

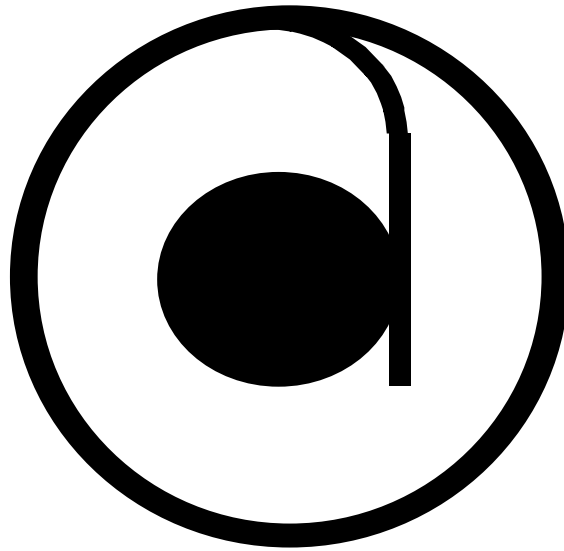
АКУСТИКА

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

Година XV

□ Брой 15

Декември 2013 год.



НАЦИОНАЛНА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКА КОНФЕРЕНЦИЯ *АКУСТИКА 2013*

11-12.10.2013 г.
Варна

29-30.11.2013 г.
София

**СЪЮЗ ПО ЕЛЕКТРОНИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И СЪОБЩЕНИЯ,
НАЦИОНАЛНА СЕКЦИЯ ПО АКУСТИКА
ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ
БЪЛГАРСКА АСОЦИАЦИЯ ЗА ОБЩЕСТВЕН КОНТРОЛ И
УПРАВЛЕНИЕ НА ШУМА
ИНСТИТУТ ПО МЕХАНИКА-БАН
ТУ-ВАРНА КАТЕДРА „РАДИОТЕХНИКА”
СПОНСОР фирма СПЕКТРИ ЕООД**

Организационен комитет

Председател: проф. д-н М. Миховски, инж. Б. Михайлов, доц. д-р М. Георгиев

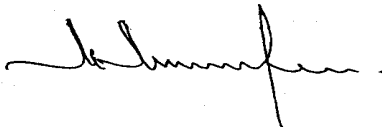
Членове: доц. д-р И. Кралов, доц. д-р Г. Евстатиен, н.с. В. Топалова,
доц. д-р Хр. Драганчев, доц. д-р Ек. Сираков,
инж. Г. Кулишев, доц. д-р Й. Иванова

ТЕМАТИКА:

**Фундаментални и научно-приложни проблеми на акустиката:
Електро-акустика; строителна акустика; акустика на зали,
Обработка на звукови сигнали; Хидроакустика;
Физическа акустика; Вибрации на машини;
Въздействие на шум и вибрации върху човека;
Акустичен безразрушителен контрол;
Нормативна база**

**В сп. Акустика, год. XV, бр.15, 2013 г. са отпечатани
доклади, включени в научната програма на
Националната конференция “Акустика 2013”,
проведена във Варна на 11-12.10.2013 г. и
в София на 29-30.11.2013 г.**

Председател на Програмния комитет:



(проф.д-н М. Миховски)

ISSN 1312-4897

Редакционна колегия: проф.д-н М.Миховски, доц. 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, 2013 г.**

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2013”	Варна 11 - 12.10.2013 г. София 29 - 30.11.2013 г.
Година XV	□ Брой 15	Декември 2013 г.

АКТУАЛНИ НОВИНИ В ОБЛАСТТА НА ШУМА И ВИБРАЦИИТЕ ОТ СПЕКТРИ ЕООД

Борис Михайлов, Татяна Георгиева
СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421,
spectri@spectri.net, www.spectri.net

Abstract: In the recent paper are presented as general overview the SPECTRI Ltd. activity and related news – in Jan.-Nov. 2013. 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.

1. Обзор:

През 2013 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.

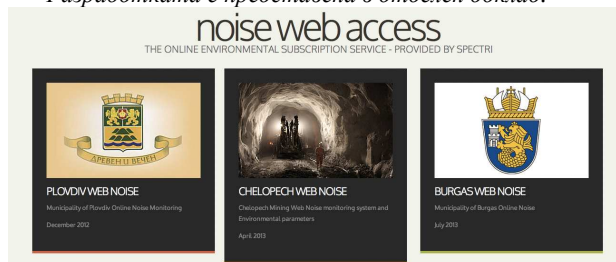
СПЕКТРИ ЕООД постоянно и организирано продължава да се развива като национален център на компетентност в областта на шума и вибрациите.

- 1.1. Стартирана собствена разработка на портално решение, маркирано под наименованието “Spectri WEBNOISE.eu” – като “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.
- 1.2. Реализация на проекти със стратегическо значение:
 - Планове за действие към Стратегически Карти за Шум, за гр. Бургас, Русе и Плевен;
 - Доставка по Оперативна Програма на оборудване за измерване на Звуков Интензитет и Идентификация на шумови източници;
 - Доставка по Оперативна Програма на оборудване за нискочестотно калибриране на виброизмерително оборудване;
- 1.3. Потвърждение на сертифициране на ОКС “СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ” по БДС EN ISO 17020:2012.
- 1.4. Организиране и инициране на сертифициране за производство, консултантски услуги, доставка и сервиз на измервателно оборудване за шум и вибрации – по ISO 9001:2008.
- 1.5. Участие в симпозиуми и изложения:
 - Булконтрола 2013;
 - Дефектоскопия 2013;
 - ММО 2013

- Акустика 2013;

- 1.6. Новини от партньора на СПЕКТРИ ЕООД в областта на шума и вибрациите, Brüel & Kjær - Дания.
 - 1.7. Новини от партньора на СПЕКТРИ ЕООД в областта на вибрационния мониторинг, PCH Engineering - Дания.
 - 1.8. Нови договорни отношения с лидера в областта на производството на сеизмични мониторингови модули и системи – Instantel - Канада.
2. Портално решение, “Spectri WEBNOISE.eu” и начало на собствено производство:

Разработката е представена в отделен доклад.



Фиг. 1 СПЕКТРИ портал WEBNOISE.EU

СПЕКТРИ – нови продукти:

- Мониторингов Терминал;
- Мониторинг на pH;



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



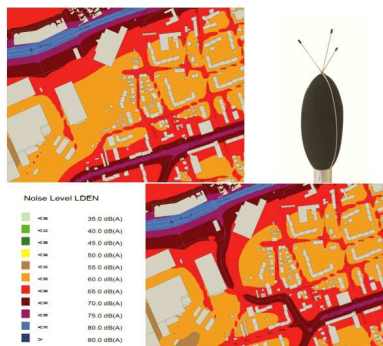
Фиг. 3 Платформа Webnoise.EU за мониторинг на шум и с възможност за мониторинг на рН

3. Ключови проекти на СПЕКТРИ през 2013 г.:

3.1. Планове за действие към Стратегически Карти за Шум (СКШ), за гр. Бургас, Русе и Плевен;

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

Шумът е един от факторите с неблагоприятно въздействие върху населението в големите градове. Породен от развитието на промишленото производство, на пътническите, товарните и водните транспортни средства и масовият градски транспорт. Дългогодишните изследвания показват, че нивото на шума в последните години нараства с 1 dB годишно и надминава граничните стойности за съответните населени територии. Промяната на транспортните средства с такива с подобрени шумови характеристики се компенсира с трайно нарастване на моторизацията. Независимо от вида и качеството на жилищния и обществен 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.



Фиг. 4 СПЕКТРИ проекти СКШ и планове за действие

3.2. Доставка по Оперативна Програма на оборудване за измерване на Звук Интензитет и Идентификация на шумови източници;

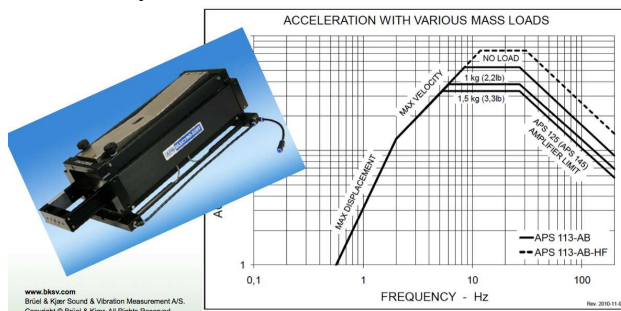
Доставяната система е ново за цялата страна решение. Описание се разглежда в отделен доклад;



Фиг. 5 Brüel & Kjær 2270 базирана система за звуков интензитет

3.3. Доставка по Оперативна Програма на оборудване за нискочестотно калибриране на виброизмерително оборудване;

Доставяната система е ново за цялата страна решение. Описание се разглежда в отделен доклад;



Фиг. 6 Нискочестотно вибрационно тяло

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. 7 Изглед сертификат на ОКС „СПЕКТРИ-ИЗМЕРВАНИЯ“

5. Успешно сертифициране по ISO 9001:2008



Фиг. 8 Изглед сертификат на СПЕКТРИ ЕООД

Обхват на сертификация: **Проектиране, производство, инженеринг, поддръжка, сервис, 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:

1. Булконтрола 2013;
2. Дефектоскопия 2013;
3. ММО 2013;
- Акустика 2013;

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



Фиг. 7 СПЕКТРИ участие в БУЛКОНТРОЛА 2013



Фиг. 9 СПЕКТРИ участие в Дефектоскопия 2013

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. 10 Brüel & Kjær Sonoscout конфигурация

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

7.2. Новини от партньора 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. 11 PCH Engineering нови продукти

8. Ново партньорство начало Септември 2013г. INSTANTEL – Canada: Предлага уреди за мониторинг и контрол на сеизмични параметри, вибрации на сгради, промишлени и строителни обекти.



INSTANTEL акцент - лого



Фиг. 12 Изглед на уред Minimate Pro

9. Изводи:

През първата половина на 2013г., 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/>.

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2013”	Варна 11 - 12.10.2013 г. София 29 - 30.11.2013 г.
Година XV	□ Брой 15	Декември 2013 г.

**РАЗШИРИЕНИЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ И ОБХВАТА НА РАЗРАБОТВАНИЯ
И ПОДДЪРЖАН ОТ СПЕКТРИ ЕООД СОБСТВЕН ПОРТАЛ ЗА
МОНИТОРИНГ НА ПАРАМЕТРИ НА ОКОЛНАТА
И РАБОТНА СРЕДА – www.webnoise.eu.
ПРЕДСТАВЯНЕ НА НОВ ПРОДУКТОВ АКЦЕНТ ОТ СПЕКТРИ, ТЕРМИНАЛ
ЗА МОНИТОРИНГ НА ШУМ В ОКОЛНА СРЕДА ТИП ESMU**

**PRESENTING OF INTERMITTENT RESULTS OF SPECTRI LTD. FOR ON-LINE
MONITORING AND INTERNET ACCESS TO BRÜEL & KJÆR ENVIRONMENTAL NOISE
MONITORING EQUIPMENT**

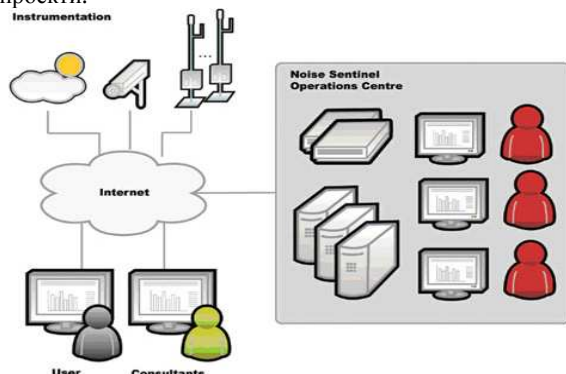
Борис Михайлов

СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 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.

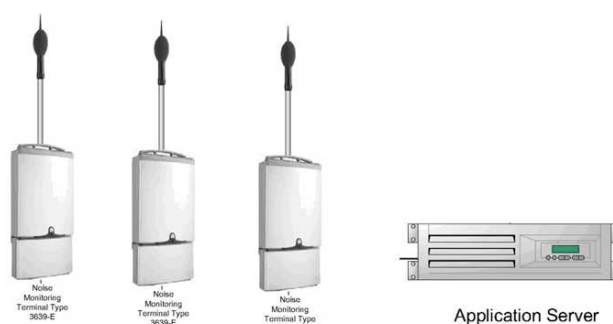
Key words: - Noise, noise behavior, noise measurements, noise monitoring, cloud solution. WEBNOISE, ESMU.

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.



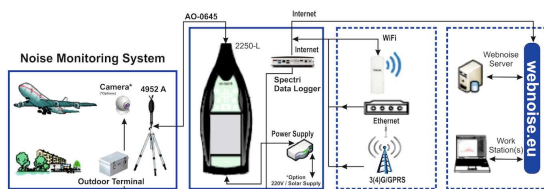
Фиг.1 Концептуална схема WEBNOISE

Хардуерното и софтуерно обезпечаване е осигурено от фирма СПЕКТРИ ЕООД и партньора ѝ фирма Brüel & Kjær - Дания. Цялостна проектна реализация е осъществена от водещата в Р. България фирма в областта на акустичния и вибрационен инженеринг, СПЕКТРИ ЕООД.



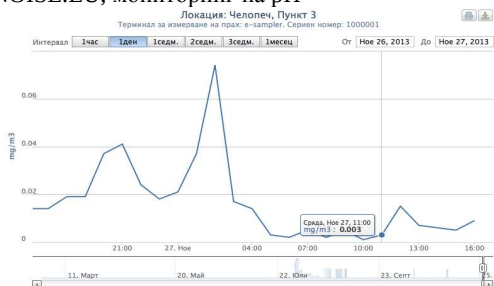
Фиг.2 Терминали и сървер за мониторинг на шум в околна среда

Нов СПЕКТРИ продукт - терминал за мониторинг на шум в околна среда тип ESMU (Environmental Source Monitoring Unit)



Фиг.3 Компоненти на СПЕКТРИ WEBNOISE

Нов СПЕКТРИ продукт – разширение на WEBNOISE.EU, мониторинг на рН



Фиг.4 Динамичен портален дисплей от WEBNOISE.eu

1. Въведение, общи положения:

През 2012 г., СПЕКТРИ ЕООД стартира собствена разработка на портално решение, маркирано под наименованието “Spectri WEBNOISE.eu” – като вид “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.

През дек. 2013г. СПЕКТРИ представи своя разработка на мониторингов терминал на параметри в околната среда – ESMU (Environmental Source Monitoring Unit), както и пушна в продажба нова версия на вътрешния контролер – Spectri Data Logger.

Порталът <http://webnoise.eu> предоставя възможност за публичен достъп и визуализация на измервателните данни.

Системата позволява достъп до 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 (L_{Amin}, L_{Amax}, L_{Аден}, L_{Авечер}, L_{Анощ}, L₂₄, dB(A)) за: последен час, текущ ден, дневно, седмично, месечно, друго (история).

Интересът от големите градове в страната за непрекъснат мониторинг на шума в градска среда е свързан с тяхното задължение за актуализация на всеки 5 години на “Стратегическата Карта за шум”, както и с оглед на респективните им “Планове за действие”. Общините развиват стратегически подход за системно непрекъснато отразяване на промените, настъпващи в акустичната среда на града.

Непрекъснатият мониторинг на шума е единствения достъпен източник за проследяване на дълговременното развитие на акустичната ситуация. В тази връзка, като част от интегрирания подход по дългосрочна редукция на шума в околната среда, разработването на стратегическата карта за шум, както и на плановете за действие към нея в техния завършен вид и последващ методичен континуитет са предвидени да оформят експертния фундамент за целенасочено и ефективно противошумово планиране.

Допълнително, големите оператори и производствени обекти, държащи на своя професионален имидж проявяват активност и готовност за инвестиция в един обществено признат подход на неманипулиран достъп до критична

информация и данни от непрекъснат мониторинг на шум, вибрации и др. допълнителни параметри.

За защита на хората от вредното действие на шума са приети гранични стойности за отделните показатели за шума. За гранична стойности на шума се приема онова ниво, което при продължително действие на шума не предизвиква изменения в целия комплекс от физиологически показатели, отразяващи реакцията на най-чувствителните към него системи на организма.

Показателите за шум и граничните стойности в Р. България са регламентирани с Наредба № 6 от 26 юни 2006 г. за показателите за шум в околната среда, отчитащи степента на дискомфорт през различните части на денонощието, граничните стойности на показателите за шум в околната среда, методите за оценка на стойностите на показателите за шум и на вредните ефекти от шума върху здравето на населението, (Обн. ДВ. бр.58 от 18 Юли 2006 г.), издадена от Министерство на здравеопазването и Министерство на околната среда и водите.

Показателите за шум са физични величини, чрез които се определя шума в околната среда, като се отчитат границите и степента на дискомфорт на хората, изложени на шум, в зависимост от характера на шума, времето на денонощието, предназначението на помещенията за обитаване, характера на териториите и зоните в и извън урбанизираните територии.

Показателите за шум, предмет на тази наредба, са дневно - **Лден**, вечерно - **Лвечер**, нощно - **Лнощ** и денонощно - **L₂₄** ниво на шума. **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).

Граничните стойности на нивата на шума в околната среда, посочени в Приложение 2 към чл. 5, Табл. 2. „Гранични стойности на нивата на шума в различните територии и устройствени зони в урбанизираните територии и извън тях”, са дадени в Табл. 1.

Взаимовръзката между шум и здраве. Шумът в околната среда нараства както като продължителност, така и като географско покритие.

Шумът е свързан с много човешки дейности, но шумът от пътен трафик, и в по-малка степен от железопътния и въздушния трафик е този, който има най-голямо въздействие. Това е реален проблем особено за градската среда: имайки в предвид, че по-голямата част от населението както в Европа, така и в България живее в големите градове, или в населени места, през и покрай които преминават основни пътни трасета (като потоците от автомобилен трафик продължават да се увеличават).

Илюстрацията представя потенциалните механизми за предизвиканите от шума влияния върху човешкото здраве, както и тяхната взаимовръзка.



Фиг.5 Въздействие на шума

Шумът действа като стресов фактор и атакува почти всички органи и системи на човешкия организъм. Високият шум засяга слуховия орган, централната и вегетативната нервна система. Хората стават неспокойни, раздразнителни,

неработоспособни, често имат главоболие и световъртеж, страдат от безсъние. Резките внезапни шумове повишават секрецията на адреналин от надбъбречните жлези, което води до свиване на кръвоносните съдове, нарушаване на периферното кръвообращение и повишаване на кръвното налягане. Всичко това допринася за развитието на хипертония и атеросклероза и може да доведе до тежки съдови инциденти - инсулти, инфаркти, тромбози и др.

Като мощен стресов фактор шумът далеч не изчерпва своето вредно въздействие върху организма само със специфичното поражение на слуховата функция. Той влияе върху нервно-психичната сфера, сърдечно-съдовата система, стомашно-чревния тракт, жлезите с вътрешна секреция, обмяната на веществата, нервно-мускулния апарат и др. В определен смисъл може дори да се твърди, че неспецифичното въздействие на шума заема по-важно място в шумовата патология, отколкото специфичното поражение на слуховата функция. Проучванията показват, че няма орган в човешкото тяло, който да е пощаден от вредното въздействие на шума.

Вредата от нежелания шум е силно изразена върху децата. При тях, шумът може да повлияе на способността им за концентриране, четене и писане. В класове, в които има силен шум, учениците показват значително по-ниски резултати от такива, в друг клас и същото училище, където вредата от шума е избегната. Според данни на Световната здравна организация, на ниво общност, вредата от шума води до намаляване на раждаемостта, нарушаване на способностите за учене, увеличава броя на инцидентите и води до повишена злоупотреба с наркотици. И не на последно място, доказано е, че дълговременно излагане на шум със стойности по-високи от 70 dB(A) може да доведе до необратима загуба на слуха.

Системата за непрекъснат достъп до мониторингови данни за шум в околна среда се състои от следните основни компоненти и решения:

1. Терминали базирани на шумомер тип 2250-L/2250 - тип 3655-A. Производител – Brüel & Kjær-Дания.

Мониторинговите терминали за шум от Brüel & Kjær, от серията “3655” са проектирани и предназначени за постоянен, квази-постоянен и периодичен контрол на параметрите на шума в околната среда. Терминалът позволява бърза и лесна настройка на измервателният профил, както и конфигурация на периодичните мониторингови протоколи.



Фиг.6 Терминал за шум – вътрешен изглед

Терминалът е поставен в защитен куфар, съдържащ в себе си акустичен анализатор тип 2250/2250-L/2270, комуникационни и захранващи аксесоари, окабеляване и изход към външен измервателен микрофон.

2. Дейта логер, тип “SPECTRI DATA LOGGER” (комуникация, изчисления, софтуер, изходи) – един бр. / терминал. Производител – СПЕКТРИ - България.

Поддръжка на криптирани протоколи за обмен на данни между клиента и сървъра.

Поддръжка на протоколи за комуникация между терминали за измерване на шум и Логъра.

Специализирана разработка на софтуер за следене на показателите на LAeq, dB(A) 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 възстановяване на връзката.

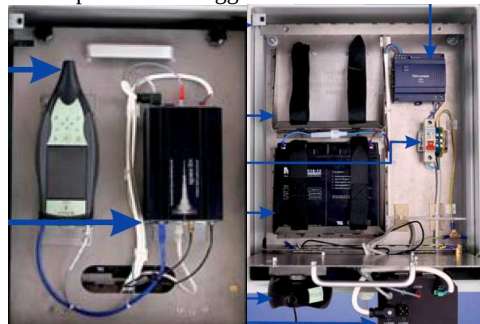
Система за самодиагностика и индикация при проблеми в работата на устройството и комуникацията между него и терминала или между него и сървъра.



Фиг.7 СПЕКТРИ логер на данни - изглед

3. През дек. 2013г. СПЕКТРИ представи своя разработка на мониторингов терминал на параметри в околната среда – ESMU (Environmental Source Monitoring Unit), както и пусна в продажба нова версия на вътрешния контролер – Spectri Data Logger.

На фигурите по-долу са показани някои реални визуализации от последните разработки на СПЕКТРИ – ESMU и Spectri Data Logger.



Фиг.8 СПЕКТРИ терминал ESMU

Основни компоненти на терминала:

- 1 – Измервателен микрофон, Brüel & Kjær, тип 4952
- 2 – Акустичен анализатор, Brüel & Kjær, тип 2250L/2250
- 3 – Логер на данни, СПЕКТРИ, тип SPH1
- 4 – Автономна батерия с интелигентно захранване
- 5 – 2/3G GSM модем
- 6 - GPS приемник
- 7 – Сензор “врата”

4. Потребителски адаптирано решение за всеки индивидуален клиент/проект: Виж. WEBNOISE.EU. Производител – СПЕКТРИ - България. Изградена система в средата на WEBNOISE.EU - по потребителска спецификация, със следните основни визуализационни възможности:

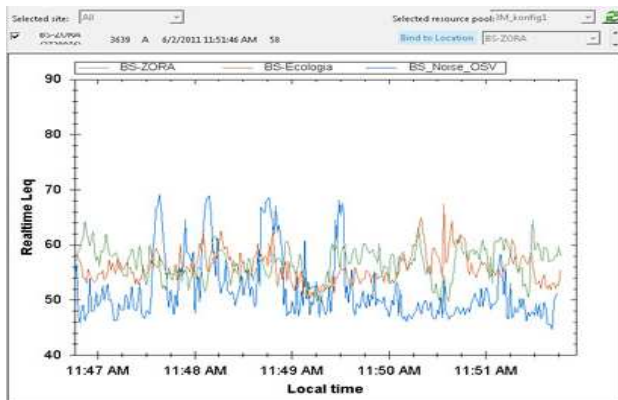
Основен екран, на който, с помощта на Google maps API v3.0 се показва разположението на точките на измерване, на реална карта. Всяка точка носи информация за моментното състояние на LAeq, и изобразява нивото му чрез съответен цвят.



Фиг.9 Начален екран WEBNOISE

Вторични екрани, на които се разполагат графиките, показващи стойностите на шума (LAeq) за определен интервал от време. Интервалът се задава чрез бутон (Часово, Дневно, Седмично, Месечно). Потребителят има възможност да маркира по-кратък интервал върху самата графика, за по-детайлно представяне на стойностите.

Допълнително за всеки дневен период се изобразяват скаларните шумови показатели L_{max}, L_{ден}, L_{вечер}, L_{нощ}, L₁₀, L₉₀.



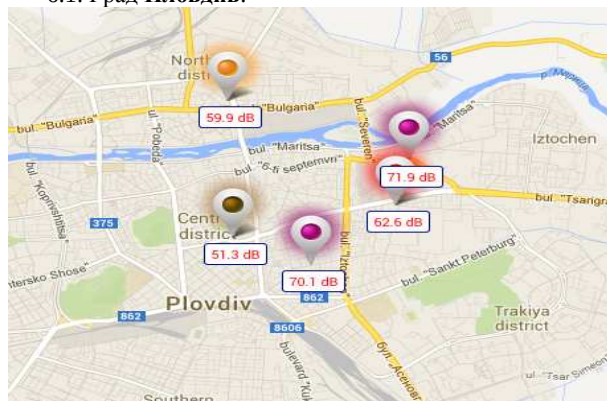
Фиг.10 WEBNOISE данни в реално време

5. Структура на предлаганото решение

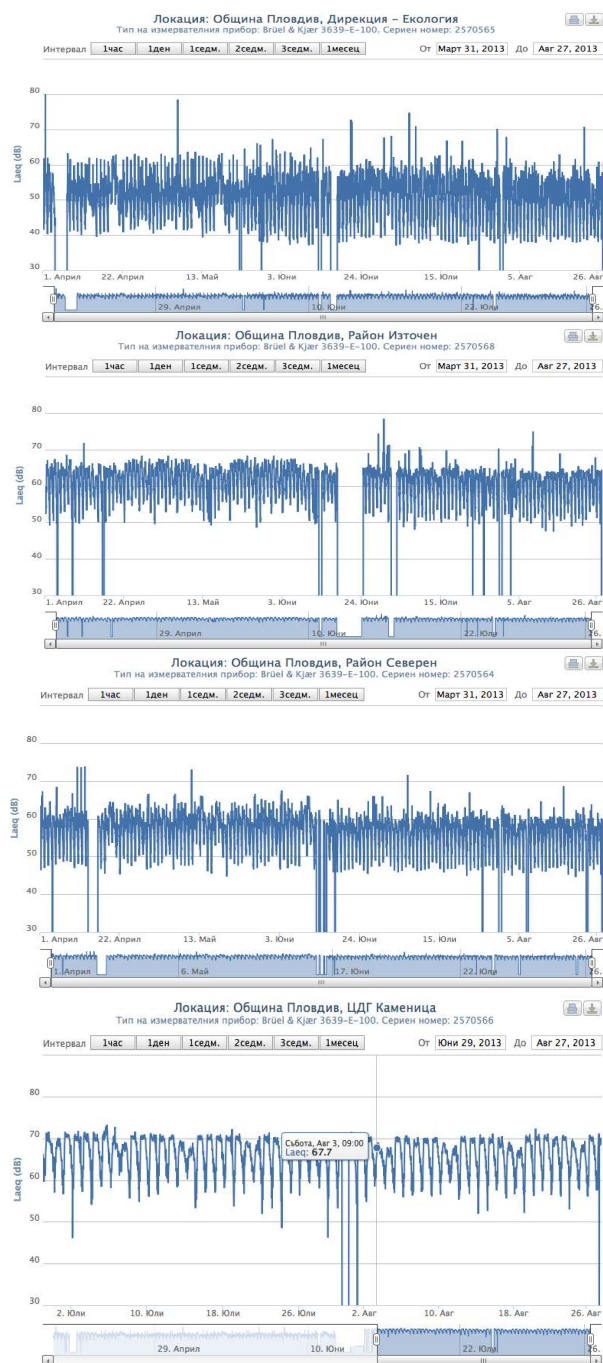
Продуктът „СПЕКТРИ Шумов Уеб Достъп©“ е обект на националното и международно законодателство за защита на интелектуалната собственост. Авторът и притежателят на авторските права на продукта „СПЕКТРИ Шумов Уеб Достъп©“ е фирмата СПЕКТРИ ЕООД - България. Ползването на продукта „СПЕКТРИ Шумов Уеб Достъп©“ се осъществява посредством подновяем годишен абонаментен договор. Абонаментът получава неизключителни права за ползване на Продукта „СПЕКТРИ Шумов Уеб Достъп©“. В периода на действащ абонаментен договор, СПЕКТРИ ЕООД се ангажира да поддържа продукта „СПЕКТРИ Шумов Уеб Достъп©“ (и неговото присъщо интернет базирано решение) в работоспособна функционалност, както и да съхранява, синхронизира и поддържа получаваните от системата измервателни данни. В периода на действащ абонаментен договор, Абонаментът се ангажира да поддържа в изправност и комуникационна функционалност измервателните станции, които комуникират и подават данни към продукта „СПЕКТРИ Шумов Уеб Достъп©“ (и неговото присъщо интернет базирано решение).

6. Междинни резултати от WEBNOISE.eu:

6.1. Град Пловдив:



Фиг.11 Изглед точки на мониторинг



Фиг.12 Резултати терминали Община Пловдив

6.2. Град Бургас:



Фиг.13 Изглед точки на мониторинг



Фиг.14 Резултати – терминали Община Бургас

7. Акценти:

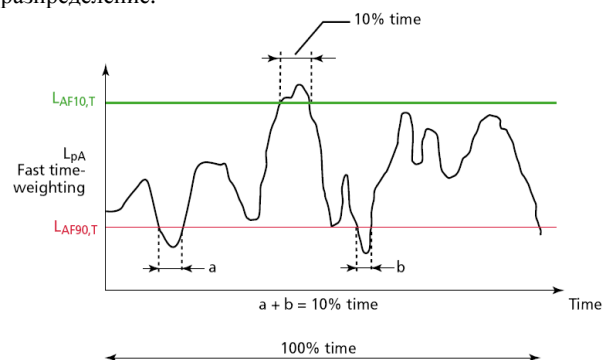
- Точна индикация за шумовото класифициране на всяка една локация;

- Незабавна визуализация при предприемане на мерки за редуция 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, СПЕКТРИ ЕООД.



Фиг.15 Акустично замърсяване в локацията – за 24 часа и за седмица.

Резултантно генериране на исторически статистически профил за L_{Aeq} – процентно 10/90 разпределение.



Фиг.16 Използвани и вече внедрени данни за L_{10} и L_{90}

Като допълнителен показател за шума се използва L_{max} за територии подложени на въздействието на авиационен шум. То представлява максималното ниво над дадена територия. Граничната стойност на L_{max} е 85 dB(A).

№	Територии и устройствени зони в урбанизираните територии и извън тях	Еквивалентно ниво на шума в dB(A)		
		ден	вечер	нощ
1	Жилищни зони и територии	55	50	45
2	Централни градски части	60	55	50
3	Територии, подложени на			

№	Територии и устройствени зони в урбанизираните територии и извън тях	Еквивалентно ниво на шума в dB(A)		
		ден	вечер	нощ
	въздействието на интензивен автомобилен трафик	60	55	50
4	Територии, подложени на въздействието на релсов железопътен и трамваен транспорт	65	60	55
5	Територии, подложени на въздействието на авиационен шум	65	65	55
6	Производствено-складови територии и зони	70	70	70
7	Зони за обществен и индивидуален отдих	45	40	35
8	Зони за лечебни заведения и санаториуми	45	35	35
9	Зони за научно изследователска дейност	45	40	35
10	Тихи зони извън агломерациите	40	35	35
Забележка: Граничната стойност на максималното ниво на шума при прелитане на летателно средство над определена територия е 85 dB(A).				

Табл.1 Гранични стойности на нивата на шума в различните територии и устройствени зони в урбанизираните територии и извън тях

8. ИЗВОДИ:

Непрекъснатото усъвършенстване и развитие на компонентите на WEBNOISE води до все по-целенасочено акцентирание върху безотказната работа на платформата и постоянното гарантиране на достъпни и лесно разбираеми данни за мониторинг на шум и доп. параметри в околната среда.

Проследявайки резултатите от натрупваните данни от поддържания от СПЕКТРИ ЕООД портал WEBNOISE.eu, недвусмислено се потвърждава, че комбинираният подход от непрекъснат мониторинг на шум в околната среда и извеждането му посредством облачна услуга на обществено достъпно ниво допринасят за създаването и развитието на надежден и значим непрекъснато актуализиращ се инструментариум за целенасочено адресиране на проблема с акустичното замърсяване.

За целите на регулярното обследване на акустичното състояние в околната среда, недвусмислено най-достоверния и надежден метод е използването на подходяща и проектирана в съответствие с актуалните международни стандарти система за непрекъснат мониторинг и проследяване на шумовото замърсяване, в комбинация с осигурен непрекъснат обществен достъп.

Постига се ясна разпознаваемост на характеристиката и природата за всяка една локация. Времево отчетливо се различава типичния индивидуален времеви шумов профил за подходящи интервещионни мероприятия.

За инженерингови и експертни цели, непрекъснато натрупваните интегрални и статистически стойности формират един незаменим и изключително ценен източник на надеждни и верифицирани данни.

ЛИТЕРАТУРА

- [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] Ръководство за добра практика за изготвяне на стратегически шумови карти и предоставяне на свързаните данни за шумова експозиция (разработена от работната група за шума към ЕС – WG-AEN, 13.01.2006);
- [3] Закон за защита от шума в околната среда (Обн. ДВ, бр.74/2005);

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2013”	Варна 11 - 12.10.2013 г. София 29 - 30.11.2013 г.
Година XV	□ Брой 15	Декември 2013 г.

КОНФИГУРИРАНЕ НА СИСТЕМИ БАЗИРАНИ НА ИЗМЕРВАНЕ НА ЗВУКОВ ИНТЕНЗИТЕТ, ОПРЕДЕЛЯНЕ И РАМКИРАНЕ НА ЗВУКОВИ ИЗТОЧНИЦИ

CONFIGURATION OF SOUND INTENSITY BASED SYSTEMS. NSI AND RANKING OF NOISE SOURCES

Борис Михайлов¹, Милчо Георгиев²

^{1, 2} СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421,

spectri@spectri.net, www.spectri.net

² ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, София 1700, georgievmt@spectri.bg

Abstract: In the recent paper is presented the general definition of sound intensity technics, and the reasons for using it. A presentation is made of the patented technics from the SPECTRI Ltd. partner, the company Brüel & Kjær – for Noise Source Identification (NSI), and noise sources ranking. Hardware and software equipment is provided by the SPECTRI Ltd. partner, the company Brüel & Kjær - Denmark.

Key words: Sound intensity, sound power, NSI.

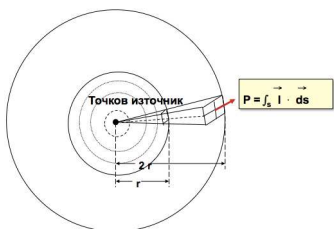
1. Въведение, общи положения:

През 2013 г., СПЕКТРИ ЕООД продължи активността си на Българския пазар в сферата на реализация на иновативни и уникални за страната проекти. Такива са и разглежданията в настоящия доклад системи, базирани на звуковия интензитет – за определяне и рамкиране на звукови източници.

1.1. Интензитет на звука

Най-общо казано, изменението на звуковото налягане се регистрира от човешкото ухо, то е това, което човек чува в дадена област на местоположение в пространството. Нивото на звуково налягане определя въздействието върху човека и се измерва в dB.

Звуковата мощност е степента на излъчвана енергия от даден източник на звук, а интензитета на звука е осреднен по време вектор, процент от енергийния поток през единица площ. Тъй като е усреднен по време, той реално представлява енергия, която се движи в различни направления (напред/назад) и по този начин може да се неутрализира (т.е. ако няма енергиен поток, няма и интензитет).



Фиг. 1 Звукова мощност от звуков интензитет

1.2. Защо се измерва звуковия интензитет?

Една от причините е свързана със задачите по контролиране на шума на работното място. При определяне на въздействието от шум в работни процеси, измерванията на звуковото налягане се провеждат в случай на риск за увреждане на слуха на работещите и с цел дефиниране на необходимост за редукция на шума. За да бъде намален

шума, трябва да се знае колко шум се излъчва и съответно от коя машина.

Звуковата мощност от отделните машини трябва да се знае и те да се класифицират в зависимост от нивата ѝ. Веднъж идентифициран, източникът от най-шумните машини следва да бъде анализиран - с цел дефиниране и рамкиране на отделните компоненти излъчващи определени нива звук.

Звуковата мощност може да бъде определена на базата на звуковото налягане, само при строго контролирани условия (при направени конкретни допускания за звуковото поле). Специално изградени стаи (акустични или реверберационни камери) отговарят на тези изисквания, но при тях, източникът на шум трябва да бъде позициониран вътре, което може да се окаже в редица случаи невъзможно (с оглед конкретното разположение на източника, както и очаквани прекомерни разходи). Една подходяща алтернатива е определянето на звуковата мощност чрез измерване на интензитета на звука.

2. Измерване на звуковия интензитет

Измерванията на място биха могли да се реализират посредством проба за звуков интензитет и анализираща част (анализатор тип PULSE LAN-XI или ръчен модел тип 2270-G от Brüel & Kjær), както и използвайки специализиран софтуерен инструментариум за определяне на процеса и конкретни съпътстващи операции - съгласно съответните национални и международни стандарти и изисквания.

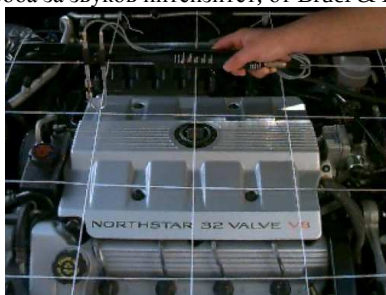
За измерване на звуков интензитет се използва специализирана проба за звуков интензитет (в съответствие с IEC 1043 Клас 1). Пробата се състои от 2 бр. ½" микрофони, с патентована технология за фазова корекция, която позволява изключително точното привързване на нискочестотната фаза и по този начин се реализира изключително точното резултатно измерване на вектора на звуковия интензитет.



Фиг. 2а Преносима система за интензитет на звука, тип 2270-G от Brüel & Kjær



Фиг. 2б Проба за звуков интензитет, от Brüel & Kjær



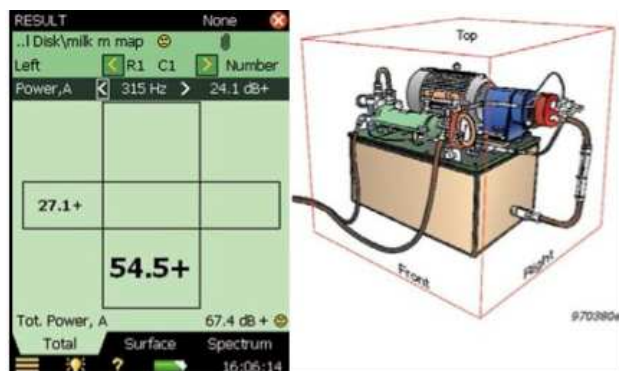
Фиг. 2в Реално сканиране и измерване на звуков интензитет – използвайки проба за звуков интензитет от Brüel & Kjær

От огромно определящо точността и надеждността на работа значение е, преди и след измерване на звуковия интензитет да се проведе процедура на калибриране на пробата на звуковия интензитет – използвайки патентования от Brüel & Kjær калибратор за звуков интензитет, тип 4297.



Фиг. 2г Калибриране на проба за звуков интензитет – използвайки патентования от Brüel & Kjær калибратор за звуков интензитет, тип 4297

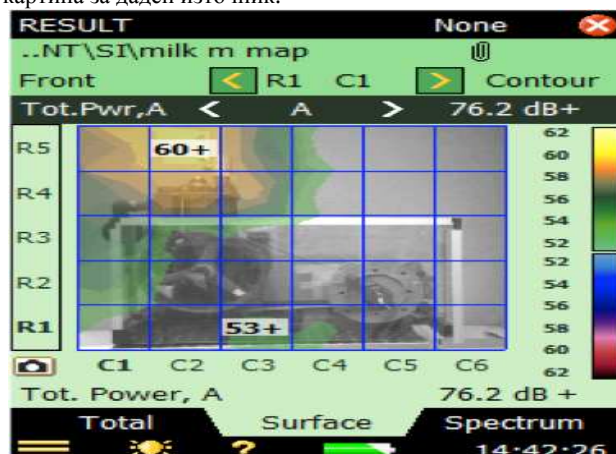
Следвайки целенасочен и стандартизиран метод и конкретна процедура, операторът избира и дефинира параметрите за всяка една машина и след сканиране на съответните въведени повърхности получава индивидуални и в последствие резултатна стойност на звуковата мощност.



Фиг. 3 Изглед работно определяне на звукова мощност, посредством звуков интензитет – използвайки тип 2270-G от Brüel & Kjær

2. Картографиране на източник и ранкиране на звуковите източници

С цел определяне на конкретните въздействащи източници на шум, се провежда процедура на сканиране, измерване на звуков интензитет и резултатно определяне на звуковата картина за даден източник.



Фиг. 4 Измервателна процедура на картографиране на шума – използвайки тип 2270-G от Brüel & Kjær



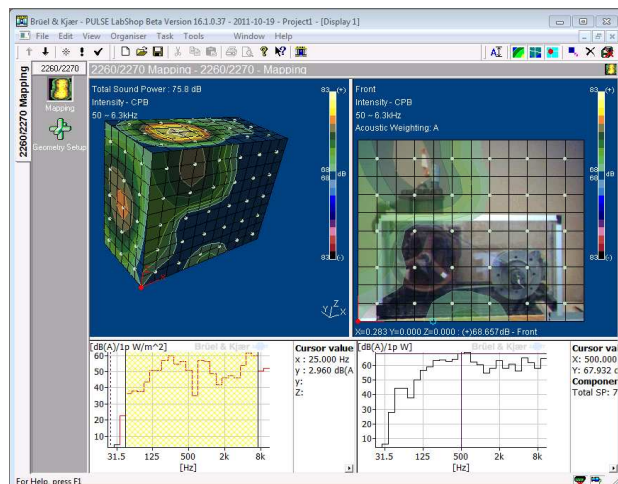
Фиг. 5 Резултат: картографиране на шума – използвайки тип 2270-G от Brüel & Kjær

3. Инженеринг, пост-картографиране и симулиране на промени в източника

Използвайки пост-процесорния софтуерен инструментариум от Brüel & Kjær, PULSE NSI тип 7752, се обработват получените посредством измерване на звуковия интензитет резултатни индивидуални секторни стойности на звуковата мощност.

Софтуерът визуализира акустичното излъчване на всяка една основна индивидуална част от дадена машина, изчислява звуковата мощност, както и ни позволява точно рамкиране на всеки един конкретен източник.

При промяна в дизайна и/или акустичната характеристика на продукта, може да се симулира резултатната нова звукова мощност и индивидуална звукова картина на източника.



Фиг. 6а Изглед софтуерен инструментариум от Brüel & Kjær, PULSE NSI тип 7752

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Международен стандарт за определяне на звукова мощност, посредством инструментариум за звуков интензитет: ISO 9614-2;
- [2] Документация на Brüel & Kjær: софтуерна платформа за определяне на звукова мощност и определяне източниците на шум (NSI), BZ-7233.



Фиг. 6б Изглед акустичен индивидуален профил - използвайки софтуерен инструментариум от Brüel & Kjær, PULSE NSI тип 7752

4. Изводи:

Използвайки технологията и изключително надеждния патентован инструментариум от Brüel & Kjær за измерване на звуков интензитет, се реализират следните основни задачи:

- Независимо от условията на измерване, точно определяне на нивата на звукова мощност;
- Определяне и дефиниране на нивата и локациите на акустично излъчване;
- Резултатно генериране на звукова карта на основния източник и последващо визуализиране на индивидуалните му компоненти;
- Моделиране и определяне на мерки за редукция на шума и промяна на акустичните характеристики на отделни продукти и компоненти;
- Надеждна, проследима и високоточна система;

[3] Документация на Brüel & Kjær: софтуерна платформа за определяне на звукова мощност и определяне източниците на шум (NSI), PULSE 7752.

[4] Sven Gade, "Sound Intensity – Theory", Brüel & Kjær Technical Review 3, 4 - 1982.

[5] Документация на Brüel & Kjær: "Звуков Интензитет – дефиниции", Primer.

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2013”	Варна 11 - 12.10.2013 г. София 29 - 30.11.2013 г.
Година XV	□ Брой 15	Декември 2013 г.

МОДЕЛИРАНЕ И МЕРКИ ЗА ОБЕЗШУМЯВАНЕ ПРИ ИЗГРАЖДАНЕ НА ЖИЛИЩНИ И ТЪРГОВСКИ ОБЕКТИ

MODELING AND MEASURES TO REDUCE NOISE IN CONSTRUCTION OF RESIDENTIAL AND COMMERCIAL SITES

Милчо Георгиев ¹⁾, Татяна Георгиева ²⁾

¹⁾ ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, София 1700, georgievmt@spectri.bg

²⁾ СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421,
office@spectri.net, www.spectri.net

Abstract: An approach of research and measures of silencing in the construction of commercial, and modelling of the noise condition of the environment around the site and on the site of the traffic from ventilation and air conditioning systems, etc., In an environment of product LimA based on GIS-pad pitch for the residential or commercial property.

Key words: - Noise, noise state, noise measurement, calibration, sound insulation panels.

1. Въведение, общи положения:

Подходът на оценка на шумовото състояние и предприемане на мерки за обезшумяване при изграждане на търговски обекти на базата на моделиране в околната среда около обекта и във обекта е моделиране в среда на продукта LimA върху ГИС-подложка за терена и за съответния жилищен или търговски обект.

Основните източници на шум са: - пътен трафик; - локални източници от обекта, като паркинг, вентилационни системи и др. Отчитат се всички съществуващи източници.

Моделирането на обекта и определянето на разпространението на шума се извършва на базата на проектни данни за източниците на шум и тяхната звукова мощност. При липса на данни се извършват натурни измервания на шума в околната среда на мястото на разположение на обекта, както и на място на подобни обекти или шумови източници в 10 – 30 точки. Провеждат се симулации на няколко варианта (2-3) на разположение вентилационните системи и на типа, шумопоглъщането и височината на шумопоглъщащи панели с оглед постигане на оптимална шумоизолация на обекта.

Моделирането на обекта е в тримерното пространство в действителни размери.

Моделирането на пътния трафик е - според стандарта XPS31-133, а за промишлени източници - метода за изчисление по ISO 9613-2 (препоръчани от Директива на ЕС 2002/49/ЕК в нейния Анекс II и Наредба 6.

Дефинират се корекции според вида на трафика (поток - продължителен плавен, пулсиращ, ускоряващ пулсиращ и намаляващ пулсиращ поток), корекции според наклона на пътя (път „хоризонтален“ – наклон < 2%; път „нагорен“ – наклон > 2%; път „надолу“ – наклон > 2%;), корекции според пътната повърхност (гладък асфалт, порьозна повърхност, циментен бетон и нагънат асфалт, гладки или грубо текстурирани паважни камъни). За промишлените източници се дефинира звукова мощност и местоположение в пространството на обекта и режим на работа (номинален и тих/нощен).

Използват се следните общи параметри:

изчисления на нивата на шума на височина 4 м на открито, при мрежа с размер от 1x1 м до 10x10 м при единични отражения;

- обобщени средногодишни температура на въздуха, влажност на въздуха и процент на благоприятните ветрове. Изчисленията на шума в закрити паркинги и транспортни коридори и се извършва на височина 1.5 м.



Фиг. 1 Шумопоглъщащи панели тип „LOUVRE“



Фиг.2а Шумозащитни панели тип „EKRAN“.

Нормиране на шума в околната среда е по Наредба 6 за съответните територии.

Табл.1 Гранични стойности на нивата на шума в различните територии и устройствени зони в урбанизираните територии и извън тях

№	Територии и устройствени зони в урбанизираните територии и извън тях	Еквивалентно ниво на шума в dB(A)		
		ден	вечер	нощ
1	Жилищни зони и територии	55	50	45
2	Централни градски части	60	55	50
3	Територии, подложени на въздействието на интензивен автомобилен трафик	60	55	50
4	Територии, подложени на въздействието на релсов железопътен и трамваен транспорт	65	60	55
5	Територии, подложени на въздействието на авиационен шум	65	65	55
6	Производствено-складови територии и зони	70	70	70
7	Зони за обществен и индивидуален отдих	45	40	35
8	Зони за лечебни заведения и санаториуми	45	35	35
9	Зони за научно изследователска дейност	45	40	35
10	Тихи зони извън агломерациите	40	35	35

Забележка: Граничната стойност на максималното ниво на шума при прелитане на летателно средство над определена територия е 85 dB(A).



Фиг. 26 Шумозащитни панели тип „стена“

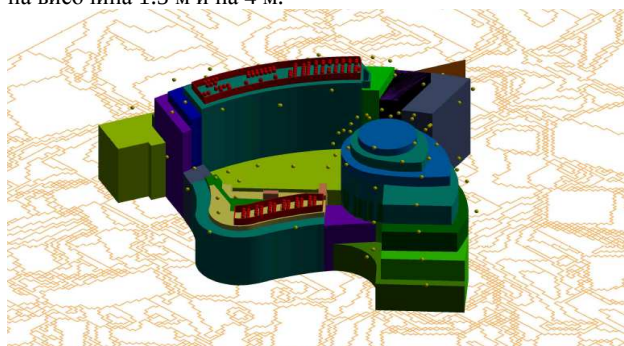


Фиг. 3а Изглед на тяло на вентилационна система (звукова мощност на 1 м - 55-65)



Фиг. 3б Изглед на тяло на вентилационна система (звукова мощност на 1 м - 77-83)

Тримерен модел на терена, сградата и разположение на източниците на шум и на измервателните точки и разпределението на шумовите контури върху терена е показано на фиг.3. Вентилационните системи са разположени на покрива на двете сгради на комплекса. Измервателните точки са разположени около сградата на различни коти за да се обхване напълно проектният обект. С оглед оценка на ошумяването в околната среда и на съществуващите съседни сгради в радиус от 800 м са дефинирани и измервателни точки за всяка съседна сграда на височина 1.5 м и на 4 м.



Фиг. 3.1 3D изчислителен модел.

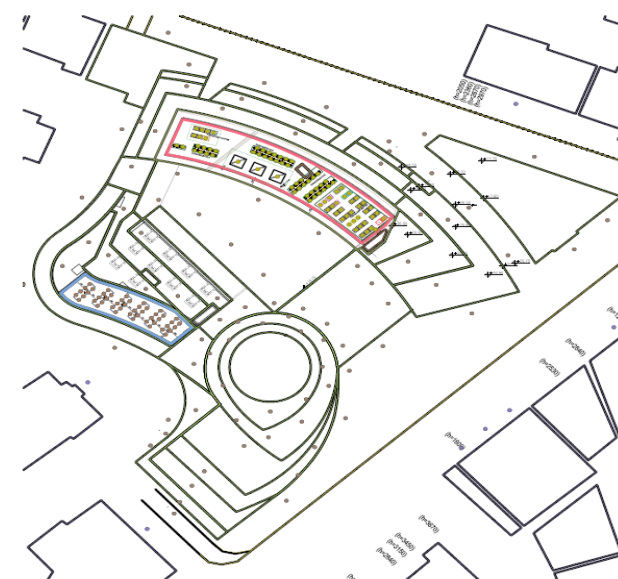
Табл. 1 Източници на шум в околната среда

Кат.	Леки МПС			ТРАФИК ПАРАМЕТРИ			Тежки МПС	
	ДЕН	ВЕЧЕР	НОЩ	СКОРОСТ	ДЕН	ВЕЧЕР	НОЩ	СКОРОСТ
A0	8703	2487	1243	50	2176	870	559	40
F	128	37	18	35	13	4	1	30
A	3 535	1 010	505	35	354	81	25	30
A	3 535	1 010	505	45	354	81	25	40
E	256	73	37	30	8	2	1	25
D	511	146	73	30	13	4	2	25
E	256	73	37	25	8	2	1	20
E	256	73	37	25	8	2	1	20
E	256	73	37	30	8	2	1	25

Табл. 2 Звукова мощност на вентилационните тела и височина

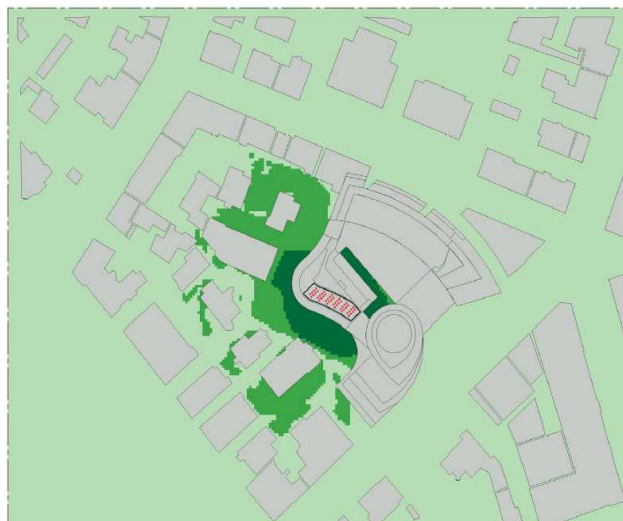
ВЕНТ.ТЕЛА	ПАРАМЕТРИ		
ТИП	ЗВУК.МОЩНОСТ	ТОЧКА ВИСОЧИНА	
DAIKIN	PNL 69dB	96 CM	
TOSHIBA	PNL 83dB	92 CM	
CARRIER	PNL 88dB	121 CM	
РАЗПОЛОЖЕНИЕ	Бр.	ВЕНТ.ТЕЛА	АКУСТ.БАРИЕРА
КОТА ГРАДИНА:	19	16.75 м	235 см
КОТА ПОКРИВ:	88	33.00 м	220 см
ТОЧКА ИЗМ. СГРАДА 2М ОТ ФАСАДА ЗА СЪОТВ. КОТА (AUF_MРхх) - 101 бр.			
ТОЧКА ИЗМ. СГРАДИ СЪЩ. 2М ОТ ФАСАДА (AUF_Vхх) - 26 бр.			

С оглед оценка на ефекта на намаляване на шума в околната среда и в транспортните коридори и паркинги на сградата – изчисленията в контролните точки се извършват без и със съответни шумопоглъщащи панели.



Фиг. 3.2 Схема на 3D изчислителния модел.

В Резултат на проведените изчисления на създадения модел на обекта са определени шумови карти от отделните източници - вентилационни системи монтирани на покрива на сградата (фиг. 4а и 4б).

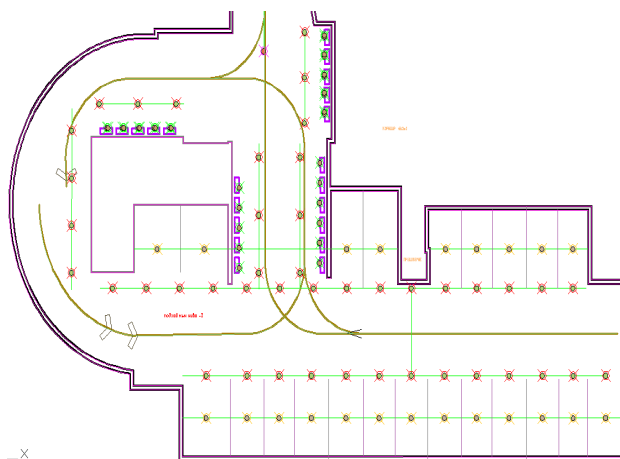


Фиг.4а Шумови контури на нивата на шум в околната среда на терена на обекта без шумопоглъщащи панели



Фиг.4б Шумови контури на нивата на шум в околната среда на терена на обекта със шумопоглъщащи панели

Изчисленията на нивата на шум в транспортните коридори и паркинги в резултат на движение по трасетата и паркоместата и от вентилационните тела са проведени в 83 измервателни точки. Изчисленията са проведени без и със шумозащитни панели в зоните на разположение на вентилационните тела с оглед оценка на нивата на шум.



Фиг. 5 Схема на кота -4.90 на разположение на вентилационните тела и схема на трасетата и паркоместата в сградата.

4. ИЗВОДИ

Създаден е подход на изследване и предприемане на мерки за обезшумяване при изграждане на търговски обекти и моделиране на шумовото състояние на околната среда около обекта и във обекта от автомобилен трафик, от вентилационни и климатични системи и др., в среда на продукта LimA на базата на ГИС-подложка за терена и за съответния жилищен или търговски обект.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Международен стандарт за определяне на звукова мощност, посредством инструментариум за звуков интензитет: ISO 9614-2.
- [2] Brüel & Kjær: софтуер за определяне на звукова мощност и на източниците на шум (NSI), BZ-7233.
- [3] Brüel & Kjær: софтуер за определяне на звукова мощност и определяне източниците на шум (NSI), PULSE 7752.
- [4] Sven Gade, "Sound Intensity – Theory", Brüel & Kjær, Technical Review 3, 4 - 1982.
- [5] Brüel & Kjær: "Звуков Интензитет – дефиниции", технически средства.
- [6] Наредба № 6 от 26 юни 2006 г. за показателите за шум в околната среда, отчитащи степента на дискомфорт през различните части на денонощието, граничните стойности на показателите за шум в околната среда, методите за оценка на стойностите на показателите за шум и на вредните ефекти от шума върху здравето на населението, (Обн.ДВ. бр.58 от 18.07.2006 г.)

ИЗМЕРВАНЕ И АНАЛИЗ НА РЕАГИРАНЕТО НА СТОМАНОБЕТОННАТА КОНСТРУКЦИЯ – ВИБРОРАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА ВИБРАЦИИТЕ ГЕНЕРИРАНИ ОТ РАБОТАТА НА ПРОМИШЛЕНИ ВИБРАЦИОННИ СИТА

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF THE RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES - VIBRATION DISTRIBUTION OF VIBRATION GENERATED BY OPERATION OF COMMERCIAL VIBRATING SCREENS

Милчо Георгиев¹, Татяна Георгиева²

¹⁾ ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, София 1700, georgievmt@spectri.bg

^{1) 2)} СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421,
office@spectri.net, www.spectri.net

Abstract: The aim of this study is the measurement and analysis of the response of reinforced concrete structures of the crush plant with 4 screens in the current state of modeling vibrational state of the construction for the replacement of single with double bottom sieve. Evaluation of vibration condition at work the sieves idle and under load with a view to replacing

Key words: - Vibration, vibrational state, vibration measurement, calibration, vibrating bodies.

1. Въведение, общи положения:

Подходът на оценка на вибрационното състояние на сградата се състои в измерване на вибрациите на кота сита: в точки на средата на пода срещу всяко от 4-те сита и на колоните между ситата на височина 2 м в надлъжно и напречно направление на сградата – общо 14 точки. Оценка и моделиране на вибрационното състояние в резултат на извършена подмяна на едното еднодънно сито с двудънно като останалите.



Фиг. 1 Двудънно сито, точки на измерване

Използвана апаратура

Ръчен измерител 2250 FFT на вибрации с акселерометър 4514-B и софтуер BZ7230 v.2.0 на Bruel & Kear. Ниво (RMS/FFT) на вибрациите в честотна обл. до 1kHz – 6400 линии.

Мултианализатор "Pulse" 3560-B-140 с акселерометър 4514B-001 и вибрационен калибратор 4294 на Bruel&Kear със софтуер „PULSE“ ver.12.



