеността на измерване GUM JCGM 100:2008.

5. Литература

[1] БДС EN ISO 10012:2006. [2] ILAC G24 IML D10.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОЧНОСТТА И ОЦЕНКА НА РЪЧНИТЕ ИЗМЕРВАТЕЛНИ СРЕДСТВА НА ВИБРАЦИИ С ОГЛЕД ПОСТИГАНЕ КАЧЕСТВО НА ИЗМЕРВАНЕ

маг. инж. ТАТЯНА ИВАНОВА ГЕОРГИЕВА,
Технически университет София, МФ, кат. ПТУ, tgeorgieva03@gmail.com

Резюме: Целта на публикацията е да се направи оценка на ръчните измервателни средства на вибрации, използвани в Р. България с оглед определяне на обхвата и периода на калибриране и оценка с оглед качество на работа.

Ключови думи: оценка на точността, калибриране, функционалност на средствата за измерване

1. Въведение

Вибрациите създавани от работните процеси върху техническите обекти и сгради, машините и околната среда, оказват неблагоприятно въздействие върху тях. Същевременно те смущават основните човешки дейности в работната, битовата и околната среда (съня, почивката, ученето, общуването, работата), действат като стресов фактор и водят до сериозни здравословни проблеми. Затова от изключително значение е точния контрол на техните параметри, което изисква периодични точни и унифицирани процедури при калибрирането на измервателните средства.

На пазара съществуват множество производители на уреди и измервателни системи за вибрации. Изискванията към измервателните средства са заложи в редица международни, регионални и национални нормативи. Националната и международната нормативна уредба е обширна и разнородна и затова е необходима унифицирана методика за оценка на точността на измервателните системи за вибрации.

Целта на предлагания проект е да извърши анализ и оценка на унифицираните измервателни средства (ръчни преносими измерители на нива на вибрации и комбинирани (hand held sound level meter and vibrations). Измерването на вибрациите се извършва с виброметри. В измервателна верига, се включват преобразувател, измервателен и регистриращ уред. Допълнително в измервателната верига се включват вътрешен и външен тарировъчен тракт. Преобразувателите могат да бъдат индуктивни, капацитивни, тензометрични и пиезоакселерометрични, сеизмични. Най-широко приложение намират пиезоакселеро-метричните преобразуватели. В зависимост от показателя, те преобразуват различни първични вибросигнали – виброускорение, виброскорост или вибропреместване. Измервателните системи позволяват хардуерна или софтуерна настройка на големината на измервания сигнал. Процесът на настройване на измервателния тракт за показване точната стойност на измервания сигнал се нарича калибриране. Преди започване на самото измерване се извършва калибриране на измервателната система. За целта се използват уреди, които подават еталонен сигнал (калибратори). Те са от висок и прецизен клас уреди и издаваният от тях сигнал е с точно дефинирани параметри, които са с много малки отклонения / допуски.

Възприемателят приема този сигнал и при това положение се извършва настройка на системата да показва точната стойност, генерирана от калибратора. Вибровеличините не зависят от атмосферните условия.

За виброизмервателните системи е необходимо еднократно калибриране и последващи проверовъчни калибрирания през определен интервал от време.

Измерването на вибровеличини се извършва с измервателни системи, които се състоят от вибропреобразувател, кабел и регистриращо устройство (няколко вибропреобразуватели при многоканална система), преобразува се вибросигнала в електрически, след което се предава на регистриращия уред, като при необходимост се усилва, мащабира или преобразува, напр. от аналогов в цифров, което позволява практическото му използване.

Индуктивните вибродатчици се използват за измерване на вибропреместване при честоти на трептенията по-ниски от собствената честота на вибродатчика, или за измерване на виброускорение при честоти по-високи от собствените им. Те са подходящи за измерване на големи вибрации. За измерване на малки вибрации не се препоръчват, тъй като имат малка чувствителност и сравнително голяма грешка, дължаща се на разсейването на магнитния поток в пространството, токовете на Фуко, магнитния хистерезис и други.

Пиезопреобразувателите се използват за директно измерване на виброускорение, а индукционните преобразуватели за измерване на виброскорост.

Те са универсални преобразуватели, едни от най-използваните във виброметрията. Принципът на действие на пиезоелектричните преобразуватели се основава на свойствата на пиезоелектричните материали да образуват на повърхността си електрични заряди, в резултат на приложени механични въздействия. Тъй като са активни датчици, генериращи електрически сигнали пропорционални на механичните колебания, при тяхната експлоатация не е нужен захранващ източник.

Оценка е приписаната стойност на параметъра или приписаното на обекта състояние, свързано с този параметър. Оценката се отнася както измерването, така и за контрола и изпитването на обектите по съответния параметър. Оценката е пълна, само когато е придружена с информация за нейното качество т.е. за нейната точност или достоверност. Оценките биват алтернативни и неалтернативни.

Качеството на оценката, когато тя е изразена чрез приписана стойност се характеризира с нейната *точност*, а когато е изразена чрез приписано състояние – с нейната *достоверност*.

Точност на оценката е степента на съвпадение между приписаната и истинската стойност на параметъра (Подход

на грешките) или степен на съвпадение между възможните приписани стойности на параметъра (Подход на неопределеността) (виж т. 1.3.2.2).

Достоверността на оценката отразява степента на доверие към нея.

Както точността, така и достоверността на оценките са качествени понятия.

Количествено точността на оценката може да бъде изразена чрез характеристиките на грешките на приписаната стойност или с мерките на нейната неопределеност.

Достоверността на оценката се изразява количествено чрез вероятността за съответствие на приписаното състояние на обекта по съответния параметър с истинското. Тази вероятност се нарича доверителна.

Точността на измерването наред с навременността и обема на получената чрез измерването информация е една от основните характеристики на неговото качество.

Еталоните са технически средства за постигане на единството и метрологичната проследимост на резултатите от измерванията. Те са необходимите елементи за осигуряване на сравнимост и точност на измерванията. Използват се като референтни елементи при осъществяване на контрол на измерванията, разработване, изпитване калибриране, проверка на средства за измерване, валидиране на процедури за измерване, изпитване, калибриране и намират широко метрологично приложение в научната, законовата и индустриалната метрология. *Еталонът е реализацията на определението на дадена величина с обявената стойност на величината и принадлежащата ѝ неопределеност на измерване и която се използва за референтен елемент.* Реализацията на еталона е реално практическо осъществяване на одобреното определение на величина с обявена стойност и принадлежащата ѝ неопределеност чрез еталон.

Процедура е документиран подход (начин) на извършване на всички действия при измерването / калибрирането. За всяко измерване / калибриране е важно последователно, точно и правилно да се изпълняват отделни експериментални действия. Важна предпоставка за сравняване на резултатите от измерванията на дадена величина са резултатите да са отнесени към общ референтен елемент – да са проследими и да са изчислени и изразени по международни общоприети процедури. Референтният елемент може да се осъществи чрез еталон и процедура. Метрологичната дейност, която осигурява връзката на всеки един резултат от измерването с дадено средство за измерване с референтния елемент е калибриране.

Калибрирането е действие, което се извършва при определени условия и може да бъде разделено на два етапа:

- първият етап се определя връзката между стойностите на величината и неопределеностите, представени от еталоните и съответните показания и принадлежащите им неопределености;

- втория етап се използва информацията за определяна на зависимостта, за получаването на резултата от измерване от съответните индикации.

Методи за калибриране на виброметри и виброкалибратори: Вторично калибриране чрез измерване параметрите на вибрацията на виброкалибратора с еталонен виброметър съгласно методика за калибриране ИАВ-МК-14-02/2003. Метрологична проследимост до еталон: Национален първичен еталон на Република България на единиците за ускорение „m/s²” при вибрация, утвърден с Решение на Министерския съвет № 79 от 19.02.2010 г., с проследимост до РТВ, Германия (свидетелство за калибриране РТВ-1105-2009 от 18.11.2009 г.). Задаване на акселерометъра на подлежащото на калибриране средство за измерване (СИ) на синусоидална вибрация чрез електродинамичен вибратор и сравняване показанията на СИ с показанията на еталонен виброметър съгласно ISO 16063-21, методика за калибриране

ИАВ-МК-14-02/2015 и документацията на калибрираното СИ.

Метрологична проследимост до еталон: -Национален първичен еталон на Република България на единиците за ускорение „m/s²” при вибрация, утвърден с Решение на Министерския съвет № 79 от 19.02.2010 г., с проследимост до еталон тип 8305 със свидетелство за калибриране 306-ИАВ/ 21.12.2009 г. Проследим до РТВ Германия.

Метод (методика) за калибриране: Вторично калибриране чрез задаване на акселерометъра на калибрирания виброметър на синусоидална вибрация чрез електродинамичен вибратор и сравняване показанията на виброметъра с показанията на еталонен виброметър съгласно ISO 16063-21 и методика за калибриране ИАВ-МК-14-02/2003. Резултатите от проведените калибрирания предполагат необходимост от калибриране на калибраторите на 1 год. и на виброметрите на 2 години.