Фиг. 2 Мултианализатор "Pulse" с комплект акселерометри и микрофони

Точки на измерване: Измерване на вибрациите в точки П1 – П4 на пода и в точки К1 х,у – К5 х,у на колоните в двата края и между ситата на кота сита - съгласно приложената схема (фиг. 3).

Режими на работа: Режимите на работа при извършване на измерванията на кота сита в 14-те точки са както следва: - цеха не работи, работа на ситата на празен ход (без товар) последователно на 1 сито, на 1 и 2 сито, на 1 и 2 и 3 сито и работа на 1, 2, 3 и 4 сита (четири режима на работа); - съвместна работа на ситата под товар при работещ цех - последователно на 1, 2 и 3 сита, само на 4-то сито и на 1,2,3 и 4 сита (три режима на работа).

Измервани величини: Амплитуда на виброускорението в m/s^2 (интегриране до вибропреместване в mm) при FFT анализ в честотната област 0.1 до 50 Hz (6400 линии) – максимална стойност. Амплитуда на виброускорението (интегриране до вибропреместване в mm) при FFT анализ в честотната област 1 до 100 Hz - MAX и средно-квадратична стойност – RMS/FFT.



Фиг. 3 Схема на разположение на точките на измерване

За целите на изследването на вибрационното състояние на сградата са поставени стоманени планки в точките на измерване на средата на пода срещу всяко сито и на височина 1.5 - 2 m странично на колоните между ситата. Измерванията на вибрациите се извършват при следните настройки на ситата: 1-во сито на степен 1 (11.5 Hz / 688 min⁻¹; 2-ро сито на степен 3 (12.6 Hz / 750 min⁻¹; 3-то сито на степен 1 (12.6 Hz / 750 min⁻¹; 4-то сито на степен 4 (12.6 Hz / 750 min⁻¹.

Измерванията на вибрациите в контролните точки, съгласно приетата схема, са извършени последователно за режимите на работа, на два етапа и съответстват на процеса на пускане на цеха:

- Работа на празен ход за всяко сито: 1, 2, 4; измерване на вибрациите в точките на пода П1 – П4 (4 бр.) вертикално (Z) и на колоните между ситата К1 – К5 (5 бр.) хоризонтално напречно (Y) и надлъжно (X) на цеха.
- Работа под товар на ситата за всяко сито: 1, 2, 4, 3; измерване на вибрациите в точките на пода П1 – П4 (4 бр.) вертикално (Z) и на колоните между ситата в точките К1 – К5 (5 бр.) хоризонтално напречно (Y) и надлъжно (X) на цеха; измерване на вибрациите на крайните колони за двете секции на кота терен в точките Т1, Т2, Т4 – Т9, (7 бр.) хоризонтално напречно (Y) и надлъжно (X) на цеха.

Резултати от измерванията на вибрациите преди подмяната на 4-то сито

- Нивата на вертикалните вибрации при едновременна работа, в точките в средата на плочите пред 4-те сита са в интервала: – за 1-во сито 4.5 - 5.8 mm/s (макс.6.8 mm/s); – за 2-ро сито 2.9 - 6.9 mm/s (макс. 6.9 mm/s); – за 3-то сито 1.7 - 4.8 mm/s (макс.5.7 mm/s); – за 4-то сито 3.3 - 4.1 mm/s (макс.6.3 mm/s). Честотата на вибрациите са в интервала 10.31 – 12.81 Hz. 1-во сито е с повишено вибрационно възбуждане на плочата поради по ниската честота на възбуждане при по-малък дебит (400 t/h), 2-ро сито (630-780 t/h) и 3-то сито (720 – 780 t/h) са с близко вибрационно възбуждане на плочата, 4-то сито (с 550 t/h) е с понижено вибрационно възбуждане поради по-малък дебит. Нивата на вибрациите на колоните между ситата са в интервала 0.65 - 0.82 mm/s (Max. 1,2) за К1, 0.70 - 0.87 mm/s (Max. 1.5) за К2, 0.55 - 0.70 mm/s (Max. 0.95) за К3, 0.56 - 0.63 (Max. 1.0) за К4 и 0.65 - 0.66 mm/s (Max. 1.1) за К4. Честотата на вибрациите са в интервала 9.68 - 12.66 Hz. При извършено симулиране на вибрационното състояние след евентуална подмяна на 4-то ситото не се установи съществено нарастване на вибрациите (~1%).

Резултати от измерванията на вибрациите след подмяната на 4-то сито

Нивата на вертикалните вибрации при едновременна работа, в точките в средата на плочите пред 4-те сита са в интервала:

- за 1-во сито 3.7 - 5.5 mm/s (макс. 7.4 mm/s), като при работа на празен ход, под товар и при номинален товар е 4.9 - 5.5 mm/s; – за 2-ро сито 2.4 - 6.2 mm/s (макс. 6.8 mm/s), като при работа под товар и при номинален товар е 4.0 - 6.2 mm/s; – за 3-то сито 2.6 - 6.6 mm/s (макс. 7.0 mm/s), като при работа под товар и при номинален товар е 3.2 - 6.6 mm/s; – за 4-то сито 2.0 - 5.1 mm/s (макс.7.7 mm/s), като при работа под товар и при номинален товар е 3.9 - 5.1 mm/s. Честотата на вибрациите са в интервала 10.94 – 12.81 Hz.

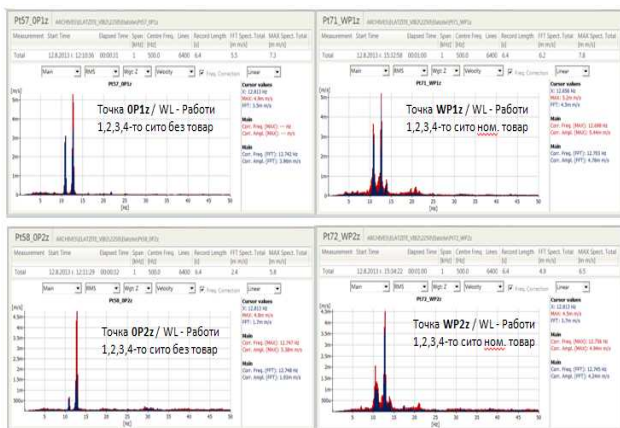
– Прямо предварителните измервания преди подмяна на 4-то сито – нивото на вибрациите при номинално натоварване за 1-во, 2-ро, 3-то и 4-то сито са от един порядък в интервала 4.5-5.8 (макс. 7.8) mm/s, като за 4-то сито се забелязва намаляване на номиналната стойност и увеличаване на максималната стойност на вибрациите.

- При работа на празен ход на 4-те сита се забелязва увеличаване на вибрациите на 1-во сито в резултат на вибрациите на другите, и влиянието на 3-то сито при пускане и особено при спиране върху 1-во сито.

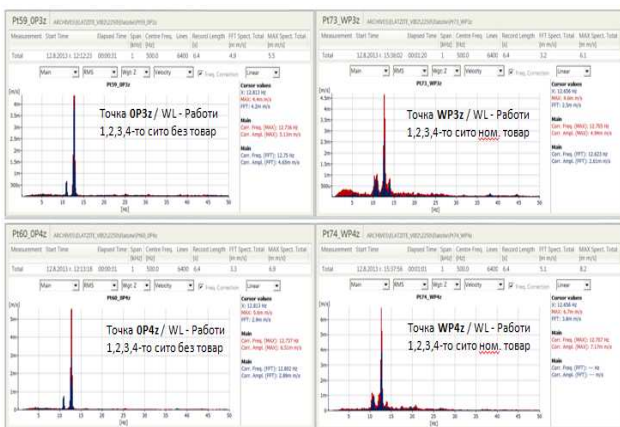


Фиг.4 Разположение на точките на измерване на пода и на колоните

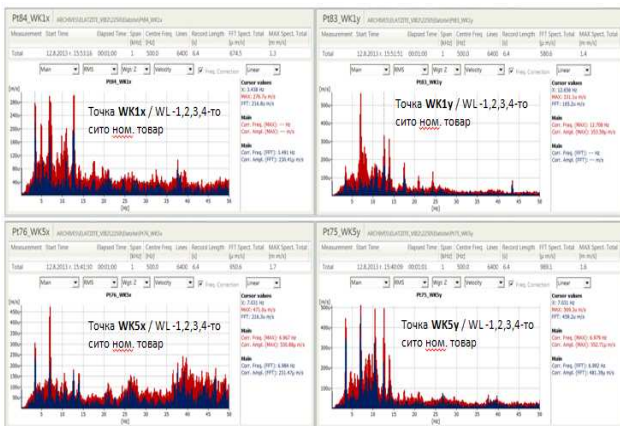
Резултати: Екрани със стойности на виброскоростта FFT Spect.Total/MAX Spect.Total - mm/s, за съотв. честота са дадени на фиг. 5. Резултатите от измерване на вибрационното състояние на сградата се характеризират: – за точки P1z – P4z въздействието е в честотния диапазон 10 - 13 Hz, съответстващ на честотите на възбуждане 11.5 - 12.6 Hz и са над собствената честота на пода на сградата; – за точки K1 x,y – K5 x,y на колоните е в честотни диапазон 5 – 13 Hz.



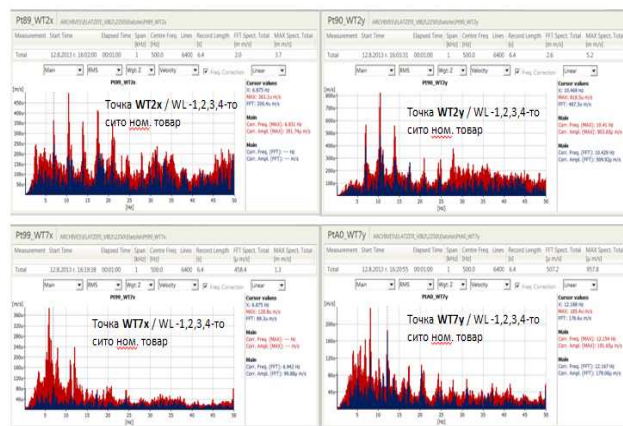
Фиг.5.1 Точки OP1z и OP2z – 1-4 сито без / ном. Товар



Фиг.5.2 Точки OP3z и OP4z – 1-4 сито без / ном. Товар



Фиг.5.3 Точки WK1x,y WK5x,y – 1-4 сито ном. товар



Фиг.5.4 Точки WT2x,y WT7x,y – 1-4 сито ном. товар

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съгласно DIN 4150-3:1999 “Structural vibration – Part 3, за запазване на функционалността на стоманобетонната конструкция е необходимо предаваните вибрации да са до 15 mm/s за честота над 4 Hz и 20 mm/s за честота над 15 Hz.

Максималните стойности на вертикалните вибрации на плочите пред ситата са 2.6 – 6.9 mm/s (макс. 7.4 – 8.2 mm/s - за 4-то сито). Максималните стойности на напречните вибрации на колоните между ситата са 1.0 – 1.6 mm/s. Максималните стойности на напречните вибрации на колоните на кота терен са 1.1 – 1.8 mm/s (макс. 1.9 – 5.2 mm/s - за колона T2x,T2y).

Установените максимални стойности на вибрациите са под допустимите за да се създаде възможност на пораждаване на дефекти на стоманобетонната конструкция.

Не е установено съществено увеличение на вибрационното състояние при замяна на 4-то сито на двудънно: за вертикалните вибрации на средата на плочата пред 4-то сито е от 3.9 – 6.6 mm/s (макс. 7.7 mm/s), подобно е вибрационното състояние на 1-во сито при текущите настройки.

Действителното вибрационно състояние на стоманобетонната конструкция не се променя съществено след замяна и пускане на двудъното 4-то сито. Режима на работа на 1-во и 4-то сита, е от съществено значение за изменението на вибрационното състояние на стоманобетонната конструкция на сградата върху колоните на кота терен.

Необходимо е да се извърши промяна на настройките на 1-во сито на 11.8-12.2 Hz. Установените резонансни честоти при работа на сита са 10.94 (1), 12.81 (2,4), 12.5 (3), виж. Графики Pt57_OP1z, Pt61_LP1z, Pt71_WP1z. Необходимо е да се предприемат действия по инспекция на стоманобетонната конструкция на сградата относно налични пукнатини и открита арматура и се извърши разкъртане на замазката и покриване с уякчен бетон на установените видими дефекти. Необходимо е да се обърне внимание и инспекция на колоните на кота терен означени с точки T2, T4 и T8 и T9, като се обърне особено внимание на T2.

От гледна точка на непрекъснатия работен цикъл на сградата по отношение на нивата на вибрации на плочите на кота сита и на крайните колони на кота терен е необходимо да се инсталира мониторингова система на вибрации за непрекъснат контрол в 4 точки на плочите на кота сита и в 4 - 8 точки на колоните на кота терен.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] DIN DIN 4150-3:1999 “Structural vibration – Part 3.
- [2] Brüel & Kjær: Ръчен измерител 2250 FFT на вибрации с акселерометър 4514-B и софтуер BZ7230 v.2.0.
- [3] Brüel & Kjær: Мултианализатор ”Pulse” 3560-B-140 с акселерометър 4514B-001 и вибрационен калибратор 4294 на Bruel&Kjaer със софтуер „PULSE“ ver.12.
- [4] Vibration monitoring of mashines, Brüel & Kjær Technical Review 2 - 1995.

КОНФИГУРИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИСТЕМИ ЗА КАЛИБРИРАНЕ ПРИ НИСКИ ЧЕСТОТИ

CONFIGURATION AND TESTING CALIBRATION SYSTEM AT LOW FREQUENCIES

Милчо Георгиев¹, Борис Михайлов²

¹ ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, София 1700, georgievmt@spectri.bg

^{1,2} СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421,
spectri@spectri.net, www.spectri.net

Abstract: The aim of the study is configuration and testing of systems to calibrate the low frequencies of vibration sensors and vibrometers in the range 0-200 Hz. Vibrations in the low frequency range are essential for reinforced concrete structures subjected to vibration effects, and various mechanical systems. For they would control the vibrations necessary calibration equipment using accelerometers vibrometers to achieve accurate measurements of the work.

Key words: - Vibration, vibrational state, vibration measurement, calibration, vibrating bodies.

1. Въведение, общи положения:

Калибрирането при ниски честоти изисква вибрационно оборудване осигуряващо възпроизвеждане на вибрационно въздействие с точна форма, синусоидална или с постоянна или променлива честота и зададена амплитуда на сигнала, които да са постоянни за времето на въздействие с оглед калибриране на съответните вибрационни преобразуватели за измерване на вибрации.

Системите за калибриране се състоят обикновено от вибрационно тяло, управляващ блок, усилвател по мощност, генератор - източник на зададен променлив сигнал, вибрационен измерител и/или осцилоскоп за визуализация на вибрационния сигнал.

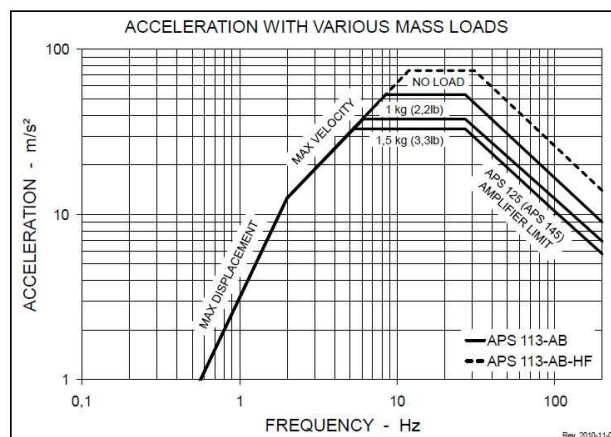
2. Конфигуриране на система за калибриране при ниски честоти

Вибрационно електромагнитно тяло APS 113-AB ELECTRO-SEIS (хоризонтално / вертикално) с въздушно лагуване, на партньорите на Brüel & Kjær – APS Dynamics INC, с технически параметри:

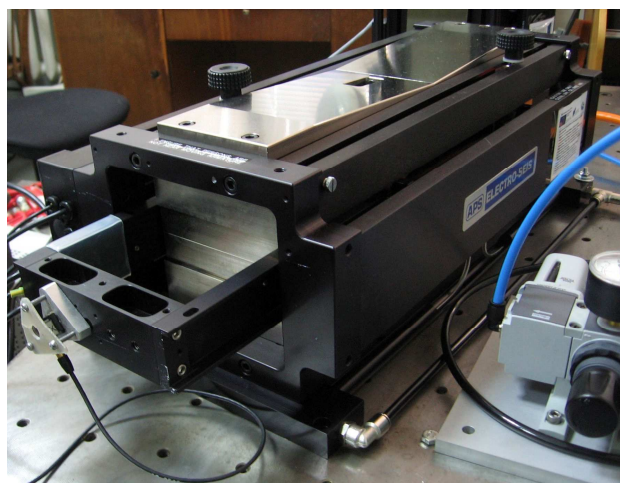
- Честотен обхват: 0 Hz до 200 Hz;
- Възбуждаща непрекъсната сила:
- 0-0.1 Hz – 93N peak (3.5A); 0.1-25 Hz – 133N (3.5A); Над 25 Hz съгл. фиг.1.

- Максимален ток 7A, максимално въздушно налягане 4-5 бара и 0.5 m³/h въздушен поток.

- Максимални ход - 158 mm и скорост до 1000 mm/s;
- Работна температура 5 до 40°C.



Фиг.1 Ускорение при различни изпитвателни маси



Фиг.2а Изглед на вибрационното тяло (H).

Размери на вибрационното тяло (L) 463.6 mm, (H) 177.8 mm, (B) 203.2 mm. Нулево позициониране – изместване на подвижния носач (72.9 mm), маса 38 kg.

Към комплекта на вибрационното тяло са включени контролер за нулево позициониране APS 0109 – Zero Position Controller, приспособление за вертикален монтаж APS 0162 – Vertical Mounting Kit, скрепителни елементи и др. аксесоари.

Усилвател APS 125/APS 145 – Dual MODE AMPLIFIER.



Фиг.26 Изглед на вибрационното тяло (V).

Калибрирането на акселерометрите и виброметрите се извършва по метода на сравнение спрямо еталонен акселерометър.

За еталонен акселерометър за калибриране се използват: – Brüel & Kjær 8305 Piezoelectric accelerometer с честотен обхват 0.2–4400 Hz, с чувствителност 1.25 pC/g и максимално работно и ударно ускорение 1000 g, изход Charge-PE с работна температура -74–200°C; – Brüel & Kjær 4574 – Accelerometer DC response, с честотен обхват 0–500 Hz, с чувствителност 200 mV/g и максимално работно 10g и ударно 10000g, изход Piezoresistive, с работна температура -55–121°C.



Фиг.3 Изглед на Brüel & Kjær 8305 и Brüel & Kjær 4574D.

Следващият компонент е: Генериране на сигнал със зададена форма и амплитуда, измерване и визуализация на реализираното въздействие от вибрационното тяло се извършва в два варианта – използване на отделни компоненти за генериране на сигнал (Програмируем генератор на сигнали) и за измерване (виброизмерител) и визуализация (Прецизен осцилоскоп), (когато разполага с такива съответната лабораторията).

– Генериране на сигнали със зададена амплитуда и форма и визуализация на изходния сигнал на вибрационното тяло.

Vibration control system LDS COMET USB



Vibration control system LDS LASER USB



Фиг.3.1 Изглед на системата за вибрационен контрол на LDS o/c Brüel & Kjær.

– Измервателен усилвател Brüel & Kjær 2525 (CE Charge / Diff Charge): AC, DC, RMS, Peak, Velocity Output, обхваща гамата акселерометри.



Фиг.3.2 Изглед на Brüel & Kjær 2525 – Measuring Amplifier.

За целите на калибрирането и за целите на измерването, за предпочитане е използване на универсалната система PULSE 3050 или 3560-B, 4 или 6 канална, включваща в компакния си обем и възможност за преносимост: генератор на сигнали (програмируем) и измерител и анализатор в честотния диапазон 0-51.2 kHz и 160 dB обхват на измервания сигнал. Управлението и

визуализацията на генерирания и на измерения сигнал се извършва на компютър със софтуера PULSE Reflex.

Frequency Range 0 - 51.2 kHz



Фиг.4 Изглед на Brüel & Kjær LAN-XI 3050

3. Изследване на система за калибриране при ниски честоти

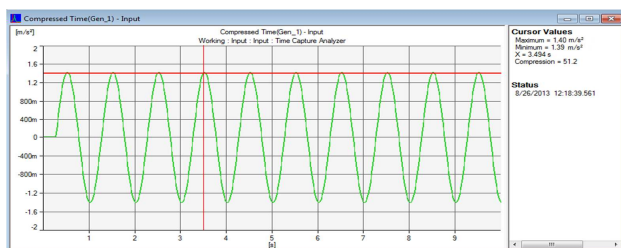
Извършено е изследване на конфигурираната система за калибриране при ниски честоти, като е използван модула PULSE 3560-6-140, акселерометър тип 8305 и софтуерния пакет Pulse ver.17.1.1, включващ: Генератор на сигнали, измерител на сигнали - 4 канала, FFT анализатор, дата рекордер и др., управлението и визуализацията е чрез преносим компютър.

Извършено е генериране на сигнали с постоянна честота 1 Hz и 5 Hz, сигнал с променяща се честота от 1 до 5 Hz и произволен сигнал, ограничен с горна честота до 12.5 Hz и до 50 Hz.

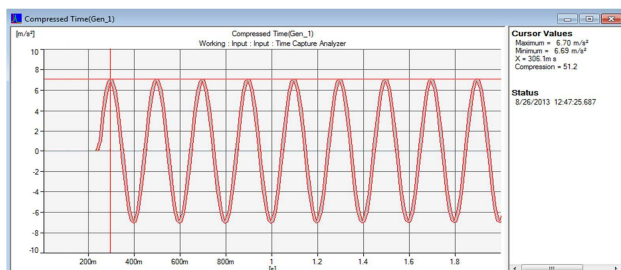
Изследването е извършено за двата варианта на конфигурация и монтаж на вибрационното тяло 113-AB ELECTRO-SEIS (хоризонтално / вертикално).

При всяко от изследванията вибрационно тяло е нулирано – подвижната арматура е позиционирана на $\frac{1}{2}$ от максималния ход 158 mm. Проверени са достиганите параметри за ход, честота и амплитуда съгласно фиг.1. Усилването на сигнала е съобразено със всеки един от диапазоните на работа:

- максимално преместване за интервала 0.6 - 2 Hz;
 - максимална скорост за интервала 2 – 10 Hz;
 - постоянно ускорение 6 – 25 Hz;
 - ограничение на усилвателя за интервала 30 – 100 Hz и 100 – 200 Hz.
- Натоварване с маса 2x40g.

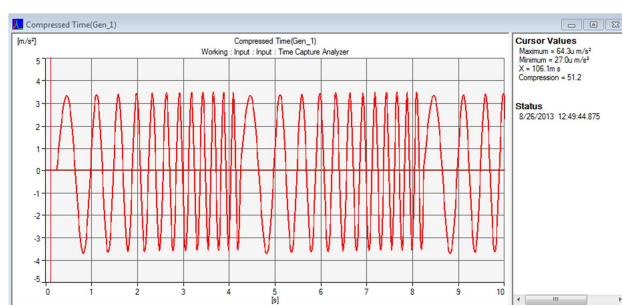


Фиг.5.1 Постоянен сигнал с честота 1 Hz.



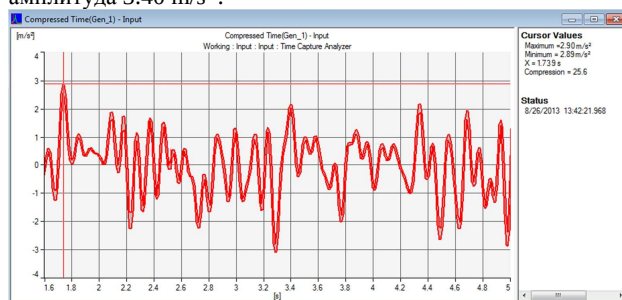
Фиг.5.2 Постоянен сигнал с честота 5 Hz.

Установен е сигнал с постоянна честота и амплитуда: за честоти 1Hz – 1.40 m/s², и за 5 Hz – 6.70 m/s².

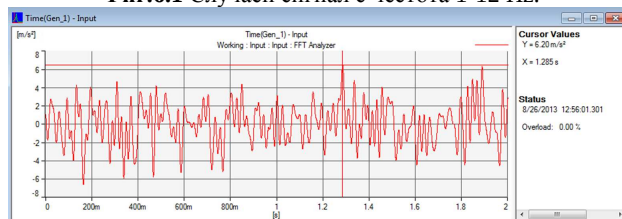


Фиг.5.3 Променлив сигнал с честота 1-5 Hz.

Установен е повтарящ се сигнал с честота: 1Hz–5 Hz и амплитуда 3.40 m/s².



Фиг.6.1 Случаен сигнал с честота 1-12 Hz.



Фиг.6.2 Случаен сигнал с честота 1-50 Hz.

Установен е случаен сигнал при честота: 1-12 Hz и макс. амплитуда: 2.90 m/s², и при 1-50 Hz – 6.20 m/s².

4. Изводи:

Извършено е конфигуриране на система за калибриране при ниски честоти 0 – 200 Hz в 3 варианта ценово ориентирана, отговаряща на изискванията за калибриране на акселерометри и виброметри.

Извършено е изследване на конфигурирана система за калибриране при ниски честоти 0 – 200 Hz с оглед установяване на техническите параметри и функционалност на системата.

Повторяемост на калибрирането със системата при идентична измервателна постановка и условия на калибриране: за обхват до 63 Hz < 0.1 %, за обхват по-голям от 63 Hz < 0.5 %

Конфигурираната система е доставена, внедрена и въведена в експлоатация от СПЕКТРИ ЕООД.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Brüel & Kjær LAN-XI 3050 Ръководство за работа.
- [2] Brüel & Kjær Pulse ver.17.1.1 Ръководство за работа.
- [3] APS Dynamics INC. Вибрационно електромагнитно тяло APS 113-AB ELECTRO-SEIS, Ръководство за експлоатация.

ХОЛИСТИЧЕН ПОДХОД ЗА НАМАЛЯВАНЕ НА ВИБРАЦИИТЕ И ШУМА НА КОРАБИТЕ

доц. д-р инж. Драганчев Хр. Ст., гл. ас инж. Пировски Хр. Ат., ас. инж. Вълчев С. Здр.
 катедра Корабни машини и механизми,
 Корабостроителен факултет, Технически Университет – Варна, България

1. Въведение

Политиката на Европейския съюз (ЕС) за осигуряване на здравословни условия на живот и труд поставя на преден план намаляване на нивото на шум в жилищните територии на населените и на работните места с цел намаляване на професионалните заболявания, предизвикани в резултат на високи нива на шум на работните места и създаване на благоприятни условия за рекреация и възстановяване на хората. Във връзка с това са приети Директива 2002/49 [1] за намаляване на шума в населените места и Директива 2003/10 [2] за минималните изисквания по отношение на здравето и безопасността на хората от въздействието на шума

Друг важен момент в политиката на ЕС е запазване на биологичното разнообразие на териториите на Европа. С директива 92/43 за местообитанията и биологичните видове, Анекс II и Анекс IV, морските бозайници са обявени за защитен вид и се забранява тези животни да бъдат убивани, наранявани или обезпокоявани.

В изпълнение на тези директиви в 7-ма Рамкова програма в тема "Транспорт" е заложена задачата „Холистично намаляване на вибрациите и шума“ с цел „позеленяване на транспорта“. По тази задача на 7-ма Рамкова програма бе разработен проект „Иновативни решения за намаляване на шума и вибрациите на корабите“ (SILENV), в изпълнението на чиито програми съвместно с 14 научни института и университета от Европа участва и колективът на научно-производствената лаборатория „Виброконтрол и диагностика на машини и съоръжения“ (НПЛ"ВДМС") към Технически университет - Варна.

Основна цел на проект SILENV е да се предложи „зелен етикет“ за шум и вибрации на корабите, който включва:

- изисквания за целеви нива на шум и вибрации в корабните помещения и целеви нива на излъчвания от корабите въздушен и подводен шум;
- препоръчителни насоки и решения за изпълнение на тези изисквания.

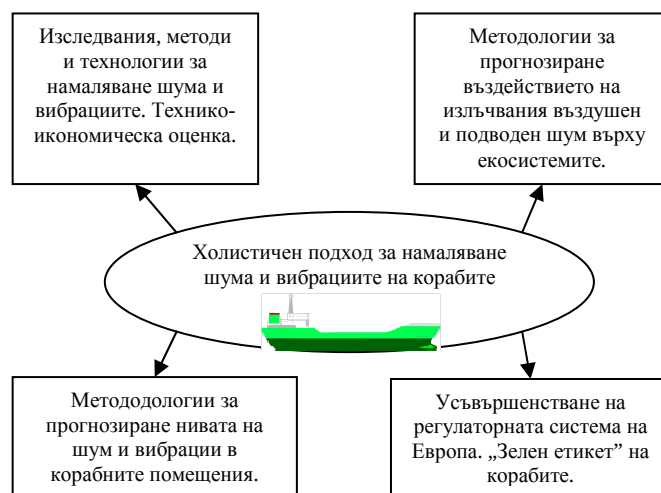
2. Методология на изследване. Основни задачи.

Изпълнението на задачата „Холистично намаляване на шума и вибрациите“ отнесена към водния транспорт изисква разглеждане на технологиите и методите за намаляване на шума и вибрациите в корабните помещения, технологиите и методите за намаляване на излъчвания от корабите въздушен шум на стоянка в пристанище или при движение по реки и канали както и на излъчвания подводен шум, въздействащ върху морските животни в тяхната цялост, а не като

свкупност на самостоятелно разработени технологии и технически решения, удовлетворяващи изпълнението на всяка подзадача сама за себе си. От методологична гледна точка холистичният подход за намаляване на шума и вибрациите на корабите включва следните главни компоненти:

- изследвания, методи и технологии за намаляване на шума и вибрациите на корабните помещения, на излъчвания въздушен и подводен шум. Техничко-икономически анализ на предлаганите решения;
- методологии за прогнозиране на нивата на шум и вибрации в корабните помещения;
- методологии за прогнозиране на въздействието на излъчвания от корабите въздушен и подводен шум върху околната среда;
- усъвършенстване на регулаторната рамка на ЕС, въвеждане на „зелен етикет“ на корабите и разработване на пътна карта намаляване на шум и вибрациите на фаза проектиране.

На фиг. 1 е показана модел на холистичния подход за намаляване на шума и вибрациите на корабите.

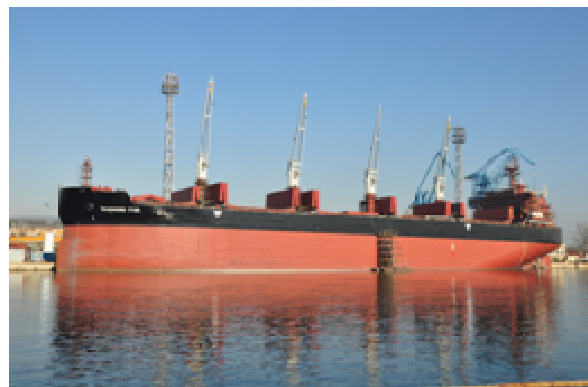


Фиг. 1. Модел на холистичния подход за намаляване на шума и вибрациите на корабите

По-долу ще бъдат показани резултати от научните изследвания, проведени от НПЛ"ВДМС" при изпълнение на проект SILENV.

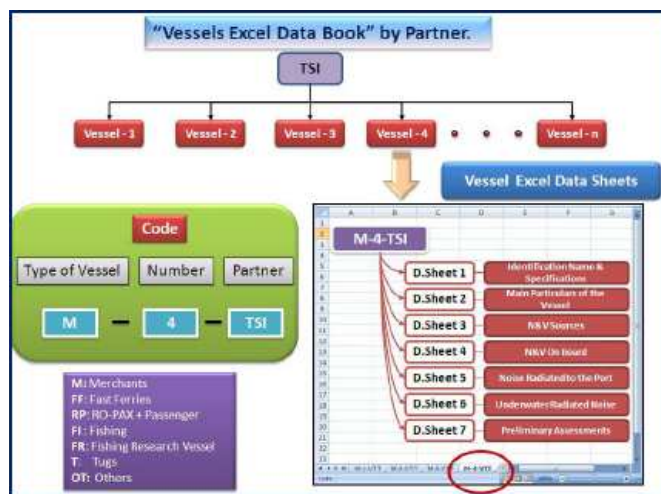
3. Изследвания, методи и технологии за намаляване на шума и вибрациите в корабните помещения, на излъчвания от корабите въздушен и подводен шум.

При изпълнение на изследователските задачи по компонент „Изследвания, методи и технологии за намаляване на шума и вибрациите на корабните помещения, на излъчвания въздушен и подводен шум. Технико-икономически анализ” са проведени следните експериментални и теоретични изследвания:



Фиг. 2. Изследвани от НПЛ”ВДМС” кораби

- систематизиране в база данни към проекта на резултатите от предишните и проведените измервания. На фиг. 3 е показана типова карта на данните за всеки кораб;



Фиг. 3. Типова карта на данните за всеки кораб

- систематизиране на резултатите от проведените, измервания на шум и вибрации в помещенията на 22 кораба по време на ходовите им изпитания, предхождащи периода на изпълнение на проект SILENV;

- измерване на шума и вибрациите в жилищните и служебните помещения на 4 проекта кораби (общо 11 кораба), измерване на излъчвания въздушен шум в пристанище на 3 от изследваните кораби и измерване на излъчвания подводен шум на 2 кораба. На фиг. 2 са показани изследваните кораби;

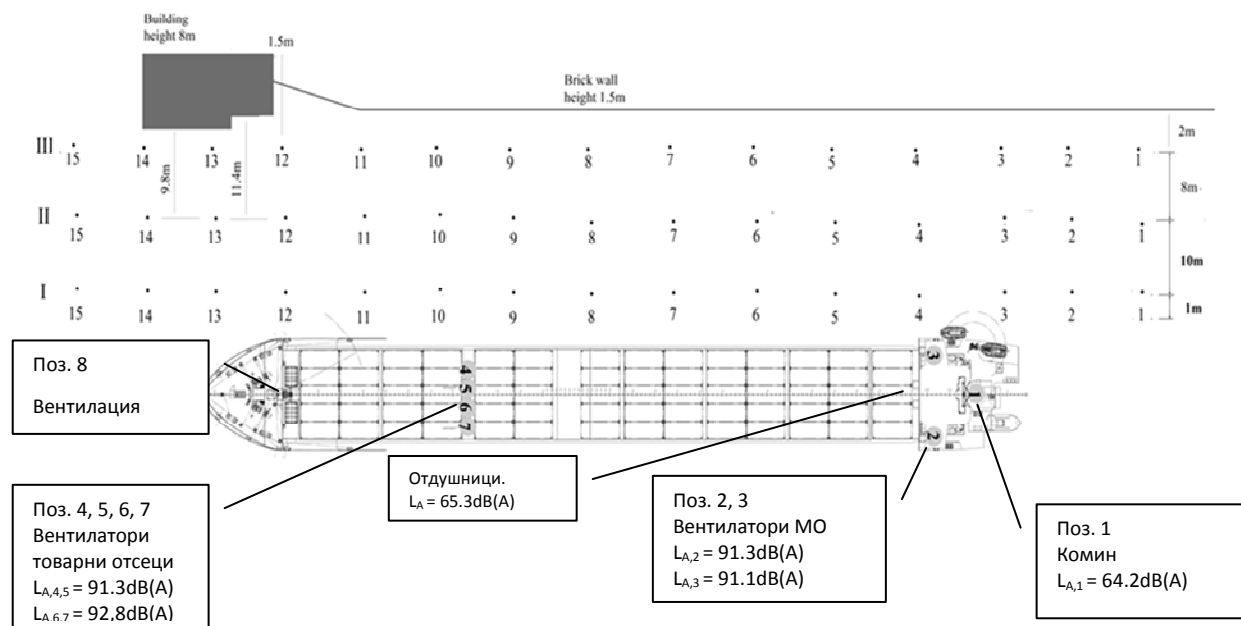
- оценяване влиянието на основните източници и на приетите проектни решения за намаляване на вибрациите и шума на фаза проектиране върху акустичното и вибрационно състояние на изследваните кораби по палуби и помещения;

- измерване на излъчвания на стоянка въздушен шум от работата на дизелгенераторите, вентилацията на машинно отделение и вентилацията на хамбарите на 6 кораба от изследваните 4 типове кораби. На фиг. 4 е показана схема на измерване на излъчвания въздушен шум от 8000tdw многоцелеви кораб. Направена е оценка на влиянието на източниците на шум върху акустичното поле на корабите на стоянка;

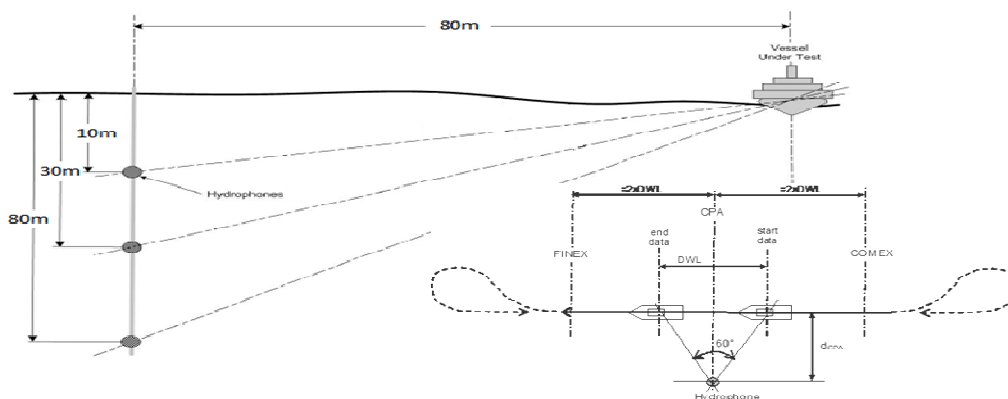
- измерване на излъчвания подводен шум и оценяване влиянието на източниците на подводен шум на кораба върху хидроакустичното му поле. На фиг. 5 е показана схема на измерване на подводния шум, излъчван от 8000tdw многоцелеви кораб. Анализът на спектрите на измерения подводен шум показва, че основно подводен шум се излъчва от работата на гребните винтове в нискочестотната област и от турбулизация на потока, обтичащ корпуса на кораба в средночестотната и високочестотната области (виж фиг.6);

- анализ на източниците на шум и вибрации от главните и спомагателните двигатели както и от корабните валопроводи. В таблица 1 са систематизирани възможните

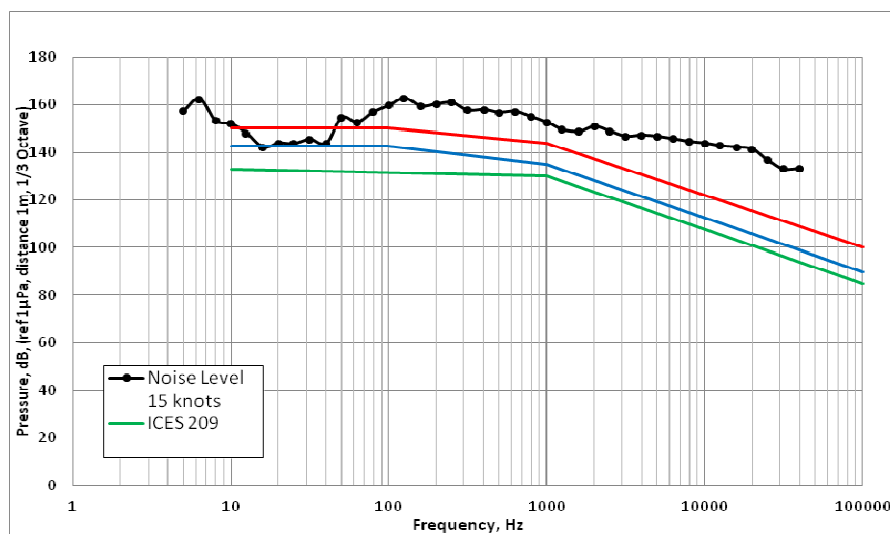
решения и ефективността им върху нивата на шум и вибрации в машинните помещения и настройката както и върху външното звуково поле.



Фиг. 4. Схема на измерване на излъчвания в пристанище шум



Фиг. 5. Схема на измерване на излъчвания от кораб подводен шум



Фиг. 6. Терцоктавен спектър на излъчвания подводен шум от 8000 tdw многоцелеви кораб

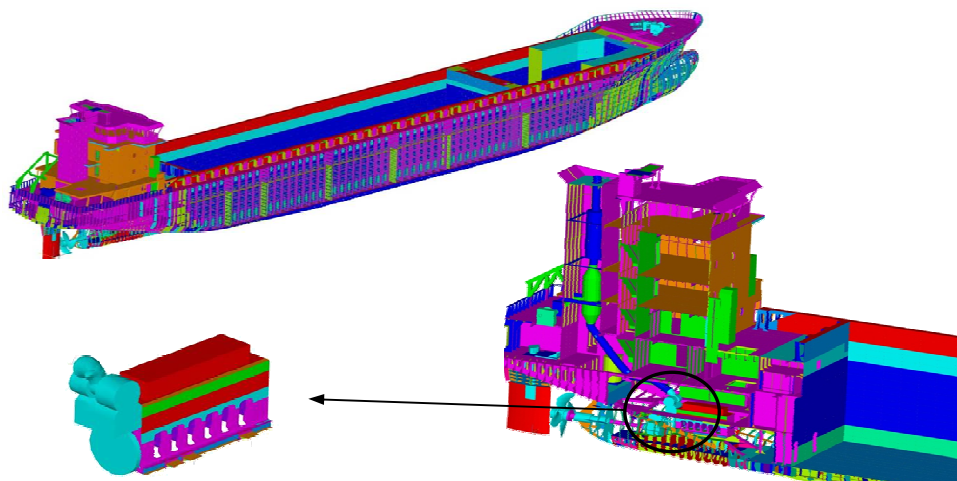
Таблица 1

Наименование на предлаганото решение	Понижаване нивото на шум:			Понижаване на вибрации в:	
	в машинно помещение	в надстройката	външен шум	машинно помещение	надстройката
Система за принудително пълнене: - звукоизолираща облицовка; - дифузор с двойни стени; - глушител.	** ** ****	* * *	* * *	* * *	* * *
Газоизпускателен тракт: - монтаж на глушители; - еластичен монтаж на газоизпускателната тръба и утилизационния котел; - разстройване на газодинамични резонанси; - минимална турбулизация на газовия поток.	** * ** **	** ** ** *	*** * *** **	* ** * *	* * * *
Мерки за понижаване на механичния шум на двигателите:	**	*	*	*	*
- еластичен монтаж на главните двигатели; - еластичен монтаж на дизелгенераторите; - звукоизолиращи конуси; - активна виброизолация; - отделяне на комина от надстройката; - компенсатори на неуравновесените моменти на ГД; - гасители общокорабни (активна виброзащита); - горно закрепване на ГД (за нискооборотни двигатели); - преместване резонанса на усукващи трептения към минималната честота на въртене.	** ** *** ** * ** ** ** ** ** **	*** ** ** *** ** ** ** ** ** ** **	* * * * * * * * * * *	*** ** * *** * *** *** *** *** *** ***	** * * ** ** *** *** *** *** *** **

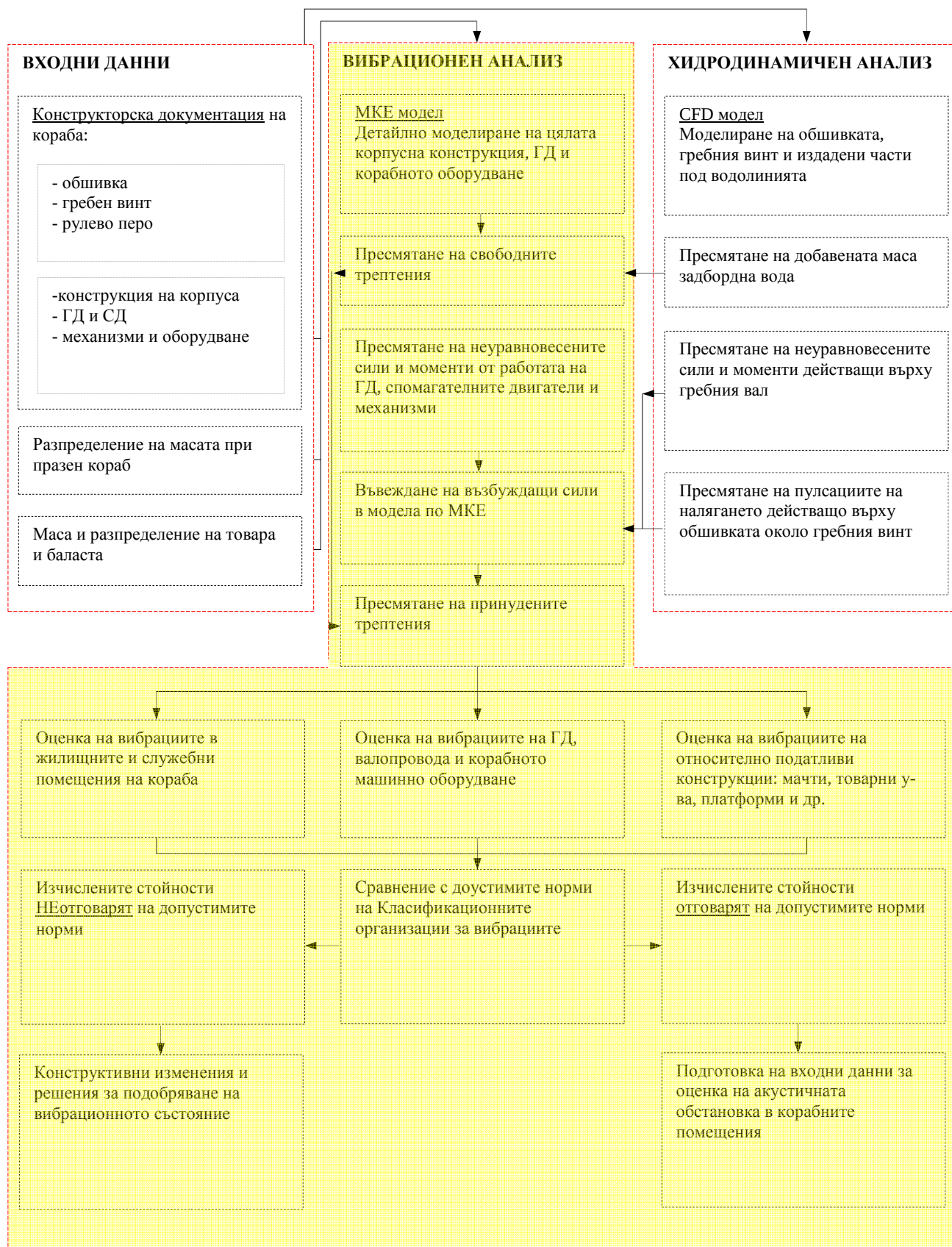
4. Методологии за прогнозиране на нивата на шум и вибрации в корабните помещения

Съгласно ISO 6954:2000 прогнозното пресмятане на вибрациите в корабните помещения трябва да се извършва в честотния диапазон от 1Hz до 80 Hz. В този честотен диапазон се намират честотите на свободните трептения на кораба като цяло, честотите на местните вибрации на палубите и стените на надстройката както и честотите на основните възбудители на вибрации – гребният винт, главният двигател, редукторът, спомагателните двигатели, тръстерите, корабният валопровод и газоизпускателния

тръбопровод. Отчитането на взаимното влияние на развиващите се в кораба вибрационни процеси е възможно единствено чрез изграждане на интегриран крайноелементен модел на корпусната конструкция, главния двигател, валопровода, газоизпускателния тръбопровод и разпределяне като съсредоточени маси на корабното оборудване [5]. На фиг. 7 е показан крайноелементен модел на 8000 tdw многоцелеви кораб. На фиг. 8 е показана блок-схема на методологията за прогнозно пресмятане на вибрационното състояние на корабните помещения и конструкции.



Фиг.7. Крайноелементен модел на 8000tdw многоцелеви кораб



Фиг.8. Блок-схема на методологията за прогнозно пресмятане на вибрационното състояние на корабните помещения и конструкции

Методологията за прогнозно пресмятане на вибрационното състояние на корабните помещения и конструкции е апробирана за серията 8000 tdw многоцелеви кораби. Извършено е пресмятане на свободните и принудени трептения на кораба по МКЕ от динамичните сили на главния двигател и гребния винт. В таблица 2 са сравнени осреднените резултати от измерване вибрациите в корабните

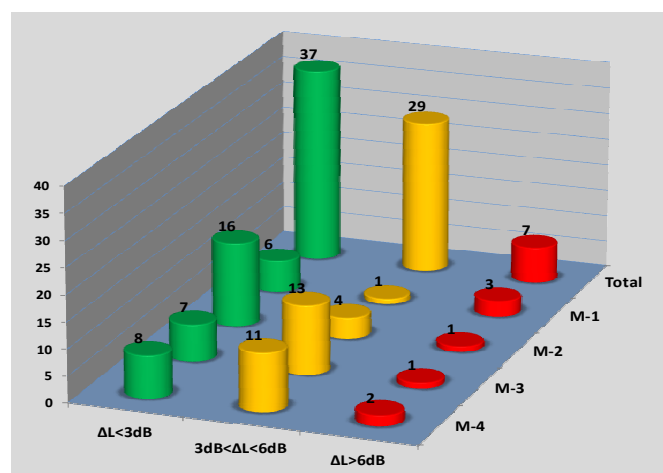
помещения на изследваните кораби в честотните диапазони 1-80Hz и 1-60Hz с резултатите от пресмятане на принудените трептения в корабните помещения в честотния диапазон 1-60Hz. Само за 4 от изследваните 32 помещения са получени нива на виброскорост, значително отличаващи се от измерените.

			Виброскорост			ΔV col.(2)-(3)
			Измерени	Измерени	MKE	
			1	2	3	
			RMS 1-80Hz	RMS 1-60Hz	RMS 1-60Hz	
Мостик	1	Радио конзола	0.65	0.54	0.63	-0.09
	2	Навигационна конзола	0.76	0.71	0.57	0.14
	3	Маса карти	0.66	0.61	0.45	0.16
Офицерска палуба	6	Дневна капитан	0.75	0.70	0.50	0.20
	7	Спалня капитан	0.62	0.47	0.48	-0.01
	8	Дневна собственик	0.41	0.36	1.20	-0.84
	9	Спалня собственик	0.50	0.37	1.10	-0.73
Лодъчна палуба	12	Старши помощник дневна	0.50	0.35	0.28	0.07
	13	Старши помощник спалня	0.45	0.35	0.35	0.00
	14	Лазарет	0.31	0.25	0.16	0.09
	15	Гл. механик дневна	0.72	0.60	0.60	0.00
	16	Гл. механик спалня	0.44	0.40	0.80	-0.40
	19	Офис	0.39	0.35	0.32	0.03
Главна палуба	20	Кухня	0.40	0.26	0.27	-0.01
	21	Столова	0.43	0.37	0.66	-0.29
Твиндек	25	Кабина 122	1.48	1.22	0.62	0.60
	26	Кабина 123	1.61	1.47	0.79	0.68
	27	2-ри помощник	1.23	1.10	0.90	0.20
	28	2-ри механик	0.94	0.87	0.44	0.43
	29	Кабина 103	1.01	0.92	0.58	0.34
	30	Кабина 104	0.97	0.78	0.66	0.12
	31	ЦПУ	0.89	0.76	0.80	-0.04
	32	Работилница	0.43	0.35	0.18	0.17

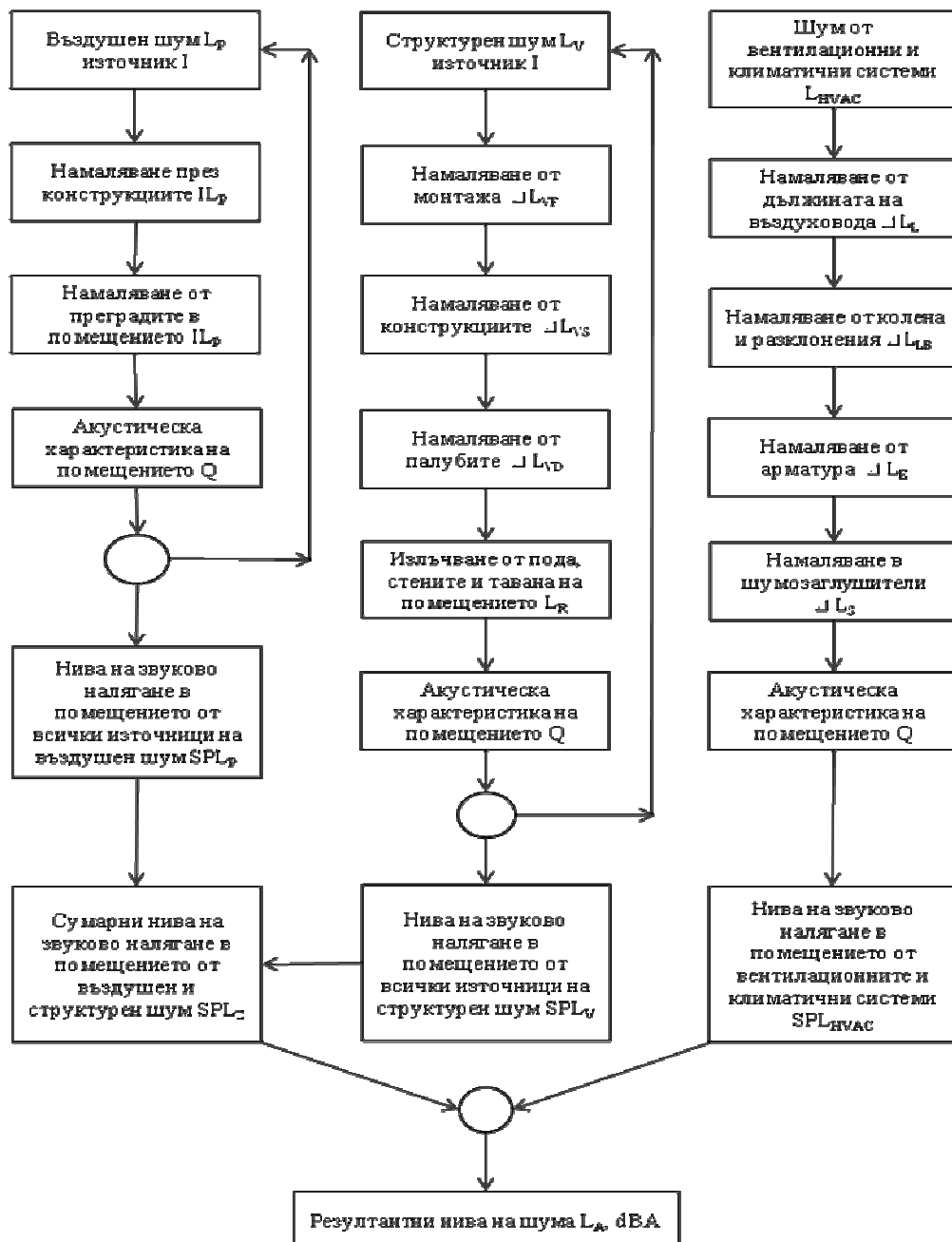
	$0 < \Delta V < 0.3 \text{ mm/s}$
	$0.3 < \Delta V < 0.6 \text{ mm/s}$
	$\Delta V > 0.6 \text{ mm/s}$

Принципната схема на методологията за прогнозно изчисляване на нивата на шум в корабните помещения е показана на фиг. 9 съдържа три модула за изчисляване поотделно на въздушния шум, структурния шум и шума от вентилационните и климатични системи. Тази структура на методиката позволява да се оцени влиянието на шума от всеки модул и да се предприемат съответните мероприятия за намаляването му.

Методологията за прогнозно пресмятане на нивата на шум в корабните помещения е апробирана за серията 8000tdw многоцелеви кораби. Резултатите от проведените измервания на шума в корабните помещения на 4 кораба от серията са сравнени с резултатите от численото пресмятане. На фиг. 10 са показани разликите между експерименталните и числените резултати. За 51% от изследваните помещения разликите са по-малки от 3dBA, за 40% от помещенията разликите са от 3 до 6 dBA, а за 9 % - са над 6 dBA. Повишените разлики между експериментални и числени резултати се дължат на повишените вибрации на палуба твиндек вследствие на повишените вибрации на тръбопроводите, закрепени към нея и неотчетени при прогнозното пресмятане.



Фиг. 10 Сравнение между експериментални и числени резултати



Фиг.9. Блок-схема на методологията за прогнозно изчисляване на шума в корабните помещения

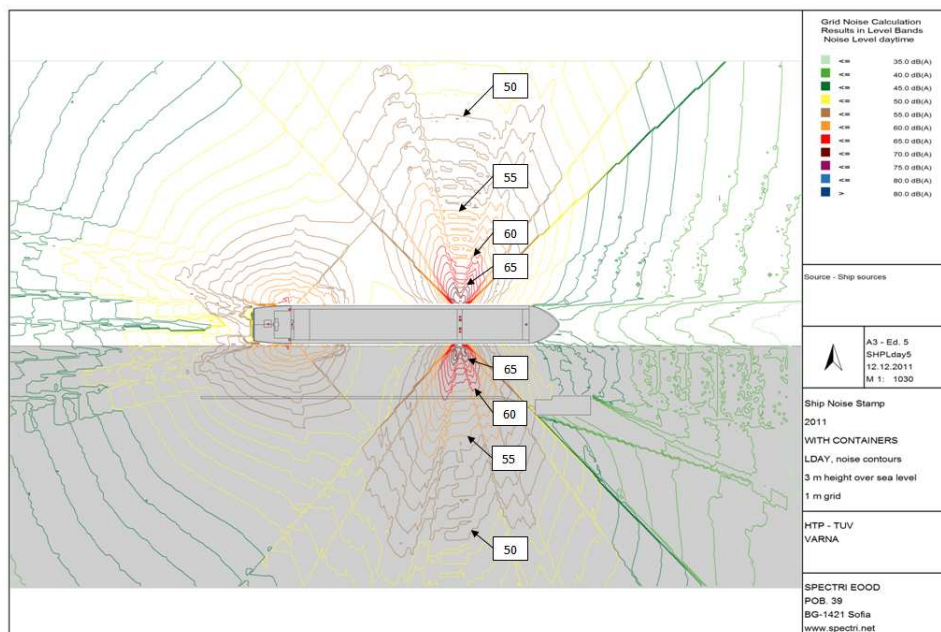
5. Методология за прогнозиране на въздействието на излъчвания от корабите въздушен шум върху околната среда

Разработена е методология за числено изследване разпространението излъчвания от корабите в акваторията на пристанище шум. Методологията включва:

- разработване на 3D модел на кораба с отчитане на отразяващите повърхност на палубите на надстройката;
- разработване на 3D модел на постройките в района на изследване на разпространението на шума;
- числена процедура за пресмятане на шума в свободно и отразено звуково поле.