2. Национален първичен еталон на Република България на единиците за ускорение m/s² при вибрация. Система за калибриране на апаратура за измерване и контрол на вибрации.

Единиците за ускорение (постоянно, при механична вибрация и удар) и ъглова скорост са ключови при измерването на променливи величини в механиката, научните изследвания, машиностроенето, транспорта, медицината, енергетиката, екологията, здравеопазване, за контрол на отговорна продукция на гражданското и специалното производство, изпитване на машини, съоръжения, агрегати, уреди, автомобили, самолети, кораби и др.

Еталонът е първичен и включва системи за възпроизвеждане с електродинамични вибратори, измервателни системи с лазерни интерферометри и спомагателно оборудване, като дава възможност за първично възпроизвеждане на единиците за преместване, скорост и ускорение при линейна вибрация и тяхното предаване към по-ниските нива от схемата за проследимост по сравнителен метод.

Възпроизвеждането и предаването на единиците се извършва по ISO 16063 в честотния обхват от 0 Hz до 1,25.10⁴ Hz при ускорение до 10³ m/s². В Лабораторията се извършват измервания на:

- Постоянно ускорение, (m.s⁻²) - за постоянно ускорение с помощта на лазерен балистичен гравиметър в опорна точка се извършват абсолютни измервания на ускорението на силата на тежестта ($g = 9,80234423 \text{ m/s}^2$ с неопределеност от порядъка на 10⁻⁹).

- Ускорение при механична вибрация - (m.s⁻²)

- Ускорение при ударно движение, (m.s⁻²) - еталонът на единиците за ускорение при ударно движение е изграден на базата на разчетно определяне параметрите на преходен процес в механична система. Състои се от уредба за първично възпроизвеждане на преходен процес, измервателна система и специализирана програма.

Метрологични характеристики:

- обхват от 30 m/s² до 5·10³ m/s²;
- продължителност на косинусоидален импулс 5·10⁻⁴ s до 10⁻² s;
- неопределеност 3%.

Работи се по първично възпроизвеждане с лазерен интерферометър по ISO 16063, както и по възпроизвеждане на импулси с програмируема форма.

Еталон за линейна скорост, km/h.

Като изходен еталон за линейна скорост се използва доплеров скоростометър със следните характеристики: Обхват от 5 km/h до 200 km/h и неопределеност до 1.10⁻². Измерването на скорост се основава на броене на импулсите от датчика за интервал от време 0,9 s.

Основни характеристики на някои от най-използваните портативни виброкалибратори, произвеждани от фирмите

Bruel&Kjaer”, „Hardy Instruments”, „Modal Shop”, „PCB Piezitrronics” „ProvibTech”, „Endevco” и др., които са лидери в предлагането на акселерометри и оборудване за тях и утвърдени авторитети в областта на производството на устройства за измерване, проверка и калибриране на акселерометри и вибрационно оборудване. Калибрирането на акселерометрите може да се извърши по два метода. Единият е методът на калибриране на строго определена честота и амплитуда, а вторият метод е калибриране в работния честотен и амплитуден диапазон на калибрирания акселерометър.



Фиг.1 Ръчни калибратори на ускорение.

Методът за калибриране на акселерометри на точно фиксирани честота и амплитуда е най-широко разпространен в практиката. Той се основава на използването на опорен източник на механични колебания с точно определени параметри (калибриран вибростенд или вибратор). Този метод може да се използва в лабораторни и в полеви условия.

Всички калибратори използващи този метод са портативни и са предназначени за бързо и точно калибриране на преобразувателите по ускорение, скорост и преместване. Захранват се от батерия и най-често се използват за калибриране на преобразуватели с малка маса (от 70g до 200g). Калибраторите са проектирани за работа в среда, която се характеризира с температури в диапазона -10 до +55°C и относителна влажност до 90% rh. Преносимите калибратори имат твърдо фиксирани честота и амплитуда на вибрациите. Те не могат да определят АЧХ и нелинейност на АХ. Най-широко приложение на преносими калибратори на една честота и амплитуда са на производителите Bruel&Kjaer - типове 4294, 4294-002, 4291, от Modal Shop-типове 394C06, 394C11.

Калибриране по метода в работния честотен и амплитуден диапазон на калибрирания преобразувател. За извършване калибриране на преобразуватели, на различни честоти и амплитуди на ускорението, се произвеждат и помасивни калибратори. Те са предназначени за прецизно калибриране на преобразуватели в широк честотен и амплитуден диапазони. С тях може да се калибрира ускорение, скорост и преместване, както и определяне на АЧХ и нелинейност на АХ. Тези калибратори, могат да се използват за работно калибриране на преобразуватели при решаване на изследвания и технически задачи. Те биват преносими и стационарни. Широко приложение намират калибровъчни вибростендове, основни представители на които са: HI-803/813 производство на компанията “Hardy Instruments”, 9100D/9110D производство на фирма “Modal Shop”, 28959 на фирма „Endevco”, PT-520 на фирма “ProvibTech”, 4290/4291 на фирма „Bruel & Kjaer”.

Фирмите производители на системи за калибриране предлагат широка гама прецизни вибростендове за калибриране на преобразуватели. Условия, при които е извършено калибрирането: Температура на заобикалящата среда: (24,0±1,0) °C; Относителна влажност на въздуха: (35±5) %rh;

Производител	Размерност	Глобал Тест	Глобал Тест	Modal Shop
Модел		AT01m	AT04	394C06
Честотата	Hz	159,2	40	159,2
Допустима грешка на честотата				
	%	±1	±1	±1
Средно-квадратична стойност на: преместването, скоростта, ускорението.				
-	μm mm. ¹ m.s ⁻²	10 10 10	40 10 2.53	9,81 9,81 9,81
Допустима грешка на поддържане на преместване, скорост и ускорение на колебанието				
	%	±2	±3	±3
Коефициент на напречните компоненти на колебанието				
Нелинейни изкривявания	%	< 5	< 7	<3%
	%	< 3	< 5	2% ÷ 9%
Максимална маса на калибрирания преобразувател				
Работни температура-тури	g °C	160 -10 ... + 50	200 -10 ... +50	210 10...+55
Габаритни размери	mm	φ58x180	φ80 x 190	φ56 x 200
Калибратор	g	950	1500	900

Производител	Размерност	Bruel&Kjaer		PCB Piezotronics
Тип		4294	4294-002	699A02
Честотата на колебанието	Hz	159.15	159.15	159,2
Допустима грешка на честотата на колебанието				
	%	±0.02%	±0.02%	±1
Средноквадратична стойност (CKC) на: преместването, скоростта, ускорението на колебанието				
-	μm mm.s ¹ m.s ⁻²	10 10 10	3.16 3.16 3.16	9,81 9,81 9,81
Допустима грешка на поддържане на преместване, скорост и ускорение на колебанието				
	%	±3	±3	±3
Коефициент на напречните компоненти на колебанието				
	%	< 5	< 5	≤3
Нелинейни изкривявания	%	2%	2%	< 7
Максимална маса на калибрирания преобразувател				
	g	70	200	250
Диапазон на работните температури				
	°C	-10...+55	-10... +55	-10...+55
Габаритни размери	mm	φ52 x 155	φ52 x 155	φ56 x 200
Маса	g	500	500	900

Измерени параметри на синусоидалната вибрация на виброкалибратор тип 4294

№ Величина и измервателна единица	Измерена стойност		Разширена относителна неопределеност [%]
	Вертикална ос	Хоризонтална ос	
1) Вибро-ускорение RMS [m/s ²]	9,92	9,92	1,0
2) Виброско-рост RMS [mm/s]	9,92	9,92	1,0
3) Вибропреместване RMS [μm]	9,92	9,92	1,0
4) Честота [Hz]	159,152	159,152	0,010

Метрологична проследимост до еталон: Национален първичен еталон на Република България на единицата за ускорение „m/s²“ при вибрация, утвърден с Решение на Министерския съвет № 79 от 19.02.2010 г., с проследимост до РТВ, Германия (свидетелство за калибриране РТВ-1105-2009от 18.11.2009 г.).



Фиг.2 Калибрационен стенд на вибрации

За всички калибрирания на измервателните средства е в сила, че декларираната разширена неопределеност от измерванията е изразена като средноквадратична неопределеност, умножена по коефициент на доверителния интервал $k=2$, което за нормално разпределение съответства на вероятност на доверителния интервал приблизително 95%. Средноквадратичната неопределеност от измерване е определена в съответствие с Ръководство за изразяването на неопределеност при измерване./GUM/ (Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement) JCGM100:2008. (for details see <http://www.bipm.org>).

3. Изводи

Резултатите от проведените калибрирания на използваните шумометри показват, почти еднакви резултати в честотния обхват

63-4000Hz. При измервания в ниските и високите честоти е необходимо работно калибриране за дадено измерване.

4. Литература

[1] БДС EN ISO 10012:2006.

[2] ILAC G24 IML D10.

[3] БДС ISO 17025 „Общи изисквания относно компетентността на лабораториите за изпитване и калибриране“.

[4] ISO 16063 „Methods for the calibration of vibration and shock transducers“ - part 1, 1998.