Изследвано е разпространението на излъчвания в акваторията на корабостроителен завод БУЛЯРД шум от

изследвания 8000tdw многоцелеви кораб. На фиг. 11 е показана шумовата карта на района на завода при натоварена с контейнери палуба. Сравнението на резултатите от проведените експериментални изследвания и числените изследвания потвърждават адекватността на разработения метод. Анализът на проведените съвместно с партньори от Университета в Генуа, Италия числени изследвания на разпространението на шума, излъчван от кораб на стоянка и сравнението с резултатите от измерване на пристанищния шум на 8000tdw многоцелеви кораб позволи да се формулират изисквания към 3D моделирането на изследвания кораб и 3D моделирането на постройките в района на пристанището, както и към начина на моделиране на източниците на външен шум на кораба като точкови, линейни и повърхностни.



Фиг.11. Шумова карта на разпространение на излъчвания от кораба шум

6. Основни резултати. Изводи.

При изпълнението на проекта е постигнато следното:

- разработена и верифицирана е методология за теоретичен анализ и числено пресмятане на вибрациите и шума (В&Ш) в корабните помещения на търговските кораби, въздушния шум на корабите и неговото разпространение в урбанизираните територии. Резултати от числените изследвания са приложени при проектирането и строителството на 8000tdw многоцелеви кораб, построен от "Корабостроителница Русе" ЕАД.
- систематизирани са в база данни резултатите от измерване на В&Ш в корабните помещения на 34 кораба, построени след 2006 г..
- числено и експериментално е изследвано разпространението на външния шум от корабите в урбанизираните територии около пристанище.
- проведени са измервания в експлоатационни условия и е оценен излъчвания от 2 типа търговски кораби подводен шум;
- формулирани са правила за намаляване на В&Ш в корабните помещения на фазата на техническото и работното проектиране с цел изпълнение на техническите изисквания.

6. Литература

1. 2002/49/EC Directive of the European Parliament and the Council of Europe dated 25 June 2002 about evaluation and management of environmental noise.
2. Regulation No 6 of 26 June 2006. on indicators of environmental noise, taking into account the degree of discomfort in different parts of the day, limits in the indicators of environmental noise, methods of evaluating values of noise indicators and harmful effects of noise on health.
3. DIRECTIVE 2003/10/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 6 February 2003 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise) (Seventeenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC)
4. COUNCIL DIRECTIVE 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora (OJ L 206, 22.7.1992, p. 7).
5. ANSYS 12.1, Nelp System, 2009.

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2013”	Варна 11 - 12.10.2013 г. София 29 - 30.11.2013 г.
Година XV	□ Брой 15	Декември 2013 г.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА НОВ АБСОРБЕР ЗА АКУСТИЧЕН ШУМ ОТ РЕЛСОВИ ПЪТИЩА

AN EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF A NEW RAILWAY TRANSPORT NOISE ABSORBER

доц. д-р инж. И. Кралов
kralov@tu-sofia.bg

маг. инж. А. Пискова
a_piskova@tu-sofia.bg

доц.д-р инж. К. Неделчев
krasined@tu-sofia.bg

Технически университет – София, България

Abstract: An experimental study of a new construction of an absorber for reduction of the wheel/rail contact induced noise is made in this study. Noise pressure levels measurement in different settings of the absorber is made. On the base of the analysis of the results, some conclusions for its practical implementation are stated. The experimental data will be used in verification of the numerical investigations of noise absorbers.

Key Words: Acoustic noise, acoustic railway noise reduction, railway noise absorber, noise barriers

1. Въведение

Железопътният транспорт заема важна роля в транспортната система на всяка страна, тъй като развитието на промишлеността и търговията на страната до голяма степен зависи от развитието на железниците.

През последните няколко години темата за вредата на шума върху околната среда, привлича все повече и повече внимание. В този смисъл въпроса за абсорбиране на шума е силно актуален. Наблюденията показват, че има много идеи и конструктивни решения за снижаване на шума на база на MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), преобразуватели за абсорбиране на акустичната енергия и др. [6, 8].

Шумът от железопътни превозни средства произлиза от редица източници: тяговите двигатели, охладителни системи, дизел-генераторите при тягов състав с комбинирано задвижване, трансмисии, аеродинамичен ефект при висока скорост, контактът колело-релса. Други източници на шум се появяват в зависимост от режимите на движение, като например, шум при спиране, преминаване през надлези и мостове, шум от преминаване на композицията през крива, преминаване през релсови наставки и други. Известно е, че при скорости да 50 км/ч преобладава шумът, генериран от контакта на колелото с релсата, при скорости между 50 км/ч 100 км/ч доминиращ е

шумът от агрегатите, а над тази скорост основен е аеродинамичният шум [4].

След редица изследвания е установено, че шумът от контакта колело-релса, или така наречения „шум от търкаляне“ (Railway Rolling Noise) се предизвиква от структурните трептения на колелото, релсата, крепежните и свързващи елементи на железният път, както и от грапавостта на контактната площ между колелото и релсата. Основно влияние върху генерирането на шум от контакта колело-релса имат: грапавостта, видът на спирачната система, цикличността при поддръжката на колоосите и релсите, контактната площ, броя на колоосите, скоростта на железопътното возило, изменението на механичните характеристики на компоненти от железния път и др. [3, 5, 7, 10]

Основните видове патентно защитени методи за снижаване на излъчвания от контакта между колелото и релсата шум при движението на жп возила [8] са:

1.1. Намаляване нивото на излъчвания структурен шум:

1.1.1. Чрез конструктивни изменения в колелата на жп возила:

- патент CZ9701819 - чрез това решение се цели основно въздействие върху намаляването на излъчвания структурен шум от колелата. Предимство на метода е относително

простата конструкция и монтаж, а недостатъкът му е необходимостта от прилагането му върху всяко колело. Последното изисква масовото му производство. Ефектът от снижаването на излъчвания шум от всяко колело е относително малък, но се мултиплицира поради големия брой колела в една композиция.

- патент JP4062208 – с това решение се цели намаляването на нивото на звука става чрез специална форма на направляващите и увеличаване на демпфирането посредством конструктивни отвори, чрез които звуковите вълни преминават и се наслагват в резонансни абсорбатори. Тук конструкцията е относително по-сложна и отново се изисква масово производство. Степента на снижаване на шума е съпоставима с предходното решение.

1.1.2. Чрез изолация на релсовия път и неговия фундамент:

- патент YUP80803 - известна изолационна конструкция, покриваща фундамента и траверсите между релсите, така, че да поглъща в по-висока степен излъчваната звукова енергия и да бъде преграда на излъчвания от фундамента и релсите структурен шум. Това решение е сложно от конструктивна гледна точка, приложимо е само в районите на спирки и станции, тъй като изисква наличието на фиксиран фундамент. Предимството е по-високата степен на снижение на излъчвания структурен шум в районите на спирки и гари.

1.2. Ограничаване на разпространението на шума чрез прегради:

1.2.1. Чрез стационарни прегради:

-патент JP4213070 - представено звукоизолационно оборудване, което ограничава и снижава шума от търкалянето на колелото по релсата, достигащ в долната част на вагона, а също изолира излъчвания шум от контакта на електрическата мрежа с токоотвеждащите устройства. Недостатък на това решение е скъпата конструкция, която изисква и построяването на носещата го преграда. В литературата липсват точни данни за степента на снижаване на шума от контакта колело-релса в този случай, но е очевидно, че това устройство е неприложимо в районите на спирките.

- патент CZ21803 - разработена е модулна конструкция за монтаж и сглобяване на фундамент и релсов път, като отстрани има прегради за разпространението на шума, фиксирани от фундаментните плоскости. При това решение се цели да се намали излъчвания структурен шум от фундамента и се ограничи разпространението му хоризонтално на нивото на релсите. Очевиден недостатък на решението е

изискването за наличие на фиксиран фундамент и относително сложната му конструкция. Въпреки липсата на данни за степента на снижаване на излъчвания шум, може да се очаква, че ефектът ще бъде осезаем.

1.2.2. Чрез подвижни прегради:

– патент WO2009133172 - подвижни стени, успоредни на релсовия път, които да служат като прегради за разпространението на шума, перпендикулярно на релсовия път. Очакваното тук снижението на шума зад преградите трябва да е значително. Сериозен недостатък на решението е сложната и скъпа конструкция, както и неприложимостта и в районите на спирки, гари и в тунели.

Съществуващите патентни решения за намаляване на излъчването и разпространението на шум от контакта колело-релса при железопътни возила са насочени в две направления:

-намаляване на излъчвания шум от колелата (релсите);

-ограничаване на разпространението на излъчвания шум чрез прегради и абсорбатори.

Решенията от първия вид са относително с по-ниска себестойност и повсеместно приложение. Решенията от втория вид са относително по-скъпи и с ограничено приложение по отношение на различни участъци от жп трасетата. Съществен техен недостатък е неприложимостта им в тунели, на мостове, в близост до естествени прегради и др. [1].

Наложително е намирането на нови решения за прегради и абсорбатори, които да ограничават и намаляват излъчвания шум от контакта колело-релса, които да имат възможност за прилагане в райони на спирки, в тунели, метростанции, както и в извън гаровите участъци.

Идея за нов вид абсорбер за акустичен шум, отговарящ на горните условия, е предложен в [8], а в [9] е представено и експериментално изследване на един вид конструкция на абсорбера.

Целта на тази работа е да се направят експериментални изследвания на различни конструкции на предложеното ново решение [9] за намаляване нивото на шума от железопътния транспорт.

2. Експериментално изследване

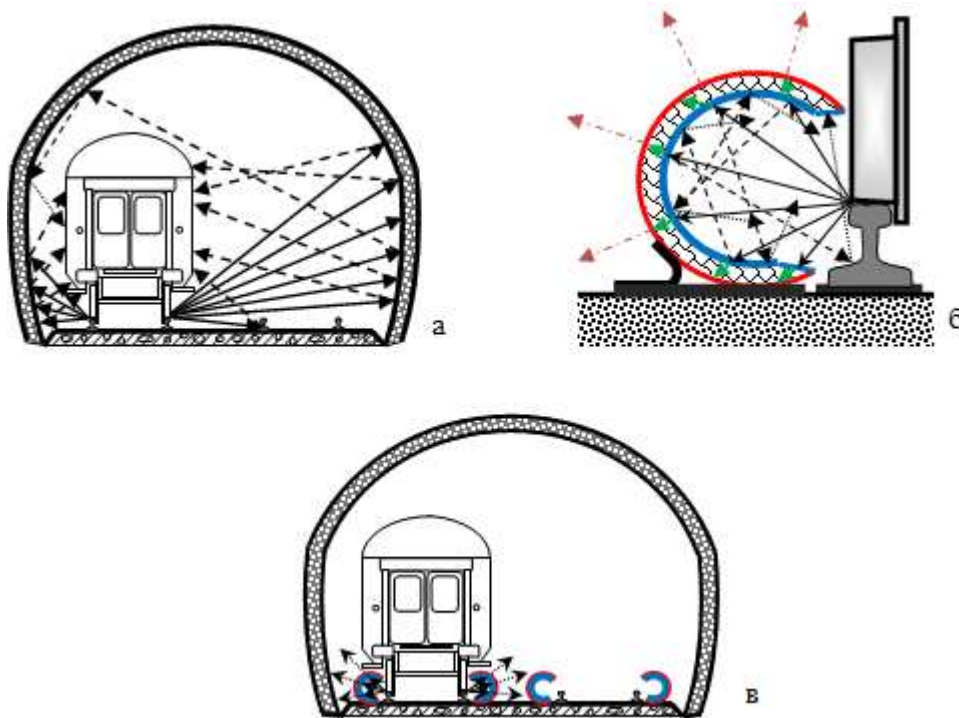
Представеният метод за абсорбиране на акустичния шум от контакта колело-релса при железопътния транспорт (фиг. 1-а) е предложен от авторите за първи път през 2011 г. [6]. Конструктивното решение улавя и абсорбира звуковата енергия (акустичния шум) в близост

до източника, като за целта то се монтира в близост, успоредно на релсите. Разположението е показано съгласно фиг.1-б в железопътни гари на фиг.1-в при железопътни тунели.

Предложеният и изследван абсорбер в [9] е от профилирана PVC тръба, като за абсорбиращ материал е използвана минерална

вата, прилепена към вътрешната повърхност на тръбата.

При новото конструктивно решение, тръбата също е от PVC материал, но е с гладка повърхност. За абсорбиращ материал е отново използвана минерална вата.



фиг.1 Приложение на метода

Експерименталната постановка е представена на фиг. 2. Използвана е камера с размери 50x55x100см. Тя има гладки стени за създаване на дифузно звуково поле, а отвън е покрита с шумоизолиращи материали. В камерата е поставен източника на шум. За експеримента е използван генератор и усилвател на шум. Измерванията са реализирани със система за измерване на шума Brul & Kjaer PULSE. Използван е микрофон, който е разположен на разстояние 1 м от абсорбера.

Спектралния анализ е направен при следните параметри: експоненциално усредняване при 1/1 октавен филтър; експоненциално времево усредняване с 1/4 секунда със свободно тригериране; долна граница 16 Hz; горна честотна граница 10 kHz, за да има съпоставимост на резултатите с тези от литературни данни [2]. Измерванията са повторени и оценени по скала A. Всички данни получени са обработени съгласно нормативната уредба за тариране и измервателна процедура, както и за оценяване на грешката при измерване.

Използваната апаратура е:

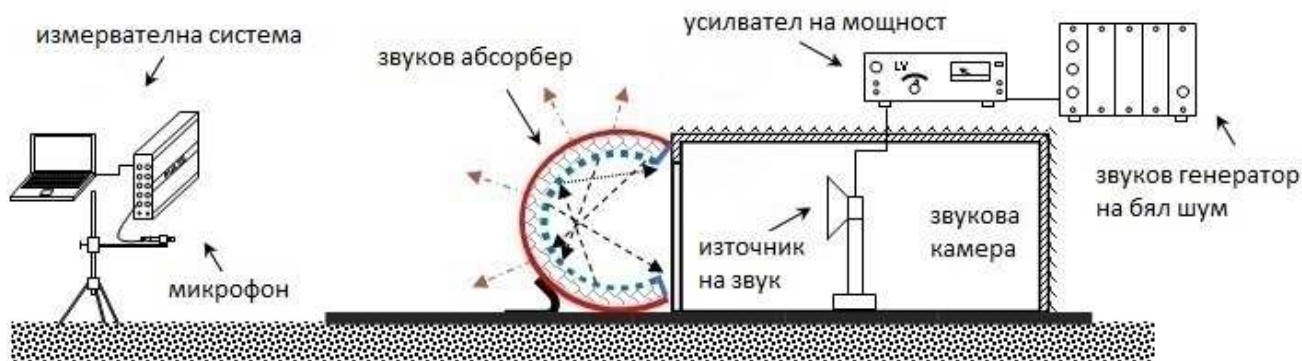
- 1) Генератор на „бял“ и „розов“ шум тип 03004-Robotron – Germany;
- 2) Измервателен усилвател LV102;
- 3) Тонколона;
- 4) Измервателен микрофон Brul & Kjaer 4144;
- 5) Система за измерване на шума:
 - Мобилен компютър;
 - Специализиран софтуер за измерване на шум и вибрации – LabShop 13.1;
 - Пет канален измервателен усилвател Brul & Kjaer PULSE 3560B.

Извършвано е едновременно измерване на нивото на звуковото налягане при източника и след абсорбера (преградата) в октавни честотни спектри. За гарантиране на достоверността е измерен и шумовият фон в помещението, като резултатите показват, че той е по-нисък с повече от 10 dB от измерваното ниво в целия честотен диапазон. В съответствие с нормативните изисквания е направен запис за определен период от време и за окончателни резултати са взети осреднените им стойности. Преди измерванията е извършено калибриране на измервателния тракт.

Направени са измервания на нивото на звуковото налягане, без абсорбер (преграда) и с абсорбер, като за целта абсорберът е монтиран с отвора си до изхода на звуковата камера и е уплътнен. Регистрирани са нивата на звуковото налягане, при различни конструктивни решения на звуков абсорбер:

Вид 1 - профилирана PVC тръба, без вата;
Вид 2 - профилирана PVC тръба с вата;
Вид 3 - гладка PVC тръба без вата;
Вид 4 - гладка PVC тръба с вата.

На фиг. 3 са дадени снимки на тестваните конструкции и на опитната постановка.



фиг.2



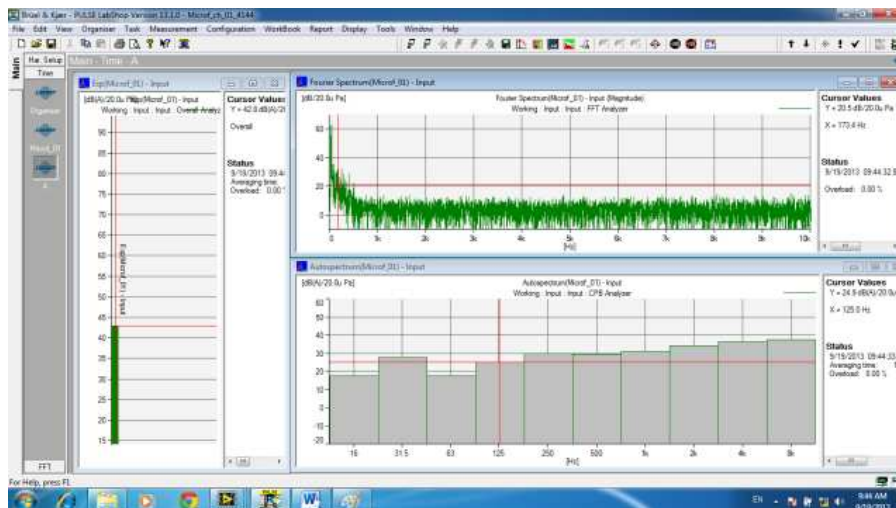
фиг.3

3. Експериментални резултати

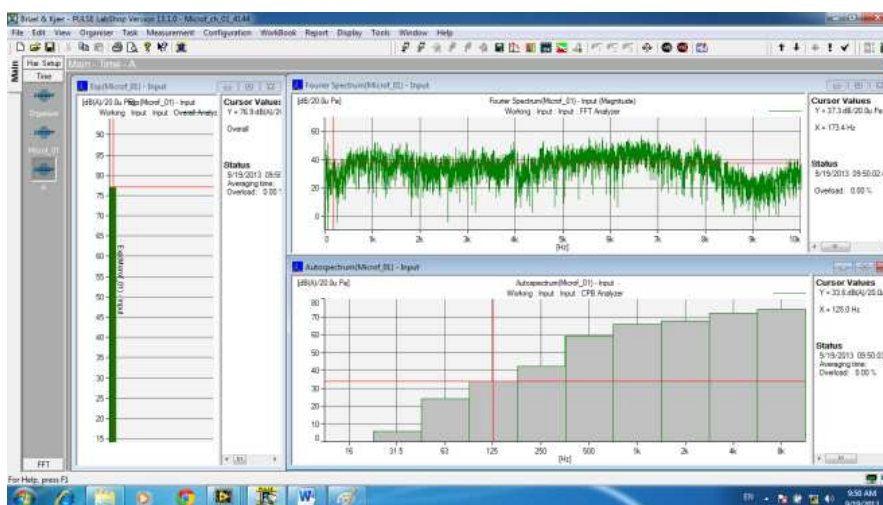
Резултатите от изследването са получени след поредица от измервания, реализирани от RMS (Root Mean Square) функцията на измервателната техника и апаратура.

Генерираният шум е в честотен диапазон от 125 Hz до 8000 Hz.

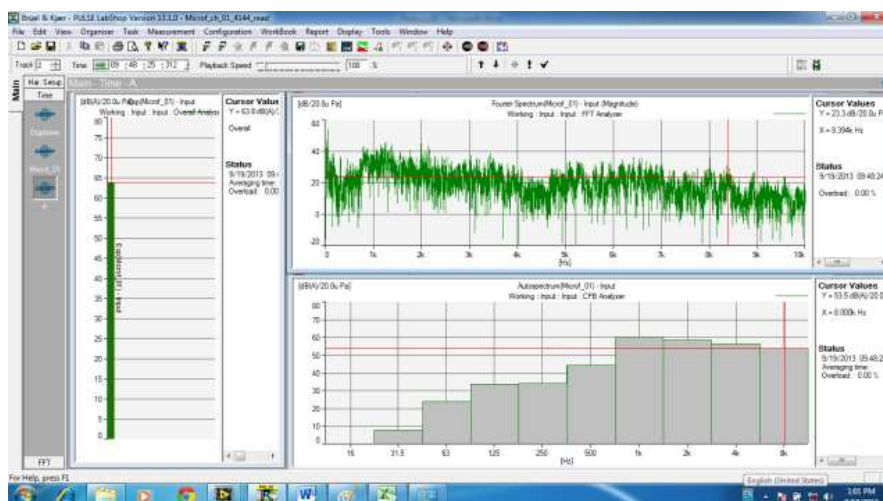
Резултатите от измерването са представени в табл.1, като за по-голяма яснота резултатите са представени и графично на фиг.3. Степента на абсорбиране на акустичният шум е показана в табл.2, а графично на фиг.4.



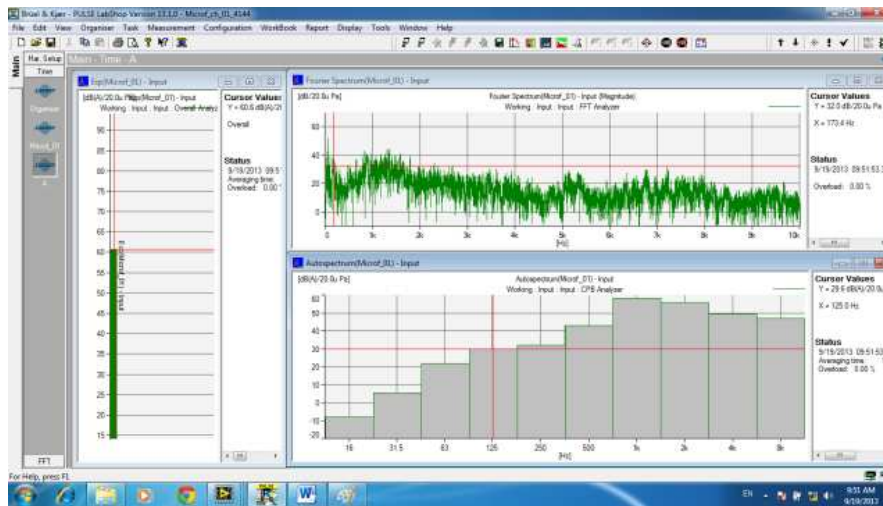
Mic_011_1.dat – Фонов шум на помещението



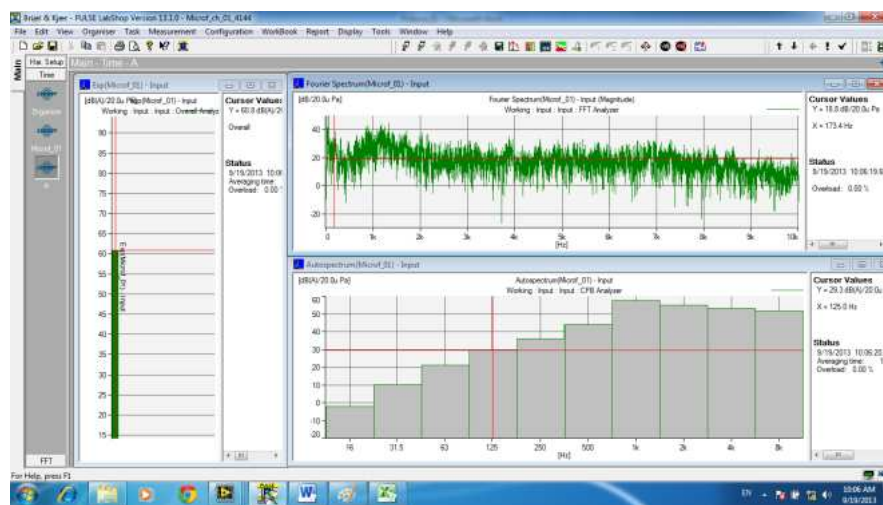
Mic_011_2.dat – Генериран шум, без абсорбер



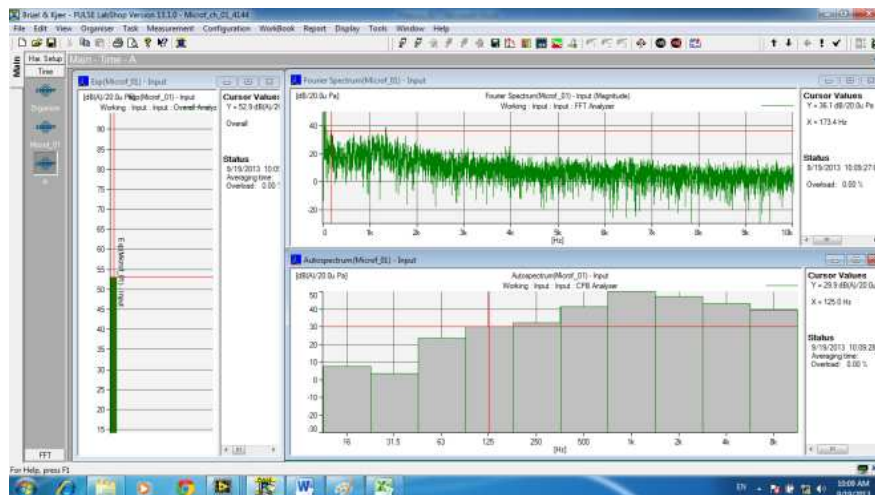
Mic_011_3.dat – Буд 1



Mic_011_4.dat – Bud 2



Mic_011_5.dat – Bud 3



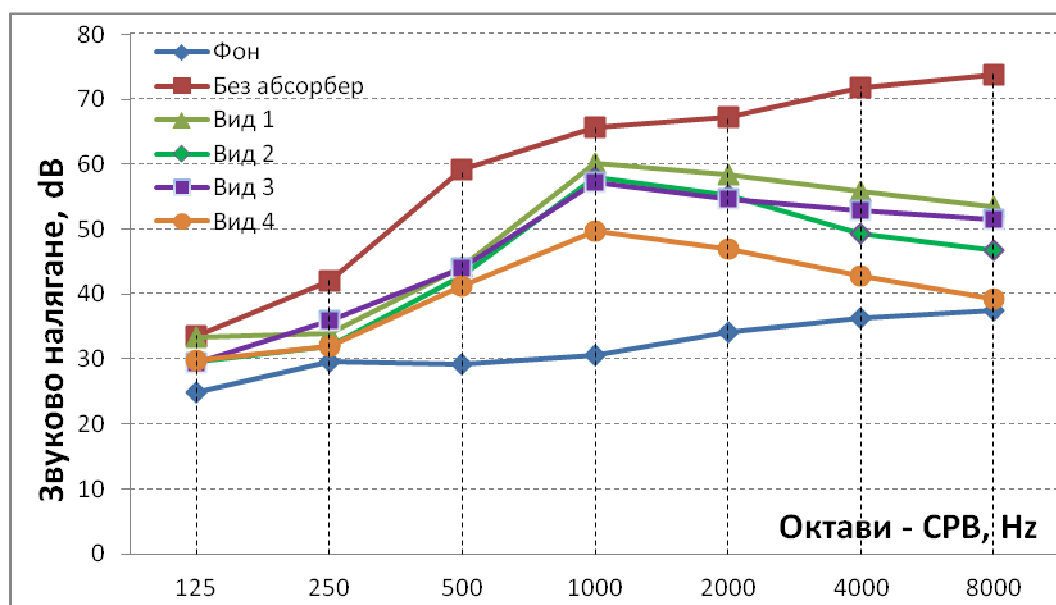
Mic_011_6.dat – Bud 4

Табл.1 Числени резултати от измерването

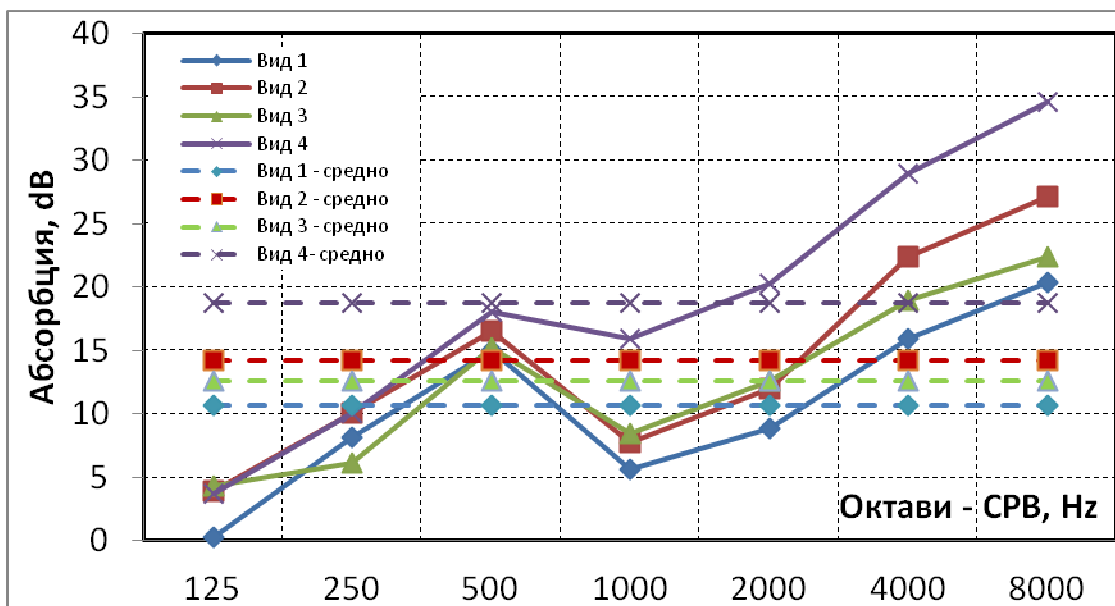
Вид Конструкция	Максимални стойности на нивото на звуковото налягане, [dB]							
	скала А	Октави, [Hz]						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Фон	42.8	24.87	29.69	29.28	30.65	34.12	36.32	37.41
Без абсорбер	76.9	33.58	42.08	59.23	65.71	67.34	71.83	73.87
Вид 1	63.8	33.3	33.92	44.16	60.08	58.43	55.9	53.49
Вид 2	60.6	29.65	32	42.72	57.99	55.33	49.42	46.73
Вид 3	60.8	29.31	35.96	43.97	57.28	54.73	52.83	51.43
Вид 4	52.9	29.87	32.00	41.21	49.8	47.03	42.82	39.26

Табл.2 Изчислена степен на абсорбция

Вид конструкция	Абсорбция, [dB]								
	скала А	Октави, [Hz]							
		125	250	500	1000	2000	4000	8000	средно
Вид 1	13.1	0.28	8.16	15.07	5.63	8.91	15.93	20.38	10.7
Вид 2	16.3	3.93	10.08	16.51	7.72	12.01	22.41	27.14	14.26
Вид 3	16.1	4.27	6.12	15.26	8.43	12.61	19	22.44	12.59
Вид 4	24	3.71	10.08	18.02	15.91	20.31	29.01	34.61	18.81



фиг.3 – Измерено ниво на звуковото налягане



фиг.4 – Абсорбция на тестваните модели в dB

4. Анализи и изводи

От получените резултати се вижда, че и за четирите конструкции абсорбирането на акустичния шум е над 10 dB в честотния диапазон 3500 – 8000 Hz, като показателите конкретно за новата конструкция абсорбер са над 20 dB. Това е много добър резултат, като се вземе предвид, че според A. Van Beek [12] акустичният шум излъчен при търкаляне, се извършва главно в обхвата между 2000 и 4000 Hz. Резултатите показват, че в целият изследван честотен диапазон, нивото на абсорбция, при новата конструкция е средно 18.81 dB с инсталирана минерална вата, и средно 12.59 dB без инсталирана вата. Вижда се и очакваният факт, че при високите честоти степента на абсорбция е по-голяма от тази при ниските честоти.

По скала A степента на абсорбция е 16.1 dB при вид 3 и 24 dB при вид 4.

От резултатите, показани на фиг. 4, можем да заключим, че най-добра абсорбция е постигната при новото конструктивно решение, с инсталирана минерална вата. Най-високо ниво на абсорбция се постига при честота над 4000 Hz.

Редукцията на акустичния шум при новия абсорбер в нискочестотния диапазон (125-250 Hz) е средно 5.2 dB – без вата и 6.9 dB – с вата; в средночестотния диапазон (250-1000 Hz) е средно 11.92 dB – без вата и 17 dB – с вата; във високочестотния диапазон (1000-8000 Hz) е средно 18 dB – без вата и 28 dB – с вата.

5. Заключение

В тази работа е представено експериментално изследване на различни конструкции за нов вид абсорбер на акустичен шум.

Направеното изследване показва, че представеното ново конструктивно решение абсорбер има висока степен на намаляване на акустичния шум, в широк честотен диапазон, което в известна степен се дължи на плътността на гладката PVC тръба.

Практическата приложимост на изследваните конструктивни решения за абсорбер се обуславя и от редица други предимства: проста конструкция, ниска цена за производство, липсата на специална поддръжка при експлоатацията, лесно изграждане без специални изисквания и без високи енергийни разходи и др.

Благодарности

*Експериментът, описан в тази статия, е реализиран с финансовата подкрепа по проект №132ПД0003-04

6. Литература

1. Кралов, И., "Анализ на патентни решения за намаляване на излъчвания шум от контакта колело-релса при движението на железопътни транспортни средства", Варна;
2. Кралов, И., С. Банов, Технически Университет – София, „Шум в транспортната техника“;
3. Hubner, P., Reducing railway noise, strategic challenges and state of the art, Forum Acusticum, 1243-1248, 2005;

4. Hardey, A., R. Joes, "Rail and wheel roughness -implications for noise mapping based on the Calculation of Railway Noise procedure, AEA Technology Rail, Issue 1, March 2004;

5. Jansen, E., "Acoustic measurement on rolling stock retrofitted with composite brake blocks", IPG Rail seminar, December 2008;

6. Kralov, I., S. Terzieva, I. Ignatov, "Analysis of methods and MEMS for Acoustic Energy Harvesting with Application in Railway Noise Reduction", Proceedings of the 3rd International Conference MECAHITECH'11, Bucharest, 2011;

7. Kralov, I., K.Nedelchev, I.Ignatov, „ Experimental study of the noise generated by wheel-rail interaction”;

8. Kralov, I., "A new solution for the railway noise reduction”;

9. Kralov, I., I.Ignatov, "Experimental study and analysis of a new wheel/rail contact noise absorber”;

10. Thompson, D., C. Jones, A review of the modelling of wheel/rail noise generation, *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 519-536, 2000;

11. Trevor, J., P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers*, Taylor & Francis, 2009.

12. Van Beek, A. et al., Task 1.2.1, State of the art, Technical Report, SNCF, 2002;

Патент № CZ9701819;

Патент № JP4062208;

Патент № YUP80803;

Патент № JP4213070;

Патент № CZ21803;

Патент № WO2009133172

	АКУСТИКА Национална конференция "Акустика 2013"	Варна 11 - 12.10.2013 г. София 29 - 30.11.2013 г.
Година XV	□ Брой 15	Декември 2013 г

КОМПЛЕКСНИ ЧИСЛА И СПЕКТРИ

COMPLEX NUMBERS AND SPECTRAS

доц. д-р Т. Трифонов¹, доц. д-р Г. Димков², доц. д-р И. С. Иванов³

¹e-mail: TihomirTrifonov(at)ieee.org ²e-mail: gdimkov(at)abv.bg, ³e-mail: ivanov_ivan(at)nvu.bg

¹Великотърновски университет „Св. св. Кирил и Методий“, катедра „Алгебра и геометрия“, В. Търново, България,

²Българска академия на науките, Институт по математика и информатика, София, България,

³Национален военен университет „В. Левски“, катедра „Комуникационни и информационни системи“, В. Търново, България

Abstract: The use of the complex numbers in acoustics is discussed in this work. Some harmonic analysis applications and conformal mapping for improving the perception are done. They would allow additional information in digital sound processing.

Key words: complex numbers, acoustics, spectra, wavelet analysis.

Увод

Комплекснозначните функции играят важна роля в описанието на акустичните феномени. Въпреки това, че физичен смисъл имат само реалнозначните, комплекснозначните функции играят незаменима роля за математическото моделиране и интерпретация.

Известно е, че имагинерните числа се споменават за първи път в труда на Кардано «Великото изкуство или за алгебричните правила». Важни приноси в теорията на комплексните числа имат Моавър, Ойлер (именно той въвежда означението i за имагинерната единица), Гаус, Арган и др.

Естествено продължение на тази идеология е разработената от Коши, Вайерщрас и др. теория на функциите на комплексни променливи. Това са функции, при които и променливите, и стойностите са комплексни числа.

В настоящата работа целта е да се покаже тяхната роля за описанието на звуковите полета и обобщения хармоничен анализ. Предлага се чрез използването на една конкретна функция да бъде подобрена визуализацията на някои акустични диаграми. В тази връзка са представени няколко интересни примера.

1. Математическо представяне на звука

От уравненията на хидродинамиката, при определени ограничения, за звуковото налягане p може да се изведе вълновото уравнение в следния вид [1]:

$$(2) \quad \Delta p - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0,$$

където Δ е оператор на Лаплас, т.е.

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ в декартова координатна система, а c – скорост на разпространение на звука в средата.

То описва произволно вълново движение във флуида, или всъщност това е вторият закон на Нютон за свиваем

флуид. Може да се каже, че първият член на уравнението характеризира свиваемостта, а вторият – инерцията на елемент от средата.

Връзката между скоростта на трептене $\vec{v}$ и звуковото налягане p се вижда от уравнението на Ойлер:

$$(2) \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \text{grad} p = 0.$$

Удобно е звуковото поле да се характеризира чрез скаларната функция потенциал на скоростта $\Phi(x, y, z, t)$, като връзката е

$$(3) \quad \vec{v} = -\text{grad} \Phi$$

и от уравнението Ойлер следва

$$(4) \quad p = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}.$$

Не всяко поле може да се опише единствено чрез скаларната функция $\Phi(x, y, z, t)$. За да е изпълнимо това, е необходимо полето да удовлетворява условието $\text{rot} \vec{v} = 0$, т.е. полето да е безвихрово (или потенциално).

Ако се разгледа т.н. хармонично колебание във вида

$$p(\vec{r}, t) = p_0(\vec{r}) \cos[\omega t + \alpha(\vec{r})],$$

където $p_0(\vec{r})$ е амплитуда, $\alpha(\vec{r})$ е фаза и ω е ъглова честота на звуковото колебание, то може да се представи в комплексна форма като

$$p(\vec{r}, t) = p_0(\vec{r}) \exp[\pm i(\omega t + \alpha(\vec{r}))]$$

Така, за да се опише равнинна звукова вълна се използва изразът

$$(5) \quad p = p_0 \exp[-i(\omega t - kx)],$$

където $k = \omega/c$ е вълновото число.

Ако звуковото налягане се запише във вида $p(\vec{r}, t) = p(\vec{r}) \exp(-i\omega t)$, и се постави във вълновото уравнение (1), се получава т.н. уравнение на Хелмхолц

$$(6) \quad \Delta p(\vec{r}) + k^2 p(\vec{r}) = 0.$$

Известна е класификацията на уравнение с частни производни (изучавани в математическата физика):

$$(7) \quad \sum_{j=1}^n a_j \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j^2} + F\left(\frac{\partial \phi}{\partial x_1}; \frac{\partial \phi}{\partial x_2}; \dots; \frac{\partial \phi}{\partial x_n}; \phi\right) = 0$$

Едно уравнение се нарича хиперболично, ако знакът пред някой от коефициентите a_j , се различава от знака на останалите коефициенти. Ако всички коефициенти a_j са с един и същи знак, уравнението се нарича елиптично. Ако някой от коефициентите a_j е равен на нула, то уравнението се нарича параболично.

От приведената класификация следва, че вълновото уравнение се явява хиперболично, а уравнението на Хелмхолц – елиптично. Методите за решение на тези уравнения съществено се различават. Вълновото уравнение се използва основно при изучаване на нестационарни процеси, имащи място например в сеизмологията. В акустиката и хидроакустиката в повечето случаи се разглежда уравнението на Хелмхолц.

Физическата разлика между хиперболичното и елиптичното уравнение се илюстрира най-добре в акустиката на движещите се среди. Уравнението за разпространението на звука в среда, движеща се по направление на оста x със скорост $U = Mc$, където M е т.н. число на Мах, има вида:

$$(8) \quad (1 - M^2) \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + 2ikM \frac{\partial p}{\partial x} + k^2 p = 0.$$

Ако $M < 1$, то уравнението се явява елиптично и звуковото поле в среда, движеща се с дозвукова скорост не се различава съществено от поле в неподвижна среда. Ако $M > 1$, то уравнението става хиперболично. Решението на такива уравнения се разглеждат в аеродинамиката. При големи скорости в средата се появяват ударни вълни, които липсват при дозвукови скорости.

2. Спектрална обработка на звук и конформно преобразуване.

2.1 Хармоничен анализ

Основата на спектралния анализ е ортогоналното разложение на дадена функция (сигнал) $s(t)$ за $s \in \mathbb{C}^T$, зададена в интервал от време, с продължителност T , в ред на Фурие по тригонометричен базис [2,3,4]. В комплексна форма за $t \in (-T/2, T/2)$ това е следния ред:

$$(9) \quad s(t) \sim \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{-ik \frac{2\pi}{T} t},$$

където

$$c_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) e^{-ik \frac{2\pi}{T} t} dt$$

При това съществено е, че като се използва това разлагане, поради периодичността на базисните функции, се допуска неограниченост на периодичното продължение на сигнала.

Ако сигналът $s(t)$ е зададен по цялата ос на времето, т.е. $t \in (-\infty, \infty)$ и е неперiodичен, обаче с крайна енергия, също е възможно спектрално представяне. То се реализира чрез интегралната трансформация на Фурие:

$$(10) \quad s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \\ g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-i\omega t} dt$$

Взаимно еднозначното изображение в областта на честотите на дискретизиран във времето сигнал s_n за интервал с продължителност T , се осъществява чрез двойката формули за ДПФ (DFT):

$$(11) \quad F_k = \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{-i \frac{2\pi}{N} nk} = \sum_{n=0}^{N-1} s_n W_N^{nk} \\ (12) \quad s_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k e^{i \frac{2\pi}{N} nk} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k W_N^{-nk}$$

Тук индексите n за времето и k за честотата се изменят от 0

до $N-1$, а $W_N = e^{-i \frac{2\pi}{N}}$ е примитивен N -ти корен на единицата, $N = f_n T$ а f_n е честота на дискретизацията.

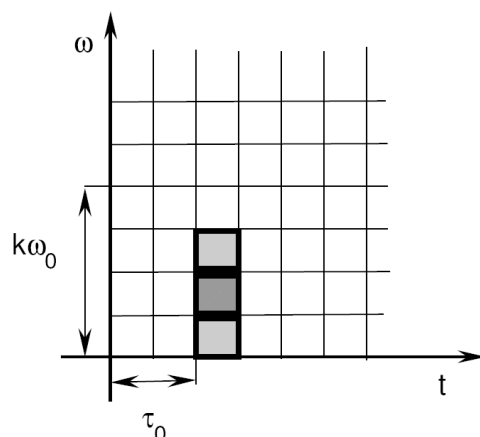
Тъй като прекъсванията на сигнала в края на интервала изкривяват спектъра, то много често преди да се приложи алгоритъмът FFT за DFT се използва т.н. прозоречна функция. Така се стига до кратковременното преобразуване на Фурие (Short Time Fourier Transform) STFT, което позволява оценяване на текущия спектър. Резултатът от такъв анализ ще бъде функция на две променливи – на отместването на прозореца τ , и на честотата ω

$$(13) \quad F(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} [w(t - \tau) s(t) e^{-i\omega t}] dt$$

или спектралният анализ в прозорец (или с тегло), се получава като скалярно произведение на сигнала и прозоречната (тегловната) функция, $g_\tau(\omega, \tau) = w(t - \tau) e^{i\omega \tau}$ т.е. $F(\omega, \tau) = \{g_\tau(\omega, \tau) \cdot s(t)\}$. Така, освен честотата се вижда вече и параметърът отместване по време τ . Кратковременното преобразуване на Фурие в равнината време-честота, е показано на Фиг.1.

Вижда се, че при отместване на прозореца или изменението на честотата на модулация, ширината на правоъгълника остава неизменна. Това е свързано с обстоятелството, че при всички тези операции, ширината на самият прозорец не се изменя.

В последните години все по-широко навлиза анализът на сигналите чрез елементарни вълни (wavelet analysis-уейвлет анализ, уейвлет трансформация, WT). При него се получават т.н. скалограми или мащабограми, при които има оптимално разделяне и по време, и по честота.



Фиг.1. Кратковременното Фурие преобразуване STFT. Функцията в равнината "време-честота", $g_\tau(\omega, \tau) = e^{j k \omega \tau} w(t - \tau_0)$, $\tau = \tau_0$, $k=1,2,3$.

Поради краткотрайността по време на тези изменения, самият сигнал може да се разглежда като дефиниран в L_2 , или за едномерните сигнали – на реалната ос $\mathbf{R} (-\infty, \infty)$ с норма $\|f(t)\|^2 < \infty$.

Ако $a \in \mathbf{R}^+$, $b \in \mathbf{R}$, или (a, b) определя една точка в дясната полуравнина, то двойката преобразувания, които носят наименованието непрекъснато уейвлет преобразуване, означено с CWT (Continuous Wavelet Transform) имат вида:

$$(14) \quad [CWT] f(a, b) = \langle f, \psi_{(a, b)}(t) \rangle = 1/\sqrt{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*(t-b)/a dt$$

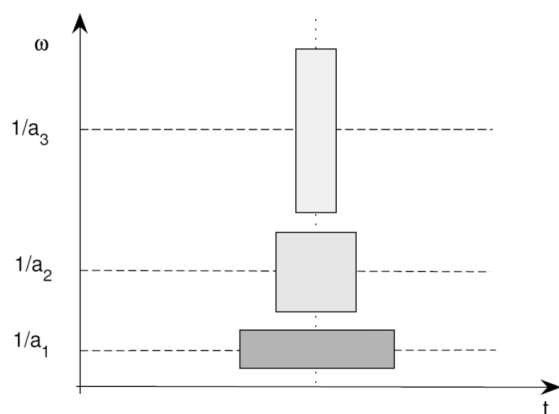
$$(15) \quad f(t) = 1/(C_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |a|^{-1/2} CWT f(a, b) 1/\sqrt{|a|} \psi^*(t-b)/a db da),$$

където $C_1 (= \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(\omega)|^2 / |\omega| d\omega)$ е коефициент, който трябва да удовлетворява критерия за допустимост $C_1 < \infty$, като $\tilde{\Psi}(\omega)$ е Фурие образ на $\psi(t)$ – Фиг.2.

2.2. Конформно преобразуване

Нека $f(z)$, $z = x + iy$ е комплекснозначна функция, дефинирана в едно едносвързано подмножество на комплексната равнина. Ако $f(z)$ е определена в точката z_0 и $f'(z_0) \neq 0$, тогава в някоя околност на точката z_0 функцията $f(z)$ е еднолистна, т.е. $f(z_1) = f(z_2) \Rightarrow z_1 = z_2$ и запазва ъглите между кривите, минаващи през нея.

Комплекснозначната експоненциална функция $W = e^z$ е много важна, а също така и много интересна функция от аналитична и геометрична гледна точка. Известно е, че експоненциалната функция е периодична с основен период $2\pi i$, т.к. $e^z = e^{x+iy} = e^x e^{iy}$, или експоненциалната функция е еднолистна във всяка хоризонтална лента широка по вертикала 2π .



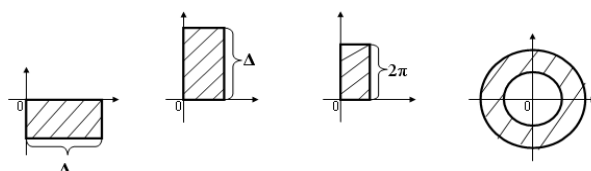
Фиг.2. Времестотни прозорци за уейвлет анализ (wavelet analysis) в равнината ω, t при различни мащаби $a_3 < a_2 < a_1$.

Нека $-\infty < a < b < +\infty$. Нека разгледаме правоъгълник с върхове $a, b, b + 2\pi i, a + 2\pi i$.

Образът на този правоъгълник, трансформиран чрез e^z е концентричен пръстен с център в началото на координатната система и радиуси съответно e^a и e^b [5].

В комплексната равнина извършваме следното:

- Разполагаме скалограмата (правоъгълна) в четвърти квадрант, като левия ѝ горен връх да съвпадне с центъра на координатната система, т. О (Фиг.3).
- Означаваме с Δ дължината на скалограмата по хоризонталната ос. Завъртаме скалограмата на $\frac{\pi}{2}$ с център т. О (умножение на $e^{\frac{\pi i}{2}}$).
- Променяме размера на страната Δ като умножаваме на $\frac{2\pi}{\Delta}$.
- Трансформираме новия правоъгълник (скалограмата) чрез експоненциалната функция.

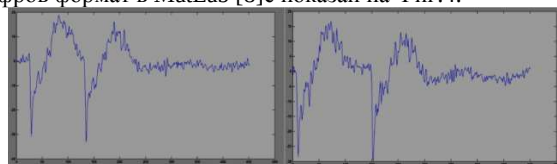


Фиг.3.

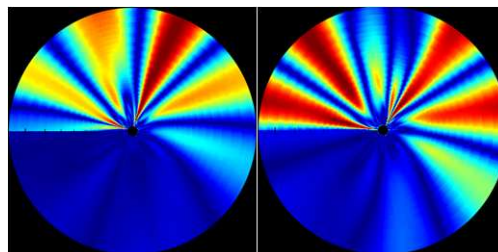
Скалограмата, преобразувана върху кръгъл пръстен наричаме звуков отпечатък (sound print) на източника на звук, по аналогия с познатия пръстов отпечатък (finger print).

3. Визуализация на акустични диаграми.

Конкретен запис на звуков сигнал регистриран чрез измервателния микрофон 4193 Brüel&Kjær [6,7] и въведен в цифров формат в MatLab [8] е показан на Фиг.4.



Фиг.4. Фрагмент от запис на звук от изстрел по време на тактическо учение 2013г. на полигон „Беляковец“, НВУ.



Фиг.5. Звукови отпечатъци на записи на звук от изстрели по време на тактическо учение.

Оценките на компонентите от спектралната плътност на мощността (PSD) на сигнала, са направени с помощта на MatLab, чрез непараметричния метод на дискретно Фурие преобразуване ДПФ (DFT), обработка в прозорец на Хенинг по метода на Уелч.

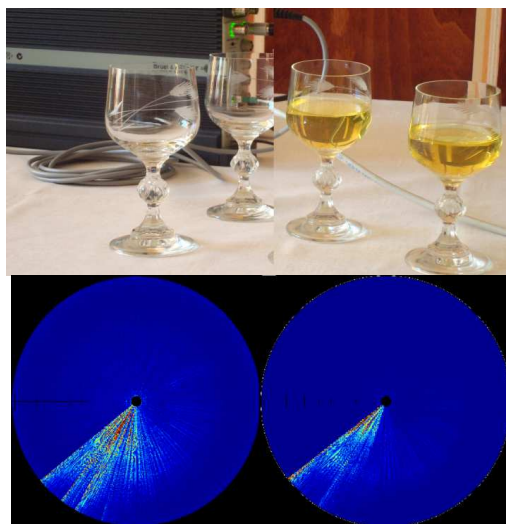
На скалограмите на сигналите получени след като е извършено непрекъснато уейвлетно преобразуване-CWT за базис на Добеши е приложена конформната

трансформация, чрез описаната процедура в 2.2, [9], на Фиг.3. В резултат това са построени звукови отпечатъци илюстрирани на Фиг.5 за съответните изстрели от Фиг.4. Аналогично са построени и звуковите отпечатъци на звън от чаши илюстрирани на Фиг.6.

Заклучение

Ролята на комплексните числа за развитието на науката като цяло и на отделни научни области е изключително голяма. В настоящата работа е дадено кратко описание на някои най-важни математически модели и методи в акустиката, свързани с тях. В исторически план математиката, музиката, астрономията и други науки често са се развивали паралелно и са се допълвали в синергетичен смисъл.

През последните години електрониката, компютърната техника и информационните технологии, приложната математика и особено сравнително новото направление на системите за компютърна математика претърпяха бурно развитие. Съвместното им използване позволи да бъдат преразгледани някои класически феномени, в това число и акустични.



Фиг.6. Звукови отпечатъци на звън на чаши

Обобщеният хармоничен анализ даде възможност да се изследват в дълбочина някои акустични явления, което от своя страна породило нови идеи.

В настоящата работа се предлага едно нестандартно използване на комплекснозначните функции, което би дало възможност за по-добра визуализация на скалограмите, получени чрез уейвлет анализ. Предложените изображения, наречени от нас условно «звукови отпечатъци - *sound prints*» биха позволили създаването на информационни системи, даващи възможност за откриване, разпознаване и идентификация в гражданската и военната област.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Шендеров Е.Л., *Волновые задачи гидроакустики*, Судостроение, Ленинград, 1972
- [2] Ананьев А.Б., *Элементы музыкальной акустики*, Феникс, Киев, 2008
- [3] Alexander D. Poularikas, *The Transforms and Applications Handbook*, Second Edition, CRC Press, 1999
- [4] S.L. Marple, Jr, *Digital Spectral Analysis with Applications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 1987.
- [5] Lars Ahlfors, *An Introduction to the Theory of Analytic Functions of One Complex Variable*, New York, 1953.
- [6] Tihomir Trifonov, Georgi Dimkov, Rosen Dzhakov, Ivan Simeonov, Research and identification of valuable bells of the national historic and cultural heritage of Bulgaria, In *Proceedings of the XXII Conf. "Noise and Vibration"*, Nish, Serbia, 2010, pages 103-107.
- [7] Brüel&Kjær, www.bksv.com
- [8] Mathworks, www.mathworks.com
- [9] Трифонов Т., Г. Димков, И. Симеонов Визуализация на звук и комплексни числа, *Конф. "50 години ВТУ "Св. св. Кирил и Методий"*, 10 май 2013 год., В. Търново.

	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2013”	Варна 11 - 12.10.2013 г. София 29 - 30.11.2013 г. Декември 2013 г.
Година XV	□ Брой 15	

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОРТЕПИАННОГО ЗВУЧАНИЯ В КОНЦЕРТНОМ ЗАЛЕ

THE ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF PIANO SOUNDING IN A CONCERT HALL

В.С.Дидковский¹, проф. докт. техн. наук, С.А.Лунева¹, доц. канд. физ.-мат. наук, В.П.Заец¹,
А.И.Лунев², Т.Трифонов³ доц. канд. физ.-мат. наук

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина

²Национальная музыкальная академия Украины им. П. Чайковского, Украина

³Великотырновский университет „Св. св. Кирилл и Мефодий“, Фак. математики и информатики,
каф. „Алгебра и геометрия“, Болгария

Abstract: The spectral and time characteristics of piano sounding are investigated. The changes of objective parameters of a sound are analyzed depending on frequency of a range, force of a sound, strokes and rates of performance, and also acoustics of a hall, which result in time and timbre characteristics of sounding.

Key words: piano, musical intervals, sound sequence, spectral characteristics of a sound signal, time characteristics of a signal, acoustics of a hall

Вступление

Акустические характеристики фортепианного звука, как объективные параметры качества звучания инструмента, на протяжении последних десятилетий исследовались ведущими акустиками разных стран [1-5]. Наряду с изучением физических особенностей колебаний струн и корпуса, анализировались частотные и временные характеристики сигнала. Однако, выбор звукового материала ограничивался звучанием отдельных нот, а средства выразительности исполнения сводились только к динамическим оттенкам. Результаты таких исследований, прежде всего, были полезны для разработчиков и производителей музыкальных инструментов и в меньшей мере – для исполнителей и слушателей.

В настоящей работе выполняется анализ акустических характеристик звуковых сигналов, более приближенных к звучанию музыкального произведения, а именно, аккордов и звуковой последовательности, а также исследуются их зависимости от таких существенных средств выразительности исполнения как темп и штрихи.

Помимо этого, в работе исследуются влияния акустики зала и размещения зрительских мест на изменения спектрально-временных характеристик звука. Этот вопрос, невзирая на его чрезвычайную значимость как для исполнителей, так и для слушателей, до настоящего времени вообще не рассматривался.

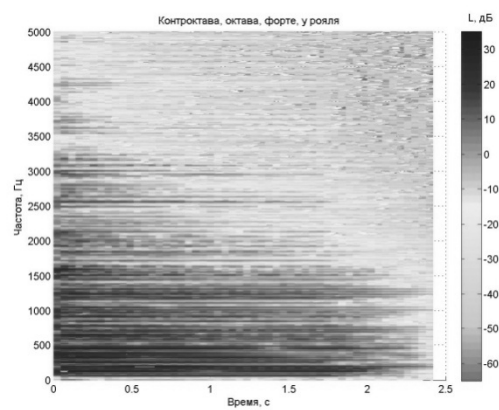
При оценке качества музыкального звука в зале нельзя не учитывать, что на звук инструмента «накладываются» акустические характеристики зала, как среды, в которой происходит передача звука, т.е. акустика помещения определенным образом изменяет звучание музыкальных инструментов, в частности, ясность, разборчивость, тембральную окраску и продолжительность звучания. Таким образом, чтобы определить степень влияния помещения на основные акустические

характеристики музыкального сигнала предлагается исследовать совместно акустику зала и музыкального инструмента, в отличие от предыдущих исследований в области архитектурной и музыкальной акустики, которые рассматривали их отдельно.

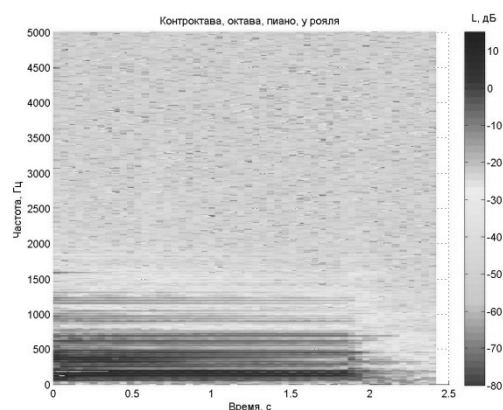
1. Спектральные характеристики музыкальных интервалов

Анализ спектральных и спектрально-временных характеристик музыкальных звуков выполнялся на основе записей фортепианного звучания в Малом зале Национальной музыкальной академии Украины (г. Киев), который по своим акустическим показателям считается практически оптимальным для исполнения камерной музыки [6]. В качестве музыкальных звуков использовались, звучащие на *forte* и *piano*, консонансные интервалы: октавы, квинты и кварты, в диапазоне от контроктавы до третьей октавы, исполненные на рояле фирмы «Bechstein». Обработка звуковых сигналов методом быстрого преобразования Фурье в среде Wave Lab позволила установить ряд акустических закономерностей, свойственных фортепианному звучанию в зале.

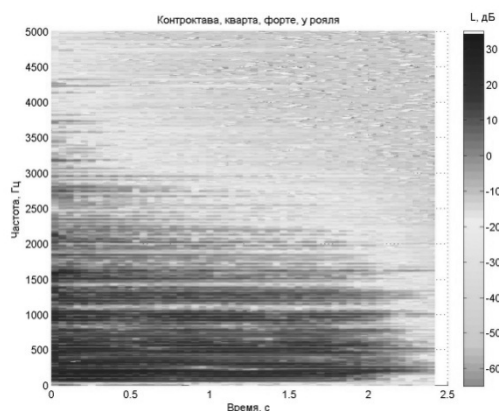
Звук, взятый на *forte* и *piano*, отличается не только громкостью, но и тембром, т.е. количеством образованных обертонов (рис.1). Спектр на *forte* имеет гораздо большую напряженность для всех интервалов во всем диапазоне частот. Причем, для звуков басового регистра, особенно в контроктаве, интенсивность обертонов оказывается больше интенсивности основных тонов. В низкочастотных регистрах богатство тембров звучания дополнительно усиливается благодаря деке, первые собственные частоты колебаний которой сосредоточены в этом диапазоне.



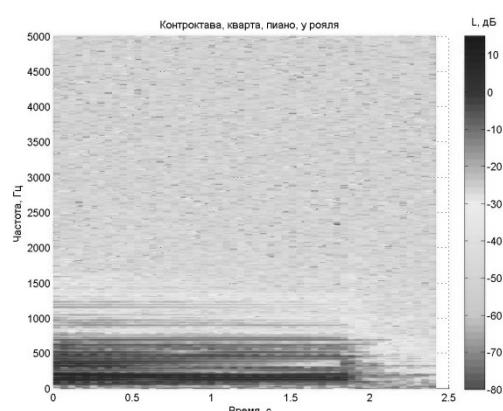
а



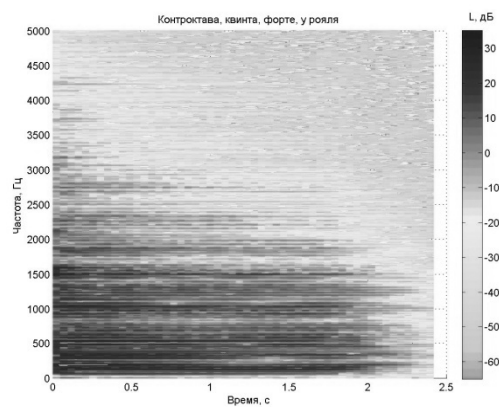
д



б



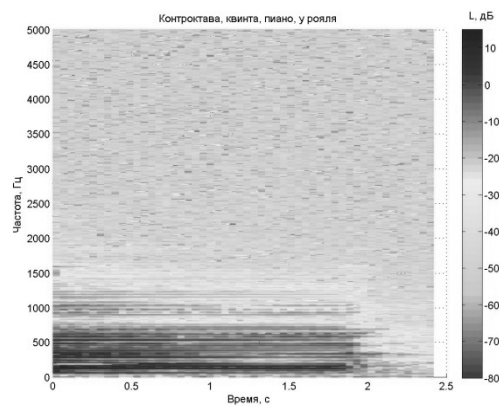
е



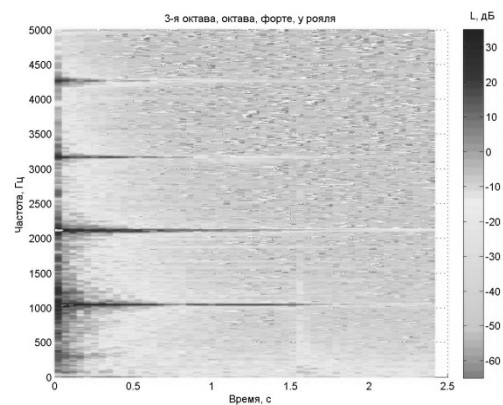
в

Рис.1.Трехмерный спектр музыкальных интервалов в контроктаве: на forte (а- октава, б- квинта, в- кварта) и piano (г- октава, д- квинта, е- кварта)

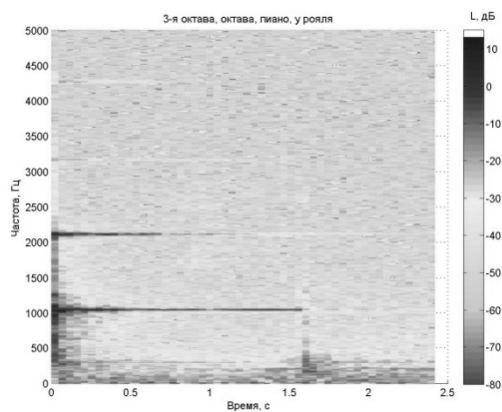
С повышением частоты спектр фортепианного звука обедняется: интенсивность основных тонов повышается, количество обертонов уменьшается; таким образом, различие между тембрами звука, взятого на forte и piano, уменьшается (рис.2). Поскольку указанные закономерности являются типичными для всех проанализированных музыкальных интервалов, далее ограничимся результатами только для интервала «октава».



г



а



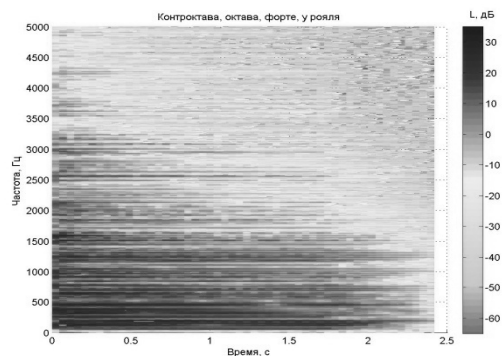
б

Рис.2. Трехмерный спектр интервала «октава» в третьей октаве :а-forte, б- piano

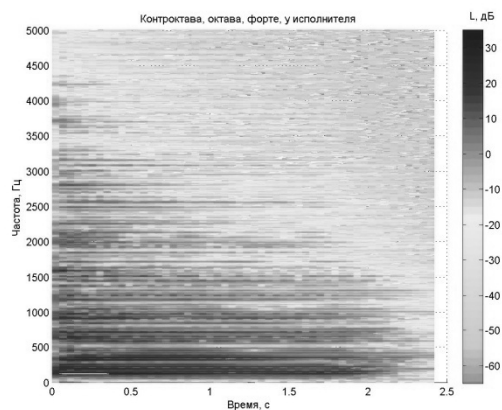
Существенный вывод проведенных исследований состоит в том, что состав спектра одного и того же звука изменяется в разных частях зала, что особенно ощутимо для громкого звука басовых и средних регистров (рис.3).

Изменения спектрального состава звукового сигнала более заметны на двумерных графиках, представленных на рис.4 (без учета длительности звучания обертонов).

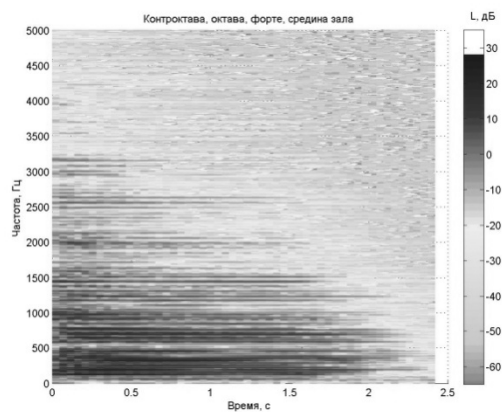
Степень искажения музыкального сигнала в разных частях зала зависит, с одной стороны, от более быстрого затухания звуков высоких частот при распространении их в помещении, с другой стороны – от неравномерности поглощения звука, в зависимости от частоты, облицовочными материалами и публикой. Возможно также усиление некоторых частотных составляющих, совпадающих с собственными частотами помещения, которые, в свою очередь, зависят от его геометрических размеров и формы.



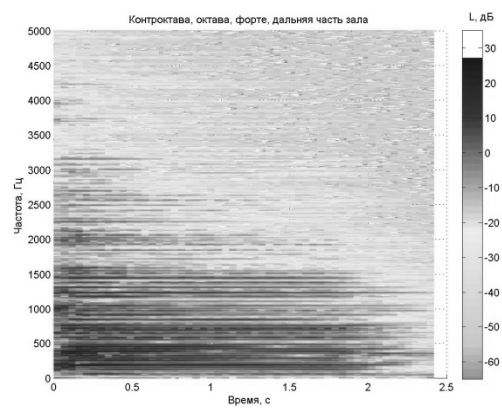
а



б

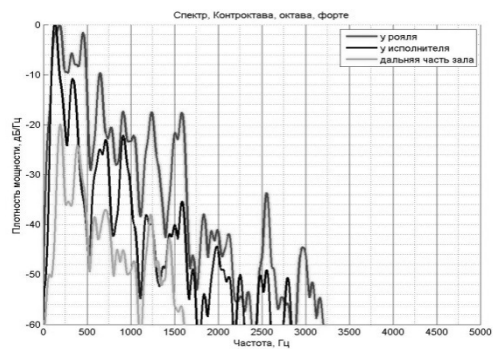


в

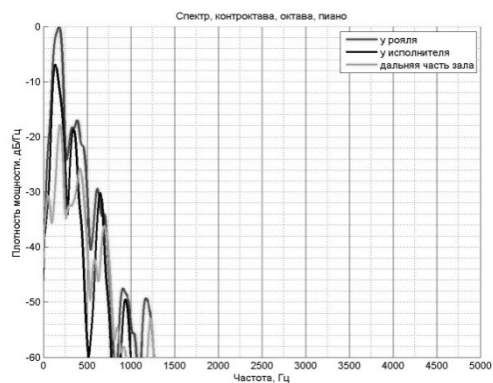


г

Рис.3. Трехмерный спектр интервала «октава» в контроктаве: а - возле струн рояля; б- возле исполнителя; в – в средней части зала; г – в дальней части зала



а



б

Рис.4. Спектр интервала «октава» в контроктаве: а – на forte, б – piano

2. Спектрально-временные характеристики звука

Процесс затухания звука рояля во времени состоит из двух участков (рис.5): первого – более пологого, который соответствует затуханию струны, пока пианист удерживает клавишу, и второго, который соответствует затуханию колебаний деки после срабатывания демпфера. На втором участке звук сначала резко падает, как только исчезает звук струны; затем наблюдаются длительные затухания, которые поддерживаются колебаниями деки. Уровень этого звука значительно меньше начального звука, и его можно считать практически неслышимым.

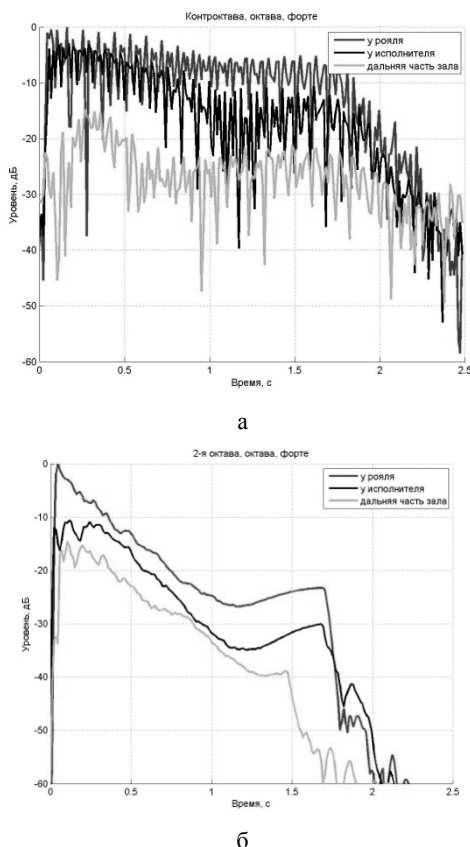


Рис.5. Временные изменения основного тона интервала «октава»: а – контроктава, б – вторая октава; верхняя кривая – возле рояля, средняя – возле исполнителя, нижняя – в дальней части зала

Именно на втором участке затухание звука существенно отличается около рояля и в дальнем конце зала, где звучание поддерживается реверберационным звуком за счет отражений от поверхностей помещения.

На первом участке сигнал в разных местах зала также заметно изменяется, а, кроме того, не сохраняется постоянным по громкости во время удержания клавиши.

Временные зависимости амплитуд отдельных гармоник звукового сигнала отличаются между собой (рис.6). Некоторые частотные гармоники образуют биения, которые проявляются пульсациями громкости соответствующих гармоник и влияют на психологический эффект восприятия музыкального фрагмента.

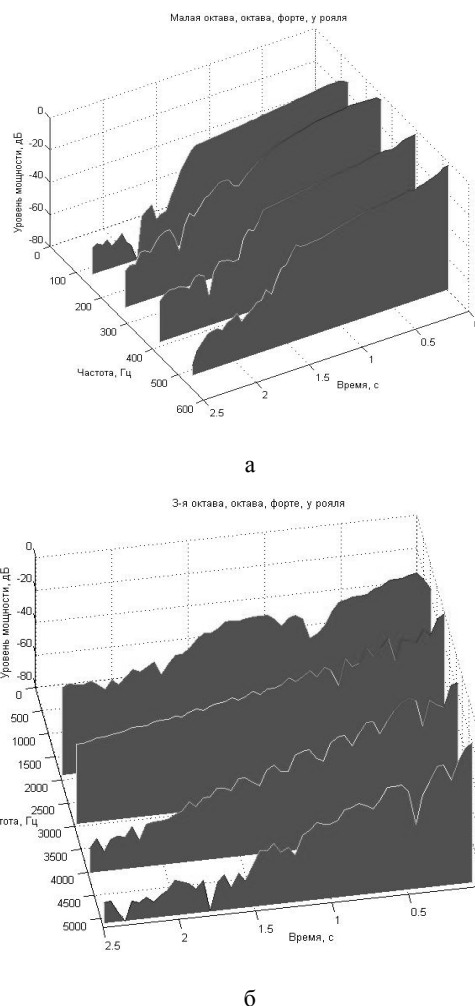


Рис.6. Временное поведение первых четырех гармоник интервала «октава»: а- в малой октаве; б- в третьей октаве

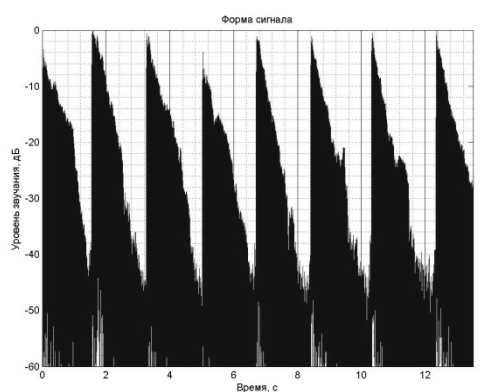
Таким образом, временное поведение частотных составляющих музыкального звука отличается не только для разных гармоник, но и для каждой гармоники в зависимости от места прослушивания в зале, что дополнительно к спектральным искажениям приводит к изменению восприятия звучания рояля.

3. Акустические характеристики звуковой последовательности

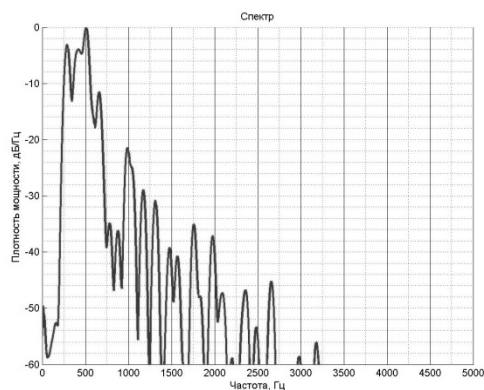
Для более полной оценки изменения тембральных характеристик звука в зале исследована форма сигнала и спектр звуковой последовательности (гаммы до мажор в первой октаве), исполненной в темпах *andante* и *vivace* (разными штрихами) около рояля и в дальней части зала (рис.7,8)

При распространении звука в зале и форма сигнала, и, соответственно, спектр изменяются в зависимости от штрихов, а тем более – от темпа.

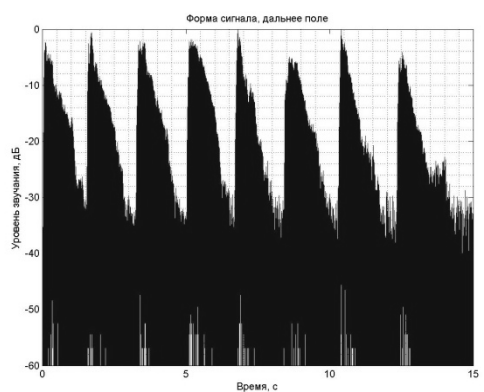
В медленном темпе *andante* (рис.7) в форме сигнала сохраняются пики, которые соответствуют каждой ноте гаммы. При этом в дальнем конце зала затухание звука отдельной ноты существенно уменьшается, и звуковая последовательность значительно сглаживается. Следовательно, в гулком зале ноты начнут «сливаться» на слух, и последующая нота будет маскироваться предыдущей, особенно при исполнении штрихом *legato*.



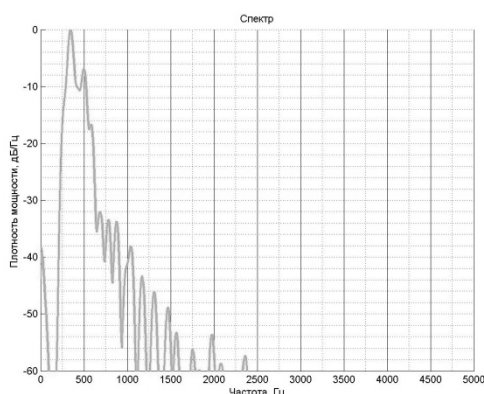
а



б

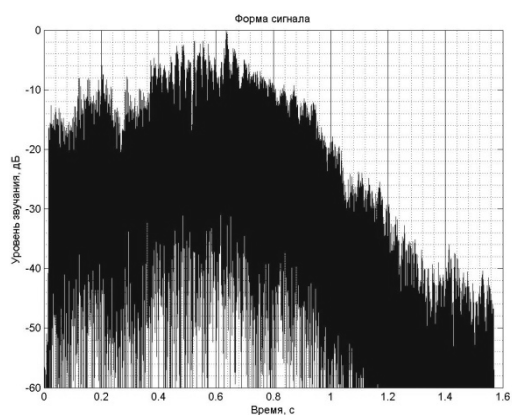


в

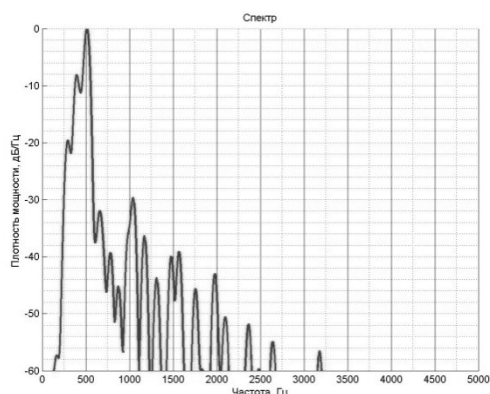


г

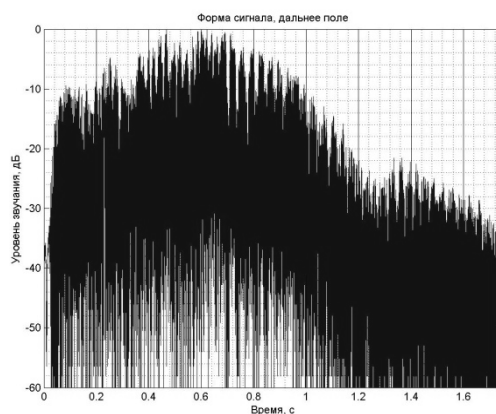
В быстром темпе по форме сигнала видно (рис.8), что все ноты сливаются в практически непрерывную форму сигнала, и все звуки воспринимаются, скорее, как единое целое. Спектр такого сигнала существенно отличается от спектра последовательности, исполненной в *andante*. Искажения спектра дополнительно обусловлены изменением формы сигнала в конце гаммы, а именно, значительным повышением уровня сигнала, что связано с «наложением» звучания предыдущих нот на последующие. Следовательно, в залах со значительным временем реверберации исполнение в слишком быстром темпе будет звучать «грязно» и неразборчиво.



а



б



в

Рис.7. Форма сигнала и спектр звуковой последовательности, исполненной *non legato* в темпе *andante*: возле рояля (а ,б) и в дальней части зале (в ,г)

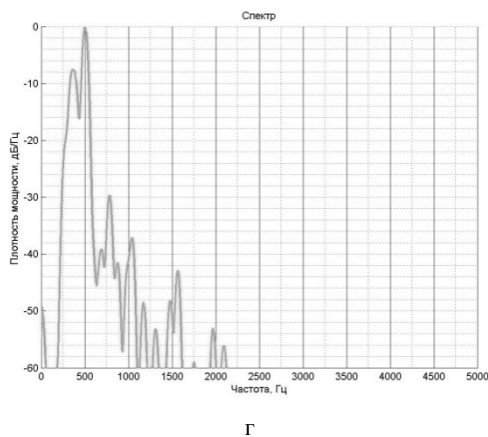


Рис.8 Форма сигнала и спектр звуковой последовательности в темпе vivace: около рояля (а, б) и в дальней части зала (в, г).

4.Временные характеристики звучания рояля

Наиболее информативной временной характеристикой помещения является стандартное время реверберации [7], т.е. время, в течение которого звук выключенного источника затухает на 60 дБ. При этом полагается, что звуковой сигнал исчезает мгновенно, как звук импульсного источника или духового музыкального инструмента.

Существует понятие оптимального времени реверберации [6], когда определенная звуковая программа звучит наилучшим образом.

Эта характеристика достаточно субъективная, однако обычно пользуются усредненными справочными данными [8], которые, в частности регламентируют время реверберации для камерной музыки.

Поскольку этот вид музыкальной программы включает сольное или ансамблевое исполнение на различных музыкальных инструментах, то понятно, что оптимальное время реверберации представляет собой очень обобщенную характеристику.

Звучание разных музыкальных инструментов существенно отличается по таким временным характеристикам, как атака и затухание. Звук духового инструмента действительно затухает мгновенно, и время его послезвучания в помещении соответствует времени реверберации в зале. Звуки же струнных инструментов: смычковых, щипковых и ударных – имеют длительное время затухания, обусловленные колебаниями струны и корпуса инструмента [9-11].

В частности, звук фортепиано, невзирая на наличие демпферов, которые демпфируют колебания струны в басовых и средних регистрах через 0,1 с после удара по клавише, имеет длительное время затухания за счет поддержания звучания резонансной декаой. В результате звук каждой ноты рояля «накладывается» на звучание зала и, таким образом, продлевается.

Следовательно, термин «время реверберации», который обычно употребляют по аналогии с акустикой помещения [12], является не корректным для временной характеристики звучания струнных инструментов.

В связи с этим, предлагается ввести понятие «время послезвучания», которое, на пример для рояля, будет определяться временем полного затухания фортепианного звука (на 60 дБ) в соответствующей октавной полосе частот. Этот параметр будет более полно характеризовать звучание струнного инструмента в зале, чем время реверберации помещения.

График частотной зависимости времени реверберации, измеренной с помощью импульсного источника звука в пустом помещении Малого зала Национальной музыкальной академии Украины, приведен на рис.9. На графике нанесена область оптимальных значений, рассчитанных по формуле Лифшица [13] для объема зала 1000 м³, с желательным подъемом в области низких и высоких частот для обеспечения «теплоты» и «яркости» звучания музыки.

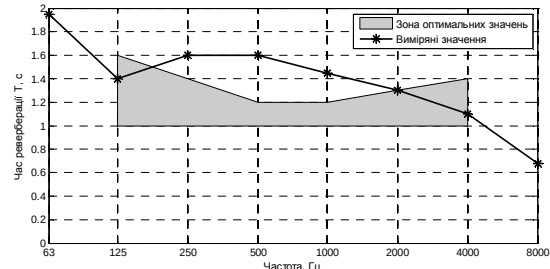


Рис.9.Стандартное время реверберации, измеренное в пустом зале

На рис.10 представлено эффективное время реверберации (вблизи рояля) [6] и стандартное (в дальнем конце зала). Стандартное время реверберации значительно превышает эффективное, в среднем на 0,5-0,7 с, что очень существенно, поскольку слушатели ощущают различие уже в 0,1 с.

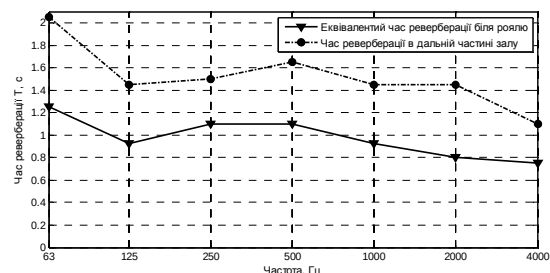


Рис.10. Время реверберации вблизи рояля и в дальней части зала

Время послезвучания музыкальных интервалов – октавы, квинты и кварты – возле рояля и в дальнем конце зала приведено на рис.11, 12. Для сравнения на этих же графиках дается эффективное (рис.11) и стандартное (рис.12) время реверберации.

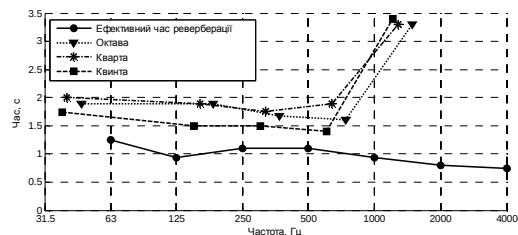


Рис.11. Время послезвучания музыкальных интервалов возле рояля

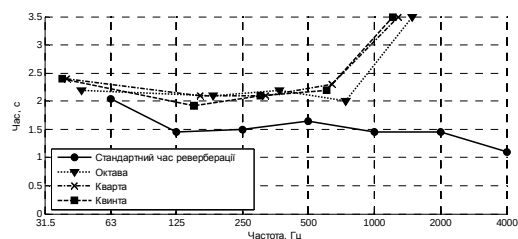


Рис.12. Время послезвучания музыкальных интервалов в дальней части зала

Как и ожидалось, время послезвучания значительно превышает соответствующее время реверберации. Подъем времени послезвучания в диапазоне частот выше 2000 Гц объясняется отсутствием демпферов в дискантном регистре и, таким образом, увеличением времени затухания колебаний струн.

В дальней части зала время послезвучания музыкальных интервалов возрастает, но не так существенно, как для импульсного источника (в среднем на 0,2 – 0,4 с). При этом значения времени послезвучания различных музыкальных интервалов сближаются, поэтому при дальнейшем рассмотрении будем использовать их усредненные значения.

Анализ представленных результатов привел к мысли, что, поскольку звучание рояля происходит в звуковом поле помещения, целесообразно для вычисления времени послезвучания в дальнем конце зала применить так называемый «закон кубов» [14]. Обычно, этот закон используется для вычисления времени реверберации в связанных помещениях или когда запись источника звука, выполненная в одном помещении, воспроизводится в другом помещении. По аналогии с указанными ситуациями предлагается вычислять куб времени послезвучания музыкального интервала в дальнем поле как сумму кубов его времени послезвучания возле рояля и стандартного времени реверберации в помещении.

На рис. 13 приведены усредненные значения времени послезвучания музыкальных интервалов в сравнении с аналогичной характеристикой, рассчитанной по «закону кубов».

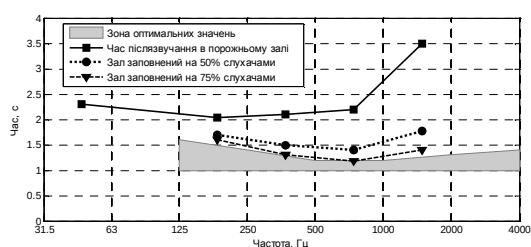


Рис.13. Усредненное время послезвучания музыкальных интервалов, рассчитанное по «закону кубов»

Как следует из графиков (рис.13), предложенная формула хорошо отражает результаты процесса «наложения» реверберации помещения на звук рояля. Значения, рассчитанные по «закону кубов», практически соответствуют измеренным значениям.

Если частотные характеристики усредненного времени послезвучания считать достаточно унифицированными для роялей определенной фирмы, то аналогичные характеристики в дальней части зала можно рассчитать, зная стандартное время реверберации в зале.

Выводы

На основе выполненного анализа спектральных и временных характеристик фортепианного звучания очевидно, что субъективные тембральные и временные характеристики звука возле пианиста и в разных частях зала существенно отличаются. В залах излишне

заглушенных или гулких, с неправильной геометрией или наличием акустических дефектов [6] искажения музыкального сигнала становятся чрезвычайно ощутимыми. В связи с этим, исполнитель не может полагаться только на собственное ощущение звучания, ему необходимо учитывать изменения звуковых впечатлений слушателей, которые происходят на зрительских местах в зависимости от акустических свойств зала.

Для акустической характеристики концертного зала, наряду со стандартным временем реверберации, рекомендуется использовать время послезвучания музыкального инструмента. Сравнение значений именно этой характеристики с рекомендованными оптимальными параметрами музыкального звучания в зале [6] даст ответ об акустическом качестве зала.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Володин А. Роль гармонического спектра в восприятии высоты и тембра звука// Музыкальное искусство и наука. - Вып.1. - М.: Музыка, 1970. - с.11-38.
- [2] Галембо А.С. Фортепиано. Качество звучания. – М.: Легпромиздат, 1987. – 165 с.
- [3] Five Lectures on the Acoustics of the Piano/ Ed. A.Askenfelt. – Stockholm: Royal Swedish Acad. Of Music, 1990. – 148 p.
- [4] Suzuki H., Nakamura I. Acoustics of Pianos// Appl. Acoust., V.30, 1990. – P.147-205.
- [5] McFerrin W.V. The Piano: its Acoustics. – Boston: Tuners Supply Co, 1972. – 290 p.
- [6] Дідковський В.С., Луньова С.А., Богданов О.В. Архітектурна акустика. – Київ: НТУУ «КПІ», 2012. – 385 с.
- [7] ISO 3382-2:2008// Акустика. Измерение акустических параметров в помещениях. Часть 2. Время реверберации в обычных помещениях. – ISO/TK 43, SC 2. – 24 с.
- [8] Акустика: Справочник/ Под ред. Сапожкова М.А. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.
- [9] Fletcher N.H., Rossing T.D. The Physics of Musical Instruments. - N.-Y.: Springer-Verlag, 1991. – 450 p.
- [10] Галембо А.С. Фортепиано. Качество звучания. – М.: Легпромиздат, 1987. – 165 с.
- [11] Усиков А.Я., Лаптий В.К. Радиофизическое исследование феномена тембра звучания старинных итальянских смычковых музыкальных инструментов// Радиофизика и электроника. – Т.13, спецвыпуск, 2008. – с.455-461.
- [12] Алдошина И.А., Приттс Р. Музыкальная акустика. – С.-П.: Композитор, 2006. – 719 с.
- [13] Лифшиц Я.С. Курс архитектурной акустики. – М.: ОНТИ, 1937. – 290 с.
- [14] Фурдуев В.В. Электроакустика. – М.-Л.: ОГИЗ, гос. изд-во техн.-теор. лит, 1948. – 468 с.

VoIP РАЗГОВОР МЕЖДУ АБОНАТИ ПРЕЗ ETHERNET И E1 ИНТЕРФЕЙС

VoIP CALL BETWEEN SUBSCRIBERS VIA ETHERNET AND E1 INTERFACE

маг. инж. ГЕОРГИ СТОЯНОВ

Технически университет - Варна
Ул. “Студентска” 1
Тел: 052 383 304
georgi.stoyanovv@gmail.com

гл.ас. инж. д-р ТОДОРКА ГЕОРГИЕВА

Технически университет - Варна
Ул. “Студентска” 1
Тел: 052 383 304
tedi_ng@mail.bg

Abstract

The current paper aims to show different ways of communication between different points of a standard communication network, and to examine the quality of services according to the communication interface. Much of modern communications are based on IP as IP PBXs that provide a full range of services needed for an enterprise, company or organization. Nowadays, there are still places where an older communication equipment is used. The quality of the conversation between two persons is primarily affected in the current paper. A number of studies are made to highlight the advantages and disadvantages of the two types of communication interfaces - Ethernet and E1.

Keywords: VoIP, QoS, SIP, IAX2, Ethernet, E1, RTP, ISDN

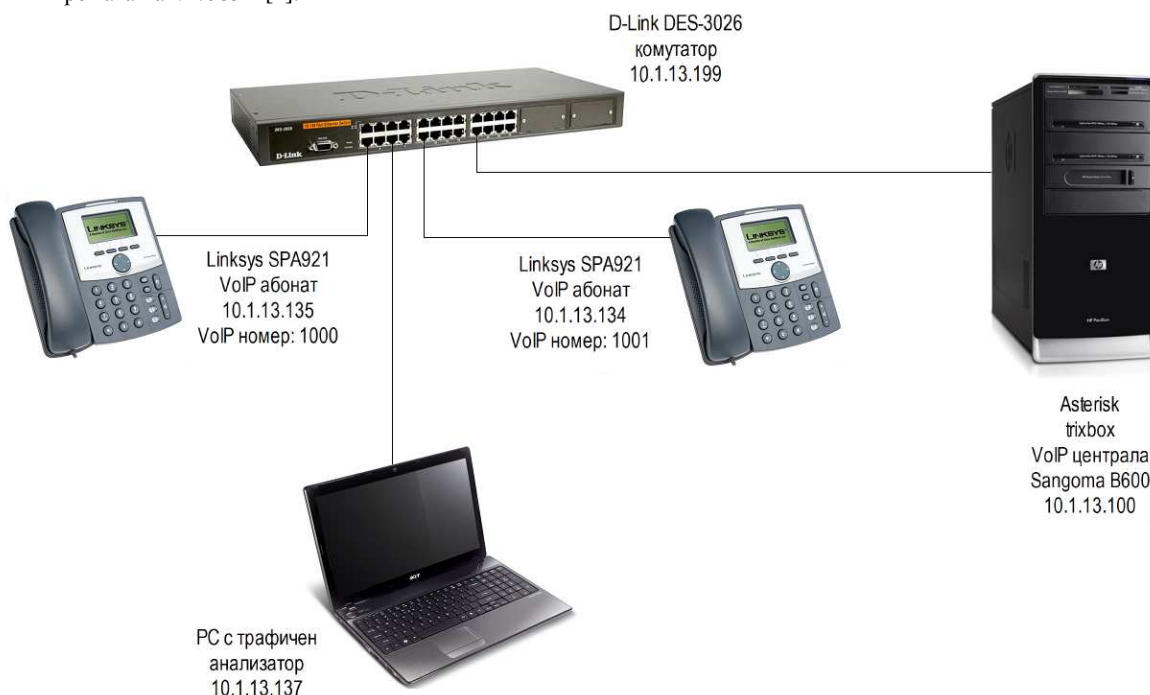
УВОД

За изграждане на мрежата е използвана наличната база от мрежови устройства, предоставяща възможност за провеждане на редица експерименти, свързани с качеството на услугите, оптимизационна мрежова дейност и управление на трафика. На базата на IAX2 протокола, разработен специално за комуникация между Asterisk базирани централи, се предоставя пълна свързаност между софтуерните VoIP централи. Свързващите звена осигуряват достъп до наличните ресурси – вътрешна университетска телефонна мрежа, LAN мрежа, Интернет и ISDN наета линия към мрежата на Vivacom [1].

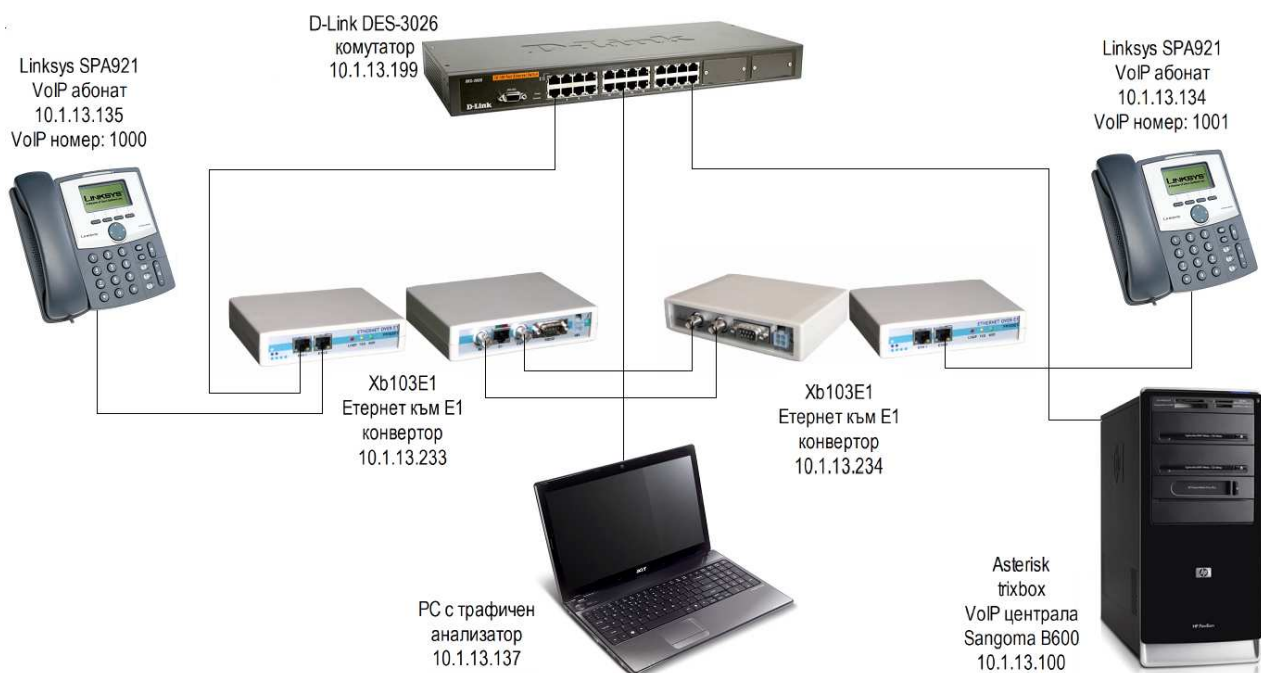
1. ИЗЛОЖЕНИЕ

1.1 VoIP РАЗГОВОР МЕЖДУ АБОНАТИ ПРЕЗ ETHERNET

VoIP повикването се реализира чрез SIP сигнализация (TCP) и RTP пакети, пренасящи полезната гласова информация (UDP). За прихващане на VoIP трафик е избран филтър, за прихванатите пакети [2]. За провеждане на изследването е използвана следната топологията (фиг.1).



фиг.1 Сценарий за изследване на SIP терминали, абонати на Asterisk trixbox централата



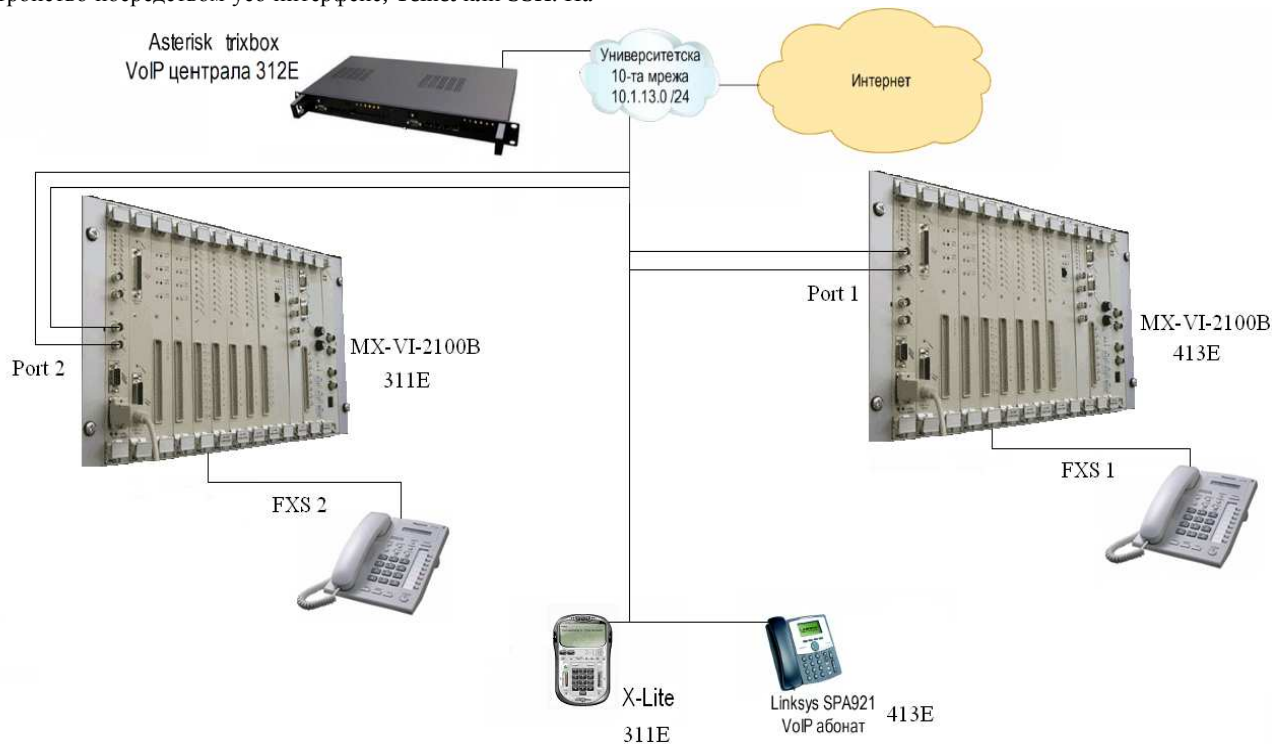
фиг.2 Топология на свързване при провеждане на разговор през E1

1.2 VoIP РАЗГОВОР МЕЖДУ АБОНАТИ ПРЕЗ E1 ИНТЕРФЕЙС

Реализирана е топология с помощта на конверторите XB103E1, преобразуващи Ethernet потока в E1 със скорост 2Mbit (фиг.2). Резултатите, които се очакват са намаляване на качеството на разговора и увеличаване на затихванията.

Управлението на мрежата се извършва от предназначен за това персонален компютър, имащ достъп до всяко устройство посредством уеб интерфейс, Telnet или SSH. На

същият компютър има VMWare софтуер с инсталирани няколко виртуални машини чрез които могат да се следят резултатите от радикални промени или несигурни експерименти върху Asterisk централи без да се застрашава работата и сигурността на хардуерните машини. За отдалечен контрол върху мрежата е изграден PPTP криптиран VPN тунел, чрез който се осигурява денонощен достъп от отдалечена мрежа [3]. По този начин е възможно извършване на редица изследвания и експерименти on line.



фиг.3 Отдалечена връзка между две мултиплексни системи

1.3 ОТДАЛЕЧЕНА ВРЪЗКА МЕЖДУ ДВЕ МУЛТИПЛЕКСНИ СИСТЕМИ

С цел наблюдение качеството на разговор между два отдалечени абоната на две различни мултиплексни системи е реализирана следната топология, показана на фиг.3. Идеята е да се наблюдава разликата в качеството при самостоятелно провеждане на разговор между два абоната на VoIP централата и едновременно провеждане на разговор по Ethernet и E1 интерфейси.

2.РЕЗУЛТАТИ

За реализиране на изследването се използват SIP софтуерни телефони и ISDN цифрови телефонни модели [4] като един от най-важните инструменти свързани с VoIP, е анализът на RTP потоци в прихванатите пакети (фиг.4).

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
29	3.641611	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	SDP/offer: INVITE sip:10000000.1.13.100, with session description
30	3.641612	10.1.13.134	10.1.13.100	SIP	Status: 400 Unauthorised
31	3.682565	10.1.13.134	10.1.13.100	SIP	request: ACK sip:10000000.1.13.100
32	3.693024	10.1.13.134	10.1.13.100	SIP	request: INVITE sip:10000000.1.13.100, with session description
33	3.694017	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 100 Trying
34	3.871846	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	SDP/offer: INVITE sip:10000000.1.13.135:5060, with session description
35	3.872275	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
36	3.887663	10.1.13.135	10.1.13.100	SIP	Status: 100 Trying
37	3.943128	10.1.13.135	10.1.13.100	SIP	Status: 180 Ringing
38	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
39	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
40	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
41	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
42	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
43	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
44	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
45	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
46	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
47	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
48	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
49	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
50	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
51	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
52	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
53	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
54	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
55	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
56	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
57	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
58	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
59	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
60	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
61	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
62	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
63	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
64	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
65	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
66	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
67	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
68	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
69	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
70	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
71	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
72	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
73	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
74	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
75	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
76	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
77	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
78	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
79	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
80	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
81	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
82	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
83	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
84	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
85	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
86	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
87	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
88	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
89	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
90	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
91	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
92	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
93	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
94	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
95	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
96	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
97	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
98	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
99	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing
100	3.944321	10.1.13.100	10.1.13.134	SIP	Status: 180 Ringing

фиг.4 Изследването на SIP софтуерни телефони

В зависимост от продължителността на разговора, големината на пакетите и някои други параметри, след известно обработката на пакетите в права и обратна посока, се получават изчислените параметри свързани с пакетните интервали (Delta [ms]), джитера (Jitter [ms]), скоростта (IP BW [kbps]) (фиг.5). Отбелязан е Marker, интерпретиращ съответния бит в RTP хедъра и Status, определящ състоянието на пакета. Освен това в информационното поле са получени данни за номера на пакета с най-голям пакетен интервал от анализирания (на фигурата – пакет с по.426), общия брой RTP пакети, колко от тях са получени и колко са загубени, а също така и каква е най-голямата последователност от загубени пакети [4] .

Src IP addr	Src port	Dst IP addr	Dst port	SSRC	Payload	Packets	Lost
10.1.13.100	16352	10.1.13.134	16400	0x1085670C	g711U	850	0 (0.0%)
10.1.13.100	13830	10.1.13.135	16432	0x78C4FDC0	g711A	850	0 (0.0%)
10.1.13.134	16400	10.1.13.100	16352	0x8ED4EF8	g711A	852	0 (0.0%)
10.1.13.135	16432	10.1.13.100	13830	0x2EDE1CE5	g711A	850	0 (0.0%)

Packet	Sequence	Delta(ms)	Filtered Jitter(ms)	Slew(ms)	IP BW(kbps)	Marker	Status
398	63071	19,54	0,66	1,77	81,60	[Ok]	[Ok]
402	63072	20,65	0,66	1,11	81,60	[Ok]	[Ok]
406	63073	20,77	0,67	0,34	80,00	[Ok]	[Ok]
410	63074	18,59	0,72	1,75	81,60	[Ok]	[Ok]
414	63075	20,20	0,68	1,54	81,60	[Ok]	[Ok]
418	63076	20,60	0,68	0,95	80,00	[Ok]	[Ok]
422	63077	18,96	0,70	1,99	81,60	[Ok]	[Ok]
426	63078	20,54	0,69	1,45	81,60	[Ok]	[Ok]
430	63079	20,30	0,67	1,15	80,00	[Ok]	[Ok]
434	63080	20,38	0,65	0,77	80,00	[Ok]	[Ok]

Max delta = 21,71 ms at packet no. 2588
Max jitter = 0,82 ms. Mean jitter = 0,64 ms.
Max slew = 2,24 ms.
Total RTP packets = 850 (expected 850) Lost RTP packets = 0 (0.00%) Sequence errors = 0
Duration 16,98 s (-158 ms clock drift, corresponding to 7925 Hz (-0,59%))

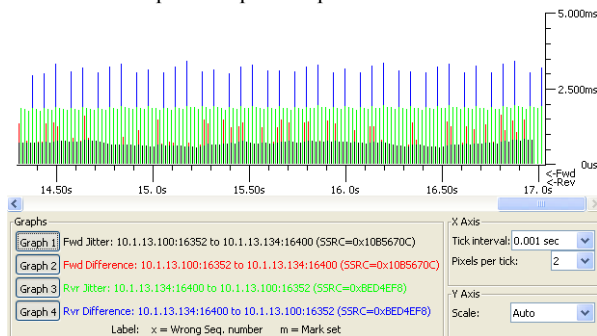
фиг.5 Обработка на пакети

Стойностите на джитера и загубата на пакети влияят по определен начин на качеството на разговора. Когато се увеличи времето на джитера и разликата се получава забавяне на получаването на говора, както и леки смущения и ехо. При загубата на пакети се влошава говора, забелязва се насичане.

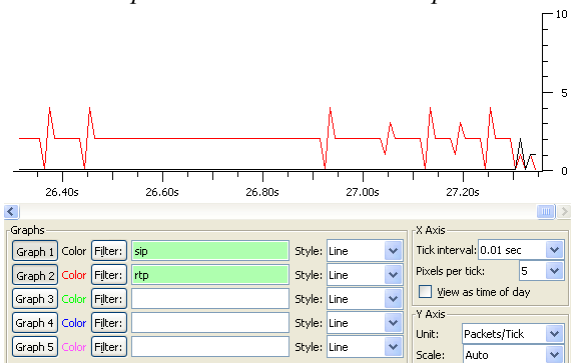
2.1 РАЗГОВОР ПРЕЗ ETHERNET

В този случай се изследва качеството на провеждане на разговор между два VoIP абоната през Ethernet интерфейс. Резултатите на фиг.6 и фиг.7 говорят за едно абсолютно

нормално провеждане на разговора без почти никакви затихвания по време на разговора.



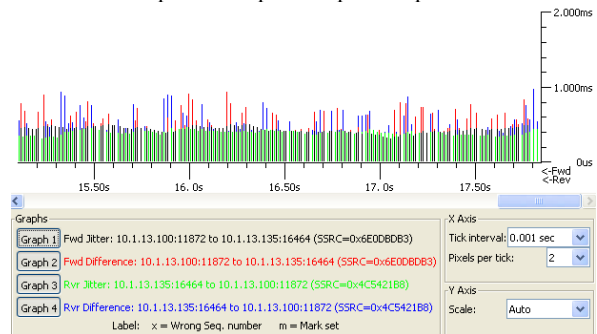
фиг.6 Закъснение и джитер



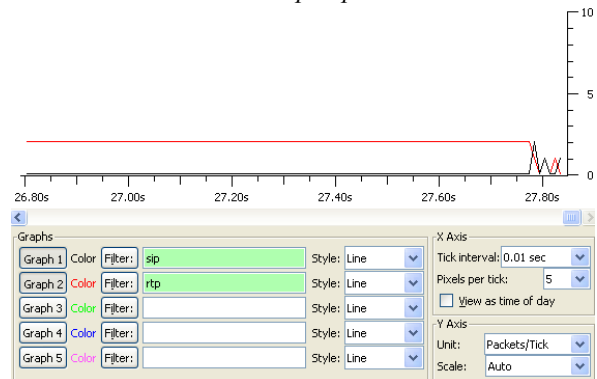
фиг.7 Затихване по време на разговор

2.2 РАЗГОВОР ПРЕЗ E1

При провеждане на разговор между два абоната през E1 интерфейс се влошава качеството на разговора и се увеличават затихванията, което се дължи на преобразуването на Ethernet потока в E1 със скорост 2Mbit. Няма почти никакво предаване на пакети – графиката на RTP трафика е абсолютно права линия (фиг. 9). Под 1ms няма как да се проведе нормален разговор.



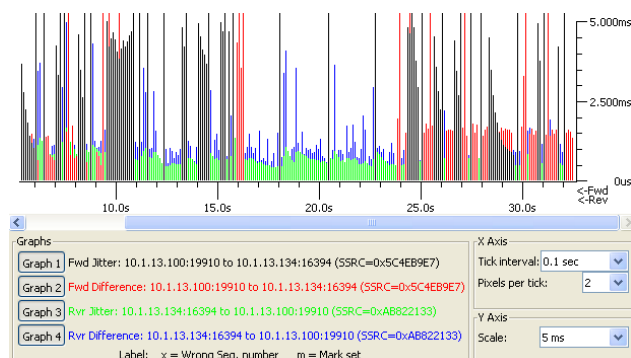
фиг.8 Закъснение и джитер с използване на конвертори



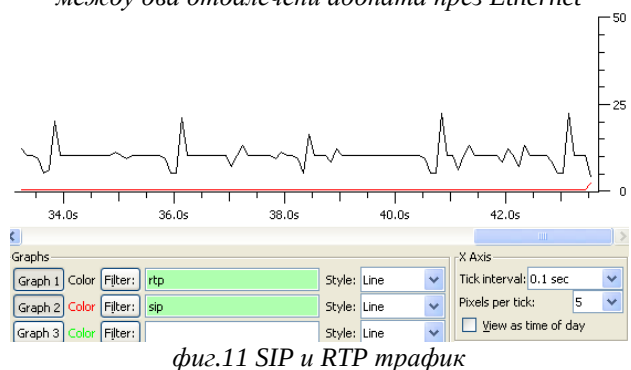
фиг. 9 Затихване по време на разговор

2.3 РАЗГОВОР МЕЖДУ ДВЕ МУЛТИПЛЕКСНИ СИСТЕМИ

В единия случай се анализира самостоятелно провеждане на разговор между два VoIP абоната, софтуерен и хардуерен телефон през Ethernet интерфейс, а в другия случай, докато се провежда този разговор между абонати на VoIP централата, се провежда, едновременно с това, и разговор между абонати на двата мултиплексора през E1 интерфейс.

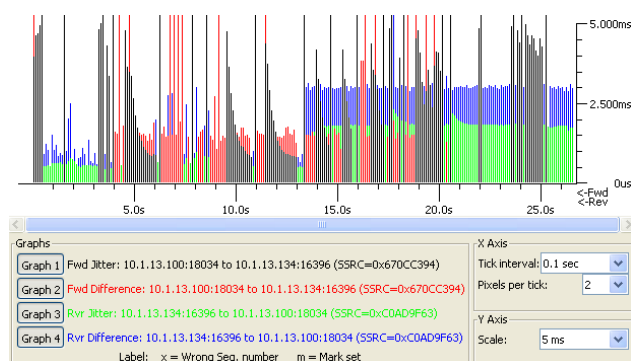


фиг.10 Самостоятелно провеждане на разговор между два отдалечени абоната през Ethernet

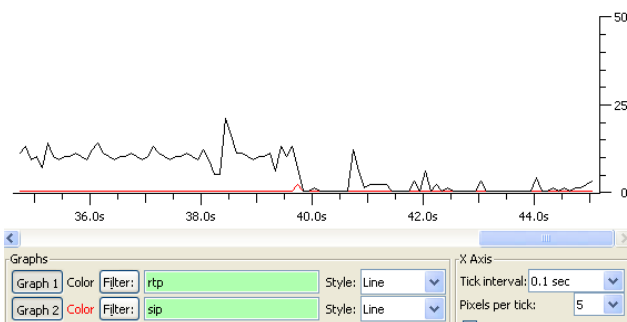


фиг.11 SIP и RTP трафик

От резултатите, посочени на фиг.10 и фиг.11 се забелязва, че няма резки промени в сигнала на изпращане и получаване. Графиката на RTP и SIP протокола също е постоянна, което води до едно качествено провеждане на разговора, без допълнителни смущения [5].



фиг.12 Едновременно провеждане на разговор през Ethernet и E1 интерфейс



фиг.13 SIP и RTP трафик

За сметка на това при включването на разговор през мултиплексорите на фиг.12, фиг.13, докато тече първия разговор се забелязва следното, а именно увеличава се времето на забавяне на джитера, също и изминалото време между изпращането и получаването на два пакета също се увеличава, което води до забавяне на говора и се появява ехо. Появява се и загуба на пакети, което се дължи на препълване на буфера на мултиплексора и се получава прекъсване по време на разговора.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изградената мрежа е създадена с идея за бъдещо развитие, допълване и резервираност, с използването на маршрутизатори, цифрови мултиплексори и конвертори. Вариантите на свързване предоставят редица възможности за изследване и практически реализации на различни типове връзки с обединяването на два типа интерфейси – аналогови и цифрови, служещи основно за предаване на глас.

При предаването на глас по E1 са използвани сигнализациите CAS (емулираща FXO, E&M или FXS), или ISDN PRI. Оборудване позволява E1 да се използва и за предаване на данни. В този случай става възможно обединяването на няколко канала по 64 kbit/s в един виртуален порт с пропускателна способност Nx64 kbit/s.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Joseph Epstein, "Scalable VoIP Mobility", Newnes, 2009.
- [2]. Multiplex Ltd. MX-VI-2100_v3.08d_bg – Техническа документация.
- [3]. L Sun & E C Ifeachor, "Subjective and Objective Speech Quality Evaluation under Bursty Losses", Department of Communication and Electronic Engineering, University of Plymouth PL4 8AA, UK, pp. 1 –3, 2008.
- [4]. Георгиева Т., Изследване на говор във VoIP мрежа, Национална Конференция „Акустика“, Научен журнал Акустика, брой 14, 2012.
- [5]. http://www.en.voipforo.com/SIP/SIP_example.php

МОДИФИЦИРАН МЕТОД ЗА СИНТЕЗ НА КЛАС АВ АУДИО УСИЛВАТЕЛ НАТОВАРЕН С КОМПЛЕКСЕН ТОВАР – ЧАСТ.1.

MODIFIED METHOD FOR THE SYNTHESIS OF CLASS AB AUDIO AMPLIFIER LOADED WITH COMPLEX LOAD - PART.1.

ПЛАМЕН АНГЕЛОВ АНГЕЛОВ

Бургаски Свободен Университет, Център по информатика и технически науки, Сан Стефано N 62, Бургас 8001 e-mail:
pangelov@bfu.bg

Abstract

In the present article we produce modification methods to determine the basic parameters of the linear audio amplifier with complex load. The compilation between known methods and our modification define some differences between basic parameters like overload voltage of the output stage and correct determine of the electronics parts.

Keywords: modification methods, determine, linear audio amplifier, complex load.

УВОД

Настоящата статия продължава анализа на модифициран метод за синтез и оценка на аудио усилвател клас „AB” с отчитане импедансната характеристика на товара. В предишна статия „Модифициран метод за проектиране на нискочестотен аудио усилвател с отчитане комплексният характер на товара” част.1. и част.2. публикувани в сп. Акустика 2012 [2] вече беше поставено началото на този метод, който отчита еквивалентната електрическа схема на високоговорителя. По този начин всички честотно определящи параметри на високоговорителя участват в синтеза на усилвателя и определят коректния избор на изграждащите компоненти. Този материал е продължение на метода за синтез и оценка на аудио усилвател (крайно стъпало) натоварен с комплексен товар.

1. МОДИФИЦИРАНА МЕТОД ЗА СИНТЕЗ НА АУДИО УСИЛВАТЕЛ КЛАС АВ НАТОВАРЕН С КОМПЛЕКСЕН ТОВАР

1.1. ХАРАКТЕРНИ ОСОБЕНОСТИ НА ПРИНЦИПНА СХЕМА НА КРАЙНОТО СТЪПАЛО

Принципната схема на крайното стъпало на усилвателя е идентична с предходните статии. Схемата тук се представя от гледна точка анализ на останалите съставни компоненти на усилвателя. Общ вид на схемата е показан на фиг.1. За подробен анализ и оценка е използван високоговорител Discovery-15M/4624G00 [5] чиито параметри са намерили приложение и в предните статии по едноименната тематика.