[5] ISO 16063 „Methods for the calibration of vibration and shock transducers“ - part 11, 1999.

EVALUATION OF THE ACCURACY OF HAND-HELD TOOLS FOR MEASURING VIBRATIONS

Mag. Eng. Tatiana Ivanova Georgieva

Technical University of Sofia, MF, Department „Precision Engineering
and Measurement Instruments“, tgeorgieva03@gmail.com

Abstract: The aim of the publication is to assess the handheld vibration measuring devices used in the Republic of Bulgaria with a view to determining the scope and period of calibration and assessment with a view to quality.

Keywords: evaluation of accuracy, calibration functionality of measuring instruments

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София-2015 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ФОРМУЛЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ СВОБОДНЫХ БАЛОК ИЗ АЛЮМИНИЯ

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE UNIVERSAL RELATION FOR DETERMINATION OF TRANSVERSAL NATURAL FREQUENCIES OF VIBRATION OF FREE BEAMS FROM ALUMINUM

доц. д-р Чириков В.А., гл.ас. д-р Димитров Д.М.
кафедра Технической механики,
Технический университет - Варна, Болгария

Abstract: *The analytical relation offered for verification totally corresponds to an approximate solution of the notorious differential equation obtained by Timoshenko for transversal vibration of stubby beams. The relation gives an opportunity for brief calculation of the transversal natural frequencies of stubby beams by avoiding complex and hard algorithms of vibration analysis. The data obtained from tests for natural transversal frequencies of short bulky free ends beams are substituted into the relation to calculate the moduli of elasticity of the beam material. Beams made of aluminum are presented to confirm the preciseness of the applied method proposed in the paper.*

KEY WORDS: STUBBY BEAM, TRANSVERSAL VIBRATION, NATURAL FREQUENCY, UNIVERSAL RELATION.

1. Введение

В настоящей работе продолжается дальнейшее усовершенствование методов аналитического расчета частот поперечных колебаний коротких балок, которые позволяли бы теоретико-экспериментальное определение упругих характеристик различных материалов посредством возбуждения свободных колебаний испытываемых образцов, без необходимости их разрушения, которое происходит при экспериментах на растяжение. Такой безразрушительный подход позволяет сохранить образец и использовать его в качестве эталона для дальнейших исследований. Этот подход предполагается применять при изучении упругих характеристик современных композитных материалов, ввиду их большого разнообразия и различных механических свойств.

В настоящем исследовании проведена еще одна серия экспериментов по измерению собственных частот поперечных колебаний коротких балок со свободными концами исполненных из алюминия и проведено сравнение с универсальной зависимостью [1], [2]. Зависимость получена на основе уравнения Тимошенко [3] поперечных колебаний коротких балок с учетом инерции вращения и сдвига. Различие настоящего опыта от предыдущих состоит в том, что материалом балок является алюминий, в отличие предыдущих опытов с балками из стали.

2. Экспериментальная постановка

Для целей исследования изготовлена специальная серия из 5 коротких алюминиевых балок различной длины с плотными прямоугольными поперечными сечениями. Стороны прямоугольников приближаются к квадратам, имея приблизительные размеры 1.45 см, а длины балок находятся в диапазоне приблизительно от 12 до 4 см. Размеры поперечных сечений измерялись с точностью до 0.01mm, а длины балок с точностью до 0.1mm. Результаты каждой серии замеров отдельных балок осреднялись. Подробные средние геометрические размеры балок представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Геометрические характеристики образцов балок

№	Длина, L [m]	Высота, h [m]	Ширина, b [m]
1	0,12060	0,01390	0,01447
2	0,07892	0,01393	0,01442
3	0,06090	0,01443	0,01447
4	0,04266	0,01383	0,01450
5	0,03980	0,01394	0,01444

Материал всех образцов – алюминий, для которого установлены следующие средние значения механических характеристик [4]: массовая плотность материала $\rho = 2788 \text{ kg/m}^3$, модуль упругости $E = 81 \text{ GPa}$ и коэффициент Пуассона $\nu = 0.33$. Плотность получена как отношение веса к объему. При этом, для увеличения точности значения массовой плотности материала, вес образцов измерялся с точностью до 0.01 грамма. Модуль упругости получен по двум методикам: по новой методике на основе универсального уравнения и по методике американского стандарта ASTM E1876-09 [5]. При расчетах принималось указанное выше приблизительное значение коэффициента Пуассона, взятое из справочников. Для измерения основных собственных частот колебаний отдельных образцов балок использовалась постановка эксперимента, представленная на Рис.1.