Известни изходни данни за аудио стъпалото участващи в анализа:

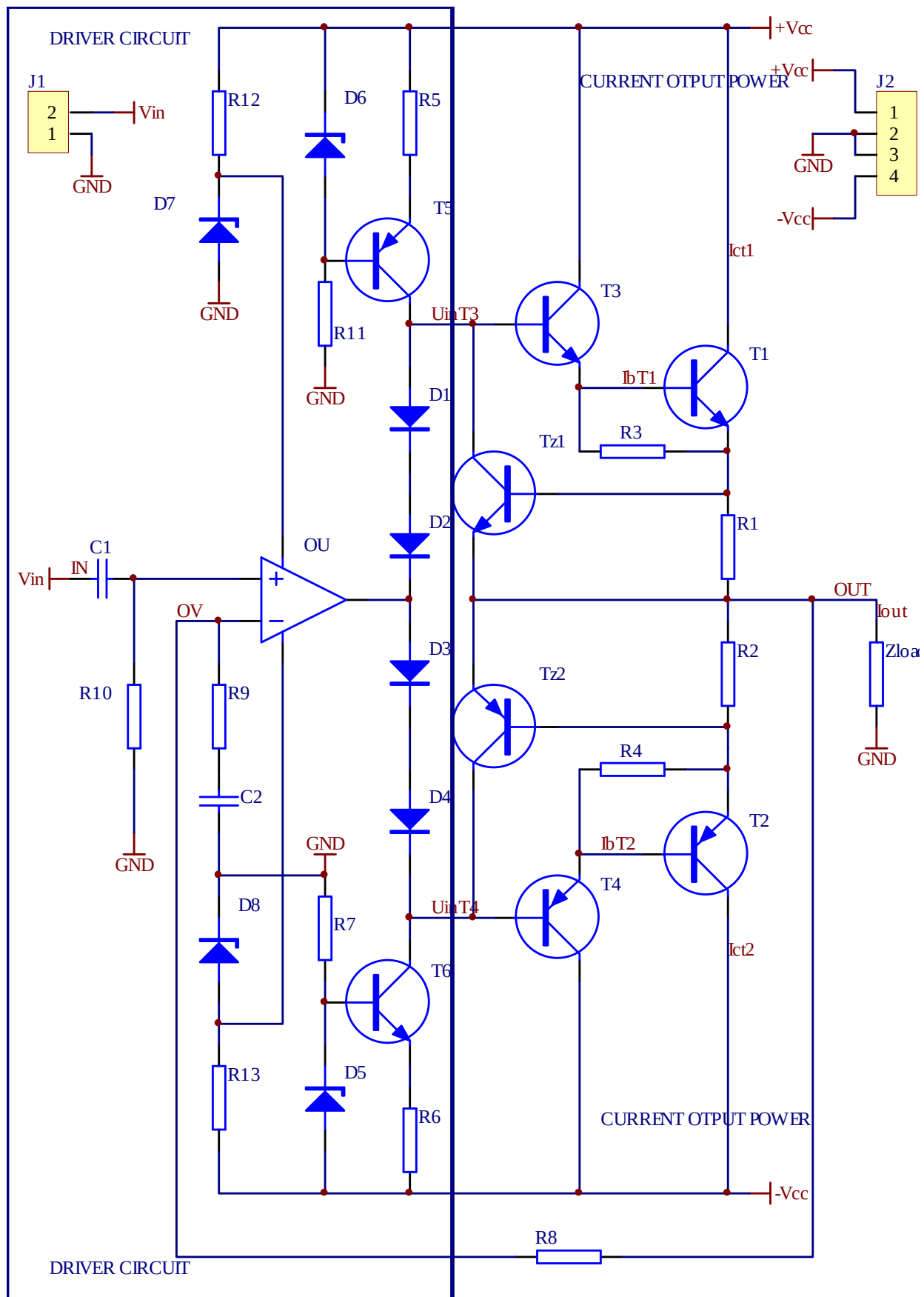
- Импедансната характеристика на товара [5]
 Z_{load} ;
- Преднапрежението на транзисторите T1 T2 $U_{be1,2}$ и максималният базов ток $I_{bmax1,2}$ на крайните транзистори;
- статичен коефициент на усилване по ток при схема общ емитер $h_{21ET1,2}$;
- честотна лента $f_l \div f_h$;
- параметри на избраният високоговорител Discovery – 15M/4624G00 [5].

Анализа продължава с определяне на допълнителните параметри:

- Ограничителни параметри при избора на всеки от транзисторите T3 и T4;
- Критерии за избор на всеки от резисторите R3 и R4;
- Оценка на разсейваната мощност за всеки от резисторите R3 и R4.

Полята на двата резистора R3 и R4 е запазване на линейността на изходното стъпало. Тези резистори определят температурната стабилност на усилвателя. Тази стабилност се изразява най-ясно при промяната на базовия ток на транзисторите T1 и T2 и промяна на работната температура на усилвателя. В този случай усилвателя работи с повишена изходна мощност, което натоварва работата на транзисторите T1 и T2. Това повишава работната температура на всеки от транзисторите и се явява основна причина за промяната на статичния коефициент $h_{21ET1,2}$. Включването на допълнителните резистори R3 и R4 паралелно на базовия преход позволява стабилизация на работната точка на T1 и T2.

1.2. КРИТЕРИИ ЗА ИЗБОР НА ВСЕКИ ОТ РЕЗИСТОРТЕ R₃ И R₄ С ПРОМЯНА НА СТАТИЧНИЯ КОЕФИЦИЕНТ $h_{21ET1,2}$



фиг.1. Обща принципна схема на нискочестотен усилвател клас AB. Вътрешната линия огражда драйверното стъпало

Големината на тези резистори се определя с израз:

$$(1) \quad R_3 = R_4 = \frac{U_{BE1,2}}{(0,1 - 0,2)I_{B \max 1,2}}$$

където:

$U_{BE1,2} = (0,8 \div 1,2)V$ - напрежение на прехода база-емитер за всеки от транзисторите T1 и T2. Отчита се от изходни статични характеристики за избраните транзистори;

$$I_{B \max 1,2} = \frac{I_{C \max 1,2}}{h_{21ET1,2}} - \text{максимален базов ток за}$$

всеки от избраните транзистори T1 и T2. Големината на този ток зависи от статичния коефициент $h_{21ET1,2}$, който е зависим от работната температура. Според това условие при избор на транзистори трябва да се отчете и температурната зависимост на статичния коефициент на усилване $h_{21Etemp}$ [3]. По този начин след използване на справочна информация се определя големината на базовия ток:

$$(2) \quad I_{B \max 1,2} = \frac{I_{C \max 1,2}}{h_{21Etemp}}.$$

Според мястото на тяхното свързване резисторите не работят в натоварен режим, но отчитането на температурния режим на крайните транзистори поставя изискване за определянето на разсейвана мощност на всеки от тях.

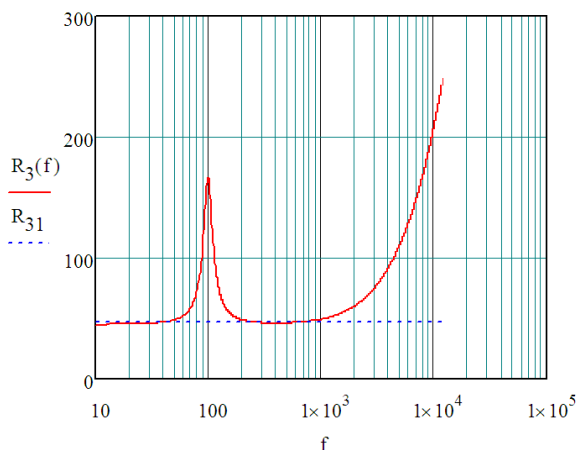
1.3. ОЦЕНКА НА РАЗСЕЙВАНАТА МОЩНОСТ ОТ РЕЗИСТОРИТЕ R_3 И R_4 :

$$(3) \quad P_{R3} = \frac{U_{R34 \max}^2}{R_3}$$

където:

$U_{R34 \max} = U_{BE1,2} = 0,7V$ - напрежение на прехода база-емитер за всеки от транзисторите T1 и T2;

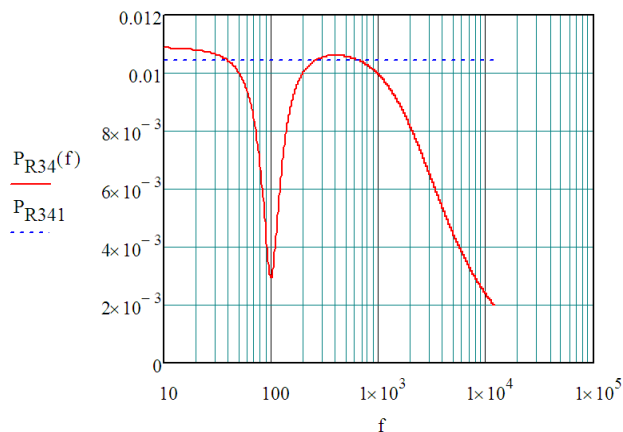
$R_3 = R_4$ - стойност за съпротивлението изведена от израз.1.



фиг. 2 Числен експеримент за определяне стойността на резистор R_3 и R_4 и максималната отдадена мощност за всеки от резисторите

При известни параметри на товара и транзисторите с помощта на израз.1. се определя големината на всеки от резисторите R_3 и R_4 . Резултата от численото изследване е показан на фиг.2.

Проведеният числен експеримент показва значително разминаване в стойността на резистора според натоварването на усилвателя. При активен товар (пунктираната линия от фигура.2.) големината на резистора е $R_3=R_4=47\Omega$, докато при натоварване на усилвателя с комплексен товар за големината на резистора се получава различна стойност (плътната линия от графика.2.). За коректност на изследването стойността на резистора се съобразява с комплексното натоварване на усилвателя. Тук се забелязва значително намаляване на параметъра при две честоти $f_1 = 100Hz$ и $f_h = 10,5kHz$. Причина за това са резонансните параметри на избраният високоговорител. Така се достига до избора $R_3=R_4=180\Omega$, която стойност отговаря на първия максимум ($f_1 = 100Hz$) от честотната характеристика на товара. Тези резистори не работят в натоварен режим, но са разположени в близост до мощните транзистори T1 и T2. Това условие налага определянето на максималната разсейвана мощност за всеки от тях. Графичен резултат за реалната мощност е показана на фиг.3.



фиг. 3 Числен експеримент за определяне на мощността на всеки от резисторите $R_3=R_4$

След отчитане на резултатите от фиг.3. се избира стандартна мощност $P_{R34}=0,125W$.

2. ОГРАНИЧИТЕЛНИ ПАРАМЕТРИ И РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕН ЕКСПЕРИМЕНТ ПРИ ИЗБОР НА ТРАНЗИСТОРИТЕ T3 И T4:

Определените параметри получени за транзисторите T1 и T2 служат за синтез на транзисторите T3 и T4. Избора на тези транзистори определя максималните стойности на параметъра h_{21e} . Така се определя температурната стабилност усилвателя, което свежда избора до определяне на два параметъра:

- Колекторен ток на покой за всеки от транзисторите T3 и T4;
- Максимален колекторен ток за всеки от транзисторите.

2.1. ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОГРАНИЧЕНИЕТО ЗА НАЧАЛНИЯ КОЛЕКТОРЕН ТОК $I_{Cp3,4}$:

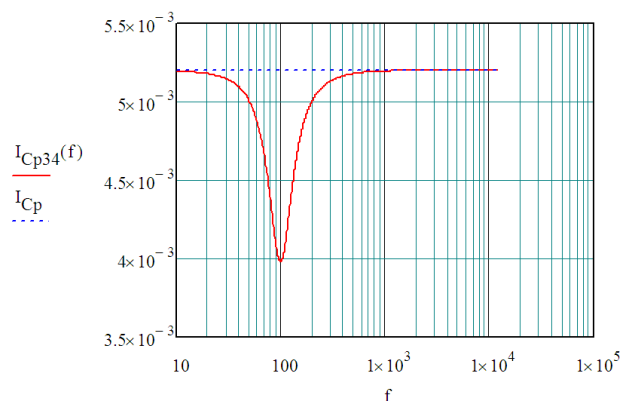
За определянето на максималният колекторен ток предварително се пресмята началния колекторен ток (ток на покой) за всеки транзистор. Очаква се честотната зависимост на товара да предизвика различното натоварване. Тогава е необходимо максималната стойност на тока да се съобрази с това изменение.

$$(4) \quad I_{Cp3,4} = \frac{I_{Cp1,2}}{h_{21E1,2}} + \frac{U_{BE1,2}}{R_{3,4}}$$

където:

$I_{Cp1,2}$ - колекторният ток на покой за всеки от транзисторите T1 и T2 във функция от честотната характеристика на товара.

При известни параметри на товара за големината на колекторния ток на покой се извежда графичната зависимост:



фиг. 4 Числен експеримент за определяне големината на колекторния ток I_{Cp34} и I_{Cmax34}

Модификацията в известните теоретични подходи предлага максималната стойност на тока да се съобрази с честотното изменение, като се спази неравенството:

$$(5) \quad I_{Cmax3,4} \geq 1,2 \cdot I_{Bmax1,2} + \frac{U_{BEmax1,2}}{R_{3,4}}$$

където:

$$I_{Bmax1,2} = \frac{I_{Cmax12}}{h_{21ET21min}} - \text{максималния базов ток}$$

за всеки от транзисторите T1 и T2;

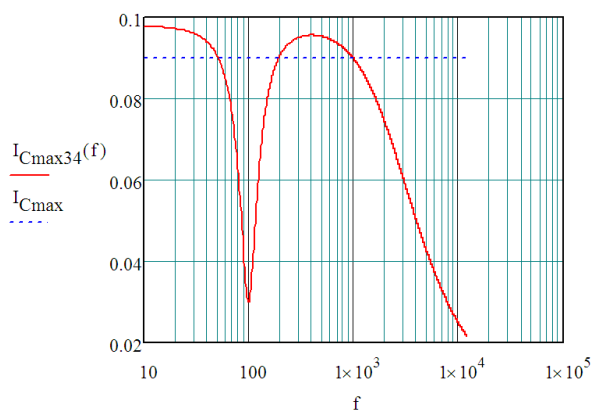
$U_{BEmax1,2}$ - максималното напрежение база-емитер (U_{be}) за всеки от транзисторите T1 и T2;

$R_{3,4}$ избраната стандартна стойност за

резисторите $R_3 = R_4$.

При известни параметри на товара се определя максималната стойност на колекторния ток I_{Cmax34} . Графичният резултат от фиг.1. показва влиянието на комплексния импеданс на високоговорителя. Двете резонансни честоти $f_1 = 100\text{Hz}$ и $f_h = 10,5\text{kHz}$ определят значителен спад в характеристиката, което облекчава работата на крайните транзистори.

След извеждане на големината на този ток, следва да се определи максималният колекторен ток за всеки от транзисторите T3 и T4. Ограничението на захранващото напрежение зависи от резонансната характеристика на товара т.е. от честотната зависимостта на колекторния ток на покой.



фиг. 5 Числен експеримент за определяне на максималния колекторен ток I_{Cmax34}

По тази причина максималното ограничение за големината на този ток се избира до 60% от изчислената стойност [4]. Така получената максимална стойност е определяща при избора на подходящ транзистор. В този случай е важно да се съобрази максималният колекторен ток за всеки от транзисторите. Числен резултат е показан на фиг.5.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представената статия се извежда модифициран метод за синтез и оценка на нискочестотен аудио усилвател с отчитане на комплексния товар. Импедансната характеристика на товара променя основни параметри в процеса на анализ на усилвателя:

- Прецизно определяне на съпротивления R_3 и R_4 (фиг.2.) с отчитане на честотната характеристика на товара;
- Колекторен ток на покой определя работната точка на усилвателя, при комплексен товар този ток е зависим от честотата (фиг.4.) За коректна оценка поведението на усилвателя тази особеност трябва да се вземе под внимание;
- Отчетеният максимален колекторен ток (фиг.5.) показва с 20% по-високо натоварване на изходните транзистори спрямо известните.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Г. Ненов „Усилватели изчисляване, измерване, регулиране“ София изд. Техника 2000 ISBN:9540305934 (стр.5-82);
- [2]. Пл. Ангелов., М. Димитрова., Модифициран метод за проектиране на нискочестотен аудио усилвател с отчитане на комплексния характер на товара – част.1. и част.2. стр.68-81. сп. Акустика 2012, ISSN 13124897. Национална секция по акустика към Българската асоциация за обществен контрол и управление на шума. Институт по механика към Българска Академия на Науките
- [3]. Bortoni, R., S. Filho, R. Seara, (2002). On the Design and Efficiency of Class A, B, AB, G, and H Audio Power Amplifier Output Stages. Journall of Audio engineering society,(Volume 50 Number 7/2002 pp. 547-563) Paper 0547;
- [4]. Raab, F. (1994). Average efficiency of Class-G power amplifiers. Convention of Green Mountain Radio Research Company IEEE Transaction on Consumer Electronics Vol.CE-32 No.2 1986 (pp.145-150); Източници от интернет
- [5]. Discovery Corp. 15M/4624G00. Scan Speak 2012, N.C. Madsensvej 1 6920 Videbaek, Denmark, www.scan-speak.dk.

МОДИФИЦИРАН МЕТОД ЗА СИНТЕЗ НА КЛАС АВ АУДИО УСИЛВАТЕЛ НАТОВАРЕН С КОМПЛЕКСЕН ТОВАР – ЧАСТ 2

MODIFIED METHOD FOR THE SYNTHESIS OF CLASS AB AUDIO AMPLIFIER LOADED WITH COMPLEX LOAD – PART 2

ПЛАМЕН АНГЕЛОВ АНГЕЛОВ

Бургаски Свободен Университет, Център по информатика и технически науки, Сан Стефано N 62, Бургас 8001 e-mail:
pangelov@bfu.bg

Abstract

In the present article we produce modification methods to determine the basic parameters of the linear audio amplifier with complex load. The compilation between known methods and our modification define some differences between basic parameters like overload voltage of the output stage and correct determine of the electronics parts.

Keywords: modification methods, determine, linear audio amplifier, complex load.

УВОД

Настоящата статия продължава анализа на модифициран метод за синтез и оценка на аудио усилвател клас „AB” с отчитане импедансната характеристика на товара. В предишна статия „Модифициран метод за синтез на клас AB аудио усилвател натоварен с комплексен товар” част.1. постави началото на този метода. По този начин всички честотно определящи параметри на високоговорителя участват в синтеза на усилвателя и определят коректния избор на изграждащите компоненти. Този материал е продължение на метода за синтез и оценка на аудио усилвател (крайно стъпало) натоварен с комплексен товар.

1. МОДИФИЦИРАНА МЕТОД ЗА СИНТЕЗ НА АУДИО УСИЛВАТЕЛ КЛАС АВ НАТОВАРЕН С КОМПЛЕКСЕН ТОВАР

1.1. ИЗВЕСТНИ ИЗХОДНИ ДАННИ УЧАСТВАЩИ В АНАЛИЗА

Известни изходни данни за аудио стъпалото участващи в този анализ са:

- Импедансната характеристика на товара Z_{load} ;
- параметри на избраният високоговорител Discovery – 15M/4624G00 [4].

Анализа продължава с определяне на следните допълнителни параметри:

- Ограничителни параметри при избора на всеки от транзисторите T3 и T4;
- Максимална разсейвана мощност за всеки транзисторите T3 T4;
- Критерии за избор на всеки от резисторите R3 и R4;
- Оценка на разсейваната мощност за всеки от резисторите R3 и R4;
- Транзитна честота за всеки транзистор[1].

Отчитането на импедансната характеристика на товара донякъде натоварва изходните транзистори. В този случай усилвателя работи с повишено натоварване и висока работна температура. Така създадените предпоставки могат да променят статичният коефициент на усилване $h_{21ET1,2}$, което е критичен параметър за линейната работа на усилвателя.

1.2. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ ЗА ОГРАНИЧЕНИЕ НА МАКСИМАЛНАТА РАЗСЕЙВАНА МОЩНОСТ ЗА T3 И T4

За коректната оценка на максималната разсейвана мощност трябва да се отчетат максималните стойности на няколко параметъра:

- Максимална стойност на захранващото напрежение;
- Честотната зависимост на товара [4];
- Статичният коефициент на усилване за всеки от транзисторите. Това трябва да се разглежда с отчитане на температурната зависимост на статичният коефициент на усилване $h_{21E} = F(t)$.

Така, чрез използване на справочна информация прецизно се определя зависимостта на разсейваната мощност от температурата - $P_{C \max 3,4} = F(t)$. Получените данни служат за определяне на разсейваната мощност, която се определя с изрази:

$$(1) \quad P_{C \max 3,4} = 0,1 \frac{U_{CC}^2}{h_{21ET1,2} \cdot Z_{load}^2} \cdot R_{load} + U_{CC} \cdot I_{C3,4 \max}$$

където:

$P_{C\max 3,4}$ - максимална загубна мощност за всеки от транзисторите ТЗ и Т4;

U_{CC} - избраната стойност на захранващото напрежение. От друга страна параметъра служи да се определи и работното напрежение на използваните транзистори;

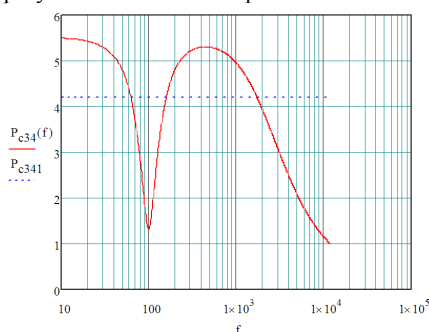
Z_{load} - честотно зависим импеданс на товара;

R_{load} - активната компонента на товара;

$h_{21ET1,2}$ - статичен коефициент на усилване по ток при схема общ емитер. Този коефициент се променя от работната температура на транзистора и според протичащият колекторен ток.

$I_{C3,4\max}$ - максимална стойност на колекторния ток за всеки от транзисторите ТЗ и Т4. Големината на тока се отчита след пресмятане на израз.5.

С помощта на получения израз се определя максималната загубна мощност за всеки от транзисторите ТЗ и Т4, резултат е показан на фиг.1.



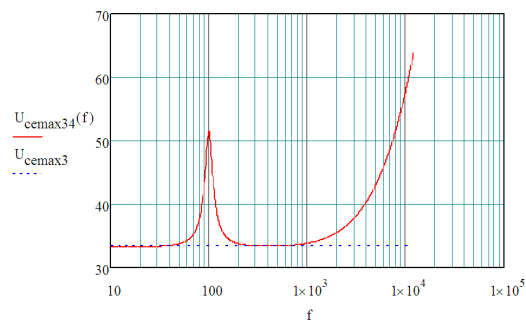
фиг. 1 Числен експеримент за определяне на максималната загубна мощност $P_{C\max 3,4}$ за всеки от транзисторите ТЗ и Т4

Поставените ограничителни условия оказват влияние върху работното напрежение за всеки от транзисторите. Различната работна честота предизвиква повишено натоварване, което изисква по-високо захранващото напрежение [2]. Така се ограничава максимално допустимото напрежение за всеки от транзисторите ТЗ и Т4.

1.3. ИЗСЛЕДВАНЕ НА МАКСИМАЛНО ДОПУСТИМОТО НАПРЕЖЕНИЕ МЕЖДУ КОЛЕКТОР И ЕМИТЕР ЗА ТЗ И Т4:

$$(2) \quad U_{CE\max 3,4} = U_{CE\max 1,2} \geq 0.5 \cdot (U_{CC} + U_i)$$

Проведен е числен експеримент за определяне на максималното напрежение U_{ce} за всеки от транзисторите Т1 и Т2. Резултатът е показан на фиг.2. Получената графика показва, че ограничението на захранващото напрежение се диктува от резонансните свойства на товара. Така получената максимална стойност за напрежението $U_{ce\max 12}=64V$ (фиг.2.) е определяща при избор на подходящ транзистор. За оценка на работата на транзисторите е необходимо определяне на максималната загубна мощност. Големината на тази мощност ще покаже необходимостта от охлаждане на всеки от транзисторите.



фиг. 2 Числен експеримент за определяне на максималното колекторно напрежение за всеки от транзисторите ТЗ и Т4

1.4. РЕЗУЛТАТИ ЗА ОЦЕНКА НА ДОПУСТИМАТА ЗАГУБНА МОЩНОСТ $P_{tot 3,4}$ ЗА ВСЕКИ ОТ ТРАНЗИСТОРИТЕ ТЗ И Т4:

За оценка на допустимата загубна мощност се извежда стойността на топлинното съпротивление между полупроводниковата подложка на транзистора и околната среда (без радиатор) R_{thja} с израз [1]:

$$(3) \quad R_{thja} = \frac{T_{j\max} - T_a}{P_{C\max 3,4}}$$

където:

$T_{j\max} = 150^\circ C$ максимално допустима температура на колекторния преход за всеки от транзисторите ТЗ и Т4;

$T_a = 50^\circ C$ работна температура на околната среда в близост до транзисторите при максимална изходна мощност;

$P_{C\max 3,4}$ - максимална загубна мощност за всеки от транзисторите ТЗ и Т4.

От друга страна за топлинното съпротивление R_{thja} се използва и познатият израз[1]:

$$(4) \quad R_{thja} = R_{thjc} + R_{thca}$$

където:

$R_{thjc} = b_{jt} \cdot R_{thja}$ е топлинно съпротивление между полупроводниковата подложка и корпуса на транзистора;

R_{thca} - топлинно съпротивление между корпуса на транзистора и околната среда.

$b_{jt} = (0,3 \div 0,7)$ е параметър зависещ от технологията на производство на биполярния транзистор.

Тогава за завършена оценка на загубната мощност се използва израз:

$$(5) \quad P_{tot 3,4} \geq 1,1 \cdot \frac{T_{j\max} - T_{nom}}{R_{thjc}}$$

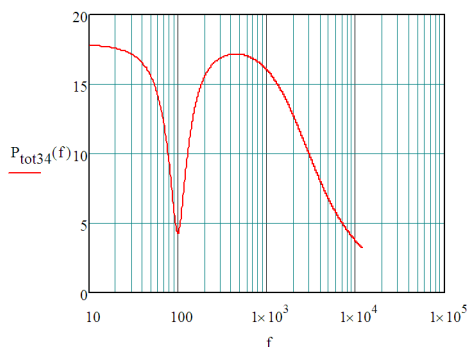
където:

$T_{nom} = 25^\circ C$ номинална температура на корпуса на транзисторите.

Модификацията в известните методи за оценка предлага максималната стойност на разсейваната мощност $P_{tot3,4избран}$ да се съобрази с честотното изменение на товара, като се спази неравенството:

$$(6) \quad P_{tot3,4избран} \geq 1.2 \cdot P_{tot3,4изчислен}$$

В случаите когато това условие не е изпълнено е необходим допълнителен охлаждащ радиатор. Познаването на импедансната характеристика на товара показва две гранични температури и промяна в топлинното съпротивление R_{thjc} . В този случай за големината на отдаваната топлинна мощност се получава графиката от фигура.3.



фиг. 3 Числен експеримент за определяне на отдаваната топлинна мощност за всеки от транзисторите Т3 и Т4

За коректния избор на съставен транзистор следва определяне на граничната честота. При всички известни методи за синтез на усилватели от този клас се използва идентичен израз за определяне на максималната транзитна честота:

$$(7) \quad f_t = (5 - 10) \frac{f_h}{\sqrt{M_{h1,2}^2 - 1}}$$

където:

$M_{h1,2}$ – допустими нелинейни изкривявания в честотна област $f_l \div f_h$;

f_h – горна гранична честота на работа за съпалото.

При зададени изкривявания $M_{h34} = 0.2\text{dB}$ и горната гранична честота за усилвателя $f_h = 17\text{kHz}$ за транзитна честота на транзистора се получава $f_t = 592\text{kHz}$.

За оценка на работата на транзисторите е необходимо определяне на максималната загубна мощност. Големината на тази мощност ще покаже необходимостта от охлаждане.

1.5. ОЦЕНКА НА ДОПУСТИМАТА ЗАГУБНА МОЩНОСТ $P_{tot3,4}$ ЗА ВСЕКИ ОТ ТРАНЗИСТОРИТЕ Т3 И Т4:

За оценка на допустимата загубна мощност се извежда стойността на топлинното съпротивление между полупроводниковата подложка на транзистора и околната среда (без радиатор) R_{thja} с израз [1]

$$(8) \quad R_{thja} = \frac{T_{jmax} - T_a}{P_{Cmax3,4}}$$

където:

$T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$ максимално допустима температура на колекторният преход за всеки от транзисторите Т3 и Т4;

$T_a = 50^\circ\text{C}$ работна температура на околната среда в близост до транзисторите при максимална изходна мощност;

$P_{Cmax3,4}$ – максимална загубна мощност за всеки от транзисторите Т3 и Т4.

От друга страна за топлинното съпротивление R_{thja} се използва и познатият израз [1]:

$$(9) \quad R_{thja} = R_{thjc} + R_{thca}$$

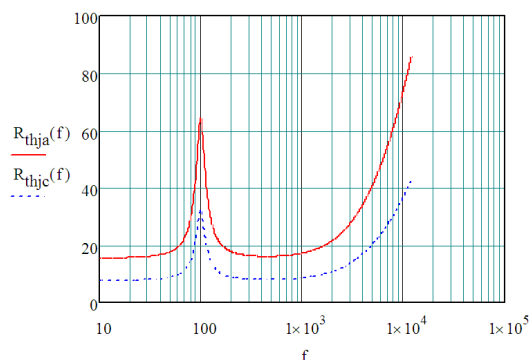
където:

$R_{thjc} = b_{jt} \cdot R_{thja}$ е топлинно съпротивление между полупроводниковата подложка и корпуса на транзистора;

R_{thca} – топлинно съпротивление между корпуса на транзистора и околната среда.

$b_{jt} = (0.3 \div 0.7)$ е параметър зависещ от технологията на производство на биполарният транзистор.

Резултата от числено изследване на съпротивленията R_{thja} и R_{thca} е показан на фиг.4.



фиг.4. Числен експеримент за определяне на съпротивленията R_{thja} и R_{thca}

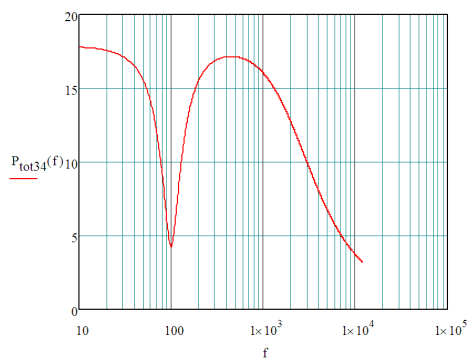
Тогава за завършена оценка на загубната мощност се използва израз:

$$(10) \quad P_{tot3,4} \geq 1.1 \cdot \frac{T_{jmax} - T_{nom}}{R_{thjc}}$$

където:

$T_{nom} = 25^\circ\text{C}$ номинална температура на корпуса на транзисторите.

След определяне на всички параметри се избира комплементарна двойка транзистори с различна проводимост и близки технически параметри. Познаването на импедансната характеристика показва две гранични температури и промяна в топлинното съпротивленията R_{thja} и R_{thjc} . В този случай за големината на отдаваната топлинна мощност се получава резултата показан на фигура.5.



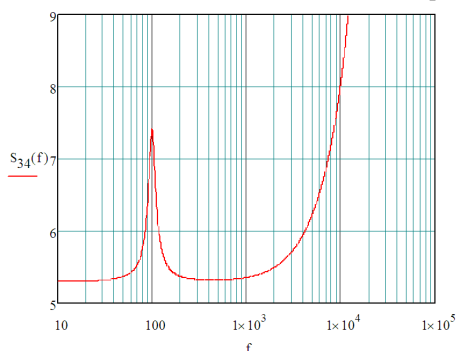
фиг. 5 Числен експеримент за определяне на отдадената топлинна мощност за всеки от транзисторите T3 и T4

Модификацията от тази разработка предлага максималната стойност на мощността $P_{tot3,4избран}$ да се съобрази с честотното изменение на товара, като се спази неравенството:

$$(11) \quad P_{tot3,4избран} \geq 1.2 \cdot P_{tot3,4изчислен}$$

След определяне на всички параметри се избира комплементарна двойка транзистори с различна проводимост и близки технически параметри. В този случай подходящи транзистори са: 2SC2236- NPN и 2SA1006-PNP, със следните параметри: $U_{ce}=180V$, $I_{cm}=1.5A$, $f_t=80MHz$, $h_{21e}=120$, $P_{tot}=25W$.

В конкретния случай това условие не е изпълнено и е необходим допълнителен охлаждащ радиатор за всеки от транзисторите. За избор на радиатор е необходимо отчитане на динамичното натоварване на транзисторите. Резултата от численото изследване е показан на фиг.6.



фиг. 6. Числен експеримент за определяне на отдадената топлина за транзисторите T3 T4

Полученият резултат насочва вниманието към значително по-голям радиатор при натоварване на транзистора с комплексен товар.

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представената статия се извежда модифициран метод за синтез и оценка на нискочестотен аудио усилвател с отчитане на комплексния товар. Импедансната характеристика на товара променя основни параметри в процеса на анализ, тази особеност влияе върху няколко основни параметри на усилвателя:

- Максималната загубна мощност върху всеки от транзисторите T3 и T4 (фиг.1.) се различава с 50% спрямо познатите методи за оценка;
- Големината на захранващото напрежение е от съществено значение при оценка на усилвателя (фиг.2.) Изведеният резултат показва разлики до 300% спрямо известните методи за оценка [1];
- Намаляването на отдадената топлинна мощност от всеки транзистор T3 T4, показва влиянието на честотната характеристика на товара (фиг.5.). Този междинен резултат служи за определяне на площта на охлаждащия радиатор (фиг.6.).

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Г. Ненов „Усилватели изчисляване, измерване, регулиране“ София изд. Техника 2000 ISBN:9540305934 (стр.5-82);
- [2]. Bortoni, R., S. Filho, R. Seara, (2002). On the Design and Efficiency of Class A, B, AB, G, and H Audio Power Amplifier Output Stages. Journall of Audio engineering society,(Volume 50 Number 7/2002 pp. 547-563) Paper 0547;
- [3]. Farina, A., (2000). Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, Convention of Audio engineering society, 108th, Paris, Convention Paper 5093 (pp. 1-23); Източници от интернет
- [4]. Discovery Corp. 15M/4624G00. Scan Speak 2012, N.C. Madsensvej 1 6920 Videbaek, Denmark, www.scan-speak.dk.

„M&Q – МОДИФИКАЦИЯ” НА МНОГОКАНАЛЕН MC-CDMA – ПРЕДАВАТЕЛ НА БАЗОВА СТАНЦИЯ ОТ НОВО ПОКОЛЕНИЕ

“M&Q – MODIFICATION” OF MULTICHANNEL MC-CDMA – TRANSMITTER OF A NEW GENERATION BASE STATION

Доц. Петър П. Петров
Технически университет - Варна, България

Abstract

Analysis is made on the principle of construction of "M&Q-modification" of traditional multichannel MC-CDMA - transmitter and established its main functional dependencies. On this basis, a comparative assessment was made with multichannel OFDM - transmitter used in mobile standards LTE and Mobile WiMAX.

Keywords: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); OFDMA (Orthogonal Frequency Multiple Access); MC-CDMA (Multi Carrier-Code Division Multiple Access); CDMA (Code Division Multiple Access).

УВОД

Още от първите години на последното десетилетие на миналия век е известно, че методът MC-CDMA (Multi Carrier-Code Division Multiple Access – комбиниран множествен достъп с честотно-кодово разделяне) е естествен подход за усъвършенстване както на метода CDMA (Code Division Multiple Access – множествен достъп с кодово разделяне), така и на метода OFDMA (Orthogonal Frequency Multiple Access – множествен достъп с ортогонално честотно разделяне). Възможността на тази база да се обединят предимствата и се отстранят недостатъците, свойствени на мобилните комуникационни системи с CDMA и OFDMA е актуален проблем и изисква синтезиране на нов MC-CDMA – базиран и програмно пренастройваем радио интерфейс [1, 2].

От такава гледна точка, в [3, 4] са анализирани принципите на построяване и основните функционални зависимости на многоканалните OFDMA и MC-CDMA – предаватели и са формулирани основните технически ограничения на „M - модификация” и „Q - модификация” на традиционния многоканален MC-CDMA – предавател, т. е.: 1) основното техническо ограничение на „Q - модификация” е, че продължителността на предаваните OFDM - символи е M - пъти по-малка от тази на OFDM - символите на многоканалния OFDMA – предавател, което съществено влошава обмена на високоскоростна информация в условия на честотно - избирателни или бързи затихвания на сигналите; 2) основното техническо ограничение на „M - модификация” е, че максималният брой на ползвателите е равен на броя на ортогоналните кодови последователности (които в квадратната $N^* \times N^*$ - матрица на Адамар-Уолш са N^* на брой), което при голям брой ползватели значително увеличава сложността на приемника и съществено влошава ICI (Inter Carrier Interference).

Преодоляването на тези технически ограничения би осигурило пълно обединяване на предимствата и пълно отстраняване на недостатъците на методите за CDMA и OFDMA и в крайна сметка многократно би повишило ефективността на множествения достъп при обмен на

високоскоростна информация от много ползватели в условия на многолъчевост. На настоящия етап за решаването на тази задача в [1] е предложено да се комбинират механизмите за мултиплексиране в низходящата линия за връзка на „M” и „Q” – модификациите на многоканалния MC-CDMA – предавател.

Целта е да се анализира принципа на построяване на “M&Q - модификация” на многоканален MC-CDMA – предавател и се установят неговите основни функционални зависимости, на основата на които да се направи сравнителна оценка с многоканалния OFDMA – предавател, използван в мобилните стандарти LTE (Long Term Evolution) и Mobile WiMAX.

1. ПРИНЦИП НА ПОСТРОЯВАНЕ И ОСНОВНИ ФУНКЦИОНАЛНИ ЗАВИСИМОСТИ НА „M&Q – МОДИФИКАЦИЯ” НА МНОГОКАНАЛЕН MC-CDMA - ПРЕДАВАТЕЛ

В съответствие с [1], принципът на построяване на “M&Q - модификация” на многоканален MC-CDMA – предавател може да се представи във вида, показан на фиг. 1. Според принципа на “Q - модификацията”, големият брой ползватели $K = QN^*$ равномерно е разпределен на Q на брой групи (подсистеми), като в първата („0”-ва) група номерацията на ползвателите е от 0 до $(N^* - 1)$, а в последната („(Q-1)”-ва) група – от $(K - N^*)$ до $(K - 1)$. Обработките на сигналите във всяка група се извършва в пълно съответствие с механизма на “M - модификацията” и се изразява в следното.

Във всички синхронизирани и идентични ползвателски канали (например в „(Q-1)”-та група), входните цифрови съобщения след традиционните обработки (шумоустойчиво кодиране, скремблиране, блоково разместване, информационна модулация и повторение) постъпват на входовете на съответните серийно - паралелни

преобразуватели (Serial-to-Parallel Converter - S/P) в последователен код:

$$(1) \quad q^{K-N^*}(t) = \{q_0^{K-N^*}(t), \dots, q_m^{K-N^*}(t), \dots, q_{M-1}^{K-N^*}(t)\};$$

$$(2) \quad q^{K-1}(t) = \{q_0^{K-1}(t), \dots, q_m^{K-1}(t), \dots, q_{M-1}^{K-1}(t)\},$$

където всеки от символите $q_m^{K-N^*}(t)$, $q_m^{K-1}(t)$ и т. н. ($m=0,1, \dots, M-1$) е с продължителност T_q и се предава със скорост $R_q = 1/T_q$.

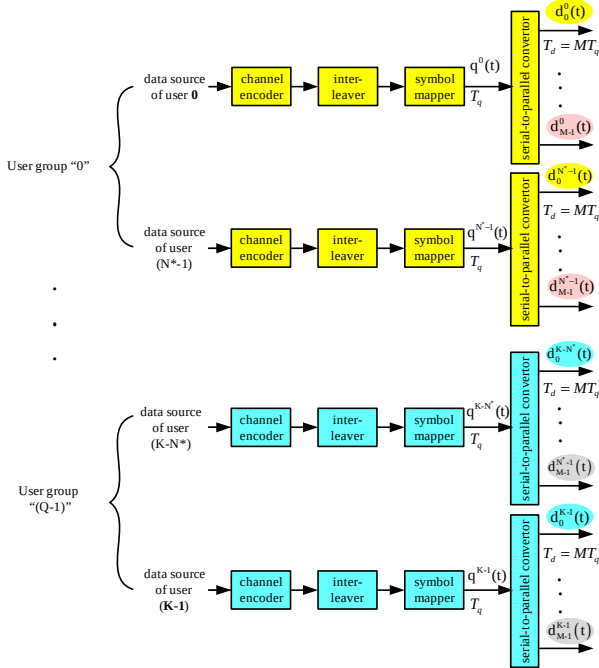
От изходите на всеки S/P (например, „(K-1)“-вия за всеки времеви интервал $T_d = MT_q$, M-броя символи на последователния код (2) се предават едновременно по M-броя под канали чрез символите на паралелния код:

$$(3) \quad d^{K-1}(t) = \{d_0^{K-1}(t), \dots, d_m^{K-1}(t), \dots, d_{M-1}^{K-1}(t)\},$$

където всеки от символите $d_m^{K-1}(t)$ е с продължителност $T_d = MT_q$ и се предава със скорост $R_d = 1/T_d = 1/MT_q = R_q / M$.

Следователно, разглежданите до тук обработки на сигналите във всяка ползвателска група са аналогични на обработките в многоканалния OFDMA - предавател.

Структурата е примерна и може да бъде по-подробна или редуцирана, като само компонентите „Увод“, „Резултати дискусия“, „Заклучение“ и „Литература“ са задължителни.



Фиг. 1а. Принцип на построяване на „M&Q - модификация“ на многоканален MC-CDMA – предавател

Всеки от символите в паралелните под канали на всеки ползвател се разширява чрез технологията DSSS/CDMA с предназначената за този ползвател ортогонална кодова последователност на Адамар-Уолш (фиг. 1б). При това във всяка група, състояща се от N^* на брой ползватели може да се използва една и съща $N^* \times N^*$ -квадратна матрица на Адамар-Уолш. Тогава например, за разширените

информационни символи на „(K-1)“-вия ползвател от „(Q-1)“-та група се получава:

$$(4) \quad \left. \begin{aligned} m_0^{K-1}(t) &= d_0^{K-1}(t)W_{N^*-1}^{N^*} = \{m_{00}^{K-1}(t), \dots, m_{0n}^{K-1}(t), \dots, m_{0(N^*-1)}^{K-1}(t)\} \\ m_m^{K-1}(t) &= d_m^{K-1}(t)W_{N^*-1}^{N^*} = \{m_{m0}^{K-1}(t), \dots, m_{mn}^{K-1}(t), \dots, m_{m(N^*-1)}^{K-1}(t)\} \\ m_{M-1}^{K-1}(t) &= d_{M-1}^{K-1}(t)W_{N^*-1}^{N^*} = \{m_{(M-1)0}^{K-1}(t), \dots, m_{(M-1)n}^{K-1}(t), \dots, m_{(M-1)(N^*-1)}^{K-1}(t)\} \end{aligned} \right\} \text{user } K-1$$

където означението $m_{mn}^{K-1}(t) = d_m^{K-1}(t)a_n^{N^*-1}(t)$ е n-ти чип на разширения информационен символ $m_m^{K-1}(t)$ от „(K-1)“-вия ползвателски канал, а $a_n^{N^*-1}(t)$ е n-ти чип от (N^*-1) -та кодова последователност $W_{N^*-1}^{N^*}$ [3, 4]. Чипът $m_{mn}^{K-1}(t)$ е с продължителност $\tau_c = T_d / N^* = MT_q / N^*$ и предава само $(1/N^*)$ -та от информацията на разширения информационен символ $m_m^{K-1}(t)$, който от своя страна предава цялата информация на информационния символ $d_m^{K-1}(t)$.

Характерна особеност на „M&Q - модификацията“ е създаването във всяка ползвателска група на M на брой подгрупи, всяка от които обединява съответните „0“-ви, „1“-ви, ..., „(M-1)“-ви разширени информационни символи и формира M на брой групови информационни символи. Например, за „(M-1)“-та подгрупа на „(Q-1)“-та група, груповият разширен информационен символ има вида:

$$(5) \quad g_{M-1}^{Q-1}(t) = m_{M-1}^{K-N^*}(t) + \dots + m_{M-1}^{K-i}(t) + \dots + m_{M-1}^{K-1}(t) = \sum_{i=1}^{N^*} m_{M-1}^{K-i}(t) = \{g_{(M-1)0}^{Q-1}(t) + g_{(M-1)n}^{Q-1}(t) + \dots + g_{(M-1)(N^*-1)}^{Q-1}(t)\}.$$

Всеки от груповите разширени информационни символи

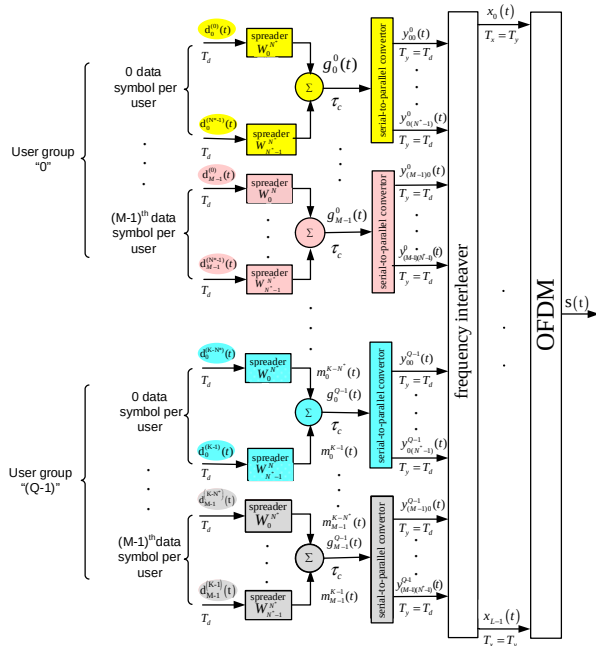
$$(6) \quad \{g_0^0(t), \dots, g_m^0(t), \dots, g_{(M-1)}^0(t)\} \text{ user group "0"}$$

$$(7) \quad \{g_0^{Q-1}(t), \dots, g_m^{Q-1}(t), \dots, g_{(M-1)}^{Q-1}(t)\} \text{ user group "(Q-1)"}$$

също се състои от N^* на брой чипове, всеки също е с продължителност $\tau_c = T_d / N^* = MT_q / N^*$ и аналогично всеки чип (например чипа $g_{(M-1)(N^*-1)}^{Q-1}(t)$) може да се представи във вида

$$(8) \quad g_{(M-1)(N^*-1)}^{Q-1}(t) = m_{(M-1)(N^*-1)}^{K-N^*}(t) + \dots + m_{(M-1)(N^*-1)}^{K-i}(t) + \dots + m_{(M-1)(N^*-1)}^{K-1}(t) = \sum_{i=1}^{N^*} m_{(M-1)(N^*-1)}^{K-i}(t).$$

По такъв начин, всеки групов разширен информационен символ е с продължителност $T_d = MT_q = \tau_c N^*$, състои се от N^* на брой чипове и чрез тях предава в последователен код информацията на съответната подгрупа. Това означава, че за времеви интервал T_d , например груповият разширен информационен символ (5), чрез своите N^* на брой чипове предава в последователен код сумарната информация само на „(M-1)“-те разширени информационни символи от „(Q-1)“-та група.



Фиг. 1б. Принцип на построяване на „M&Q - модификация“ на многоканален MC-CDMA - предавател

За времеви интервал T_d всеки от групите разширени информационни символи (6) и (7), посредством втори S/P се предава едновременно по N^* - броя под канали, чрез символите на съответните паралелни кодове. Например, за „(Q-1)“-та група

$$(9) \quad y_0^{Q-1}(t) = \{y_{00}^{Q-1}(t), \dots, y_{0n}^{Q-1}(t), \dots, y_{0(N^*-1)}^{Q-1}(t)\};$$

$$(10) \quad y_{M-1}^{Q-1}(t) = \{y_{(M-1)0}^{Q-1}(t), \dots, y_{(M-1)n}^{Q-1}(t), \dots, y_{(M-1)(N^*-1)}^{Q-1}(t)\},$$

всеки от символите $y_{mn}^{Q-1}(t)$ (където $m=0,1,\dots,M-1$; $n=0,1,\dots,N^*-1$) е с продължителност $T_y = \tau_c N^* = T_d$ и предава в паралелен код информацията на съответния чип от последователния код.

За да могат символите на всяка подгрупа ((9), (10) и т. н.) да се предават чрез набори от непоследователни ортогонални честоти (избрани от целия честотен диапазон на системата) се използва блок за честотно разместване (frequency interleaver). В резултат на тази операция на входа на OFDM - модулатора се формира паралелния код

$$(11) \quad x(t) = \{x_0(t), \dots, x_\lambda(t), \dots, x_{L-1}(t)\}; \quad L = MQN^*,$$

където всеки от символите $x_\lambda(t) [\lambda=0,1,\dots,(L-1)]$ е с продължителност $T_x = T_y = T_d = MT_q = \tau_c N^*$, съответства на строго определен символ $y_{mn}^q(t) [q=0,1,\dots,(Q-1); m=0,1,\dots,(M-1); n=0,1,\dots,(N^*-1)]$ и се предава на собствена ортогонална подносеца честота $f_\lambda = \lambda \Delta f = \lambda / T_x$.

За времетраенето на един времеви интервал T_x , общият за всички групи MC-CDMA-мултиплексираният сигнал на изхода на OFDM - модулатора

$$(12) \quad s(t) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{\lambda=0}^{L-1} x_\lambda(t) e^{i2\pi\lambda\Delta f t} = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{\lambda=0}^{L-1} x_\lambda(t) e^{i2\pi\lambda t/T_x}$$

се предава в честотна лента

$$(13) \quad F_{MC-CDMA-M \& Q} = L \Delta f = MQN^* / T_x = K / T_q = MQF_{group^{M^*}} = QF_{group^{Q^*}},$$

където $F_{group^{M^*}} = N^* \Delta f = N^* / T_x = F_{MC-CDMA-M \& Q} / MQ$ е честотната лента, която се експлоатира от една подгрупа на всяка група; $F_{group^{Q^*}} = MN^* \Delta f = MN^* / T_x = F_{MC-CDMA-M \& Q} / Q$ - честотната лента, която се експлоатира от една група ползватели (N^* на брой); $K = QN^*$ - брой на ползвателите.

Принципът на построяване на „M&Q - модификация“ на многоканалния MC-CDMA - предавател от фиг. 1 може да се обобщи по следния начин:

1. Броят на ползвателите $K = QN^*$ равномерно е разпределен на Q на брой групи. Във всеки ползвателски канал за времеви интервал $T_d = MT_q$, M - броя кодирани информационни символи ((1), (2)) чрез първи S/P се предават едновременно посредством символите на паралелните кодове (3).

2. Броят на ползвателите във всяка група е N^* , а символите на всеки паралелен код (3) са M на брой и се разширяват във времева област с една и съща ортогонална кодова последователност на Адамар-Уолш, броят на чиповете във всяка от които е N^* . Всеки от получените по такъв начин паралелни разширени информационни символи (4) предава в последователен код (чрез своите чипове) информацията на съответните „0“-ви, „1“-ви, ..., „(M-1)“-ви информационни символи (3) на всеки ползвател.

3. Чрез обединяване в подгрупи на съответните „0“-ви, „1“-ви, ..., „(M-1)“-ви разширени информационни символи на ползвателите от една и съща група се формират групови разширени информационни символи ((5) и т. н.), които чрез вторите S/P предават в паралелен код ((9), (20)) информацията на едноименните символи на всичките ползватели от групата. В резултат на това, всеки символ (например, символа $y_{mn}^{Q-1}(t)$) от паралелните кодове ((9), (10)), предава $(1/N^*)$ -та от информацията на всичките едноименни ползвателски информационни символи ((1), (2)), всяка подгрупа паралелни кодове (например (9), (10)) предава цялата информация на всичките едновременни ползвателски символи (например (3)), а всеки ползвател в крайна сметка предава M - броя информационни символи (например (2)) чрез всичките MN^* на брой паралелни символи ((9), (10)) на всичките MN^* на брой ортогонални под носещи.

При същите условия на функциониране в многоканалния OFDMA - предавател, честотната лента е същата [3], т. е.

$$(14) \quad F_{OFDM-Mult} = L \Delta f = K / T_q = KM / T_x = KF_{user}$$

където $F_{user} = M / T_x = F_{OFDM-Mult} / K$ е честотната лента, която експлоатира един ползвател; $L = KM$. Недостатъкът на този метод за мултиплексване е, че за същия времеви интервал $T_x = T_d = MT_q$ всеки ползвателски канал предава в паралелен код M -брой символи (всеки с продължителност T_d) чрез съответстващите им M - броя ортогонални под носещи. При това, всеки информационен символ (с продължителност T_q) от всеки ползвателски канал е строго привързан към определен OFDM - символ (с

продължителност $T_d = T_x$), който се предава на конкретна ортогонална под носеща. Затова в условия на честотно - избирателни или бързи затихвания, ортогоналните под носещи затихват по различен начин, като е възможна и пълна загуба на OFDM - символите на някои под носещи. Това обстоятелство води до голяма трудност или невъзможност за възстановяване в приемника на предадените OFDM - символи, а следователно и до неточно възстановяване на предаденото съобщение.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основата на приведената и анализирана архитектура на "M&Q - модификация" на многоканален MC-CDMA – предавател и неговата сравнителна оценка с многоканален OFDMA – предавател, могат да се направят следните по-важни изводи:

1. Когато в двата типа многоканални предаватели максималният брой на активните ползватели е $K = QN^*$, броят на едновременно предаваните символи (всеки с продължителност T_q) от един ползвател за времеви интервал $T_d = MT_q$ е M , а продължителността на OFDM-символите е $T_x = T_d = MT_q$, тогава техните пропускани честотни ленти са равни ($F_{MC-CDMA-M \& Q} = F_{OFDM-Mult} = MQN^* / T_x = KM / T_x$).

2. В многоканалния OFDMA – предавател: мултиплексирането на M -те на брой паралелни под канали на всеки ползвателски канал е ортогонално честотно; всеки m -ти информационен символ от всеки ползвателски канал е строго привързан само към един OFDM - символ, който се предава на конкретна ортогонална под носеща честота; за времеви интервал $T_x = T_d = MT_q$ всеки ползвателски канал предава M - броя информационни символи чрез съответстващите им M -броя OFDM - символи на съответстващите им M - броя ортогонални под носещи честоти в $(1/K)$ -та от честотната лента на системата ($F_{user} = M / T_x = F_{OFDM-Mult} / K$).

3. В "M&Q - модификация" на многоканален MC-CDMA – предавател: мултиплексирането на M -те на

брой паралелни подканални на всеки ползвателски канал е кодово, а мултиплексирането на „m”-подгрупите и „q”-групите е ортогонално честотно; всеки m -ти информационен символ от всеки ползвателски канал се предава чрез N^* на брой OFDM - символи на определените за тази подгрупа N^* на брой ортогонални под носещи честоти; за времеви интервал $T_x = T_d = MT_q$ всеки ползвателски канал предава M - броя информационни символи чрез съответстващите им $M N^*$ -броя OFDM - символи на съответстващите им $M N^*$ -броя ортогонални под носещи честоти в $(1/Q)$ -та от честотната лента на системата

$$(F_{group"Q"} = MN^* \Delta f = MN^* / T_x = F_{MC-CDMA-M \& Q} / Q).$$

4. Възможността в системите с TDMA (Time Division Multiple Access – множествен достъп с времево разделяне) всеки ползвател за времето на един слот да предава информационните символи с многократно по-голяма скорост в цялата честотна лента на системата правят актуална задачата за усъвършенстване на архитектурата от фиг. 1 в многоканален предавател с времево мултиплексиране на „q”-групите.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fazel, K., S. Kaiser. *Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems: From OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008;
- [2] Yang, L. *Multicarrier Communications*. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [3] Петров, П., Б. Найденов. *Анализ, сравнителна оценка и технически ограничения на OFDMA и MC-CDMA предаватели на базови станции от ново поколение – част 1. Юбилейна научна сесия на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”, Варна, 2013 г.;*
- [4] Петров, П., Б. Найденов. *Анализ, сравнителна оценка и технически ограничения на OFDMA и MC-CDMA предаватели на базови станции от ново поколение – част 2. Юбилейна научна сесия на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”, Варна, 2013 г.;*

МНОГОКАНАЛЕН ХИБРИДЕН M&Q MC-CDMA/TDMA – ПРЕДАВАТЕЛ ЗА БАЗОВА СТАНЦИЯ ОТ НОВО ПОКОЛЕНИЕ

MULTI-CHANNEL HIBRIDEN M&Q MC- CDMA/ TDMA – TRANSMITTERS FOR BASE STATION OF NEW GENERATION

Доц. Петър П. Петров
Технически университет - Варна, България

Abstract

Analyzed a frequency-time distribution of the resource relationship of "M & Q-modification" of multi-channel MC-CDMA – transmitter. Based on the analysis, the structure of multi-channel hybrid M & Q MC-CDMA/TDMA – transmitter was synthesized. Its principle of construction was analyzed and its main functional dependencies were established.

Keywords: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); OFDMA (Orthogonal Frequency Multiple Access); MC-CDMA (Multi Carrier-Code Division Multiple Access); CDMA (Code Division Multiple Access); CDM (Code Division Multiplexing).

УВОД

В [1] е приведена и анализирана функционална схема на „M&Q – модификация” на многоканален MC-CDMA – предавател, чиято структура може да се сведе до вида, показан на фиг. 1. Според използвания принцип на построяване, големият брой ползватели $K = QN^*$ равномерно е разпределен на Q на брой групи, във всяка от които се обособяват M на брой подгрупи. Всяка от групите се състои от N^* на брой ползватели, броят на едновременно предаваните информационни символи (всеки с продължителност T_q) от един ползвател за времеви интервал $T_d = MT_q$ е M, продължителността на OFDM – символите е $T_x = T_d = MT_q$, а пропусканата честотна лента на системата е [1]:

(1)

$$F_{MC-CDMA-M\&Q} = L\Delta f = MQN^* / T_x = K / T_q = MQF_{group^M} = QF_{group^Q},$$

където

$$F_{group^M} = N^* \Delta f = N^* / T_x = F_{MC-CDMA-M\&Q} / MQ$$

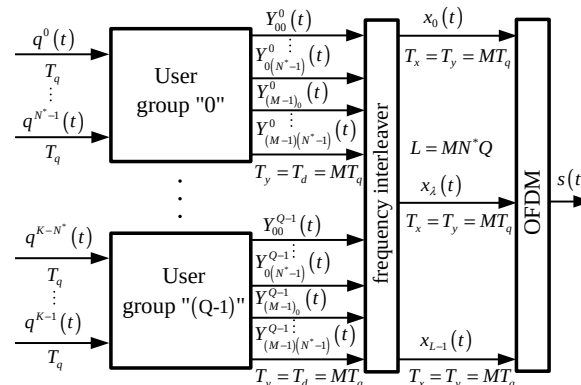
честотната лента, която се експлоатира от една подгрупа на всяка група;

$$F_{group^Q} = MN^* \Delta f = MN^* / T_x = F_{MC-CDMA-M\&Q} / Q$$

честотната лента, която се експлоатира от една група ползватели. При това мултиплексването на M-те на брой паралелни под канали на всеки ползвателски канал е кодово, а мултиплексването на „m”-подгрупите и „q”-групите е ортогонално честотно.