Исследуемая балка устанавливалась на массивном фундаменте, содержащем две угловые опоры: одна из которых неподвижная, а другая – подвижная, обеспечивающие свободное колебание балки в вертикальной плоскости (Рис.1). Балка (1) устанавливалась на опорах таким образом, чтобы

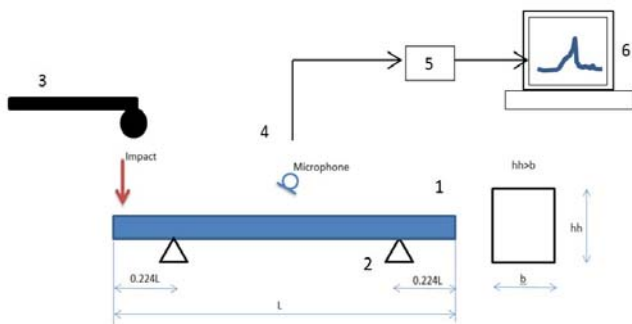


Рис.1 Схема экспериментальной постановки
1-образец; 2-опоры; 3- импульсный молоток; 4- микрофон;
5-цифровой осциллоскоп; 6-компьютер.

контактные линии опор (2) находились в местах узловых точек формы соответствующей балки. При помощи импульсного молотка (3), который представляет собой шарик из закаленной стали, прикрепленный к гибкой рукоятке, производится легкий удар по концу балки. Вибрации регистрируются посредством микрофона МК122 (4), чей сигнал подается на цифровой осциллоскоп Picoscope 2206 (5). Инсталлированное на компьютере (6) программное обеспечение осциллоскопа преобразует поступающий сигнал в частотный спектр, откуда определяется соответствующая основная частота колебаний балки.

3. Сравнение экспериментальных частот с универсальной зависимостью

На следующем Рис. 2 представлены результаты экспериментов для каждой балки в сравнении с универсальной зависимостью [1].

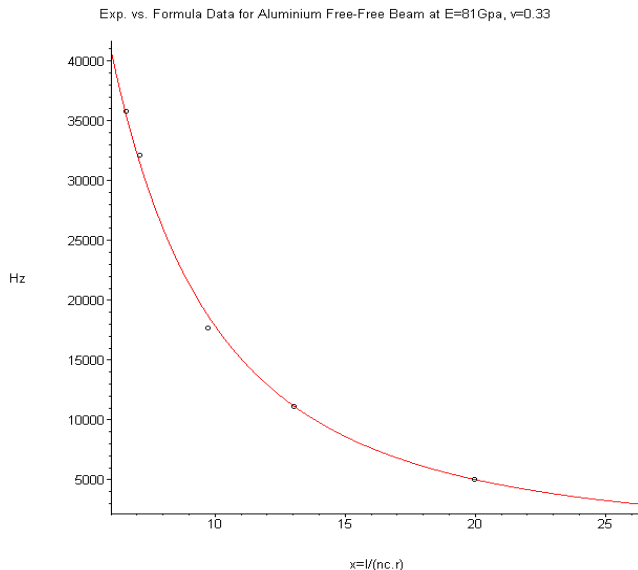


Рис.2. Сравнение экспериментальных частот поперечных колебаний балок с кривой универсальной зависимости.

Для удобства анализа на Рис.2 использована специальная координатная система с параметром s по абсциссе и собственной частотой ω_n по ординате [6]. Безразмерный параметр s включает в себя геометрические и инерционные характеристики балок, виды опор и номер собственной частоты, и имеет вид:

$$(1) \quad s = \frac{L}{n_c r}$$

где: L есть длина балки, r есть инерционный радиус поперечного сечения, а n_c есть частотное число, получаемое из решения уравнения детерминанты формы колебаний балки.

Например, для балок на шарнирных опорах по концам, последовательные частотные числа n_c равняются порядковому номеру частоты n , т.е. $n_c = n$.

Для заделанных с обеих сторон балок или балок со свободными концами последовательные частотные числа являются следующими: 1.505619, 2.499753, 3.50001, 4.5, и т.д. Для балок с одним шарнирным концом, а другим заделанным или свободным: 1.249876, 2.249999, 3.25, 4.25 и т.д. Для консоли они следующие: 0.5996864, 1.494176, 2.500247, 3.5, 4.5, и т.д.

Общий член этих рядов для высших частот можно легко определить. Для заделанных с обеих сторон балок или балок со свободными концами это: $n_c = n + 0.5$. Для балок с одним закрепленным шарнирно концом, а другим заделанным или свободным: $n_c = n + 0.25$. Для консоли: $n_c = n - 0.5$. Очевидно, что нулевые значения частотных чисел, относящихся к движениям твердого тела, в эти ряды не включаются. Для таких значений параметр s становится бесконечно большим.

По оси ординат откладываются собственные частоты колебаний балок ω_n представленные в герцах, т.е. разделенные на 2π . Благодаря введенному параметру s , любую классическую частоту поперечных колебаний длинной тонкой балки с типичными краевыми условиями на концах можно представить следующим образом:

$$(2) \quad \omega_n = \frac{c}{r} \left(\frac{\pi}{s} \right)^2$$

где вводится обозначение $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$.

Очевидно, получается уравнение квадратной гиперболы. Для удобства представления результатов дополнительно введем следующий безразмерный параметр z :

$$(3) \quad z = \left(\frac{\pi}{s} \right)^2$$

С его помощью собственные частоты ω_n колебаний длинных балок можно представить следующей зависимостью:

$$(4) \quad \omega_n = \frac{c}{r} \cdot z$$

При настоящем исследовании получаемые значения собственных частот поперечных колебаний коротких балок со свободными концами сравнивались с аналитической зависимостью, полученной в [1]:

$$(5) \quad \omega_n = \frac{c}{r} \cdot \frac{z}{\sqrt{1 + (1 + 2\kappa(1 + \nu))z}} \cdot \lambda,$$

где множитель λ имеет следующий вид:

$$\lambda = \frac{\sqrt{1 + 2(1 + 2\kappa(1 + \nu))z + (1 + 6\kappa(1 + \nu) + 4\kappa^2(1 + \nu)^2)z^2}}{1 + (1 + 2\kappa(1 + \nu))z}.$$

Именно эта зависимость, после уточнения проведенном в [1] для зависимости в [2], и называется универсальной зависимостью расчета частот поперечных колебаний коротких балок со свободными концами. Можно отметить явное совпадение экспериментальных и аналитических результатов, за исключением образца под номером 3. Это подсказывает, что у этого образца имеется скрытый дефект. Установление этого факта возможно посредством других видов экспериментов, чем и займемся при дальнейших исследованиях.

4. Вычисление модуля упругости материала

Применим универсальную зависимость (5) для расчета модуля упругости материала на основе экспериментирования образцов со свободными концами через возбуждение поперечных колебаний, как представлено в работе [1]. Для этого подставим в нее численные и буквенные значения соответствующих рассматриваемому случаю величин, в результате чего получаем следующее выражение:

$$(6) \quad f_1 = \frac{1.0279194 \cdot \sqrt{E} \cdot h}{\sqrt{\rho} \cdot L^2} \cdot \sqrt{1 + \left((12.6781782 + 8.9493023 \cdot \nu) \frac{h^2}{L^2} + (48.52676 + 65.0731338 \cdot \nu + 20.0225027 \cdot \nu^2) \frac{h^4}{L^4} \right) \cdot \left(1 + (6.3390891 + 4.47465113 \cdot \nu) \frac{h^2}{L^2} \right)^3}$$

Здесь h представляет высоту профиля образца, L есть длина балки, а f_1 есть основная частота поперечных колебаний балки в герцах.

Теперь, исходя из формулы (6), получаем выражение для расчета модуля упругости материала для свободных балок с плотными прямоугольными поперечными сечениями:

$$(7) \quad E = \rho \cdot f_1^2 \cdot \frac{L^4}{h^2} \cdot \frac{0.9464155751 \cdot \left(1 + (6.3390891 + 4.47465113 \cdot \nu) \frac{h^2}{L^2} \right)^3}{1 + \left((12.6781782 + 8.9493023 \cdot \nu) \frac{h^2}{L^2} + (48.52676 + 65.0731338 \cdot \nu + 20.0225027 \cdot \nu^2) \frac{h^4}{L^4} \right)}$$

Аналогичным образом можно установить зависимость для расчета модуля упругости материала балки с иными поперечными сечениями или по более высокой собственной частоте.

В результате расчетов по формуле (7) получены следующие значения модуля упругости, представленные в Таблице 2.

Таблица 2.

№	Масса, [gr]	Частота, f_1 [Hz]	Модуль E, [GPa]
1	67.66	5043	80.999
2	44.22	11115	80.457
3	35.44	17699	77.262
4	23.84	32141	82.928
5	22.30	35811	82.059

Округленное среднее значение модуля упругости E (до целого числа GPa), полученное по данным в Таблице 2 есть 81 GPa. Видно серьезное отличие значения E для образца с номером 3.

Для сравнения в Таблице 3 представлены значения модуля упругости, полученные по формуле американского стандарта ASTM E1876-09 [5].

Таблица 3.