Технологията за множествен достъп с ортогонално честотно разделяне (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA) и технологията за ортогонално честотно мултиплексване (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) са усъвършенствани разновидности на архаичните технологии FDMA (Frequency Division Multiple Access – множествен достъп с честотно разделяне) и FDM (Frequency Division Multiplexing – мултиплексване с честотно разделяне). При тяхното използване в

многоканалните радио комуникационни системи, честотната лента на системата се използва неефективно.



Фиг. 1. Структура на „M&Q – модификация”
на многоканален
MC-CDMA – предавател

Възможността в системите с TDMA (Time Division Multiple Access – множествен достъп с времево разделяне) и по-конкретно в предавателите с TDM (Time Division Multiplexing – мултиплексване с времево разделяне) всеки ползвател за времето на един слот да предава информационните символи с многократно по-голяма скорост в цялата честотна лента на системата или със същата скорост, но в многократно по-тясна честотна лента правят актуална задачата за усъвършенстване на архитектурата от фиг. 1 в многоканален предавател с времево мултиплексване на „q”-групите.

1. ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

В съответствие с [2], честотно - времево разпределение на ресурса на връзката на многоканалния предавател от фиг. 1 може да се представи във вида, показан на фиг. 2. Тогава честотната лента на радио комуникационната система $F_{sist} = F_{MC-CDMA-M\&Q}$ (1) равномерно е разпределена между Q на брой ползвателски групи. Времевата ос е разбита на фрейми (рамки, кадри,

frames), всеки с продължителност T_{fr} . От своя страна всеки фрейм се разбива на Q на брой слота (прозорци, slots), всеки с продължителност $T_{s\lambda} = T_{fr} / Q = T_x = MT_q$. Във всяка честотна лента:

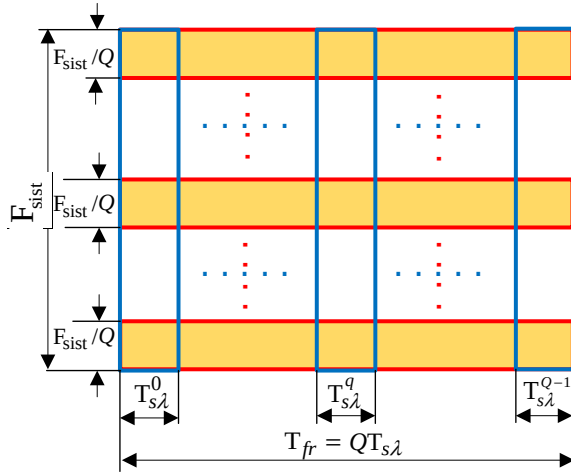
(2)

$$F_{sist} / Q = F_{MC-CDMA-M \& Q} / Q = F_{group-Q} = MN^* / T_x = N^* / T_q$$

всичките N^* на брой ползватели за продължителността на целия фрейм могат едновременно да предават данните със скорост:

(3)

$$R_{user} = 1 / T_q = F_{group-Q} / N^*$$



Фиг. 2. Честотно - времево разпределение на ресурси на връзката на „M&Q-модификация“ на многоканален MC-CDMA - предавател

От фиг. 2 и в съответствие с механизма на TDM – мултиплексването следва, че е възможно всяка „q“-та ползвателска група ($q = 0, 1, \dots, Q-1$) за времетраенето на предназначения за нея слот $T_{s\lambda}^q$ да предава информационните символи: 1) в цялата честотна лента на системата, но с многократно по-голяма скорост, т. е. във всеки правоъгълник от фиг. 2 с размери $T_{s\lambda} = T_{fr} / Q = T_x$ и $F_{sist} = F_{MC-CDMA-M \& Q}$; 2) със същата скорост $R_{user} = 1 / T_q$, но в честотна лента, която се експлоатира от една ползвателска група и която е на Q - пъти по-тясна от честотната лента на системата, т. е. във всеки правоъгълник от фиг. 2 с размери $T_{s\lambda}$ и F_{sist}/Q .

Обект на разглеждане е вторият случай, тъй като в съвременните условия на взривно увеличаване на ползвателите на мобилен широко лентов достъп, честотният ресурс на връзката става все по-дефицитен.

2. ПРИНЦИП НА ПОСТРОЯВАНЕ И ОСНОВНИ ФУНКЦИОНАЛНИ ЗАВИСИМОСТИ

На основата на гореизложеното може да се синтезира показаната на фиг. 3 структурна схема на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател. Както и в схемата от фиг. 1, големият брой ползватели $K = QN^*$ равномерно е разпределен на Q на брой групи, като в първата („0“-ва) група номерацията на ползвателите е от 0 до $(N^* - 1)$, а в последната („(Q-1)“-ва) група – от $(K - N^*)$

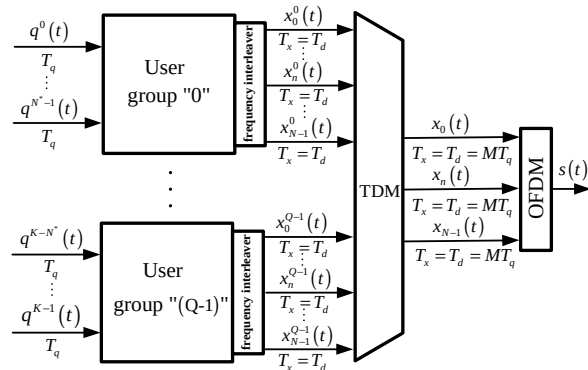
до $(K - 1)$. Обработките на сигналите във всяка група се извършва в пълно съответствие с механизма на „M&Q - модификация“ и се изразява в следното.

Във всички синхронизирани и идентични ползвателски канали (например в „(Q-1)“-та група, показана на фиг. 4), входните цифрови съобщения след традиционните обработки (шумоустойчиво кодиране, скремблиране, блоково разместване, информационна модулация и повторение) постъпват на входовете на съответните серийно - паралелни преобразуватели (Serial-to-Parallel Converter - S/P) в последователен код

$$(4) \quad q^{K-N^*}(t) = \{q_0^{K-N^*}(t), \dots, q_m^{K-N^*}(t), \dots, q_{M-1}^{K-N^*}(t)\};$$

$$(5) \quad q^{K-1}(t) = \{q_0^{K-1}(t), \dots, q_m^{K-1}(t), \dots, q_{M-1}^{K-1}(t)\},$$

където всеки от символите $q_m^{K-N^*}(t)$, $q_m^{K-1}(t)$ и т. н. ($m=0, 1, \dots, M-1$) е с продължителност T_q и се предава със скорост $R_q = 1 / T_q$.



Фиг. 3 Структура на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA - предавател

От изходите на всеки S/P (например, „(K-1)“-вия) за всеки времеви интервал $T_d = MT_q$, M -броя символи на последователния код (5) се предават едновременно по M - броя подканални чрез символите на паралелния код

$$(6) \quad d^{K-1}(t) = \{d_0^{K-1}(t), \dots, d_m^{K-1}(t), \dots, d_{M-1}^{K-1}(t)\},$$

където всеки от символите $d_m^{K-1}(t)$ е с продължителност $T_d = MT_q$ и се предава със скорост $R_d = 1 / T_d = 1 / MT_q = R_q / M$.

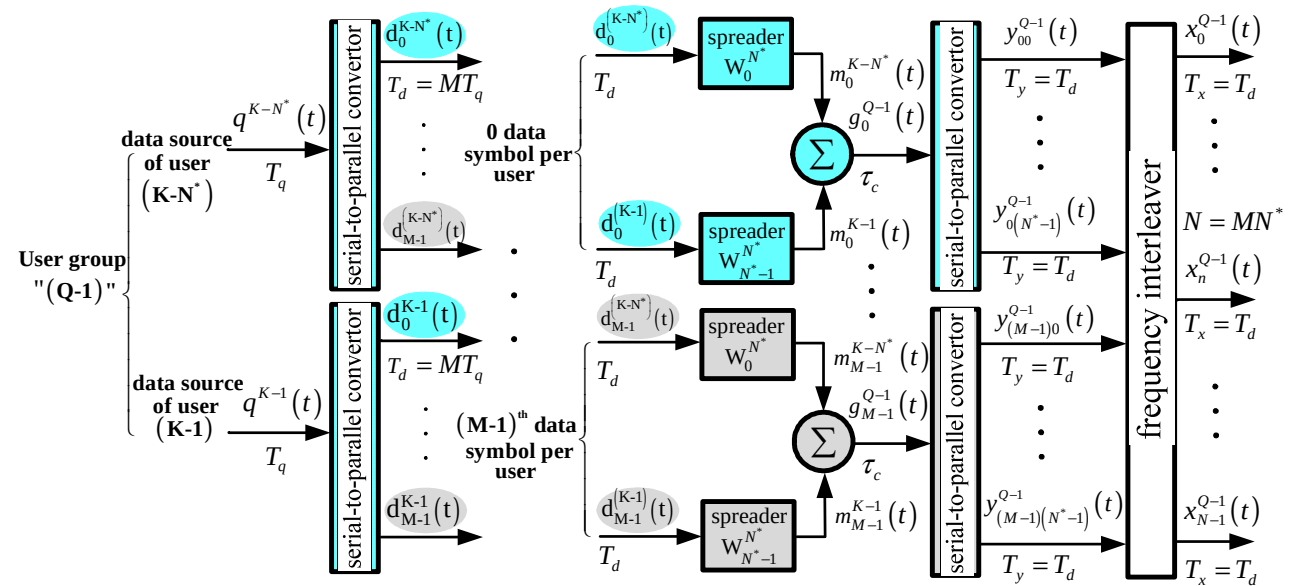
Следователно, разгледаните до тук обработки на сигналите във всяка ползвателска група са аналогични на обработките както в многоканалния OFDMA - предавател [3], така и в предавателя от фиг. 1.

Всеки от символите в паралелните под канали на всеки ползвател се разширява чрез технологията DSSS/CDMA с предназначенията за този ползвател ортогонална кодова последователност на Адамар-Уолш. При това във всяка група, състояща се от N^* на брой ползватели може да се използва една и съща $N^* \times N^*$ -квадратна матрица на Адамар-Уолш. Тогава например, за разширените информационни символи на „(K-1)“-вия ползвател от „(Q-1)“-та група се получава:

$$(7) \quad \left. \begin{aligned} m_0^{K-1}(t) &= d_0^{K-1}(t)W_{N^*-1}^{N^*} = \{m_{00}^{K-1}(t), \dots, m_{0n}^{K-1}(t), \dots, m_{0(N^*-1)}^{K-1}(t)\}; \\ &\dots\dots\dots \\ m_m^{K-1}(t) &= d_m^{K-1}(t)W_{N^*-1}^{N^*} = \{m_{m0}^{K-1}(t), \dots, m_{mn}^{K-1}(t), \dots, m_{m(N^*-1)}^{K-1}(t)\}; \\ &\dots\dots\dots \\ m_{M-1}^{K-1}(t) &= d_{M-1}^{K-1}(t)W_{N^*-1}^{N^*} = \{m_{(M-1)0}^{K-1}(t), \dots, m_{(M-1)n}^{K-1}(t), \dots, m_{(M-1)(N^*-1)}^{K-1}(t)\} \end{aligned} \right\} \text{user K-1}$$

където означението $m_{mn}^{K-1}(t) = d_m^{K-1}(t)a_n^{N^*-1}(t)$ е п-ти чип на разширения информационен символ $m_m^{K-1}(t)$ от „(K-1)“-вия ползвателски канал, а $a_n^{N^*-1}(t)$ е п-ти чип от (N^*-1) -та кодова последователност $W_{N^*-1}^{N^*}$. Чипът $m_{mn}^{K-1}(t)$ е с продължителност $\tau_c = T_d / N^* = MT_q / N^*$ и предава само $(1/N^*)$ -та от информацията на разширения информационен символ $m_m^{K-1}(t)$, който от своя страна предава цялата информация на информационния символ $d_m^{K-1}(t)$.

Характерна особеност на „М&Q - модификацията“ е създаването във всяка ползвателска група на М на брой подгрупи, всяка от които обединява съответните „0“-ви, „1“-ви, ..., „(M-1)“-ви разширени информационни символи и формира М на брой групови информационни символи. Например, за „(M-1)“-та подгрупа на „(Q-1)“-та група, груповият разширен информационен символ има вида:



$$(8) \quad g_{M-1}^{Q-1}(t) = m_{M-1}^{K-N^*}(t) + \dots + m_{M-1}^{K-i}(t) + \dots + m_{M-1}^{K-1}(t) = \sum_{i=1}^{N^*} m_{M-1}^{K-i}(t) = \{g_{(M-1)0}^{Q-1}(t) + \dots + g_{(M-1)n}^{Q-1}(t) + \dots + g_{(M-1)(N^*-1)}^{Q-1}(t)\}.$$

Всеки от груповите разширени информационни символи:

$$(9) \quad \{g_0^0(t), \dots, g_m^0(t), \dots, g_{(M-1)}^0(t)\} \rightarrow \text{user group "0"}$$

$$(10) \quad \{g_0^{Q-1}(t), \dots, g_m^{Q-1}(t), \dots, g_{(M-1)}^{Q-1}(t)\} \rightarrow \text{user group "(Q-1)"}$$

също се състои от N^* на брой чипове, всеки също е с продължителност $\tau_c = T_d / N^* = MT_q / N^*$ и аналогично всеки чип (например чипа $g_{(M-1)(N^*-1)}^{Q-1}(t)$) може да се представи във вида:

$$(11) \quad g_{(M-1)(N^*-1)}^{Q-1}(t) = m_{(M-1)(N^*-1)}^{K-N^*}(t) + \dots + m_{(M-1)(N^*-1)}^{K-i}(t) + \dots + m_{(M-1)(N^*-1)}^{K-1}(t) = \sum_{i=1}^{N^*} m_{(M-1)(N^*-1)}^{K-i}(t).$$

По такъв начин, всеки групов разширен информационен символ е с продължителност $T_d = MT_q = \tau_c N^*$, състои се от N^* на брой чипове и чрез тях предава в последователен код информацията на съответната подгрупа. Това означава, че за времевия интервал T_d , например груповият разширен информационен символ (8), чрез своите N^* на брой чипове предава в последователен код сумарната информация само на „(M-1)“-те разширени информационни символи от „(Q-1)“-та група.

За времевия интервал T_d всеки от груповите разширени информационни символи (9) и (10), посредством втори S/P се предава едновременно по N^* -броя под канали, чрез символите на съответните паралелни кодове. Например, за „(Q-1)“-та група:

Фиг. 4 Принцип на построяване на „(Q-1)“-ва група от N^* на брой ползватели в многоканален хибриден М&Q MC-CDMA/TDMA – предавател

$$(12) \quad y_0^{Q-1}(t) = \{y_{00}^{Q-1}(t), \dots, y_{0n}^{Q-1}(t), \dots, y_{0(N^*-1)}^{Q-1}(t)\};$$

$$(13) \quad y_{M-1}^{Q-1}(t) = \{y_{(M-1)0}^{Q-1}(t), \dots, y_{(M-1)n}^{Q-1}(t), \dots, y_{(M-1)(N^*-1)}^{Q-1}(t)\},$$

всеки от символите $y_{mn}^{Q-1}(t)$ (където $m=0,1,...,M-1$; $n=0,1,...,N^*-1$) е с продължителност $T_y = \tau_c N^* = T_d$ и предава в паралелен код информацията на съответния чип от последователния код.

За да могат символите на всяка подгрупа ((12), (13) и т. н.) да се предават чрез набори от непоследователни ортогонални честоти (избрани от целия честотен диапазон на системата) се използва блок за честотно разместване (frequency interleaver). За времетраенето на всеки слот, на входа на OFDM - модулятора от всяка група постъпва паралелния код:

$$(14) \quad x(t) = \{x_0(t), ..., x_n(t), ..., x_{N-1}(t)\}; N = MN^*,$$

където всеки от символите $x_n(t) [n=0,1,...,(N-1)]$ е с продължителност $T_x = T_y = T_d = MT_q = \tau_c N^*$, съответства на строго определен символ $y_{mn}^q(t) [q=0,1,...,(Q-1); m=0,1,...,(M-1); n=0,1,...,(N^*-1)]$ и се предава на собствена ортогонална под носеща честота $f_n = n\Delta f = n/T_x$.

За времетраенето на всеки времеви интервал $T_x = T_{s\lambda}$, сигналът на изхода на OFDM-модулатора:

$$(15) \quad s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_n(t) e^{i2\pi n\Delta f t} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_n(t) e^{i2\pi n t / T_x}$$

се предава в честотна лента:

$$(16) \quad F_{M\&Q \text{ MC-CDMA/TDMA}} = F_{group "Q"} = MN^* / T_x = N^* / T_q$$

която е Q - пъти по-тясна от честотната лента на предавателя от фиг. 1, т. е.:

$$(17) \quad F_{MC-CDMA-"M\&Q"} / F_{M\&Q \text{ MC-CDMA/TDMA}} = (QN^* / T_q) / (N^* / T_q) = Q$$

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основата на гореизложеното могат да се направят следните по-важни изводи:

1. В основата на синтеза на предлаганата архитектура на многоканален M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател за базова станция от ново поколение е

използван подхода на хибридно мултиплексиране, чрез който може да се осигури обединяване на предимствата и отстраняване на недостатъците на съществуващите методи за мултиплексиране. Използваното хибридно мултиплексиране е последователна комбинация от: мултиплексиране с кодово разделяне (CDM) на M на брой паралелни под канали на всеки ползвателски канал; мултиплексиране с ортогонално честотно разделяне (OFDM) на „m”-подгрупите на всяка ползвателска група; мултиплексиране с времево разделяне (TDM) на ползвателските „q”-групи.

2. При еднакъв брой на активните ползватели $K = QN^*$ и едновременно предаваните в паралелен код символи M от един ползвател, честотната лента на M&Q MC-CDMA/TDMA – предавателя $F_{M\&Q \text{ MC-CDMA/TDMA}}$ (16) е Q-пъти (17) по-тясна от честотната лента на „M&Q-модификация” на многоканален MC-CDMA – предавател (1).

3. В предлаганата структура на хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател, TDM-мултиплексираните символи се предават в паралелен код чрез механизма на OFDM-модулацията, с което се осигурява ефективна борба с честотно-избирателните и/или бързите затихвания на сигналите. Това, обаче е първият етап на задачата за отстраняване или съществено намаляване влошаването на характеристиката на достоверността на приетата информация в условия на многогънестост. Вторият етап изисква използването на един или няколко допълнителни метода за борба с намаляването на средната стойност на отношението сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio-SNR) в условия на амплитудно (плоско) или бавно затихване на сигналите.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петров, П. „M&Q - модификация” на многоканален MC-CDMA – предавател на базова станция от ново поколение. Научна конференция Акустика`2013;
- [2] Склад, Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. под ред. А. В. Назаренко. Москва, издательский дом „Вильямс”, 2003, 1104с.
- [3] Петров, П. Принципи на построяване, основни функционални зависимости и технически ограничения на многоканалните OFDMA - предаватели в стандарт LTE. Национална конференция с международно участие „40 години Шуменски Университет 1971-2011”, Шумен, 2011.;

МНОГОКАНАЛЕН ХИБРИДЕН M&Q MC- CDMA/ TDMA- ПРЕДАВАТЕЛ С ЕДИННА КОДОВА ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТ И РАЗЛИЧНИ НАБОРИ ОРТОГОНАЛНИ ПОДНОСЕЩИ ЧЕСТОТИ

MULTI-CHANNEL HYBRID M& QMC- CDMA/ TDMA – TRANSMITTERS WITH SINGLE CODE OF SEQUENCE AND DIFFERENT SET SUBCARRIERS ORTHOGONAL FREQUENCIES

Доц. Петър П. Петров

Технически университет - Варна, България. E-mail:

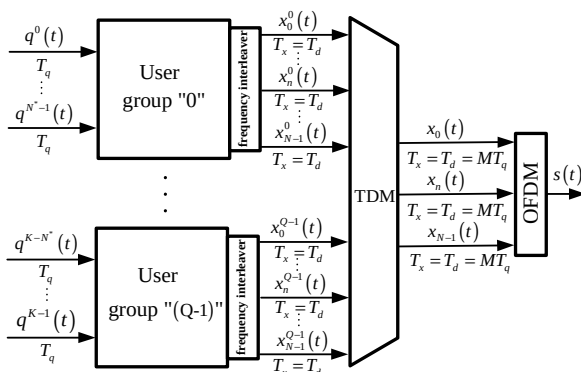
Abstract

Through the combined use of the methods of spreading in frequency and hybrid CDM/ OFDM/ TDM- multiplexing is synthesized multi-channel structure M & Q MC-CDMA/TDMA- transmitters with single code of sequence and different set sub carriers orthogonal frequencies. Its principle of construction was analyzed and the possibilities of such a radio communication system for calculating coherent BPSK-signals in Rayleigh multipath channel number of divided frequency Channels have been brought.

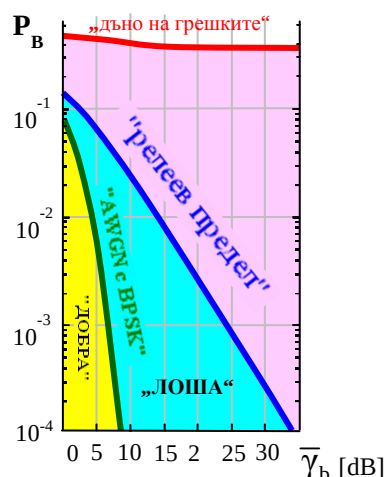
Keywords: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); OFDMA (Orthogonal Frequency Multiple Access); MC-CDMA (Multi Carrier-Code Division Multiple Access); CDMA (Code Division Multiple Access); CDM (Code Division Multiplexing); TDM (Time Division Multiplexing); (Frequency Diversity)..

УВОД

В [1] е синтезирана и анализирана структурата на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател за базова станция от ново поколение (фиг. 1). В основата на синтеза е залегнал принципът на хибридно мултиплексиране, който в разглеждания случай представлява последователна комбинация от: мултиплексиране с кодово разделяне (Code Division Multiplexing - CDM) на M на брой паралелни подканални на всеки ползвателски канал; мултиплексиране с ортогонално честотно разделяне (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) на „m“-подгрупите на всяка ползвателска група; мултиплексиране с времево разделяне (Time Division Multiplexing – TDM) на ползвателските „q“-групи. В резултат на това е осигурено обединяване на предимствата и отстраняване на недостатъците на използваните традиционни методи за мултиплексиране.



Фиг. 1 Структура на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA - предавател



Фиг. 2. Категории характеристики за достоверност на приетата информация

В архитектурата от фиг. 1, TDM – мултиплексираните символи се предават в паралелен код чрез механизма на OFDM – модулацията, с което се осигурява ефективна борба с честотно - избирателните и/или бързите затихвания на сигналите. Използването, обаче на OFDM – модулацията е само първи етап на задачата за отстраняване или съществено намаляване влошаването на характеристиката на достоверността на приетата информация $P_b = f(\gamma_b)$ в условия на многолъчевост [2]. Чрез този етап $P_b = f(\gamma_b)$ преминава от областта „ужасна“ в областта „лоша“, горната граница на която е кривата „релеев предел“ (фиг. 2 [2]).

Вторият етап на задачата за отстраняване или съществено намаляване влошаването на характеристиката на достоверността на приетата информация изисква използване на един или няколко допълнителни методи за

борба с намаляването на средната стойност на отношението сигнал /шум (Signal-to-Noise Ratio – SNR) $\bar{\gamma}_b$ в условия на амплитудно (плоско) или бавно затихване на сигналите.

Чрез този етап характеристиката $P_b = f(\bar{\gamma}_b)$ се доближава до областта „добра“, горната граница на която е кривата AWGN (Additive White Gaussian Noise) с BPSK (Binary Phase Shift Keying).

За борба с намаляването на SNR се използват различни методи. Изследванията от последните няколко години показват, че в комбинация с FEC (Forward Error Correction – непосредствено коригиране на грешките), Interleaving (блоково разместване) и OFDM, разнасянето по честота (Frequency Diversity) е един от най-ефективните методи за гарантиране на допустимите граници за скорост на предаване на данните и вероятност за грешка на бит (Bit Error Rate – BER) на различните видове трафик в условия на многолъчево затихване на сигналите. От такава гледна точка, целта е чрез комбинирано използване на методите за разнасяне по честота и хибридно CDM/OFDM/TDM – мултиплексиране да се синтезира и анализира функционална схема на многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател с единна кодова последователност и различни набори ортогонални под носещи честоти.

1. ФУНКЦИОНАЛНА СХЕМА НА МНОГОКАНАЛЕН ХИБРИДЕН M&Q MC-CDMA/TDMA – ПРЕДАВАТЕЛ С ЕДИННА КОДОВА ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТ И РАЗЛИЧНИ НАБОРИ ОРТОГОНАЛНИ ПОДНОСЕЩИ

Един от подходите за създаване на предавател с разнасяне по честота е комбинацията от механизмите на OFDM и DFS-MC-CDMA (Frequency Domain Spread MC-CDMA) [3]. Приложението на този подход към схемата от фиг. 1 означава всичките TDM – мултиплексирани символи да се предават посредством отделни DFS-MC-CDMA – блокове със собствени комплекти от по G на брой ортогонални под носещи честоти и единна за целия предавател кодова последователност (фиг. 3).

Последната аналитично може да се представи във вида [4]:

$$(1) \quad C^k(f) = \{c_0^k = e^{i\beta_0^k}, \dots, c_g^k = e^{i\beta_g^k}, \dots, c_{G-1}^k = e^{i\beta_{G-1}^k}\}$$

и представлява една (например k-тата) от ортогоналните кодови последователности на Уолш, Голд, Zadoff Chu и др.

Когато $\beta_g^k = \{0, \pi\}$ и $\exp(i\beta_g^k) = \{-1, +1\}$, тогава чиповете $c_0^k = \exp(i\beta_0^k), \dots, c_g^k = \exp(i\beta_g^k), \dots, c_{G-1}^k = \exp(i\beta_{G-1}^k)$ на

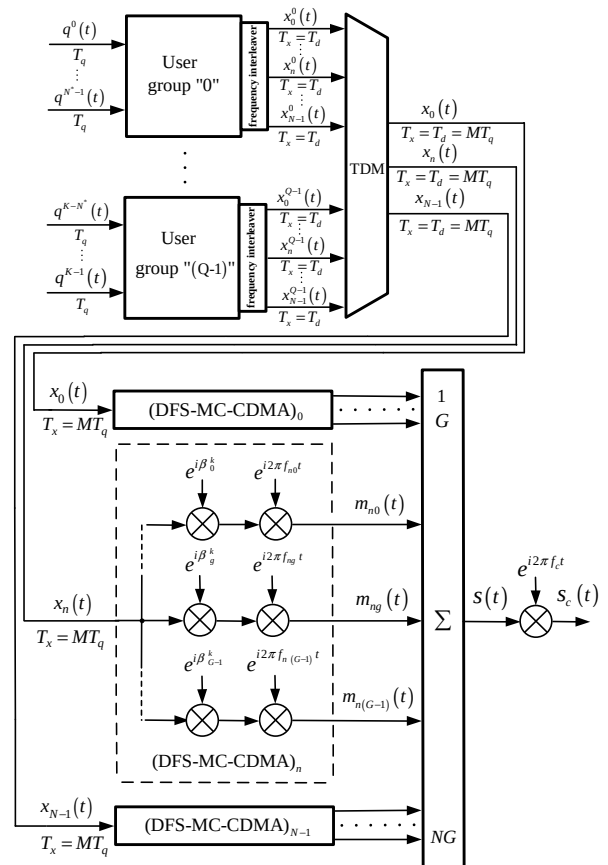
предназначената за разглеждания предавател кодова последователност $C^k(f)$ (1) съвпадат с чиповете на k-тата ортогонална кодова последователност на Уолш:

$$(2) \quad W_k^{N^*} = \{a_0^k, a_1^k, \dots, a_n^k, \dots, a_{N^*-1}^k\}$$

от системата:

$$(3) \quad H_{N^*} = \begin{pmatrix} a_0^0 & a_1^0 & \dots & a_n^0 & \dots & a_{N^*-1}^0 \\ a_0^1 & a_1^1 & \dots & a_n^1 & \dots & a_{N^*-1}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_0^i & a_1^i & \dots & a_n^i & \dots & a_{N^*-1}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_0^{N^*-1} & a_1^{N^*-1} & \dots & a_n^{N^*-1} & \dots & a_{N^*-1}^{N^*-1} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{matrix} W_0^{N^*} \\ W_1^{N^*} \\ \dots \\ W_i^{N^*} \\ \dots \\ W_{N^*-1}^{N^*} \end{matrix},$$

където $i=0,1,\dots,(N^*-1)$; $n=0,1,\dots,(N^*-1)$; $W_i^{N^*}$ - i-та кодова последователност на Уолш с дължина (брой на чиповете) N^* ; $a_n^i(t)$ - n-ти по ред чип от i-тата кодова последователност, характеризиращ се с продължителност $\tau_c = T_x$, с амплитуда, равна на 1 и с полярност, определена от елементите a_n^i на матрицата на Адамар H_{N^*} . Трябва да се има предвид, че за общия случай вместо квадратната $N^* \times N^*$ - матрица (3) могат да се използват матрици, в които броят на чиповете N^* е многократно по-голям от броя на редовете. Броят на последните, обаче, определя максималния брой на базовите станции, а броят на чиповете определя максималния брой G на ортогоналните под носещи честоти в един DFS-MC-CDMA – блок.



Фиг. 3. Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател с единна кодова последователност и различни набори ортогонални под носещи честоти

2. ОСНОВНИ ФУНКЦИОНАЛНИ ЗАВИСИМОСТИ

Броят на всичките ортогонални под носещи честоти в предавателя от фиг. 3 е $P=NG$. Минималната разлика между

съседните под носещи е $\Delta f = 1/T_x = 1/MT_q [1]$, а всяка под носеща се определя с формулата $f_p = p\Delta f$, където $p=0,1,...,(P-1)$. За да се осигури условието за разнасяне по честота [3, 5, 6]:

$$(4) \quad \Delta f_{FD} = r/T_x \geq \Delta f_{coh} \approx 1/T_{max}; \quad T_{max} \geq T_x / r; r \geq 2$$

разпределението на ортогоналните под носещи в отделните DFS-MC-CDMA- блокове се извършва посредством матрицата [3, 7, 8]:

$$(5) \quad \begin{pmatrix} f_{00} & f_{01} & \dots & f_{0g} & \dots & f_{0(G-1)} \\ f_{10} & f_{11} & \dots & f_{1g} & \dots & f_{1(G-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{n0} & f_{n1} & \dots & f_{ng} & \dots & f_{n(G-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{(N-1)0} & f_{(N-1)1} & \dots & f_{(N-1)g} & \dots & f_{(N-1)(G-1)} \end{pmatrix}$$

където:

$$(6) \quad f_{ng} = \frac{n + gN}{NT_q}; n = 0, 1, \dots, N-1; g = 0, 1, \dots, G-1.$$

По такъв начин в колоните са подредени последователни под носещи, минималният интервал между които е $\Delta f = 1/T_x$, а в редовете – непоследователни под носещи, минималният интервал между които е N/T_x . Това означава, че ако честотите от един ред, например n -тия се използват за разнасяне по честота на символа $x_n(t)$ тогава условието (4) приема вида:

$$(7) \quad \Delta f_{FD} = N/T_x \geq \Delta f_{coh} \approx 1/T_{max}; \quad T_{max} \geq T_x / N$$

където $\Delta f_{coh} \approx 1/T_{max}$ е кохерентна ширина на лентата (Coherence Bandwidth); T_{max} - максимално допълнително закъснение (Maximum Excess Delay).

В разглеждания случай и в съответствие с [2, 5, 6], за да не внася каналът честотно-избирателни и бързи затихвания на сигналите е необходимо да се изпълнят условията:

$$(8) \quad \Delta f_{coh} \approx 1/T_{max} > F_x \approx 1/T_x > f_D \approx 1/T_{coh}; \quad T_{max} < T_x < T_{coh}$$

където $f_x \approx 1/T_x$ е широчина на пропусканата честотната лента, приблизително равна на скоростта на предаване на символите; $T_x = MT_q$ - продължителност на предаваните символи; f_D - доплерово разширение (Doppler Spread) на сигнала; $T_{coh} \approx 1/f_D$ - кохерентно време (Coherence Time) на сигнала. От съвместното решаване на (7) и (8) за допустимите граници на изменение на T_x в разглеждания предавател се получава:

$$(9) \quad T_{max} < T_x = MT_q \leq NT_{max}$$

Едновременно изпълнение на условията:

$$(10) \quad T_x = MT_q < T_{coh} \approx 1/f_D; T_x = MT_q \leq NT_{max}$$

лесно се постига чрез подходящ избор на N и M .

Във всеки DFS-MC-CDMA блок (например n -тия) всеки G - пъти дублиран символ $x_n(t)$, например, g -тия се кодира с предназначения за него код $c_g^k = \exp(i\beta_g^k)$, представляващ g -тия чип на k -тата ортогонална кодова последователност $C^k(f)$ (1). Тогава за един времеви интервал $T_x = MT_q$:

1) на изхода на всеки g -ти модулатор от n -тия DFS-MC-CDMA - блок се формира модулирания сигнал:

$$(11) \quad m_{ng}(t) = x_n(t) e^{i\beta_g^k} e^{i2\pi f_{ng}t} = A_n(t) e^{i[\varphi_n(t) + \beta_g^k]} e^{i2\pi f_{ng}t} = y_{ng}(t) e^{i2\pi f_{ng}t}$$

където

$x_n(t) = a_n(t) + ib_n(t) = \sqrt{[a_n(t)]^2 + [b_n(t)]^2} e^{i\varphi_n(t)} = A_n(t) e^{i\varphi_n(t)}$ е комплексната обвиваща на символа; $\varphi_n(t) = \arctg[b_n(t)/a_n(t)]$ - фаза на комплексната обвиваща; $a_n(t)$ и $b_n(t)$ - синфазна и квадратурна съставлящи на комплексната обвиваща; $y_n(t) = A_n(t) \exp\{i[\varphi_n(t) + \beta_g^k]\}$ - комплексна обвиваща на кодирания символ;

2) на изхода на суматора Σ само от n -тия DFS-MC-CDMA - блок се формира модулирания сигнал:

$$(12) \quad s_n(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} m_{ng}(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} A_n(t) e^{i[\varphi_n(t) + \beta_g^k]} e^{i2\pi f_{ng}t} = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{g=0}^{G-1} y_{ng}(t) e^{i2\pi f_{ng}t}$$

характеризираш предаването на символа $x_n(t)$ чрез съответния набор от G на брой ортогонални честоти (n -тия ред на матрица (7));

3) след сумиране на сигналите от всичките DFS-MC-CDMA - блокове на изхода на суматора Σ се формира пълният модулиран сигнал:

$$(13) \quad s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{g=0}^{G-1} A_n(t) e^{i[\varphi_n(t) + \beta_g^k]} e^{i2\pi f_{ng}t} = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{g=0}^{G-1} y_{ng}(t) e^{i2\pi f_{ng}t};$$

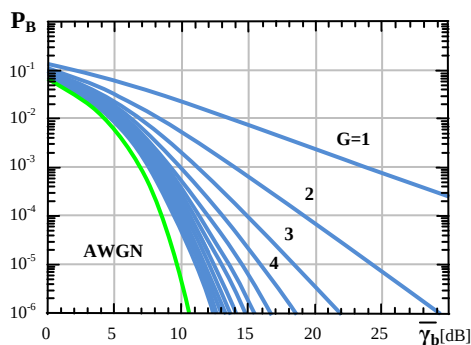
4) след техническата функция на линеен пренос на спектъра на (13) на необходимата висока носеща честота $\omega_c = 2\pi f_c$ за аналоговия алгоритъм, формиращ високочестотния сигнал се получава:

$$(14) \quad s_c(t) = s(t) e^{i\omega_c t} = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{g=0}^{G-1} y_{ng} e^{i2\pi(f_{ng} + f_c)t}.$$

При използване на двоична фазова модулация (Binary Phase Shift Keying - BPSK), тогава $a_n(t) = \pm 1; b_n(t) = 0$, в резултат на което (13) се редуцира във вида:

$$(15) \quad s(t) = \frac{1}{\sqrt{G}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{g=0}^{G-1} a_n(t) c_g^k \cos(2\pi f_{ng}t)$$

където $c_g^k = \exp(i\beta_g^k) = \pm 1$.



Фиг. 4. Осреднена P_B на РКС с G - кратно разнасяне по честота и кохерентно приемане на BPSK - сигнали в релеев многолъчев канал

Графиките на осреднената вероятност за грешка на бит P_B от средната стойност на отношението сигнал /шум на радио комуникационна система с G - кратно разнасяне по честота и кохерентно приемане на BPSK – сигнали в релеев много лъчев канал са показани на фиг. 4 [3]. Тези резултати са приложими и за оценка на възможностите на разглежданата M&Q MC-CDMA/TDMA – система.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От гореизложеното могат да се направят следните важни изводи:

1. В предложения многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател с разнасяне по честота (фиг. 3), всеки от TDM – мултиплексирани символи $x_0(t), \dots, x_n(t), \dots, x_{N-1}(t)$ се предава чрез общ OFDM/DFS-MC-CDMA – радиопредавател, характеризиращ се с различни набори честотно - разнесени и ортогонални под носещи (5) и с единна кодова последователност (например к-тата) от системата последователности на Адамар – Уолш (3).

2. При $G \rightarrow \infty$, което се реализира в схемата с честотно разнасяне от фиг. 3, характеристиката $P_B = f(\gamma_b)$ е най-добра и се доближава до областта „добра“ (фиг. 2), горната граница на която в условия на AWGN е кривата с не кодирана BPSK (фиг. 2, фиг. 4).

3. При $G=1$, което се реализира и в схемата с OFDM от фиг. 1, характеристиката $P_B = f(\gamma_b)$ е най-лоша и се доближава до областта „ужасна“ (фиг. 2), долната

граница на която е кривата „релеев предел“ (фиг. 2) или крива „ $G=1$ “ от фиг. 4.

4. Броят на подносещите ортогонални честоти в предавателя от фиг. 3 е $P=NG$, поради което неговата пропускана честотна лента:

$$(16) \quad F_{M\&Q\ MC-CDMA/TDMA/DFS} = NG/T_x = MN^*G/T_x$$

е G -пъти по-широка от честотната лента на предавателя от фиг. 1, която е $F_{M\&Q\ MC-CDMA/TDMA} = MN^*/T_x$ [1].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петров, П. Многоканален хибриден M&Q MC-CDMA/TDMA – предавател за базова станция от ново поколение. Научна конференция Акустика`2013.
- [2] Скляр, Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. под ред. А. В. Назаренко. Москва, издательский дом „Вильямс“, 2003, 1104с.
- [3] Yang, L. Multicarrier Communications. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [4] Nassar, C., Natarajan B., Wu Z., Wiegandt D., Zekavat S., Shattil S. Multi – Carrier Technologies for Wireless Communication. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [5] Петров, П., Б. Найденов. Принципи на построяване, технически ограничения и сравнителна оценка на OFDM и MC-CDMA – предаватели в условия на многолъчево затихване на сигналите – част 1. Юбилейна научна сесия на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна, 2011.
- [6] Петров, П., Б. Найденов. Принципи на построяване, технически ограничения и сравнителна оценка на OFDM и MC-CDMA – предаватели в условия на многолъчево затихване на сигналите – част 2. Юбилейна научна сесия на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна, 2011.
- [7] Петров, П. Комбинирано използване на методите за разнасяне по честота и хибридно multicode-TDM-OFDM – мултиплексиране в низходящата линия за връзка на 4G-част 1. Научна конференция Акустика`2011.
- [8] Петров, П. Комбинирано използване на методите за разнасяне по честота и хибридно multicode-TDM-OFDM – мултиплексиране в низходящата линия за връзка на 4G-част 2. Научна конференция Акустика`2011.

АКУСТИЧНО ПРОЕКТИРАНЕ НА ЗАЛА С ОБЩО ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ

ACOUSTICS PROJECT OF MULTI-FUNCTION HALL

инж. Петър Попов

Технически университет - Варна, България. E-mail: petar.vt@gmail.com

Abstract

Room acoustics describes how sound behaves in an enclosed space. The way sound behaves and affect the people in the room depends heavily on the room geometries and placement of absorption material. The sound that you hear in any room is a combination of the direct sound that travels straight from your speakers to your ears, and the indirect reflected sound — the sound from your speakers that bounces off the walls, floor, ceiling, and furniture before it reaches your ears.

Keywords: Architectural acoustic, Sabine, Reverberation time, Absorption materials.

УВОД

При излъчване на звук в затворено помещение, в първия момент звуковите вълни се разпространяват свободно, докато не достигнат повърхностите на помещението, които поглъщат и отразяват част от звуковата енергия.

Условията за слушане в едно помещение се определят от средните стойности на величините, характеризиращи звуковите процеси в помещенията. Тези средни стойности се получават от резултатите, получени при изследването на звуковите процеси в различни точки от помещението.

1. ВРЕМЕ НА РЕВЕРБЕРАЦИЯ

Процесът на затихване на звука в помещението се нарича реверберационен, а продължителността на отзвучаването, т.е. времето, за което сигнала затихва до прага на чуваемостта, се нарича време на реверберация.

Времето, за което средната плътност на звуковата енергия намалява с 60 dB, се нарича време на реверберация - T и се определя по формулата на Сабин [1, 2]:

$$(1) \quad T = \frac{0,161.V}{A} \quad ;$$

където V - обем на помещението, m^3 ;
 S - повърхнина на помещението, m^2 ;
 A - общо поглъщане на помещението.

Това време не зависи от мястото на източника на звук и разположението на звукопоглъщащите повърхности в помещението.

1.2. МАТЕМАТИЧЕСКИ АЛГОРИТЪМ

Алгоритъмът или математическия модел се състои основно от три части [3]:

1. Линейна функция, чрез която целта на задачата се представя в математическа форма;

2. Система от линейни уравнения, чрез която се представят в математическа форма ограничението условия, при които протича изследваното явление;

3. Система от уравнения, изразяващи условието за не отрицателност на решенията на първата система.

При общата форма на математически модел се търсят значенията на променливите $X_1, X_2, \dots, X_n$, при които се достига екстремална стойност (максимум или минимум) на линейната функция .

$$(2) \quad Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots c_nx_n$$

При следните ограничителни условия x_j ($j = 1, 2, \dots, n$):

$$(3) \quad \begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= b_m \end{aligned}$$

$$(4) \quad x_1 > 0, x_2 > 0, x_n > 0,$$

където c_j , a_{ij} и b_j са известни постоянни величини.

При това индексите на коефициентите c_j показват пред кое неизвестно, в линейната функция стоят тези коефициенти; първия индекс на коефициента a_{ij} показва в кое уравнение, а втория показва пред кое неизвестно стоят съответните коефициенти; индексът на b_j показват на кое уравнение тези величини са свободни членове.

За всички величини $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$; $n > m$.

За удобство при работа с моделите се използват някои съкратени форми на записване:

$$Z = \sum_{i=1}^n C_i X_i \quad \text{при условие}$$

$$(5) \quad Z = \sum_{i=1}^n a_{ij} . x_i = b_{ij} \quad (j=1,2,\dots,m)$$

и $x_i > 0 (i = 1, 2, \dots, n), n > m$

Математическият модел на акустиката в конкретна зала се прилага за всички честоти и има вида [3]:

$$F_{min} = \sum_{i=1}^n C_i \cdot S_i, \text{ при следните ограничения:}$$

$$A_{g125\text{Hz}} = \sum_{i=1}^n \alpha_{i125\text{Hz}} \cdot S_i = \alpha_{1125\text{Hz}} \cdot S_1 + \alpha_{2125\text{Hz}} \cdot S_2 + \dots + \alpha_{n125\text{Hz}} \cdot S_n$$

$$A_{g250\text{Hz}} = \sum_{i=1}^n \alpha_{i250\text{Hz}} \cdot S_i = \alpha_{1250\text{Hz}} \cdot S_1 + \alpha_{2250\text{Hz}} \cdot S_2 + \dots + \alpha_{n250\text{Hz}} \cdot S_n$$

$$A_{g500\text{Hz}} = \sum_{i=1}^n \alpha_{i500\text{Hz}} \cdot S_i = \alpha_{1500\text{Hz}} \cdot S_1 + \alpha_{2500\text{Hz}} \cdot S_2 + \dots + \alpha_{n500\text{Hz}} \cdot S_n$$

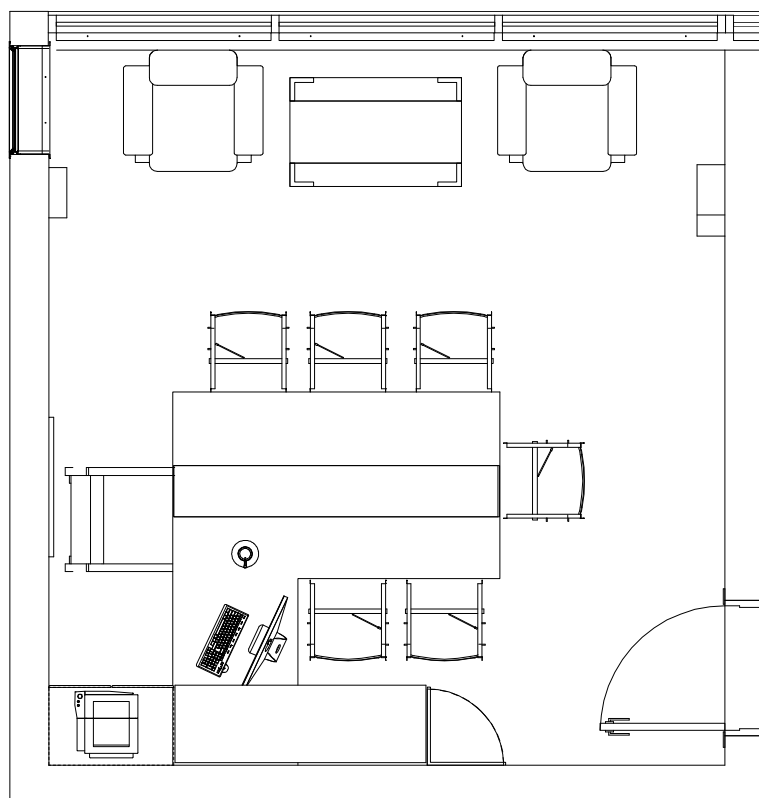
Изчисленията на математическия модел продължават за всички честоти до 4000 Hz.

Цели на проекта:

- делови офис;
- зала за лекции и презентации;
- стая за развлечение;

Изисквания:

- $T_{опт} = 0,5 \text{ s}$ при честота 1 kHz;
- Неравномерност на АЧХ $\pm 10 \%$;



Фиг. 1 Общ план на залата.

2. ПРЕДПОСТАВКИ И НАЧИНИ ЗА РЕШАВАНЕ НА ПРОБЛЕМА

Основната задача при акустичното проектиране на всякакви аудитории се състои в осигуряването на оптимална реверберация, при която говорът да звучи съвършено разбираемо, при достатъчни нива на силата на звука.

От съществено значение за акустиката на помещенията е разпределението на звукопоглъщащи материали.

Тези материали, трябва да бъдат разпределени несиметрично по цялата повърхност, която ограничава обема на помещението; съсредоточаване на поглъщането на една от повърхностите или в един от краищата на помещението води до нарушаване на експоненциалния характер на отзвука и по-специално до появяване на чупки върху линейното спадане на нивото.

При неравномерно поглъщане се повишава ефективността на поглъщащите материали и следователно

се намаляват разносните за акустическа обработка на аудиторията.

3. РЕШЕНИЕ НА НАУЧНИЯ ПРОБЛЕМ

3.1 ОПРЕДЕЛЯНЕ НА АКТУАЛНО ВРЕМЕ НА РЕВЕРБЕРАЦИЯ

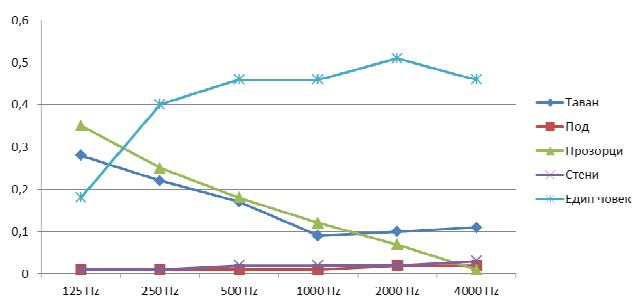
Определя се коефициентът на звукопоглъщане на всички прилежащи обекти в стаята за честотен диапазон от 125 ÷ 4000 Hz.

- Таванът е окачен с панели от шперплат;
- Подът е покрит с плочки от гранитогрес;
- Стените са тухлена зидария, измазани;
- Прозорците са от алуминиева дограма;

- Звукопоглъщането за един човек е за един слушател, прав или седнал.

Графика 3.1

Коефициенти на звукопоглъщане α на материалите в стаята



Изчислява се времето на реверберация по формулата на Сабин:

$$T = \frac{0,161 \times V}{\sum S_i \times q_i} = \frac{0,161 \times 54,03}{\sum S_i \times q_i} = \frac{8,7}{\sum S_i \times q_i} [s]$$

$$T = \frac{8,7}{S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + S_{10} \alpha_3 + S_8 \alpha_4 + S_9 \alpha_9 + N \cdot \alpha_1}$$

3.2. ИЗБОР НА ОПТИМАЛНО ВРЕМЕ НА РЕВЕРБЕРАЦИЯ

При изчислен обем на офиса от $V = 54 \text{ м}^3$ и съгласно БДС 9991-84 и БДС 10676-84 оптималното време за реверберация $T_{\text{опт}}$ може да се избере в границите $0,5 \div 0,8 \text{ s}$.

Неравномерността на честотната характеристика на $T_{\text{опт}}$ е определена на основание т. 2,3 на БДС 10676-84. ЧХ е хоризонтална, а за ниските честоти е възможно повдигане с $15 \div 20 \%$ спрямо стойностите за средни честоти.

Стандартът изисква при зали предназначени за говор, но с електроакустична озвучителна система, времето на реверберация да бъде ниско.

Таблица 3.1

F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T [s]	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5

3.3. ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА НЕОБХОДИМИЯ КОЕФИЦИЕНТ НА ЗВУКОПОГЛЪЩАНЕ

От формулата на Сабин се извежда сумата от избраните площи умножени по търсения коефициент на звукопоглъщане α , за да се изчисли същия [1, 2]:

$$T = \frac{0,161 \times V}{\sum S_i \cdot q_i} \Rightarrow \sum S_i \cdot q_i = \frac{0,161 \times V}{T} = \frac{8,7}{T_{\text{опт}}}$$

3.4. ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА СОБСТВЕНИ РЕЗОНАНСНИ ЧЕСТОТИ

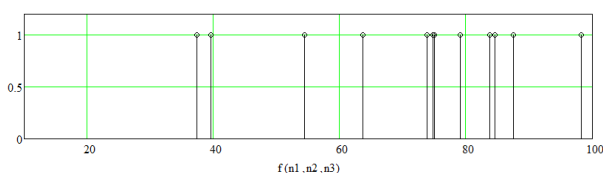
Всеки затворен въздушен обем представлява линейна трептяща система с определен спектър на собствени резонансни честоти. Тези честоти оказват влияние на излъчвания в помещението сигнал като всяка съставна на сигнала възбужда ново затихващо трептене, фон, при който се възприемат новите сигнали.

В настоящият проект, правоъгълна зала с идеално твърди стени (фиг. 3) резонансните честоти се определят с израз:

$$(6) \quad f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

където l_x – дължина; l_y – ширина; l_z – височина;
 c_0 – скорост на звука;

Съвкупността от трите цели числа n_x , n_y и n_z определят нормалните вълнови колебания. Дискретният спектър е показан на фиг. 2 [4].

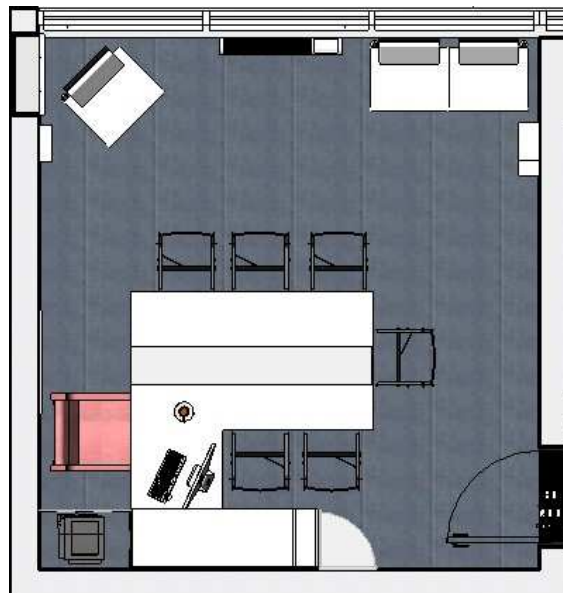


Фиг. 2 Собствени честоти на проектираната зала изчислени при следните размери:
височина – 2,7 m, дължина – 4,35 m,
ширина – 4,60 m.

3.5. ИЗБОР НА ЗВУКОПОГЛЪЩАЩИ МАТЕРИАЛИ

За постигане на възможно най-добра акустика в стаите е добре да се монтира звукопоглъщащ материал на тавана и на срещуположната на лектора страна.

Съобразно изчисления коефициент $\alpha_{\text{необх}}$ са избрани звукопоглъщащи панели на световни производители като AMF и EUROCOUSTIC [5, 6].



Фиг. 3 Триизмерен модел на помещението.

4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

При изчисленията на актуалното време на реверберация на зала с общо предназначение, имаме рязко изразен скок на реверберационният процес в областта на средните и високи честоти като минават оптималните нива, които са около 0,5 s повече от $200 \div 300 \%$, т.е. имаме време от порядъка на $1 \div 1,6 \text{ s}$. За обезпечаване времето на реверберация се използват акустични панели на фирмите AMF и EUROCOUSTIC [5, 6].

Акустичните панели Samoa E на EUROCOUSTIC не покриват зададената равномерност на АЧХ в изходните данни за проекта от $\pm 10 \%$ (таблица 4.1). За конкретния случай най-удобни са таванни панели THERMATHEX Feinstratos и стенни панели Line Style на фирмата AMF. Техният сумарен коефициент на звукопоглъщане се доближава максимално до необходимия за оптималното време на реверберация.

Таблица 4.1

F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Сабин [s]	0,84	0,87	0,94	1,58	1,11	1,13
$T_{\text{опт}}$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5
T_{AMF}	0,8	0,81	0,6	0,5	0,54	0,57
T_{EURO}	0,72	0,58	0,48	0,48	0,44	0,39
$\Delta T/T, \% \text{ AMF}$	0	13,4	0	0	7,4	12,3
$\Delta T/T, \% \text{ EURO}$	11,11	20,7	25	4,17	13,64	28,2
$\Delta T/T, \%$	10	10	10	10	10	10

В областта на ниските честоти – 250 Hz и високите честоти – 4000 Hz има малък скок и неравномерност от $12 \div 13 \%$, която може да се пренебрегне.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Залата с общо предназначение има лоша естествена акустика, което оказва влияние при наличие на малка аудитория. Причини за това са: покритият под с плочки от гранитогрес и окаченият таван с дървени панели (заради монтиране на LED осветление). В допълнение по стените няма звукопоглъщащи повърхности, което също влошава акустичните параметри на залата.

Чрез настоящите анализи се постига значително намаляване на времето на реверберация след заменяне на таваните панели, с акустични такива на фирмите AMF и EUROCOUSTIC. Чрез стенни панели от продуктова гама на AMF се образува акустична мембрана на срещуположната страна спрямо лектора и разположението на мултимедийните устройства. Така се постига максимално доближаване до необходимият коефициент на звукопоглъщане в залата.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kuttruff H., *Room Acoustic, Fifth Edition*, ISBN-10: 0415480213, Spon Press, 2009.
- [2] F. Alton Everest, *Master Handbook of Acoustics, Fifth Edition*, ISBN-10: 0071603328, The McGraw-Hill Companies, 2009.
- [3] Г. Евстатиев, Е. Сираков, *Математически метод, обезпечаващ оптималното време на реверберация при акустическа обработка на закрити зали, Трета национална научно-техническа конференция с международно участие - "Акустика'79г., 28÷29 септември 1979г., Благоевград.*
- [4] Сираков Ек. и Живомиров Хр., „Green's Function and Acoustic Standing Waves in Rectangular Loudspeaker Enclosures”, *Национална конференция с международно участие „Акустика“, Варна.*
- [5] <http://eurocoustic.com/> - каталози на EUROCOUSTIC.
- [6] <http://www.amfgrafenau.de/> - каталози на AMF.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕХАНИЧНИ ВИБРАЦИИ ПРИ КРЪГЪЛ ИЗЛЪЧВАТЕЛ

EXAMINATION OF MECHANICAL VIBRATION OF CIRCULAR PISTON

доц. Екатеринослав Сираков

Технически университет - Варна, България. E-mail: katio@mail.bg

докт. Илиян Илиев

Технически университет - Варна, България. E-mail: ilian_tatoo@abv.bg

Abstract

The present work deals with the vibrations of a loudspeaker's membrane. These vibrations cause deformation on the surface of the membrane, leading to deterioration of the reproduced sound from the loudspeaker. A brief review of the problem has been made including the theoretical basics. A few modes of the loudspeaker's membrane have been analyzed and represented by 3D and 2D Matlab simulations. From the analysis of the modes certain conclusions have been derived. These conclusions are applicable to the field of designing and manufacturing of loudspeakers.

Keywords: Circular membrane, Loudspeaker, Frequency response, Nodal lines, Vibrations, Measurements.

УВОД

Настоящата статия разглежда проблема за вибрациите на мембраната на високоговорител. Тези вибрации водят до деформации по нейната повърхност, които влияят на качеството на възпроизведения звук. Направен е кратък обзор и е представена основната теория за това явление. Анализирани са няколко деформации на мембраната на даден високоговорител. С програмен продукт Matlab® деформациите са 2D и 3D симулирани и визуализирани.

Още в средата на миналия век е наблюдавано поведението на високоговорители при различни честоти [1, 2, 3, 4]. С напредване в техническо отношение е станало възможно да се наблюдават с лазерни постановки [5, 6, 7] деформациите, предизвикани от вибрациите по повърхността на високоговорител, а също така и по-лесно числовото им пресмятане с цел конструктивна оптимизация [7, 8, 9, 10].

Тези деформации представляват интерес за акустиката и за това все повече се изследват и визуализират [11, 12, 13, 14, 15]. По този начин се обогатяват теоретичните знания и експерименталните данни използвани при конструиране на високоговорители.

От анализа на деформациите са направени няколко заключения, които са приложими в областта на проектиране и произвеждане на високоговорители.

1. ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА НА ПРОБЛЕМА

При ниски честоти може да се приеме, че мембраната на високоговорител извършва възвратно-постъпателно движение като кръгъл плосък бутален излъчвател. При високите честоти, обаче, тя вече не се движи като едно цяло. Акустичните ѝ маса и импеданс се изменят като функция на честотата [16]. В резултат на това настъпва резонанс на различни честоти за даден високоговорител. Тези резонанси причиняват неравномерност в амплитудно-честотната характеристика (АЧХ) на високоговорителя.