№	Масса, [gr]	Частота, f_1 [Hz]	Модуль E, [GPa]
1	67.66	5043	80.513
2	44.22	11115	79.428
3	35.44	17699	75.623
4	23.84	32141	80.002
5	22.30	35811	78.774

Округленное среднее значение модуля упругости E, полученное по данным в Таблице 3 получается 79 GPa.

Проверка точности применения обоих методов можно осуществить на базе дополнительных экспериментов иного типа.

5. Заключение

Таким образом удалось установить, что использование безразрушительного метода определения модуля упругости материала посредством возбуждения свободных колебаний алюминиевых образцов с плотным прямоугольным поперечным сечением с последующим применением универсальной зависимости [1] дает достоверные результаты. Проверку точности получаемого результата для модуля упругости на основе такого теоретико-экспериментального подхода предстоит установить на основе других методов экспериментирования, хотя уже и сейчас можно убедиться в высокой точности результата из-за близости значений измеренных собственных частот колебаний образцов к использованной универсальной формуле (Рис.2.).

Для усовершенствования метода и дальнейших проверок его точности необходимо продолжить проведение экспериментов по выявлению достоверных упругих характеристик материалов, как используя различные материалы для образцов, так и в условиях других лабораторий, применяя различные методы экспериментирования. Чисто проведенные эксперименты помогут решить как вопросы с реальной картиной колебаний коротких балок, так и с использованием полученных результатов для точного установления механических характеристик материалов на основе предлагаемого подхода.

4. Литература

1. Чириков, В.А. Анализ универсальной формулы собственных частот поперечных колебаний коротких балок со свободными концами. – Научни известия на НТСМ, Година XXIII, брой 2(165), юни 2015, сс. 349-352. (ISSN 1310-3946).
2. Чириков В.А., Димитров Д.М., Костов К. П. Унивеуниверсальная экспериментальная зависимость для определения собственных частот поперечных колебаний коротких балок со свободными концами. – Научни известия на НТСМ, Година XXII, Брой 1(150), юни 2014, том II, сс. 295-299 (ISSN 1310-3946).
3. Тимошенко С.П., Колебания в инженерном деле. Наука, 1967, с. 444.
4. Димитров. Д.М., Използване на динамични методи за определяне на еластичните константи на материали получени по метода на праховата металургия, – Научни известия на НТСМ, Година XXI, Брой 2(139), Юни 2013, стр.433-435 (ISSN 1310-3946).
5. ASTM E1876 - 09 Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, – ASTM –Int'l, USA, 2012.
6. Chirikov V.A., On the Range of Rotary Inertia and Shear Effects for Beams. Applied Mechanics in the Americas – B: Proc. of PACAM VII in Temuco, Chile, vol. 9, 2002, pp. 9-12.

5. Благодарность

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке Национального фонда научных исследований Болгарии, ТУ-Варна, проект НП-17/2015 г.

Для контактов:

Чириков Виктор Алексеевич, кафедра Технической механики, Технически университет – Варна, ул. Студентска 1, г. Варна 9010, Болгария. Тел: +359-52-383-686, Факс: +359-52-302-771, chirikov@tu-varna.bg

ПРОИЗВОДСТВО, ИНЖЕНЕРИНГ И ДОСТАВКИ НА ЦЯЛОСТНИ РЕШЕНИЯ И ОБОРУДВАНЕ

- системи за мониторинг на шум, вибрации, процес-параметри, вибрационни изпитания
 - вибрационен контрол и мониторинг
- мониторинг и контрол на сеизмични параметри, вибрации на сгради, промишлени и строителни обекти
 - микроклимат, газови емисии
- ултразвуково безконтактно измерване на дебит, утечки



Преносими шумомери и акустични анализатори



Многоканална, мултипараметърна и многозадачна система за шум и вибрации, PULSE LAN-XI



Преносими и стационарни терминали за мониторинг на шум, вибрации и параметри на околната среда



Преносими вибрационни анализатори и вибромери



Системи за звуков интензитет, звукова мощност и оценяване на шумови източници



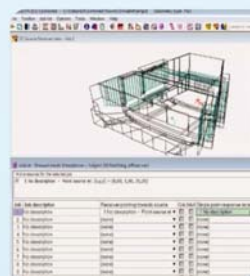
Системи за постоянен мониторинг и виброконтрол на въртящи се машини и съоръжения



Безконтактно ултразвуково измерване и контрол на дебит



Вибрационни и сеизмични мониторингови системи



Акустичното моделиране в строителната акустика. Акустика на помещения

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

spectri!
Специалисти по шум и вибрации



www.spectri.net