В настоящата статия се изследва поведението на високоговорител и по-точно деформациите на неговата мембрана, породени от различни резонансни честоти.

Движението на звуковата бобина на високоговорителя причинява напречно трептене по повърхността на неговата мембрана. Ако дължината на това напречно трептене е сравнима с размера на мембраната, последната ще извършва не само възвратно-постъпателно движение. При по-високите честоти тези деформациите са много сложни поради наслагване на радиалните и тангенциалните вълни, разпространяващи се по повърхността на мембраната.

Голямо влияние върху деформациите оказват динамичните свойства и физичните характеристики на материала, от който е направен високоговорителя. При възникване на трептене различните материали започват да се деформират с различна амплитуда. Тази амплитуда ще нараства при приближаване на честотата на трептенето до основната резонансна честота на даден материал и ще достигне максимум, когато двете честоти се изравнят. Всеки материал има няколко такива честоти, което означава, че ще възникнат няколко резонанса. Тези резонанси водят до различни деформации, по повърхността на мембраната, наречени моди [11].

Уравнение на движението при мембрана е [17, 18]:

$$(1) \quad \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \frac{E \cdot h^2}{3 \cdot \rho \cdot (1 - \nu^2)} \nabla^4 \zeta = 0;$$

$$(2) \quad \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \frac{E \cdot h^3}{\rho \cdot h \cdot 12 \cdot (1 - \nu^2)} \nabla^4 \zeta = 0,$$

където ∇^2 е оператора на Лаплас;

ζ – представляват преместването на мембраната от равновесното и положение, m;

ρ – плътност на материала (900 kg/m³ за полипропилен);

E – модул на еластичност – 1,5 · 10⁹ Pa.

h – дебелина на мембраната, m.

Съпротивлението на огъване на мембраната е:

$$(3) \quad D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}.$$

При полагане $\zeta = y \cdot \exp(j \cdot \varpi \cdot t)$ и заместване на $\frac{\partial}{\partial t}$ с $j \cdot \varpi$, ще се получи уравнението за разпределението на амплитудата на преместването [19]:

$$(4) \quad \nabla^4 y - k^4 \cdot y = 0,$$

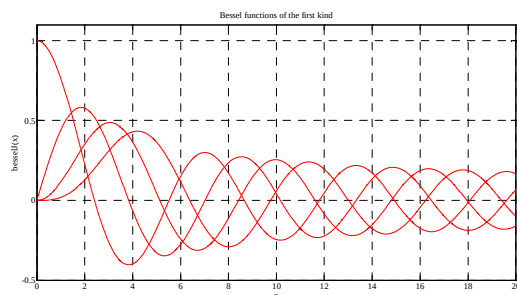
където:

$$(5) \quad k^4 = \frac{\varpi^2 \cdot \rho \cdot h}{D}.$$

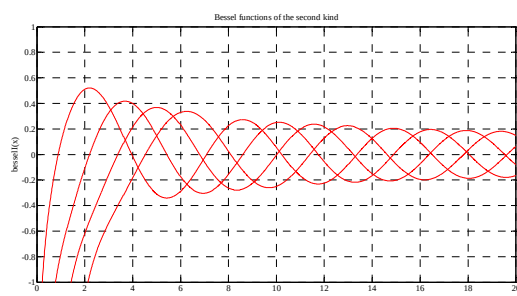
За кръгла мембрана уравнението има вида [18]:

$$(6) \quad y(r, \varphi) = \sin(n \cdot \varphi) \cdot [A \cdot J_n(k \cdot r) + B \cdot I_n(k \cdot r)],$$

където $I_n(k \cdot r) = j^n \cdot J_n(j \cdot k \cdot r)$ се нарича функция на Бесел от първи и втори ред графиките на която са показана на фиг. 1 и фиг. 2, [20, 21].



Фиг. 1 Функция на Бесел от първи ред.



Фиг. 2 Функция на Бесел от втори ред.

Константите A и B се определят от граничните условия на уравнение (6):

$$(7) \quad y(a, \varphi) = 0;$$

$$(8) \quad \left(\frac{\partial y}{\partial r}\right)_{r=a} = 0.$$

Първото условие (7) е спазено, когато:

$$(9) \quad B = -A \cdot \frac{J_n(k \cdot a)}{I_n(k \cdot a)},$$

а второто условие е изпълнено при $r = a$.

Стойностите на k са такива, че:

$$(10) \quad I_n(k \cdot a) \frac{d}{dr} J_n(k \cdot r) - J_n(k \cdot a) \frac{d}{dr} I_n(k \cdot r) = 0,$$

На практика възникват деформации по повърхността на мембраната породени от свободните ѝ вибрации и последващите резонанси. Тези деформации са породени от:

– резонанси (възли) по диаметъра (n на брой) порождащи тангенциални вълни:

$$(11) \quad \sin(n \cdot \varphi) = 0;$$

– резонанси, порождащи радиални вълни, които представляват концентрични окръжности с радиус, корен на уравнението:

$$(12) \quad [A \cdot J_n(k \cdot r) + B \cdot I_n(k \cdot r)] = 0,$$

където корените са:

$$(13) \quad k_{mn} = \frac{\pi}{a} \beta_{mn}.$$

Стойностите на коефициентите β_{mn} [18 (с корекция)]:

$$(14) \quad \left. \begin{array}{l} \beta_{01} = 1.017388620682674 \\ \dots\dots\dots \\ \beta_{11} = 1.467695015704959 \\ \dots\dots\dots \\ \beta_{21} = 1.879835766954797 \\ \dots\dots\dots \end{array} \right\} \beta_{mn} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(n + \frac{m}{2} \right)$$

определят честотите, при които възниква резонанс и се образуват специфичните деформации (моди) по повърхността на мембраната. Тези честоти се получават от израза [17]:

$$(15) \quad v_{mn} = \frac{\pi \cdot h}{2 \cdot a^2} \sqrt{\frac{Q}{3 \cdot \rho(1 - s^2)}} (\beta_{mn})^2.$$

където s – коефициент на Поасон, характеризиращ еластичните свойства;

Q – модул на еластичност – $1,5 \cdot 10^9$ Pa;

h – дебелина на мембраната, m;

a – радиус на мембраната.

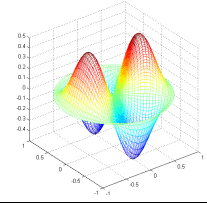
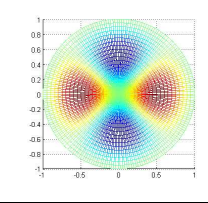
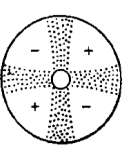
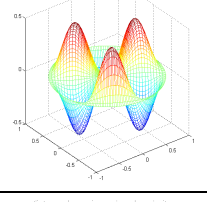
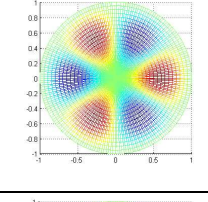
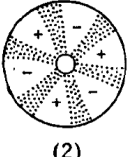
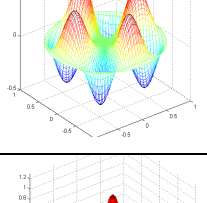
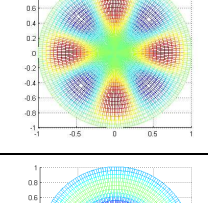
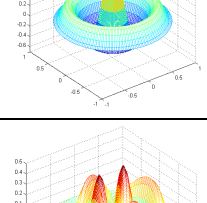
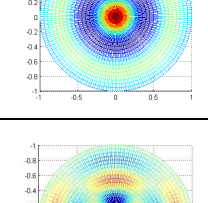
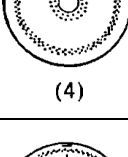
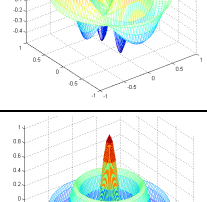
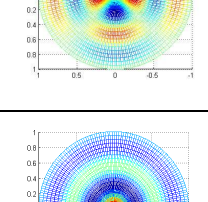
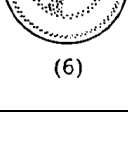
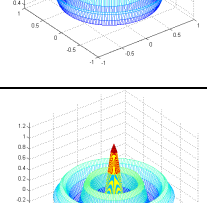
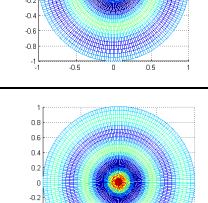
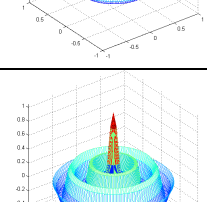
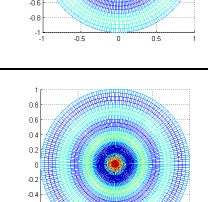
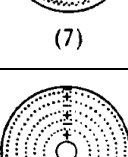
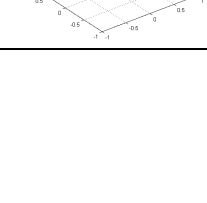
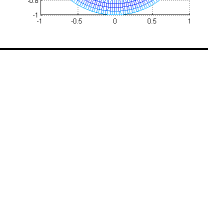
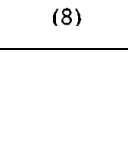
Радиалните вълни (колебания с подвижен център) представляват кръгове, перпендикулярни на оста на излъчване. При тях звуковата бобина и мембраната се движат с увеличена амплитуда [1], което води до увеличаване на амплитудата в АЧХ.

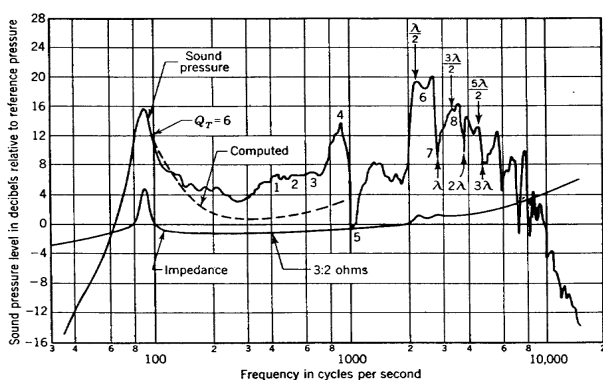
Тангенциалните колебания се разпространяват от центъра към периферията на мембраната и обратно.

На фиг. 3 е показана измерената от М. С. Корингтън амплитудно-честотната и импедансната характеристики на високоговорител с диаметър 0,2 m [16]. Някои от модите са показани за точно определени честоти, а в Таблица 1 са нанесени в четвърта и пета колона.

В точка 1 от графиката на фиг. 3 се вижда, че за честота 420 Hz мембраната изпада в резонанс и приема формата представена на първи ред от Таблица 1.

Таблица 1

№	β_{mn}	ν_{mn}	Matlab (3D)	Matlab (2D)	Measured Nodes or frequency range [16, 22, 23]
1	$\beta_{21} = 1.8798357669547$	$\nu_{21} = 3.41$			 420 CPS (1)
2	$\beta_{31} = 2.2738565470422$	$\nu_{31} = 4.99$			 500 CPS (2)
3	$\beta_{41} = 2.6568071863846$	$\nu_{41} = 6.81$			682 Hz – 886 Hz
4	$\beta_{03} = 3.0046858962094$	$\nu_{03} = 8.72$			 940 CPS (4)
5	$\beta_{23} = 3.9477495443888$	$\nu_{23} = 15.05$			 2150 CPS ($\lambda/2$) (6)
6	$\beta_{04} = 5.0026977586826$	$\nu_{04} = 15.48$			1548 Hz – 2012 Hz
7	$\beta_{05} = 5.0026977586826$	$\nu_{05} = 24.17$			 2800 CPS (λ) (7)
8	$\beta_{06} = 6.0022248590003$	$\nu_{06} = 34.80$			 3800 CPS (8)



Фиг. 3. Амплитудно-честотна и импедансна характеристики на високоговорител с диаметър 0,2 m [16].

Вижда се, че съществуват четири нодални линии разположени радиално по мембраната, както и четири области с максимално изкривяване. Две в посока навън от високоговорителя („+“) и две в обратна посока („-“). Може да се направи извод, че тези области на максимално деформиране изместват въздуха към нодалните линии. Също така цялата мембрана се движи и като бутало. Резултатът от тези движения и деформации е увеличаване на амплитудата (фиг. 3) с няколко децибела.

Подобни са процесите и в точки 2 и 3, но разликата е в броя на нодалните линии (ред 2, Таблица 1).

В точка 4 за честота 940 Hz се наблюдава силно изразен максимум. От четвърти ред на Таблица 1 се вижда, че централната част на мембраната вибрира с голяма амплитуда, което поражда максимума в АЧХ. Деформацията по краищата на мембраната е в противофаза с основната ѝ част, но това не оказва съществено влияние върху крайната амплитуда.

Непосредствено след максимума следва силно изразен минимум (точка 5) за честота 1100 Hz.

С увеличаване на честотата мембраната извършва различни видове колебания. Това води до промяна на положението на нодалните линии разположени по нейната повърхност.

В точки 6, 8 може да се отбележи увеличеният брой на концентричните нодални линии по повърхността на мембраната (ред 8, Таблица 1). Когато по-голямата площ от мембраната извършва движение в посока от високоговорителя („+“) се появяват силно изразени максимуми. Съответно, когато по-голяма част от мембраната се движи към високоговорителя се наблюдава силно изразен минимум (точка 7).

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретично са анализирани и компютърно са симулирани вибрации при кръгъл излъчвател. Получените резултати от теоретичният анализ и компютърната симулация са съпоставени с експериментални резултати на М. С. Корингтън публикувани в световно утвърдени издания от Лео Беранек, Тим Меллоу [16], А. Куценко, М. Раскита [22], Д. Шифман [23] и др.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящият доклад е в рамките на научно-изследователски проект „Изследване на електродинамични и електроакустични антени в безехова камера“, спонсориран от Министерство на образованието и науката, Република България, 2013.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фурдуйев В. Електроакустика. Наука и изкуство, София, 1956.
- [2] Olson Harry F., Acoustical Engineering. D. Van Nostrand Company, Inc, New York, USA, 1960.
- [3] Вахитов Шакир Яхъярович, Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. Изкуство, Москва, 1982.
- [4] Алдошина И., Войшвилло А. Высококачественные акустические системы и излучатели. Радио и связь, Москва, 1985.
- [5] Quaegebeur N., Chaigne A. Transient modal radiation of axisymmetric sources: application to loudspeaker. Applied Acoustics 71, pages 335-350, 2010.
- [6] Klippel W., Schlechter J. Measurement and Visualization of Loudspeaker Cone Vibration. Presented at the 121st Convention of the Audio Eng. Soc., New York, USA, 2006
- [7] Buck M., Andrews P., Simmons G., Saye S. Extended Range Beryllium Dome Diaphragm Assembly for Large Format Compression Drivers. ALMA Europe Symposium, Frankfurt, 2011.
- [8] Kim W., Jang G., Kim Y. Microspeaker Diaphragm Optimization for Widening the Operating Frequency Band and Increasing Sound Pressure Level. IEEE Transactions of magnets, Vol. 46, 2010.
- [9] Bolaños F. Modal Analysis and Nonlinear Normal Modes (NNM) on Moving Assemblies of Loudspeaker. Presented at the 119st Convention of the Audio Eng. Soc., New York, USA, 2005.
- [10] Skrodzka E., Sek A. Comparison of modal parameters of loudspeakers in different working conditions. Applied Acoustics Vol. 60 pages 267-277, Elsevier, 2000.
- [11] Miller R. Modal Analysis of Loudspeaker Diaphragms. Rensselaer Polytechnic Institute, Hartford, USA, 2010.
- [12] Mao Q., Pietrzko S. Control of Noise and Structural Vibration. Springer, London, 2013.
- [13] Schlechter J. Visualization of Vibrations of Loudspeaker Membranes. Technical University, Dresden, 2006.
- [14] Loutridis S. Resonance identification in loudspeaker driver units: A comparison of techniques. Applied Acoustics Vol. 66 pages 1399-1426, Elsevier, 2005
- [15] Kim K., Park K. Numerical investigation on vibration characteristics of a micro-speaker diaphragm considering thermoforming effects. Journal of Mechanical Science and Technology, Busan, Korea, 2013.
- [16] Beranek Leo L., Mellow Tim J. Acoustics: Sound Fields and Transducer. Elsevier, Oxford, Great Britain, 2012.
- [17] Морз Ф. Колебания и звук. Издательство: Книга по Требованию, Озон.ru, 2012 г.
- [18] Weaver W., Timoshenko S., Young D.. Vibration Problems in Engineering. Wiley-Interscience, 2008.
- [19] Hagedorn P., DasGupta A. Vibration and Waves in Continuous Mechanical Systems. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2007.
- [20] E. Sirakov, H. Zhivomirov, B. Nikolov. Green's Function and Acoustic Standing Waves in Rectangular Loudspeaker Enclosures. Icest 2011, June 29 – July 1 2011, Nis, Serbia. Proceedings of Papers, ISBN: 978-86-6125-033-0, Vol. 3, pp. 721-724, 2011.
- [21] E. Sirakov, H. Zhivomirov. Acoustic Standing Waves in Closed Cylindrical Enclosures. Icest 2012, June 28 – June 30 2012, Veliko Tarnovo, Bulgaria. Proceedings of Papers, ISBN: 978-619-167-002-4, Vol. 1, pp. 129-130, 2012.
- [22] Куценко А., М. Раскита. Методическое пособие по курсу электроакустика и звуковое вещание. Часть 1. Гръмкоговорители. Таганрог, 2007.
- [23] Д. Шифман. Гръмкоговорители. Конструирование и производство. Энергия, Москва, 1965.

ГЕНЕРИРАНЕ НА ИЗМЕРВАТЕЛНИ СИГНАЛИ С ПРИЛОЖЕНИЕ НА MATLAB

GENERATION OF MEASUREMENT SIGNALS WITH MATLAB IMPLEMENTATION

ас. докт. инж. Христо Живомиров

Технически университет - Варна, България. E-mail: hristo_car@abv.bg

докт. инж. Илиян Илиев

Технически университет - Варна, България. E-mail: ilian_tatoo@abv.bg

Abstract

In the present paper the problem about generation of test signals, used for acoustic and audio measurements, is considered. The generation of the signals is accomplished through Matlab® file-functions. Short theoretical definitions of the generated signals are given. Matlab® scripts for generation of each of the signals are suggested. The latter can be downloaded for free, from the link given at the end of the article. Conclusions with practical value have been made. Topics for future work are also considered.

Keywords: signals, generation, measurement, Matlab®.

УВОД

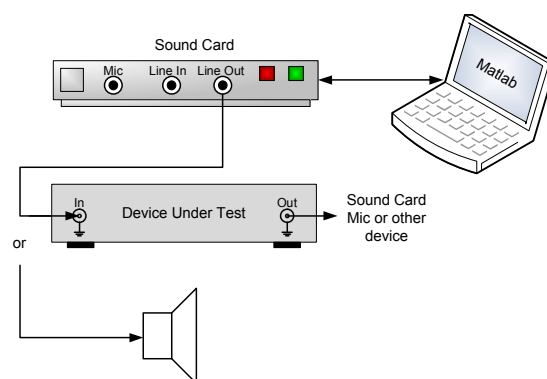
В настоящата статия се разглежда въпросът за генерирането на тестови сигнали, използвани за акустични и аудио измервания. Показано е приложението на програмния продукт Matlab®, като са използвани възможностите предоставени от Signal Processing Toolbox [1] и Data Acquisition Toolbox [2]. Като изходно периферно устройство е показано използването на вградена или външна аудиокарта (soundcard). Дадени са блокови схеми на постановката, както и на общия алгоритъм на авторските програмни продукти.

Сигналите са функция на една или повече независими променливи и пренасят информация за дадено физическо явление. В резултат на едни сигнали постъпват на входа на дадена система, на изхода ѝ се пораждат други. Следователно те могат да се използват не само за пренос на информация между отделните блокове на една система, но за различни тестове на последната [3].

Безспорно централно място в сферата на реализацията, практическите изследвания и измервания на веригите и системите (circuits and systems), както и в областта на сигналите и системите (signals and systems) стои въпросът за генерирането (синтезирането) на изпитателни (тестови) сигнали. Глобално погледнато въпросът се разпростира върху цели области от познанието: образна диагностика, геодезия, сеизмология, радио-, хидро- и аудио- локацията, архитектурна акустика, машиностроене, идентификацията на системи и редица други.

1. ПОСТАНОВКА НА ПРОБЛЕМА

Както е показано на фиг. 1 за генериране на измервателните сигнали се използва аудиокарта, персонален компютър (лаптоп) и възможностите на програмния продукт Matlab®. На изхода на аудиокартата може да се включват различни устройства които са обект на изследване (напр. филтри, усилватели и др.) или преобразователи (напр. високоговорител, хидрофон и др.).



Фиг. 1. Блокова схема на постановката

В настоящата статия се използва стандартна звукова карта – Realtek High Definition Audio. Последната, разглеждана като DAQ-система, притежава параметри:

- честота на дискретизация: 8000 ÷ 192000 Hz;
- 16 bit DAC → ≈ 90 dB динамичен диапазон;
- тип на изхода – AC;
- 16 bit ADC → ≈ 90 dB динамичен диапазон;
- тип на входа – AC, DR: ± 1 V.

Тези параметри на хардуера и програмния продукт Matlab® позволяват да се генерират най-различни измервателни сигнали в аудио-честотния обхват. В зависимост от характера на изследването и вида на устройствата, които ще се изследват може да се генерират:

- синусоидален сигнал (sine wave signal);
- правоъгълен сигнал (square wave signal);
- сигнал с линейна честотна модулация (chirp signal);
- сигнал от тип $\sin(x)/x$ (sinc signal);
- сигнал от тип бял шум (white noise signal);
- сигнал от тип розов шум (pink noise signal);

Съответните дефиниции са:

- за синусоидален сигнал [4]:

$$(1) \quad x(t) = \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0)$$

- за правоъгълен сигнал [4]:

$$(2) \quad x(t) = \begin{cases} 1 & \text{за } 0 < t \leq t_i \\ -1 & \text{за } t_i < t \leq T \end{cases}$$

- за сигнал с линейна честотна модулация [5]:

$$(3) \quad x(t) = \sin(2\pi f_1 t + \pi \frac{f_2}{T} t^2), \quad 0 < t < T$$

- за сигнал от типа $\sin(x)/x$ [4]:

$$(4) \quad x(t) = \text{sinc}(\omega_0 t) = \frac{\sin(2\pi f_0 t)}{2\pi f_0 t}$$

- за сигнал от типа бял шум [5]:

$$(5) \quad x(t) = WN(0, \sigma_X^2)$$

$$(6) \quad S_x(f) = \sigma_X^2, \quad \forall f$$

- за сигнал от типа розов шум [5]:

$$(7) \quad x(t) = PN(0, \sigma_X^2)$$

$$(8) \quad S_x(f) = \frac{1}{f} \sigma_X^2$$

Където:

t - текущо време, s;

t_i - продължителност на импулса, s;

T - период на сигнала, s;

ϕ_0 - начална фаза, rad;

f - текуща честота, Hz;

f_0 - честота на генериране, Hz;

f_1 - стартова честота, Hz;

f_2 - крайна честота, Hz;

σ_X^2 - дисперсия;

$S_x(f)$ - спектър.

Генерирането на сигналите се извършва чрез файл-функции (file-functions) в програмната среда на Matlab®. По този начин се постига голяма гъвкавост при използването. Лесно и бързо се задават и променят различните параметри на тестовия сигнал:

- честота на сигнала – f_0 , Hz;
- честота на дискретизация – F_s , Hz;
- продължителност на сигнала – T , s;
- брой повторения на пакета – r ;
- продължителност на пауза между пакетите – p , s;

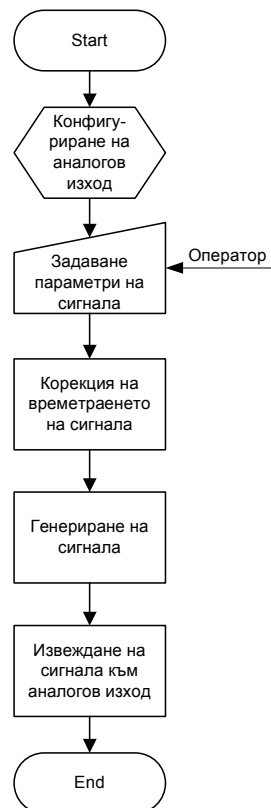
2. ПРОГРАМНО ОБЕЗПЕЧАВАНЕ

На фиг. 2 е представена блоковата схема на общия алгоритъм на файл-функциите.

Всяка от файл-функциите започва с конфигуриране на аналогов изход:

```
% Preparation of the analog output
AnalogOutput = analogoutput('winsound');
addchannel(AnalogOutput, 1);
set(AnalogOutput, 'StandartSampleRates', 'off')
AnalogOutput.SampleRate = Fs;
AnalogOutput.RepeatOutput = r-1;
```

С помощта на дадените редове се задава изходното устройство (в случая звуковата карта – 'winsound'), по който канал (ляв и/или десен) да се излъчи сигнала, честотата на дискретизация и броя на повторение на пакета. По подразбиране, Matlab ограничава софтуерно честотата на дискретизация до 44100 Hz. Това ограничение се премахва след като се сваля забраняващият флаг с команда – 'off'.



Фиг. 2. Блокова схема на общия алгоритъм на постановката

Следващият етап се състои в подготовка на времеви вектор и генериране на пауза между пакетите.

```
% Preparation of the time vector
k = round(endtime*f0); t = (0:1/Fs:k/f0)';
% Generation of the pause
n = zeros(p*Fs, 1);
```

Генерира се съответния тестови сигнал.

- синусоидален сигнал;

```
% Generation of sine wave signal
y = sin(2*pi*f0*t);
```

- правоъгълен сигнал;

```
% Generation of square wave signal
y = square(2*pi*f0*t, d*100);
```

- chirp-сигнал;

```
% Generation of chirp signal
y = chirp(t, f1, endtime, f2, 'linear', -90);
```

- sinc-сигнал;

```
% Generation of sinc signal
y = sinc(2*f0*t);
```

- бял шум;

```
% Generation of white noise
y = randn(N-2,1);
```

- розов шум;

```
% Generation of pink noise
y = randn(M,1);
NUP = M/2+1;
Y = fft(y);
Y = Y(1:NUP, 1);
m = 1:NUP;
m = sqrt(m);
Y = Y(1:NUP)./m';
Y(NUP+1:M) = real(Y(M/2:-1:2)) - 1i*imag(Y(M/2:-1:2));
y = ifft(Y);
y = real(y(1:M));
y = y./max(abs(y));
y = [0; y; 0];
```

Извършва се обединяване на генерирания сигнал и зададената пауза.

```
% Signal + pause
y = [y,n];
```

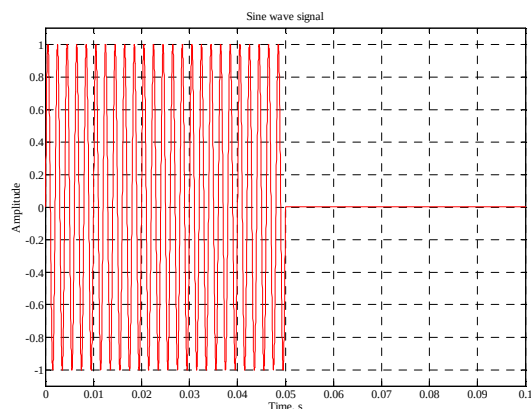
Последният етап позволява да се стартира сигнала от аналоговия изход или изходи.

```
% Start the analog output
putdata(AnalogOutput, y);
start(AnalogOutput);
```

За да се начертае формата на сигнала е необходимо задаване на времеви вектор, който включва както сигнала, така и паузата.

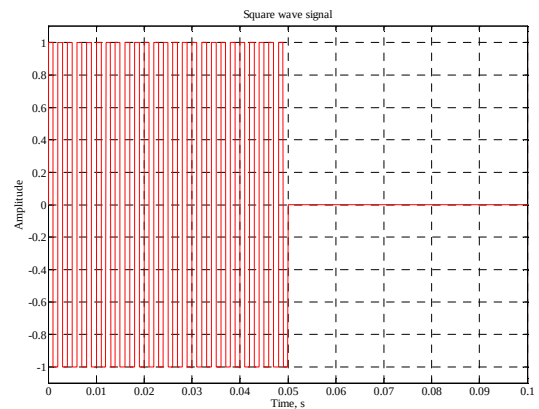
```
% Preparation of the new time vector
t = (0:1/Fs:(k/f0+p))';
```

На фиг. 3 ÷ фиг. 8 са дадени времедиаграми на генерираните сигнали, които показват възможностите на предложените продукти.

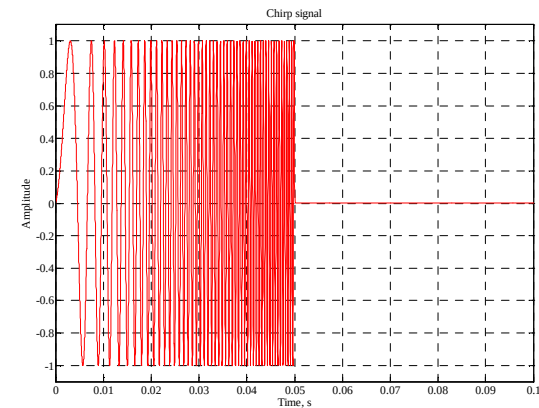


Фиг. 3. Генериран синусоиден сигнал

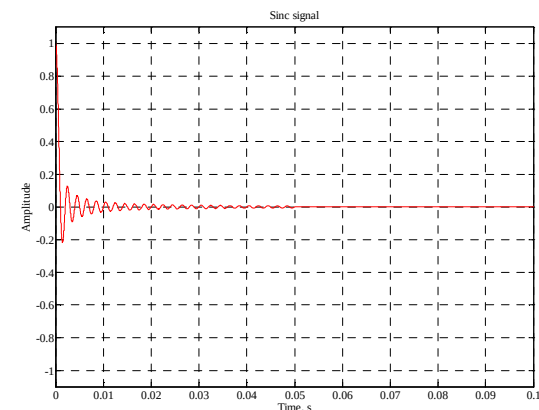
Задължително трябва да се обърне внимание, че програмните продукти са предназначени за работа само на 32-bit версии на Matlab®, т.е. поддържащи Legacy Interface.



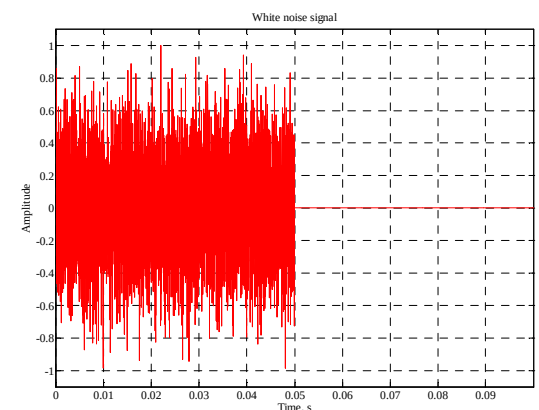
Фиг. 4. Генериран правоъгълен сигнал



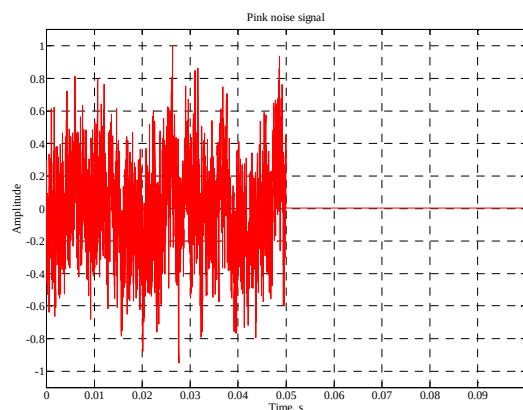
Фиг. 5. Генериран сигнал с линейна честотна модулация



Фиг. 6. Генериран сигнал от вида $\text{sinc}(x)$



Фиг. 7. Генериран сигнал от вида бял шум



Фиг. 8. Генериран сигнал от вида розов шум

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разгледан е проблемът за генериране на аудио измервателни сигнали в средата на Matlab®. Генерираните сигнали се подават на аналоговият изход на звуковата карта (моно). С минимална доработка на предложените кодове, може да се:

- генерират други видове сигнали;
- подават различни сигнали на левия и десния канал на звуковата карта.

Реализацията на програмното обезпечаване под формата на файл-функции дава изключително голяма гъвкавост на приложението и позволява подготвените функции да бъдат вграждани в други такива, или в по-сложни програмни продукти.

Унифицирането на командите и операторите реализиращи управлението на хардуера, дава възможност с минимална промяна в програмния ред “обръщач” се към него, да бъдат реализирани същите операции на съвършено друга DAQ-платформа (напр. на фирмите National Instruments [6], Agilent [7] и др.).

Настоящата работа може да има приложение във всички сфери на изследователската и инженерна работа, където е необходимо да се генерират измервателни и/или тестови сигнали [8, 9], за снемане параметри на активни или пасивни дву- и четири- полюсници, в архитектурната акустика, в аудио- и хидро- локацията, сеизмологията, океанологията и др.

Предвижда се продължаване на работата, като се използват пълните възможности на Matlab® и Data Acquisition Toolbox, позволяващи управлението на множество аналогови и цифрови входове и изходи.

Способността да се управляват входовете и изходите на хардуерното DAQ-устройство (напр. NI USB-6211 [10]), при това независимо, синфазно и синхронно във времето разкриват на практика неограничени възможности за тестване, измерване и изследване на какви да е системи [11]. Конкретно приложение ще се търси в областта на измерванията в аудиотехниката и акустичните измервания.

Разработените авторски скриптове са достъпни на адрес:

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/43802-generation-of-audio-test-signals-with-matlab-implementation>.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Signal Processing Toolbox User's Guide.pdf*. The MathWorks Inc, 1999;
- [2] *Data Acquisition Toolbox User's Guide.pdf*. The MathWorks Inc, 2005;
- [3] А. Опенхайм, А. Уилски, Я. Йънг. *Сигнали и системи*. София, „Техника“, 2002;
- [4] М. Mandal, А. Asif. *Continuous and Discrete Time Signals and Systems*. Cambridge, Cambridge University Press, 2007;
- [5] D. Manolakis, V. Ingle. *Applied Digital Signal Processing*. Cambridge, Cambridge University Press, 2011;
- [6] National Instruments DAQ – <http://www.ni.com/data-acquisition/>
- [7] Agilent Technologies DAQ – <http://www.home.agilent.com/en/pc-1000000676%3Aeapsg%3Aapgr/data-acquisition-daq?&cc=BG&lc=eng>
- [8] И. Илиев, Ек. Сираков, Хр. Живомиров. *Изследване на акустичната близка зона на кръгъл излъчвател. Международна научна конференция UNITECH'2013 – Габрово, 22 Ноември - 23 Ноември 2013, Габрово*.
- [9] Ек. Сираков. *Електроакустика, Варна, Технически университет – Варна, 2009*.
- [10] DAQ sistem NI USB-6211 – <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/203224>
- [11] Р. Василев. *Електрически измервания. Варна, Технически университет – Варна, 2009*.

МЕТОД ЗА ОТКРИВАНЕ НА ЛОКАЛНА КОРОЗИЯ В СТОМАНЕНИ ТРЪБИ С ДИАМЕТЪР ДО 40 ММ ПОСРЕДСТВОМ НОРМАЛНИ УЛТРАЗВУКОВИ ВЪЛНИ

GUIDED WAVES DETECTION OF LOCAL CORROSION IN SMALL DIAMETER STEEL PIPES

гл. ас. д-р инж. К. Стайков¹, гл. ас. д-р инж. Д. Ганчев²

Технически университет – София, България; ¹ e-mail: staikov@tu-sofia.bg, ² e-mail: ganchevdamyan@gmail.com

Abstract: The paper discusses novel method for non-destructive testing of small diameter pipes and rods using guided waves. Axisymmetric guided wave mode $L(0,2)$ is selected because of its special abilities in specific frequency region. Experiments are conducted to establish inspection parameters, testing range and sensitivity of the method. Further increasing of sensitivity is achieved using wavelet denoising approach. Conclusions and recommendations are made in order to improve practical application of the method.

Key words: guided waves, local corrosion, pitting corrosion, long range, wavelet denoising

1. Увод

През последните години възможностите на нормалните вълни за откриване и оценка на местна корозия в стоманени изделия с постоянно напречно сечение са известни и широко дискутирани [1]. Основният недостатък се явява високата себестойност на оборудването, което се дължи най-вече на физичните трудности и ограничения за възбуждане и самостоятелна мода в едно направление. Задачата при контрол на тръби се комплицира допълнително, поради няколкократно по-високият брой моди в сравнение с пластини [2]. В стоманени тръби и пръти с относително малки диаметри, при наличие на достъп до едната от челните повърхнини на изделието, проблемът се опростява значително. Чрез използване на конвенционално оборудване и нормален контактен нискочестотен пиезо-електричен преобразувател, позициониран на едната челна повърхнина тръбата биха могли да се възбудят надлъжни моди на нормалните вълни в изделието. При внимателен избор на параметри на генериращия сигнал (честота, брой периоди и прозоречна функция), методиката позволява в рамките на няколко секунди да се изпита целия обем на изделието. В настоящата статия са изследвани възможностите на методиката за откриване и оценка на местна (локална) корозия, като най-често срещан дефект, но метода е приложим и за откриване други несъвършенства.

Според направлението на доминираща компонента на преместване на частиците, модите на нормалните вълни в тръби и пръти биват три типа: Надлъжни, усукващи и огъващи (флексурални). Приложение в практиката намират надлъжните моди и фундаменталната усукваща мода (т. нар. аксиално-симетричните моди) [2]. Тези моди имат еднакво диаметрално разпределение на компонентите на преместванията. Трудностите при контрола на тръби и пръти при контрола с нормални вълни са свързани основно с изолирането на огъващите моди, които са производни на аксиално-симетричните моди. Например много често

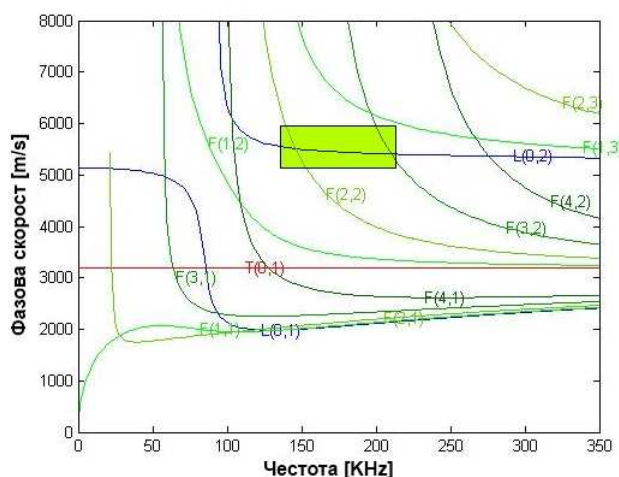
заедно с мода $L(0,2)$ се възбужда и мода $F(1,3)$, поради подобните им физични характеристики. Мода $F(1,3)$ има същото преместване по дебелина на стената на тръбата като $L(0,2)$, но има един цикъл на вариация на амплитудата около диаметъра. Огъващите моди са източник на фантомни еха и шум в А-изображенията. Вследствие на това се понижава чувствителността на метода и се затруднява интерпретацията на резултатите от контрола. Чрез предложената схема на пролъчване, трептенията се възбуждат в изделието аксиално-симетрично, в следствие на което възбуждането на флексурални моди се ограничава.

2. Предпоставки за избор на мода и работен честотен диапазон

Най голям потенциал за контрол с избраната схема на пролъчване има мода $L(0,2)$, в областта отбелязана на фиг.1, тъй като:

- Притежава ниска дисперсия в широк честотен диапазон. По този начин широчината на сигналите се променя незначително, което влияе положително върху разрешаващата способност и съотношението сигнал-шум, което от своя страна повишава обхвата и чувствителността към отражатели;
- Има еднакви стойности на надлъжната компонента на преместванията по диаметър и по дебелина на стената на тръбата в целия диапазон, което води до еднаква чувствителност към повърхностни или вътрешни несъвършенствата, независимо от тяхното диаметрално разположение в тръбата
- Има висока групова скорост, поради което индикациите, породени от възбуждане на други моди или от трансформация на основната мода се приемат по-късно от апаратурата.

- Има доминираща надлъжна компонента на преместванията, което понижава изтичането на акустична енергия в заобикалящата среда [3].

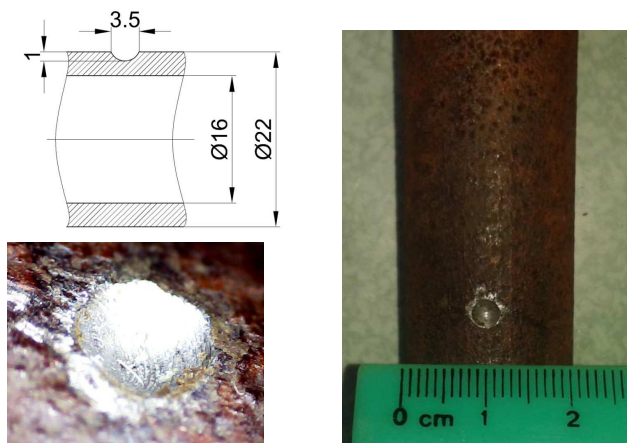


Фиг.1 Дисперсионни криви на фазовата скорост за стоманена тръба с диаметър 22 mm и дебелина на стената 3 mm

Като изключим усукващите моди, които не могат да се генерират чрез тази схема на пролъчване, от аксиално-симетричните моди освен мода $L(0,2)$ в нискочестотния диапазон съществува само мода $L(0,1)$. Тъй като амплитудата на надлъжната компонента на преместванията на мода $L(0,2)$ многократно надвишава тази на мода $L(0,1)$, използването на тази методика в този честотен диапазон би довело до възбуждане основно на мода $L(0,2)$. Освен това, аксиално-симетричното възбуждане на вълните гарантира ограничаване на флексуралните моди. Тази хипотеза бе оправна точка преди експерименталното потвърждаване на надеждността на методиката.

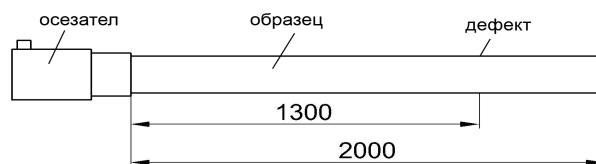
3. Методика, използвана апаратура и експериментални образци

За експериментални образци са използвани стоманени тръби с диаметър 22 mm и дебелина на стената 3 mm. Всички образци са с дължина 2000 mm. Дисперсионните криви са изчислени посредством уравненията на Pochhammer-Chree в Matlab среда и са представени на фиг.1 [4].



Фиг. 2 Геометрични параметри на изкуственото несъвършенство

В един от образците, посредством свредло с цилиндричен връх е изработен изкуствена точкова (питинг) корозия в тръбата. Отражателя представлява сферична шапка с диаметър 3.5 mm и дълбочина 1 mm (фиг.2). Той е позициониран на разстояние 1300 mm от единия край на образца (фиг.3).

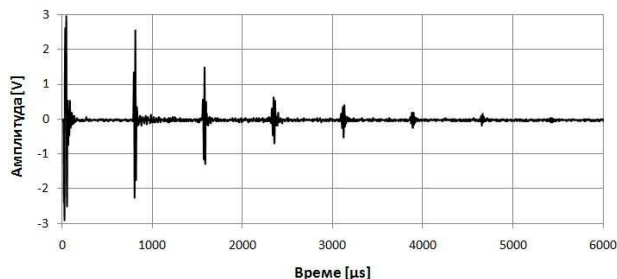


Фиг.3 Схема на пролъчване

За възбуждане и приемане на вълните е използван нормален контактен пиезо-електричен преобразувател (Unipan, Полша) с резонансна честота 500 KHz. Използваната апаратура се състои от функционален генератор, високо-мощен нискочестотен краен усилвател и осцилоскоп модел M520 на фирма ETC и персонален компютър [5]. За генериращ сигнал е използван синусоидален сигнал от пет периода, модифициран с прозрачна функция на фон Хан. Пролъчването се осъществява съгласно схемата, представена на фиг. 3. За акустичен контакт се използва машинна грес.

4. Резултати и дискусия

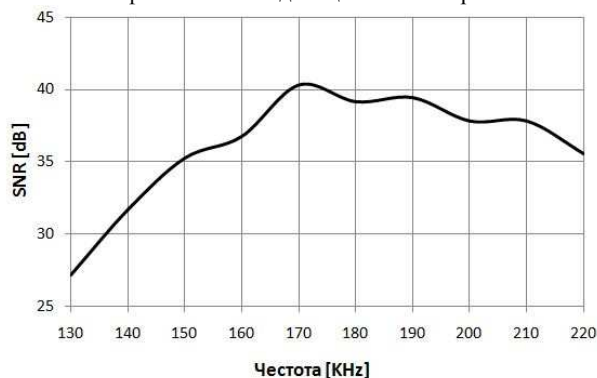
Първоначално бяха проведени изследвания, за установяване на ефективността на възбуждане на мода $L(0,2)$ с предложената методика. На фиг.4 е представено А-изображение получено при пролъчване на бездефектен образец при честота на генерацията сигнал 170 KHz. На А-изображението са видими многократни отражения от срещуположният ръб на тръбата. От дисперсионните криви на груповата скорост бе отчетено, че получените сигнали отговарят по групова скорост на мода $L(0,2)$. Не се наблюдават наличие на сигнали от други моди в А-изображението.



фиг.4 А-изображение, получено при възбуждане на мода $L(0,2)$ в бездефектен образец

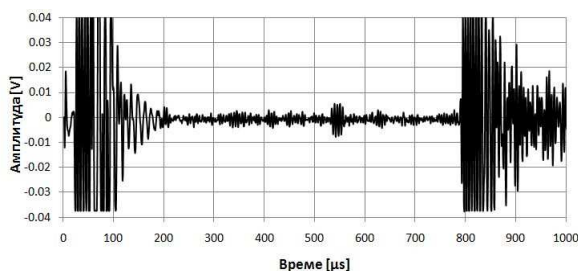
От това може да се заключи, че посредством предложената схема на прозвучаване, мода $L(0,2)$ се възбужда самостоятелно с висока ефективност. Освен това, резултатите показват, че вълните се разпространяват на

голямо разстояние с минимално затихване (около 2dB/m). От броя на многократните отражения е видимо, че срещуположен ръб на образца може да регистрира надеждно на разстояние от преобразувателя над 15m. Бяха проведени изследвания за определяне на оптимална работна точка за контрол на тръби с диаметър 22 mm и дебелина 3 mm чрез намиране на максималното съотношение сигнал-шум (SNR) в диапазона 130KHz – 220 KHz. SNR е пресметнато като отношението на амплитудата на първото отражение на мода $L(0,2)$ от срещуположния край на бездефектен образец към средноаритметичната стойност на шумовете в А-изображението. Резултатите са представени на фиг.4. На графиката се вижда, че най-високо SNR се наблюдава при честота 170 KHz, при която то надвишава 40 dB. При издेलия с друга геометрия на напречното сечение оптималната работна точка ще бъде при друга честота на възбуждане, но експериментите показват, че тя се намира в нискочестотния част на зоната с ниска дисперсия на мода $L(0,2)$. За по-голяма достоверност на резултатите е възможно контрола да бъде извършен при няколко честоти, но е препоръчително да се използва честота под критичната честота на мода $L(0,3)$, с цел избягване на фантомните индикации в А-изображенията.



Фиг.5 Влияние на честотата върху съотношението сигнал-шум

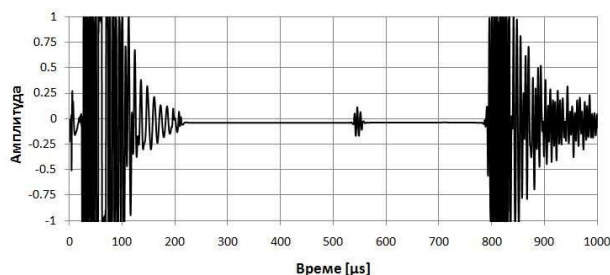
На фиг.6 е представено А-изображение получено при възбуждане на мода $L(0,2)$ в образца с изкуствена локална корозия. Генериращият сигнал е с честотата 170 KHz. При 800 μ s се наблюдава отражението на мода $L(0,2)$ от срещуположния край на тръбата. Освен него, на А-изображението се наблюдава и сигнал при 550 μ s, който според дисперсионната крива на груповата скорост отговаря на отражение от изкуствения отражател. Амплитудата на отражението от дефекта надвишава със над 6 dB амплитудата на шумовете, което гарантира надеждно откриване на такъв отражател на разстояние 1.3 метра от преобразувателя. Използването на по-мощен усилвател би повишило обхвата и чувствителността.



Фиг. 6 А-изображение, получено при възбуждане на мода $L(0,2)$ в образец с изкуствена корозия

Експерименти върху образци с по-дълбоки несъвършенства, имащи същата геометрия, също доказват високата чувствителност и ефективност на метода. При тях, в А-изображенията се наблюдава и трансформация на основната мода $L(0,2)$ в мода $F(1,3)$, като амплитудата на тази трансформация може да бъде критерий за квалификация и оценка на несъвършенството.

Допълнително повишаване на чувствителността може да се постигне чрез прилагане на цифрова обработка на получените от контрола А-изображения. Напоследък се наблюдава значителен интерес в използването на Уейвлет трансформациите за обработка на сигнали и по-специално за потискане на шума. Уейвлет трансформацията представя сигнала като редица коефициенти, представляващи приближения на фиксирана изграждаща функция с различни мащаби и позиции спрямо базовата Уейвлет функция. За прилагане на Уейвлет трансформациите за отстраняване и намаляване на шумовете в сигнала, получените след изчисляване на дискретната Уейвлет трансформация на сигнала коефициенти се обработват с прагова функция. Коефициентите чиято стойност е по-малка от дадена прагова стойност се отстраняват. Останалите коефициенти след това се използват за да се реконструира изходния сигнал. По този начин може да се отстранят шумовете с минимална загуба на детайли от полезния сигнал. В ТУ-София е разработен софтуер за подобряване на отношението сигнал-шум при ултразвуков контрол, базиран на този алгоритъм [6,7].



Фиг. 7 А-изображение, получено при пролъчване на образец с изкуствена корозия и последваща обработка с Уейвлет функция на Coiflet от 30-ти ред

От проведените серия експерименти се установи, че най-високи стойности на съотношението сигнал-шум се получават при Coiflet функцията. На фиг.7 е представено А-изображението от фиг.6 след обработка с Уейвлет функция на Coiflet от 30-ти ред. Наблюдава се значително повишение на съотношението сигнал-шум. За обработката на изходното А-изображение е използвана прагова функция с „мек“ праг, тъй като при нея се осигурява непрекъснатост на изходния сигнал, за разлика от тези с „твърд“ праг. Този подход повишава надеждността на методиката, като допълнително намалява влиянието на човешкия фактор при оценка на индикациите.

При практическо прилагане на методиката трябва да се вземе под внимание относително голямата зона на влияние на генериращия сигнал, получена вследствие използването на широки генериращи сигнали с ниска честота. В конкретния случай тази зона обхваща около 400 mm от изделието, като в този участък не могат надеждно да се откриват несъвършенства. При необходимост, тя може да бъде понижена като се намалят броя периоди на генериращия сигнал, което пък от своя страна ще доведе до понижаване на чувствителността.

5. Изводи

От направените изследвания може да се заключи, че с използваната методика могат да се изпитват бързо, ефективно тръби със сравнително малки диаметри, към които достъпът е ограничен. Тя би могла да се приложи също и за контрол на пръти с плътно сечение. Поради простотата на метода, прилагането му не изисква специална квалификация на персонала. В тези случаи обаче е необходимо контрола да се извършва съгласно процедура, изготвена от опитен специалист по ултразвуков контрол. Възможно е дори А-изображенията да се записват от необучени оператори, а обработката на резултатите от контрола и оценката да се извършва в следствие в лабораторни условия. Методиката е приложима за отговорни изделия като тръби за топлообменници, шпилки, укрепващи анкери за минната промишленост и пътното строителство, стоманени кабели, двигателни винтове, валове и др. Освен за местна корозия, методът може да се използва за откриване и оценка на други дефекти, като пукнатини, пластични деформации и др.

6. Литература

- [1] Rose, J. L., A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 124, 273-282, AUGUST 2002
- [2] 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
- [3] Lowe, M., Alleyne, D., Cawley, P., Defect detection in pipes using guided waves, Ultrasonics 36, p 147-154, 1998
- [4] Seco, F., Jiménez, A.R., "Modelling the generation and propagation of ultrasonic signals in cylindrical waveguides", in Ultrasonic waves, chapter 1, pp. 1-28, Intech Open Access Publisher, 2012
- [5] Стайков К., Неразрушаващ контрол на стоманени листове с вълни на Ламб, Дисертация, Технически университет - София, София, 2012
- [6] Стайков К., Ганчев Д., Повишаване на съотношението сигнал-шум с помощта на уейвлет трансформации при контрол с вълни на Ламб, сп. Акустика бр.7, 2005
- [7] Ганчев Д., Разработване на софтуер за подобряване на отношението сигнал шум при ултразвуков контрол, Научни известия на Научно-техническия съюз по машиностроене, Година XIII, Брой 3, стр. 443-447, Юни 2006

УЛТРАЗВУКОВА ДЕБЕЛОМЕТРИЯ НА ПЕТРОЛНИ РЕЗЕРВОАРИ

Доц. д-р **Александър Попов**

Институт по механика - БАН – София, България
 Направление “Механика на деформируемост твърдо тяло”

Резюме: Ултразвуковата дебелометрия на вертикални цилиндрични резервоари (ВЦР) в петролната индустрия е често срещана при ултразвуковото изпитване. Показана е необходимостта от калибровка на дебеломера по известна скорост на разпространение на надлъжните ултразвукови вълни. Разглежда се на въпроса за измерване, при едностранен достъп, на тази скорост, съгласно ASTM 494:2010. Представен е метод за статистически анализ на резултата от измерванията. Даден е пример за ВЦР с обем 5000 m³.

КЛЮЧОВИ ДУМИ: УЛТРАЗВУКОВА ДЕБЕЛОМЕТРИЯ, ПЕТРОЛНИ РЕЗЕРВОАРИ

Въведение

Ултразвуковата дебелометрия на вертикални цилиндрични резервоари (ВЦР) в петролната индустрия е често срещана при ултразвуковото изпитване. Корпусите на петролните ВЦР обикновено се изработват отделни мантили, като долните са от въглеродна стомана марка 10Г2САФ, с повишено съдържание на Mn и горните мантили от стомана марка ВСтЗсп [1]. За стомана марка 10Г2САФ скоростта на разпространение на надлъжните ултразвукови вълни - V_L е (5310 - 5650) m/s, а за стомана марка ВСтЗсп4 $V_L \sim$ (5820 - 5880) m/s [2]. Това налага измерване на скоростта V_L в материала от който е изработен корпуса на резервоара и последваща калибровка на дебеломера по известна скорост. Неотчитането на горните факти т.е. калибриране на ултразвуковия дебеломер по еталон от стомана марка 20 ($V_L = 5920$ m/s) довежда до голяма разлика между измерени и действителни дебелини на корпуса на ВЦР.

Резултата от провеждане на ултразвуковата дебелометрия са случайни величини. Това налага използването на подходящ статистически анализ на данните.

В настоящата статия е дадено коректното решение на описаните по-горе проблеми.

1. Ултразвукова дебелометрия

Коректното провеждане за ултразвукова дебелометрия [3] обикновено се свързва с технико - технологична подготовка и измерване на скоростта V_L в първия мантил на ВЦР. Това се осъществява съгласно ASTM 494:2010 [4]. В точка X2.18.3.3. на този стандарт е описан метод за измерване на скоростта при едностранен достъп. След като е измерена скоростта V_L се провежда калибровка по известна скорост. При, така направената калибровка,

се провежда дебелометрията на корпуса на ВЦР - δ .
 Тя се определя от $\delta = V_L \cdot (t / 2)$.

2. Анализ на данни от ултразвуковата дебелометрия

Резултата от измерването на дебелината на първи мантил от ВЦР представлява извадката

$$(1) \{ \delta(k); k = 1, \dots, n \}.$$

В метрологията е прието за резултата от измерването да се определи неговата неопределеност [5]. От друга страна резултатите от измерването на дебелините представляват случайни величини. Това дава основание измерваните величини да се представят с, известния в математическата статистическата, толерантен интервал [6] т.е. вероятностен интервал в който попада цялата извадка (1). Този интервал е нещо различно от доверителния интервал, който е интервал на средната стойност. Тъй като извадките, в разглеждания случай, обикновено с малък обем и сравнително голямо разсейване, то подходящо е да се използват робастни оценки т.е. медианна оценка на измерените стойности за дебелините - $\{ \delta(k); k = 1, \dots, n \}$ на корпуса на ВЦР. Толерантният интервал е за тях е

$$(2) \delta_m \pm t\left(\frac{\alpha}{2}; n-1\right) S_m \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{1/2}$$

където

$$\delta_m = \begin{cases} x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} & n = 2k \\ \frac{1}{2} \left(x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right) & n = 2k + 1 \end{cases},$$

$$S_m \approx 1.48 \text{ med } | \delta(k) - \delta_m |; \forall k = 1, \dots, n,$$

$t\left(1 - \frac{\alpha}{2}; (n-1)\right)$ - разпределение на Стюдент.

3. Пример

Разгледан е ВЦР с обем 5000 m^3 , с височина на пълнене $H = 11.5 \text{ m}$, външен диаметър $D = 23 \text{ m}$ и дебелина на първи манел от корпуса $\delta_D \approx 9 \text{ mm}$. За първия мантел, който е от стомана марка 10Г2САФ, е направена калибровка по $V_L = 5310 \text{ m/s}$. За четвърти мантел, който е от стомана марка ВСтЗсп е направена калибровка по $V_L = 5820 \text{ m/s}$. Грешката от неправилна калибровка при измерването се определя от

$$(3) \Delta\delta = \Delta V_L \cdot \Delta t$$

където $\Delta\delta = \delta_D / \delta_H$; $\Delta V = V_D / V_H$;

$\Delta t = t_D / t_H$, δ , V , t са съответно дебелина, скорост, време, индексите D и H се отнасят съответно за действителни и измерени стойности.

За разглеждания случай резултатът от пресмятането за стомана марка 10Г2САФ е

$$\Delta V_L \approx 0.90; \Delta t < 1 (1\%), \delta_D < 0.89\delta_H, \text{ а за}$$

стомана марка ВСтЗсп е

$$\Delta V_L \approx 0.98; \Delta t < 1 (1\%), \delta_D < 0.97\delta_H.$$

За разглеждания ВЦР са измерени за делерини за стомана марка 10Г2САФ - $\delta_H \approx 10.1 \text{ mm}$ ($\delta_D \approx 9 \text{ mm}$) т.е. 11.1 % завишена дебелина и за стомана марка ВСтЗсп - $\delta_H \approx 3.8 \text{ mm}$ ($\delta_D \approx 4 \text{ mm}$) т.е. 5.0 % завишена дебелина.

Както е известно [1], за разглеждания случай, якостното условие е $\sigma_{ДОП} > p\left(\frac{D}{2\delta}\right)$;

където $\sigma_{ДОП}$ е допустимото механично напрежение в корпуса на ВЦР, хидростатично налягане $p = \gamma(H - x)$, γ - специфична плътност на петрола, H - височина на пълнене на ВЦР, x - текуща височина на пълнене на ВЦР.

Получените по-горе резултати за измерени дебелини показват, че при $\Delta V_L \approx 0.89$ се изпълнява условието $p_{РАБ} > p_{ДОП}$. Вижда се, че неправилното измерване на дебелината на първи мантел от корпуса на ВЦР може да доведе до поява на свръхналягане и авария. Това определя необходимостта от калибровка по известна скорост на ултразвуковия дебеломер.

4. Заключение

Ако при калибровка по еталон с $V_L = 5920 \text{ m/s}$ и се измерва дебелината на стена от стомана марка 10Г2САФ-12 то действителната дебелина - δ_D е около 11% по-малка от измерената стойност за

дебелинат - δ_H . Правилната калибровка на ултразвуковия дефектоскоп е по известна скорост. Използва се измерване на скоростта на разпространение на ултразвука при едностранен достъп (ASTM 494-2010, X2.18.3.3.).

Необходимо е обучение за измерване на V_L в материала в курсовете по UT 2 ниво.

5. Литература

1. Венков Л., Ръководство за курсово проектиране по специални стоманени конструкции, Свitez 1, ВЦР.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий, Машиностроение, Москва, 1986.
3. БДС EN 14127:2011, Изпитване (контрол) без разрушаване. Измерване на дебелина с ултразвук
4. ASTM E 494:2010, Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials.
5. Радев Хр., Неопределеност на резултата от измерването, Софттрейд, 2001
6. Закс Ш., Теория статистических выводов, МИР, 1975.

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ИЗПОЛЗВАНЕ НА АКУСТИЧНИ МЕТОДИ ЗА КОНТРОЛ БЕЗ РАЗРУШАВАНЕ НА ЕЛЕМЕНТИ ОТ БОЕПРИПАСИ

POTENTIAL OF ACOUSTIC NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR CONTROL OF AMMUNITION ELEMENTS

Доц. д-р Грозев В.¹ Проф. д-н Миховски М.² Доц. д-р Генов Б.³ Проф. д-р Генов Г.¹

¹Шуменски университет „Епископ Константин Преславски“, Шумен, България, valgroz@abv.bg

²Българска академия на науките, Институт по механика, София, България, nntdd@imbm.bas.bg

³Институт по отбрана, София, България, genov@abv.bg

Abstract. In essence, procuring ammunition is similar to subscribing to a insurance policy: a large part of what is procured will never be used before its shelf life expires. Considering that the ammunition has high-value goods, and generate costs over their entire life cycle, it is necessary to look for ways to avoid the cost of demilitarization and to delay it in time. Modernization and extending the shelf life are ones of the answers. Inherent requirement in all cases the ammunition to be fit and safe for service. Non-destructive methods, particularly acoustic non-destructive methods, offer a range of solutions to ensure the safety and readiness to use of ammunition. In this article we investigate two applications of ultrasonic non-destructive methods (as a part of acoustic methods) for one very important element – artillery cartridge.

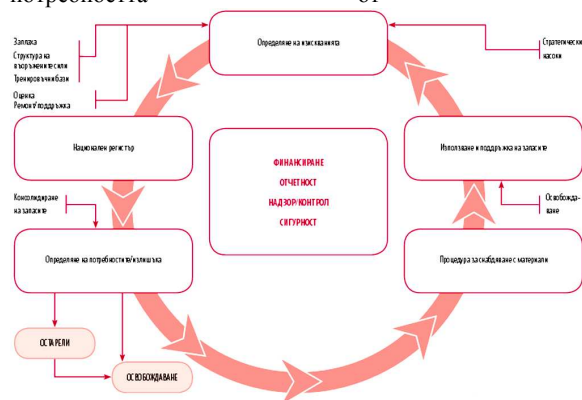
Keywords: ammunition life cycle, ultrasonic wave, artificial flaw, artillery cartridge.

1. УВОД

По своята същност снабдяването с боеприпаси прилича на сключването на един вид застраховка за националната отбрана: голяма част от закупеното не се използва преди изтичането на срока му на годност [4].

Този факт поражда две характерни особености: боеприпасите следва да могат продължително да се съхраняват и да има технологична възможност за тяхната демилитаризация¹.

Боеприпасите са стока със висока стойност, чието производство отнема дълго време и затова често се закупуват в големи количества, за да се изпревари потребността от тях.



Фиг. 1. Управление на жизнения цикъл на боеприпасите (вариант) [5]

Специфично за боеприпасите е, че те генерират разходи във всички етапи на жизнения си цикъл – от разработването до освобождаването от тях. Това означава, че трябва да се възприеме подход за „цялостно управление на жизнения цикъл“ на боеприпасите [5].

Независимо от факта, че напоследък в нашата страна се обръща предимно внимание на демилитаризацията на боеприпасите са стока със висока стойност, са налице тотално грешни подходи към нея.

Липсата на прилагане на добри практики при определяне на излишъците, търговете и технологиите за демилитаризация прави цялостния процес неефективен.

Независимо от широко разпространената теза за интегриране на изискванията за демилитаризация в ранните фази на жизнения цикъл², съществуват и по-удачни подходи като например поддръжка и модернизация на боеприпасите, което позволява да се отложи момента на демилитаризация във времето.

За да бъде оправдан този подход, е необходимо да се използват методи за контрол на техническото състояние на боеприпаса като цяло и на неговите елементи – гилза, метателен заряд, снаряд и др.

В настоящата разработка ще се изследва възможността за прилагане на ултразвукови методи, като част от акустичните методи, за контрол на техническото състояние на артилерийски гилзи.

¹ комплекс от дейности по премахването или неутрализирането на военния потенциал на боеприпаса [3], [8]

² Представлява следствие от възприетата теза, че логистичните разходи в жизнения цикъл трябва да се имат предвид още в ранните фази [5]

2. ПРЕДПОСТАВКИ И НАЧИНИ ЗА РЕШЕНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Артилерийските гилзи се произвеждат от високоякостна стомана или месинг с добавка на силиций като заготовката се подлага на неколккратно дълбоко изтегляне. Стреляните гилзи остават за скрап или подлежат на възстановяване.

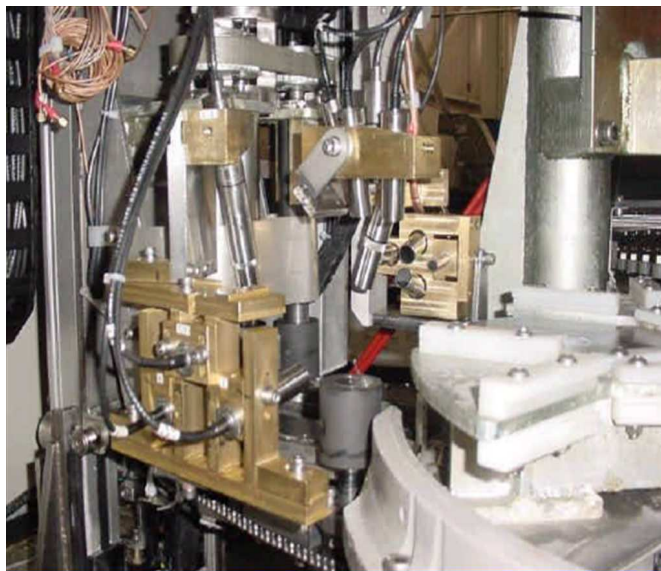
Решението дали стреляна гилза да бъде използвана повторно

Опасните сечения са в дънната и преходната част на гилзата. Затова регламентиращите документи не допускат вътрешни и външни дефекти до 50 mm от венета. В тънкостенната част на гилзите се допускат дефекти с дълбочина до една трета от дебелината на стената.

Ултразвукови технологии намират все по-широко приложение за дефектоскопия на различни елементи на артилерийските гилзи. В [7] се предлага ултразвукова система за контрол на дънната част на стоманена 120 mm артилерийска гилза M831A1 (фиг. 2). При процеса на контрол се сканират дъното и страничните стени с общо девет осезателя (фиг. 3).

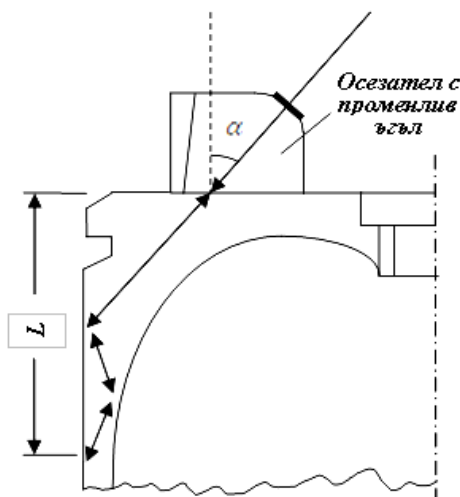


Фиг.2. 120 mm артилерийска гилза M831A1 [7]



Фиг.3. Автоматизирана ултразвукова система за контрол на 120 mm артилерийска гилза M831A1 [7]

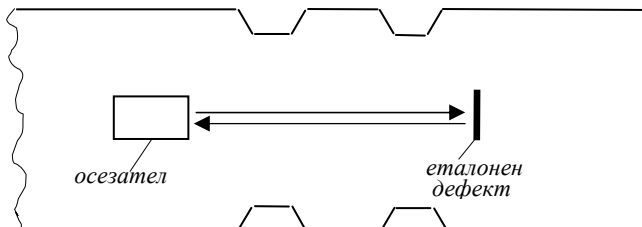
Оригинален метод за ултразвуков контрол с напречна вълна е предложен от J. Knichala и др. [6] (фиг.4).



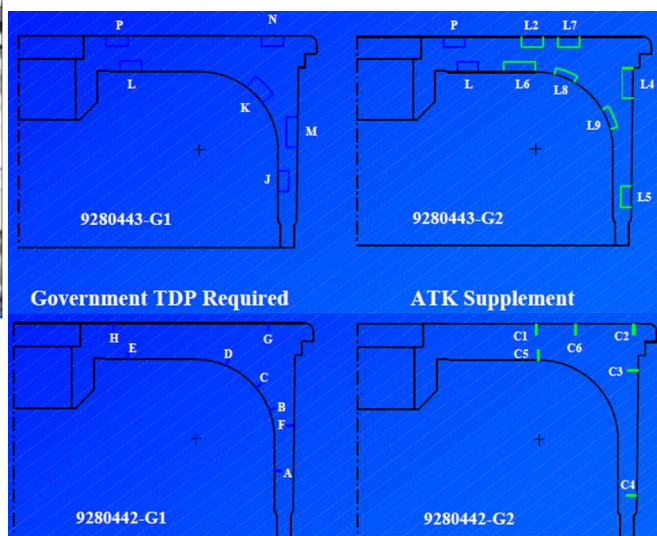
Фиг.4. Ултразвуков контрол на преходната част на артилерийски гилзи [6]

За създаване на методики за дефектоскопия за всеки типоразмер гилзи е необходимо да се изследва разпространението на ултразвукови вълни в тях. Разпространението на ултразвуковите вълни в тънкостенната част на артилерийски гилзите е представено на фиг.5.

За еталониране на чувствителността при дефектоскопия на тънкостенни тръби се препоръчват резки и канали. Затова се използват резки с ъгъл при върха 45° с дължина по - голяма от ширината на осезателя и дълбоки 0,2 до 1 mm. За имитация на побитости и корозионни язви се използват непроходни отворстия с дълбочина до 1/3 от дебелината на стената.



Фиг.5. Разпространение на ултразвуковите вълни в тънкостенната част на гилзите при еталонен дефект резка, разположена перпендикулярно на оста на гилзата



Фиг.6. Разположение на еталонните дефекти за 120 mm артилерийска гилза M831A1 [7]

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

Целта на настоящето изследване е да се определи зоната на контрол L (фиг.4) и оптималните ъгли на падане на ултразвуковите вълни, при които се получава максимално отражение от еталонни дефекти в преходната и тънкостенна части на артилерийски гилзи.

Поради особеностите в конструкцията и материала като обект на изследване избираме 57 mm месингова гилза (наличие на канавка в дънната част) и 122 mm стоманена гилза.

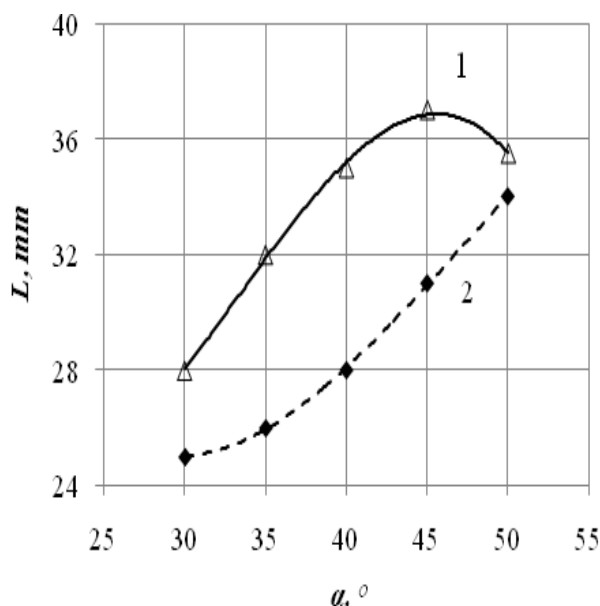
В преходната част се създават еталонни дефекти във вид на проходни и непроходни отвори с диаметър 1,5 mm. Ултразвукови вълни се възбуждат с осезатели с променлив ъгъл при 2 и 4 MHz. Зоната на контрол L при различни ъгли на осезателя α (фиг.4) се определя чрез съвпадане на ехото от страничната стена и сигнала от изкуствен дефект тип отворие.

За определяне на оптималните ъгли на наклонените осезатели се измерва амплитудата на сигнала от контролен отражател при различни ъгли за въвеждане на ултразвуковите вълни в материала на гилзите.

3.1. Разпространение на ултразвукови вълни в преходната част на гилзите

Зависимостта на зоната на контрол L от ъгъла на осезателя е представена на фиг.7.

Максималната зона на контрол при 57 mm месингови гилзи е 36 mm при ъгъл на падане на ултразвуковите вълни 45° , а при 122 mm стоманени гилзи същите характеристики са съответно 34 mm и 50° . Тези разстояния от дънния срез на гилзите удовлетворяват изискванията, тъй като цялата преходна част на двата вида изследваните гилзи попада в зоната на контрол.



Фиг.7. Зависимост на зоната на контрол в преходната част от ъгъла на осезателя за 57 mm месингови (1) и 122 mm стоманени (2) гилзи

На фиг.7. са нанесени данните за амплитудата на отразения от контролен отражател сигнал при различни

ъгли на осезателя. На ординатната ос е разликата между амплитудите $|A - A_c|$, където:

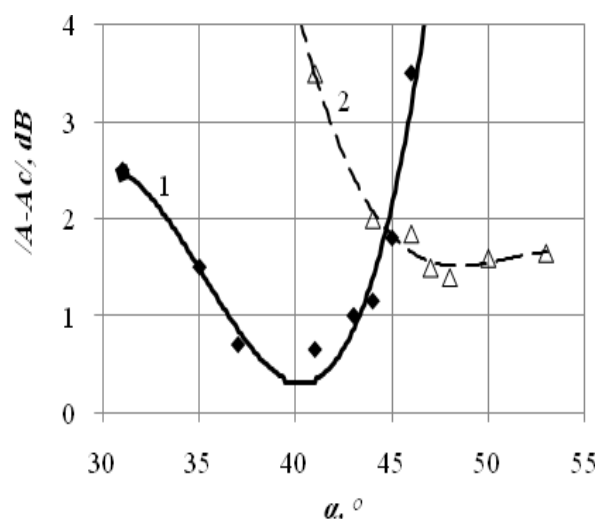
A – амплитуда на отразения от еталонен дефект сигнал, [dB];

A_c – амплитуда на отразения от стената на гилзата ултразвуков импулс, [dB] (ехо от стената).

Графиките показват, че за 57 mm гилза оптималният ъгъл за получаване на максимален сигнал от еталонния дефект е $39^\circ - 41^\circ$, а за 122 гилза $48^\circ - 49^\circ$. Сравнението между данните на фигури 3 и 4 показва, че при оптималните ъгли се достигат максималните зони на контрол на преходната част. Канавката върху дънната част на 57 mm гилзи не води до паразитни сигнали върху екрана на дефектоскопа при контактен способ за въвеждане на ултразвуковите вълни.

3.2. Разпространение на ултразвукови вълни в тънкостенната част на гилзите

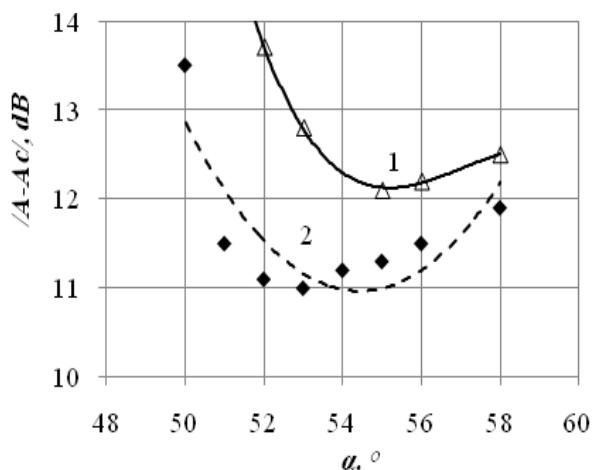
Влиянието на ъгъла на падане на ултразвуковата вълна върху степента на отражение от непроходни отвори е представено на фиг.8. Експерименталните данни, направени по схемата на фиг.5 показват, че при двата вида гилзи отразеният сигнал има максимална стойност при ъгъл на осезателя около 55° .



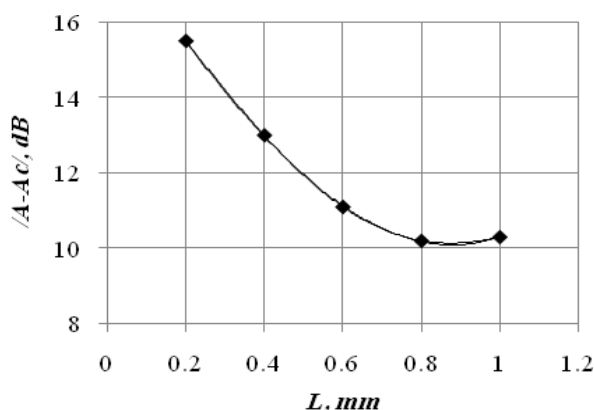
Фиг.8. Зависимост на амплитудата на отразения сигнал от ъгъла на падане на ултразвуковата вълна в преходната част на 57 mm месингови (1) и 122 mm стоманени (2) гилзи

Резултатите за 122 mm стоманени гилзи показаха, че сигналите с дълбочина 0,2 mm трудно се различават на фона на шумовете. Като се има предвид изискването за дълбочина на дефектите 1/3 от дебелината на стената на гилзите може да се приеме като еталонен дефект резка с дълбочина 0,8 mm.

Откриването на пукнатини, разположени успоредно на оста на гилзата, извършваме чрез осезател с фигурна повърхност. Резултатите показаха, че оптималните ъгли за дефектоскопия в областта на канавките за 122 mm стоманени артилерийски гилзи е $45^\circ - 46^\circ$, а в ската на 57 mm гилзи – около 45° .



Фиг.9. Зависимост на амплитудата на сигнала от ъгъла на падане на ултразвуковата вълна при еталонни дефекти непроходно отверстие при стоманени (1) и месингови гилзи (2) при 2 MHz



Фиг.10. Зависимост на амплитудата на отразения сигнал от дълбочината на еталонен дефект тип резка за 122 mm стоманена гилза

За определяне на чувствителността към дефекти тип пукнатини беше изследвано отражението от резки с различна дълбочина при оптимален ъгъл на осезателя (фиг.10) съгласно схемата на фиг.4.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Експерименталните изследвания показват, че чрез ултразвукова дефектоскопия в областта на преходната и тънкостенна част могат да се откриват неизправности, което позволява определяне на качествено състояние на контролираните образци. Зоните на контрол и оптималните ъгли на осезателите зависят от материала и конструкцията на артилерийските гилзи.

Получените резултати позволяват използваните методи да се автоматизират, а от друга позволяват да се разшири приложението им и за други елементи от боеприпасите – основно корпуси на снаряди.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генев Б., Логистични аспекти на системата за придобиване на отбранителни продукти, 2009.
2. Грозев В. Дисертация, 1983.
3. AOP-38, ed. 5, Specialist glossary of terms and definitions on ammunition safety, NSA, 2009.
4. Bevan J., Stockpile Management: Accounting, In Conventional Ammunition in Surplus: A Reference Guide, SAS, Geneva, Switzerland, 2008.
5. Buckley et al., Physical Security and Stockpile Management, First RASR workshop, Zagreb, 2009.
6. Knihała J., J. Kowalczyk, R. Lapinski. Dziesita Krajowa Konferencja Badan Nieniszczacych, Jadwisin, 1980.
7. Skeates Art, Development of an Ultrasonic Inspection System for 120 mm Case Base, 38th Annual Gun Ammunition and Missiles Symposium, 2003.
8. STANAG 4518 ed. 1., "Safe disposal of munitions, design principles and requirements, and safety assessment", NSA, 2001.
9. Sun Q., Z. Ma. An Automatic Strength Inspection System for Halved Joint cartridges. – Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007.

ВИБРО-АКУСТИЧЕСКО ИЗСЛЕДВАНЕ НА БУТАЛО ОТ ДВГ

Иван Коларов
Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”
Ул. „Гео Милев” № 158, 1574, София

1. Въведение

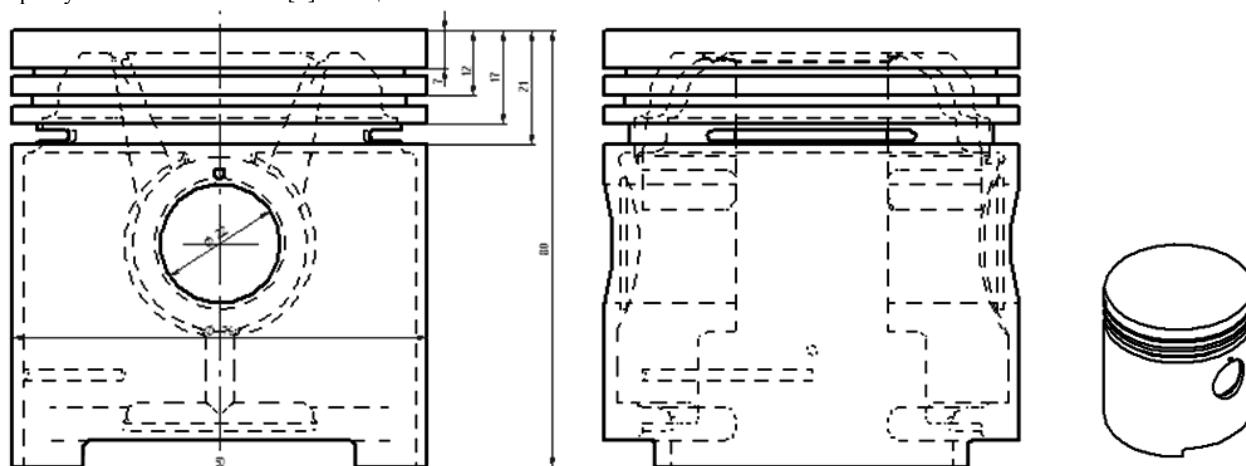
Буталото е ключов машинен елемент от двигателя с вътрешно горене или други механизми в съвременното машиностроене. Натоварено е с големи механични и топлинни влияния от изгарянето на газове в камерата на ДВГ, от динамичните натоварвания при правопостъпателното движение в цилиндъра и др. От качеството на буталото до голяма степен зависи работоспособността и дълговечността на двигателя и това е причина за отделянето на голямо внимание при производството, вкл. и приложението на съвременни методи за безразрушителен контрол и критерии за оценка на техническото им състояние в края на производствения процес. Така например, Federal-Mogul Corporation е създала технология за производство на бутало от алуминиева сплав с повишена механична и якост и топлинна устойчивост. Технологията е първо внедрена в 3.0 литровия високомощен двигател на BMW оборудван с троен турбокомпресор и развиващ специфична мощност 93 kW на литър. Материалът във високо натоварените зони на буталото се привежда локално в течно състояние, чрез което се подобрява микроструктурата и уморната якост. Качеството на повърхностния слой на продукцията се оценява чрез вихровотоков метод. За оценка на размерите на вътрешни дефекти в [1] е разработен специализирана 2D ултразвукова технология. В [2] за оценка на качеството

на буталата (наличието на порестост, пукнатини, вътрешни напрежения и др.) се разработват автоматизирани линии и системи на базата на високотехнологични безразрушителни методи, като 3D-СТ цифров дефектоскоп за радиоактивен контрол. В наши дни буталата се конструират чрез CAD и могат да се балансират до точно тегло с отклонение до 0.5 gr. (при обосновани случаи и до 0.3 gr.) чрез механична обработка на съвременни CNC машини.

Цел на настоящата работа е да направи акустическо изследване на конструкция на бутало, изработено от алуминиева сплав с цел оценка на параметри на качеството, като тегло, трудно забележими дефекти от отливането, порестост и малки невидими дефекти в челото.

2. Постановка на изследването

Изследвани са четири еднакви нови бутала за автомобил, изработени от алуминиева сплав. Буталата са произведени с цел ремонт на двигателя и са закупени покрити с консервираща смазка и хартия. Тяхната конструкция е показана на фиг. 1, а измерените маси - в табл. 1. На фиг. 2 е показан общ вид на изследваните образци.



Фиг. 1. Конструкция на изследваното бутало

Табл. 1. Измерени маси на буталата.

Бутало №	1	2	3	4
Измерена маса, g	354	314	350	344.5

Буталата са експериментално изследвани чрез виброакустически методи. Изследвано е тяхното динамично поведение при импулсно извеждане от равновесие чрез измервателен микрофон с керамична мембрана, чувствителност 137 dB и линейност в честотния диапазон 20 – 18000 kHz. Направен е цифров запис на сигналите чрез помощта на интерфейс за USB връзка с компютър и честота на регистрацията 44000 Hz и възможност за направа на амплитудно-честотен анализ по Фурие в диапазона до 22000 Hz. Записът е направен с помощта на софтуер Score, свободен за некомерсиална употреба и осигуряващ резолюция за отчитане на честотата в рамките на 2 – 3 Hz в диапазона 20 Hz – 20 kHz. Чрез изследването е измерено звуковото налягане, породено от повърхнината на буталата при вибриране.

Измерени са вибрациите в челото на едно бутало (№ 4) чрез вибро-акустически сензор с линейна характеристика в диапазона 20 – 20000 kHz. Сензорът е свързан към предусилвателно стъпало на виброизмервателна апаратура, а сигналът е записан чрез модул SIM 2 през серийния порт на компютър чрез софтуер e-Prolab с вграден модул за амплитудно-честотен анализ. Максималният брой на цифровите измервания е 16000 записа, а максималната честота – 100 kHz. За целта вибросензорът е залепен с твърда смазка към челото на буталото и двата елемента се придържат за осигуряване на контакт между тях и реализирането на експеримента. При всички експерименти е отделено специално внимание електрическото ниво на сигнала да бъде по-ниско от максимално допустимото и да се избегне премодулация. Резултатите са записани в V, а сравнението на резултатите е направено по относителното изменение на изследваните информационни параметри.

Буталата са изследвани и чрез динамична симулация в компютърна чертожна среда. За целта размерите на буталата са измерени чрез общо измервателни средства (шублер) и са направени 3D точни модели в средата на Solid Edge, където е определен обемът. При измерването са допуснати апроксимации на трудно измервани размери, чрез което са допуснати възможни отклонения между действителните и измерените размери на някои трудно достъпни вътрешните размери. Тъй като няма

точна информация за алуминиевата сплав, то нейната относителна плътност е определена така, че масата на виртуалното бутало да отговаря най-близко до тази на реалните образци. От табл. 1. се вижда, че е налице разлика на масата на буталата от 4 до 40 грама. Бутало под условен номер 2 се отличава рязко от останалите. В горната част на буталата са налице вкоравяващи ребра, посочени чрез стрелки на фиг. 2. Чрез външен оглед е установено различна дебелина на тези ребра. Нормалната практика е преди монтаж чрез фрезозване на тези вкоравяващи ребра се изравнява или намалява разликата в масите на буталата, работещи в комплект в двигателя. Установените чрез външен оглед отклонения са важни с оглед обясняване на получените експериментални резултати. Моделирането на особеностите на буталата се отчита именно чрез коригиране на дебелината на тези ребра. Предварителните изследвания показваха известни отклонения в размерите и на други части от буталото, като оребвяване на челото на буталото, на втулките за монтаж на бутални болтове и др. Те трудно могат да намерят отражение в моделираните образци и затова при симулационното изследване на влиянието на различни технически отклонения върху динамичното поведение на буталата е използван само един модел.

В 3D модела са изработени дефекти от вида:

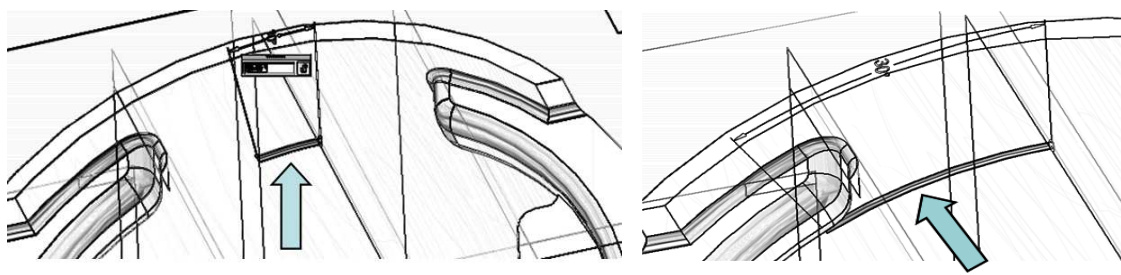
- кръгов вътрешен канал с дълбочина 0.5 mm (фиг. 3) във вътрешната повърхнина на буталото на разстояние от 16 mm от долния му ръб и на ъгли 10, 30, 60 и 90°; симулира се недобро формиране на отливката в процеса на изработка на буталата;

- масов дебаланс в модела чрез отнемане на маса 0.314 грама (еквивалентната на плоскокопнен цилиндър маса на с диаметър 5 mm, височина 5 mm) от един участък и добавяне в друг (фиг. 4); симулира се нееднородност на материала в буталото и възможността да се отчита тази нееднородност чрез акустико-резонансния метод, а така също дава представа за чувствителност към този показател;

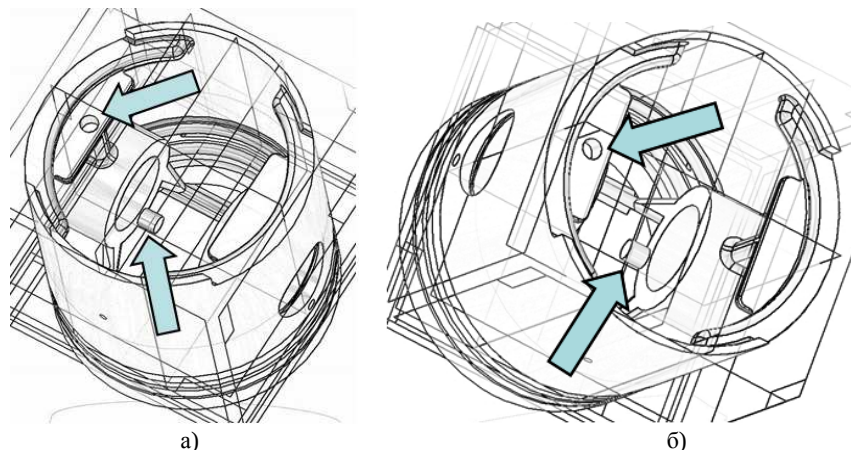
- създаване на изкуствен дефект от вида отвор с диаметър 0.5 mm и дълбочина 0.5 mm в средата на челото на буталото и на 15 mm от средата от вътрешната страна на буталото; симулират се трудно забележими повърхностни дефекти.



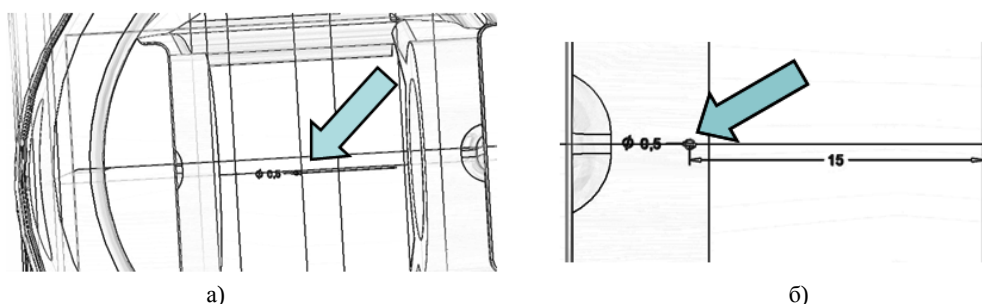
Фиг. 2. Снимка на изследваните бутала.



Фиг. 3. Изкуствени дефекти по вътрешната повърхнина на буталото на ъгли 10 и 30°.



Фиг. 4. Създаване на дисбаланс в буталото чрез условно преместване на еквивалентната маса на плоскодънен цилиндър с диаметър 5 mm, височина 5 mm (с маса 0.314 грама); а) - Вариант 1, масата е преместена по височина на буталото; б) - Вариант 2 - масата е преместена по височина на буталото и симетрично на равнината на симетрия.



Фиг. 5. Изкуствени дефекти в челната зона по вътрешната повърхнина на буталото; а) – Вариант 1: Отвор с диаметър 0.5 mm и дълбочина 0.5 mm в средата на челото на буталото, б) – Вариант 2: Отвор с диаметър 0.5 mm и дълбочина 0.5 mm на 15 mm от средата на буталото.

Създадените модели са динамично изследвани чрез метода на крайните елементи. За целта те са транслирани в средата на Solid Works с инсталиран модул Cosmos. Зададен е материал на модела от съществуващата в Solid Works номенклатура на алуминиеви сплави, като е коригирано относителното тегло с цел достигане на максимално теглово съответствие между модела и действителните образци. Моделът се разделя на крайни елементи с помощта на вградената в софтуера операция за създаване на мрежа. Задавана е ситна мрежа с минимална едрина, съобразена с най-малките геометрични особености на модела и е получена добра сходимост на симулационните резултати. Изследвана е и значимостта на модите на модела по отношение на безразрушителната диагностика, като бутало е натоварвано във виртуалната среда с пулсираща сила с големина 20 N. При изследване на динамични натоварвания в честотния диапазон до 10 – 20 kHz се симулира се вибрационното натоварване от специализирани вибромаси и вибратори. Проведени са изследвания и при по-високи честоти, срещани в литературното проучване и възбуждани и измервани с по-специализирани устройства. За практическо

реализиране на виртуалното натоварване с пулсираща сила моделът е фиксиран в компютърната среда.

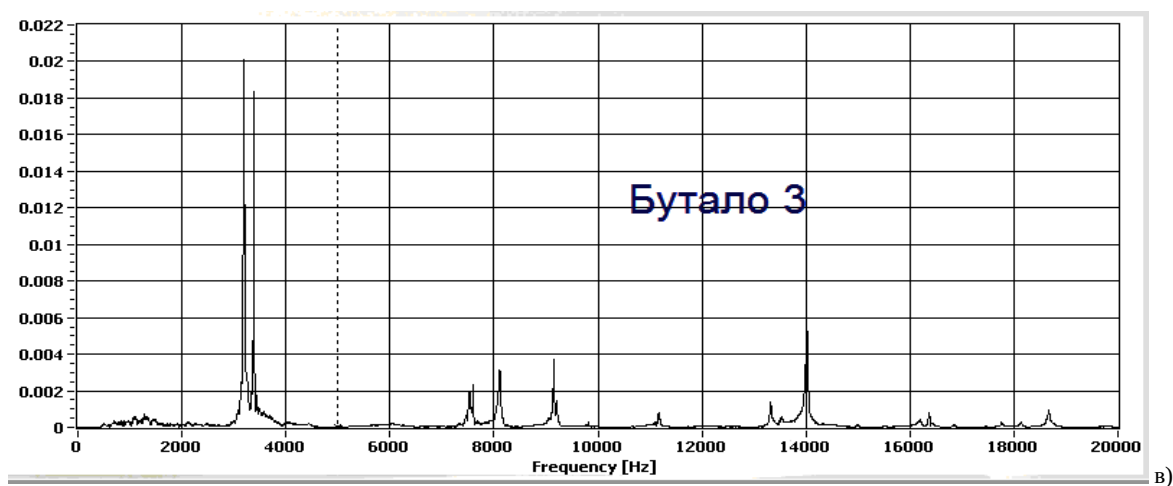
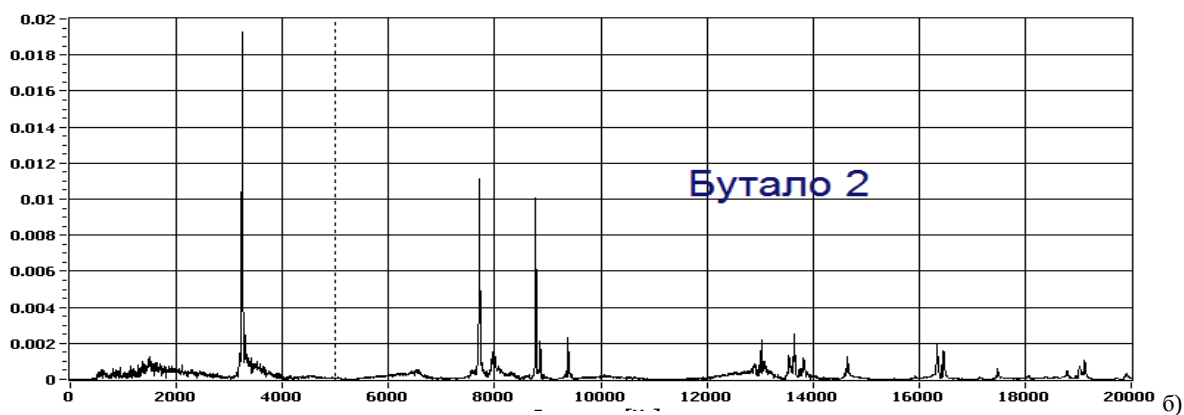
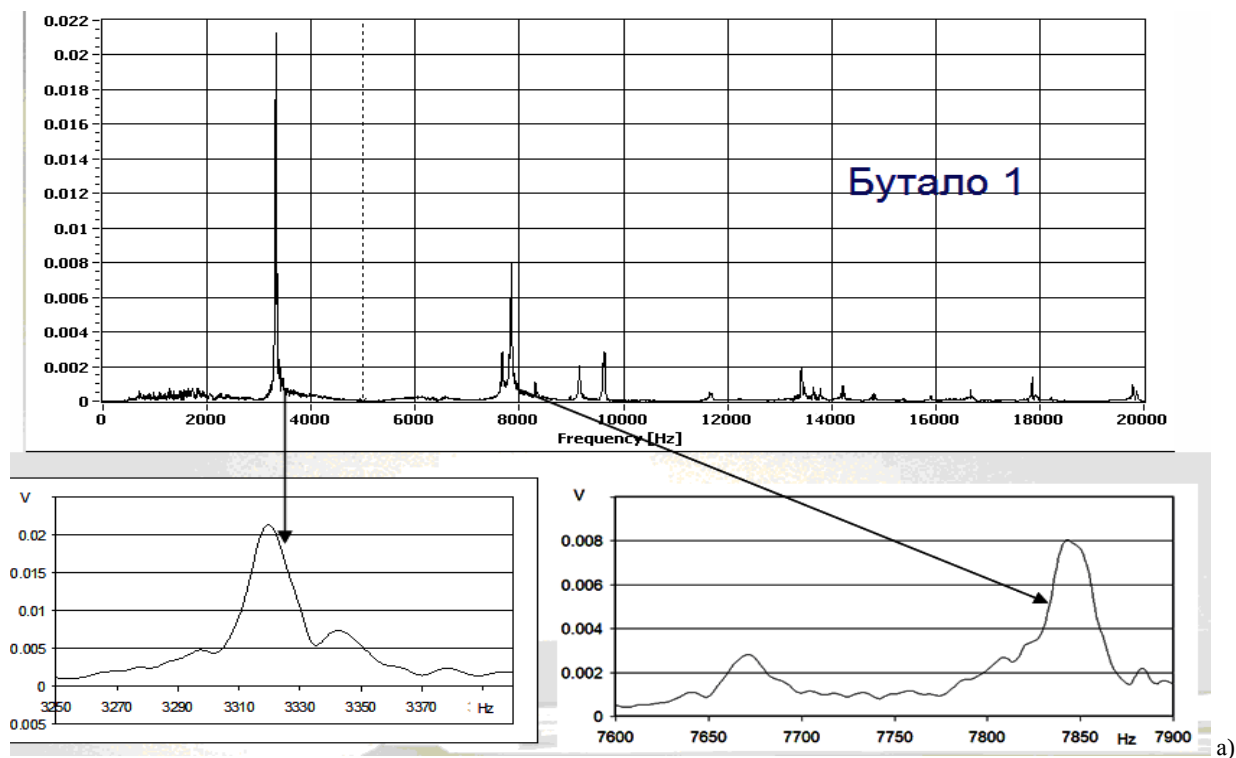
3. Резултати от изследването

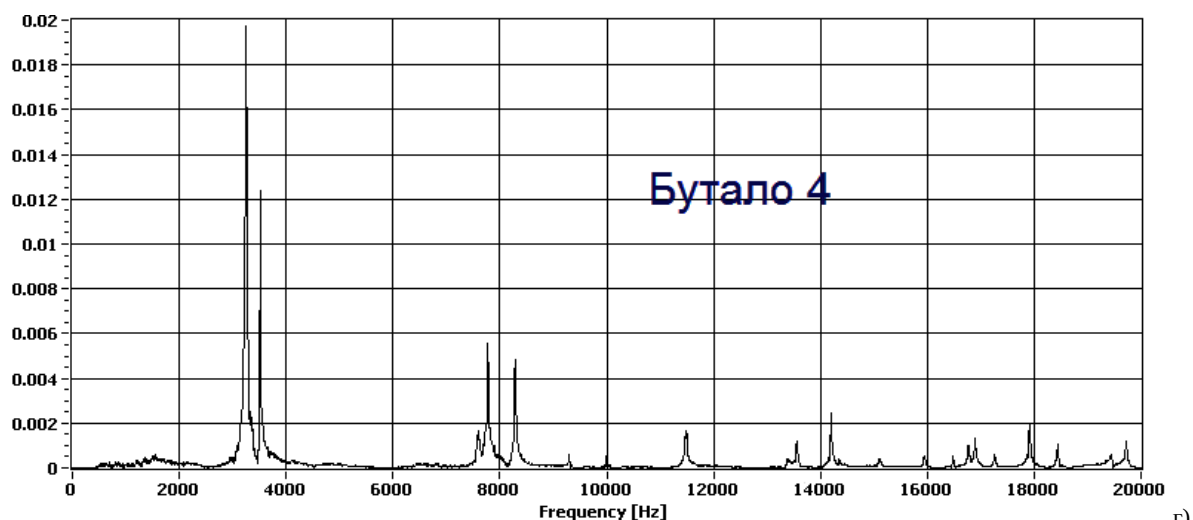
На фиг. 6 са показани типични резултати от акустическо изследване на буталата чрез с микрофон. Забелязва се, че въпреки буталата са еднакви, то са налице честотни разлики на възбудените амплитуди. Броят на амплитудите в отделните експерименти е различен. Амплитудите до честотния диапазон 8000 Hz имат максимални стойности и най-лесно са установими. Подробното изследване на амплитудите показва, че често пъти те имат сложен характер, дължащо се на наслагането на вибрации с различен произход в близък честотен диапазон. Такова изследване е показано на фиг. 6 а). Честотите на регистрираните амплитуди са показани в табл. 2. Налице е групиране на амплитудите по номера, отчетени от различните графични зависимости. Най-близки са отчетените амплитуди с номера 2 и 3. За някои амплитуди са налице отклонения до 200 – 300 Hz.

В табл. 3 са показани честотите на регистрираните на установените чрез симулация мода за бутало без дефект. Налице е разлика в броя на получените мода и

експериментално регистрираните амплитуди. Причината за това се отдава преди всичко на възможността за механичното възбуждане в буталата освен на резонансни честоти, така и на амплитуди с други честоти или на наличието на други трептящи участъци в буталата. Забелязват се отклонения между теоретичните и

експериментални резултати. Те са по-големи в честотния диапазон до 10 kHz. Причините може да са комплексни, като отклонения в геометричните размери на сравняваните образци, в обема и относително тегло, еластични характеристики и др.





Фиг. 6. Експериментални резултати от изследване на буталата 1 – 4 с измервателен микрофон (а - г).

Табл. 2. Резултати за регистрираните информационни чрез микрофонен запис амплитуди на буталата.

Информационна мода	бутало 1	бутало 2	бутало 3	бутало 4
	Hz	Hz	Hz	Hz
1	3319	3226	3195	3251
2	3342	3306	3379	
3	7670	7709	7603	7605
4	7845	7989	7535	7773
5	8308	8772	8119	8288
6	9159	9382	9151	9296
7	9633		9815	10005
8	11702		11170	11499
9	13427	13035	13322	13427
10	13653	13548	13538	13559
11	14224	14655	14026	14201
12	15379		15030	15113
13	15921	15932	16210	15950
14	16678	16345	16378	16484
15		16462		16773
16			16866	16893
17		17485		
18	17861	18801		17981
19	18230	19121	18682	18444
20	19787	19921		19453

Основни амплитуди

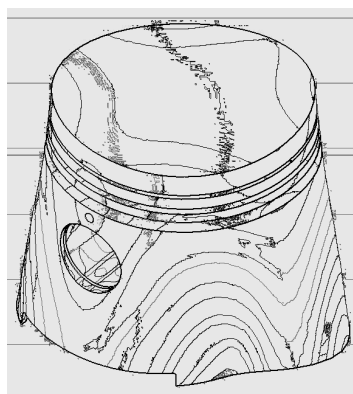
Табл. 3. Честоти на установените чрез симулация моди за бутало без дефект.

Мода №	Честота, Hz
1	4646.2
2	5307.8
3	11660
4	12071
5	12266
6	13286
7	13999
8	14537
9	15547
10	17714
11	19736

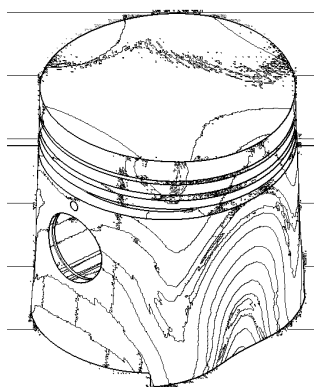
Някои от заеманите форми на модела при деформиране вследствие резонансните трептения са показани на фиг. 7. От тях се вижда, че за така конструираното бутало основните вибрации възникват в страничните повърхнини на буталото. Дефекти от различен характер в тези зони, а така също и в съседните участъци за вкоравяване на конструкцията и за монтаж на буталните болтове биха променяли собствените моди на буталото. Очакванията са, че дефекти в челото на буталото биха се отразявали в минимална степен на модите при свободно окачване на буталото.

Типичен сигнал от бутало 4 при честота на цифровия запис 100 kHz чрез вибросензор, усилвател, аналого-цифров преобразовател и компютър е показан на фиг. 8 а), а на фиг. 8 б) и в) са показани амплитудно-честотни анализи на регистрираните сигнали от буталото при импулсно взаимодействие в различни участъци: по

външната цилиндрична повърхнина на буталото и по пръстеновидната повърхнина. Тези участъци имат различна локална коравина. Установена е разлика в големината на регистрираните амплитуди, но е налице честотно съвпадение. Следователно може да се приеме, че наблюдаваните амплитуди отговарят по честота на модите на буталото. Отчетени са честотите, регистрирани чрез виброметъра и те са 3248, 3367, 6450, 6717 Hz. Сравнение на вибрациите на бутало 4 в честотния диапазон 3200 – 3600 Hz е показано на фиг. 9. Част от тези стойности съвпадат с достатъчно добра точност на показаните в табл. 2 честоти на основните амплитуди, но тези с честота 6450, 6717 Hz се отличават. Възможните причини за това са промяна на масата на буталото от вибросензора и промяна на собствените моди от прикрепването за осигуряване на измерването.



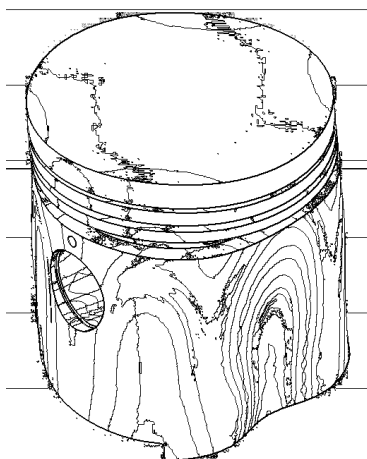
4646.2 Hz



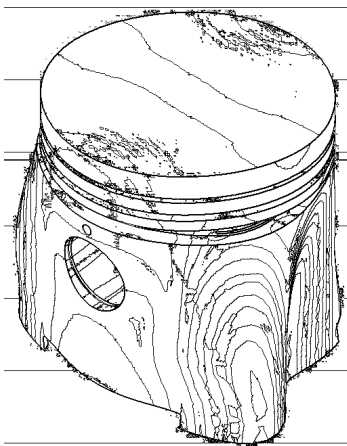
5307.8 Hz



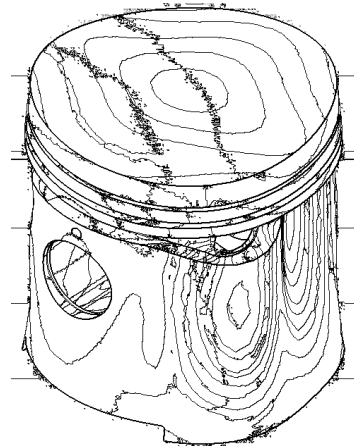
11660



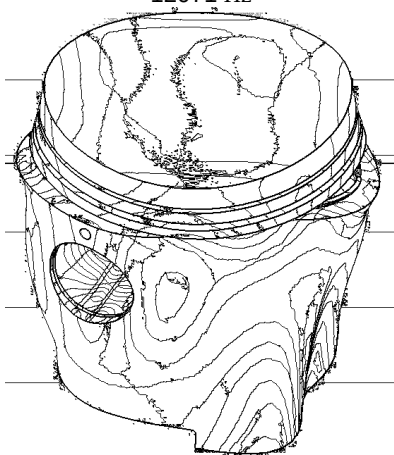
12071 Hz



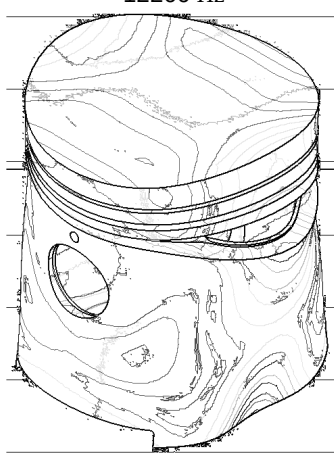
12266 Hz



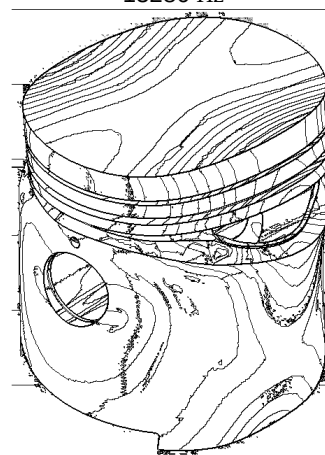
13286 Hz



13999 Hz

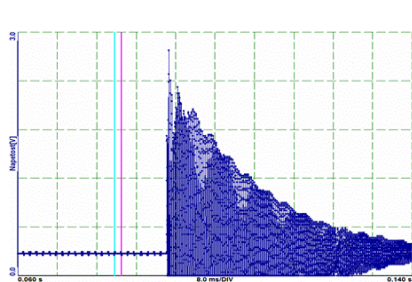


14537 Hz

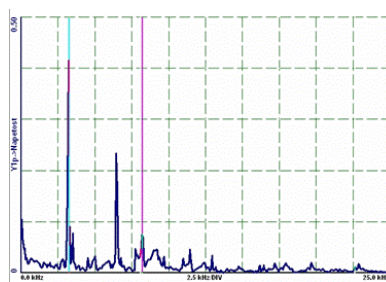


15547 Hz

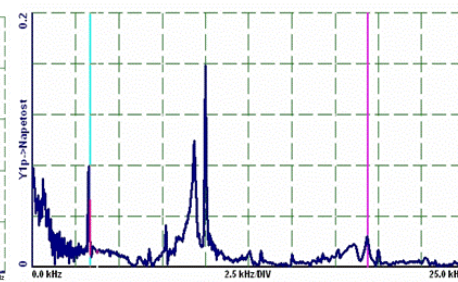
Фиг. 7. Някои деформации заемани от буталото при вибриране вследствие възникване на резонанс



а)

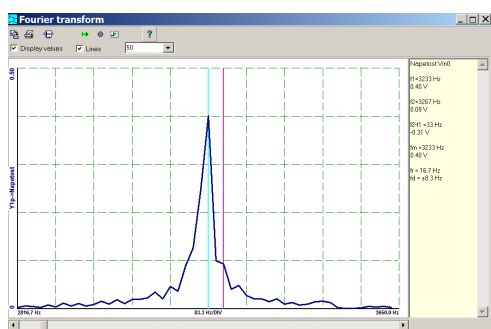


б)

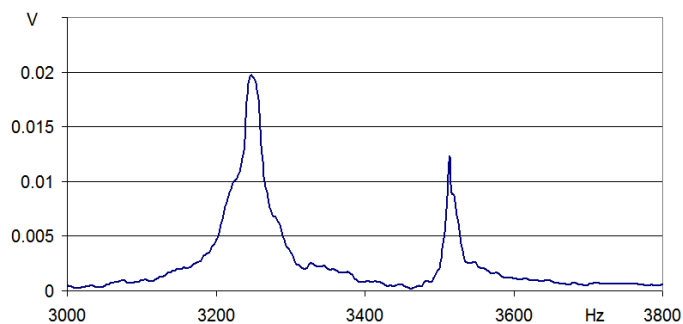


в)

Фиг. 8. Типичен сигнал регистриран чрез виброизмервателна апаратура (а) и амплитудно-честотни анализи при динамично взаимодействие върху външната цилиндрична повърхнина (б) и върху пръстеновидната повърхнина (в) на бутало 4.



a)

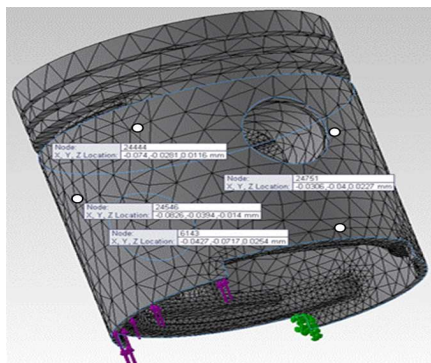


б)

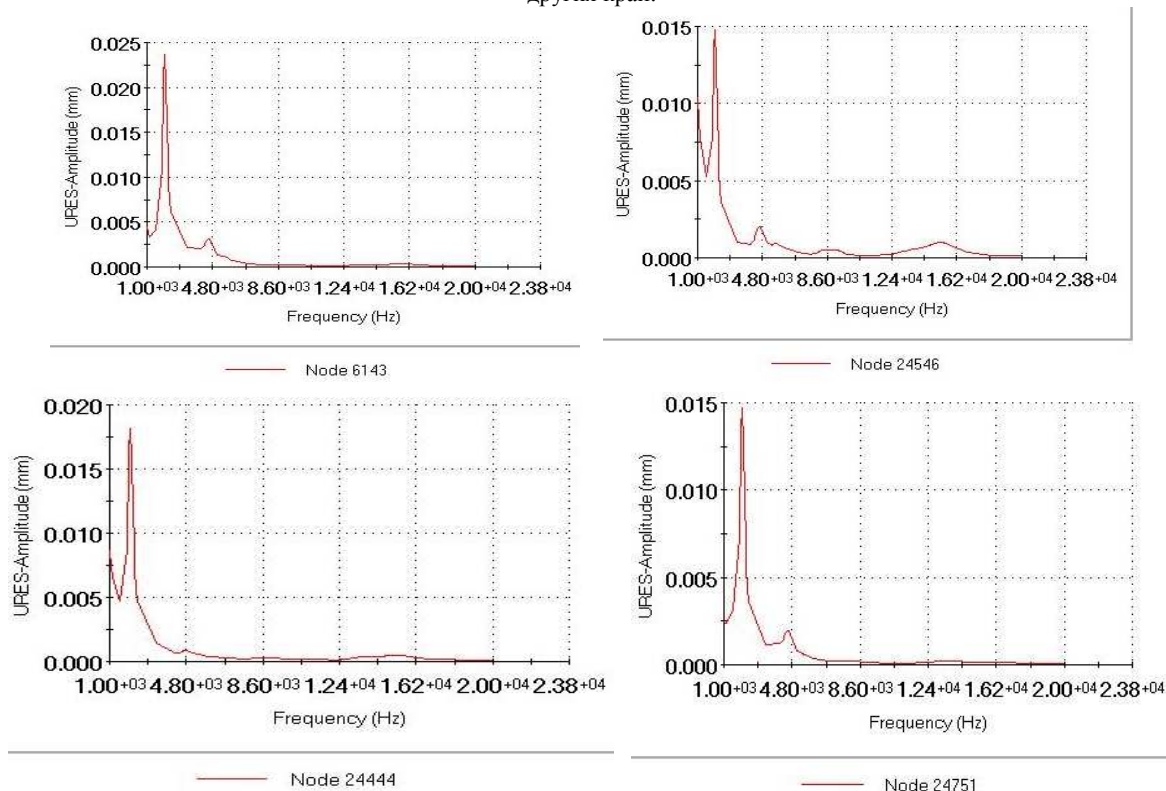
Фиг. 9. Сравнение между амплитудно-честотни анализи на сигнали, получени чрез вибро-акустическо (а) и акустическо (б) изследване на бутало 4 в честотния диапазон 3200 – 3600 Hz.

Проведено е симулационно изследване на амплитудно-честотното поведение на различни участъци от буталото. За целта моделът е запънат в долния си долен край (фиг. 10), в срещуположния участък е натоварен динамично от сила 20 N. Изследвано е динамичното поведение във възли от повърхнината, показани на фигурата. Резултатите за пълните премествания са изложени на фиг. 11. Забелязва се

честотно съвпадение на отчетените амплитуди. Налице е подобие на регистрираните амплитудни премествания в различните точки на изследване, както и незначителни разлики в преместванията. Регистрираните амплитуди отговарят по честота на основните моди, но са налице и други пикове, факт дължащ се преди всичко на влиянието на закрепването на буталото.

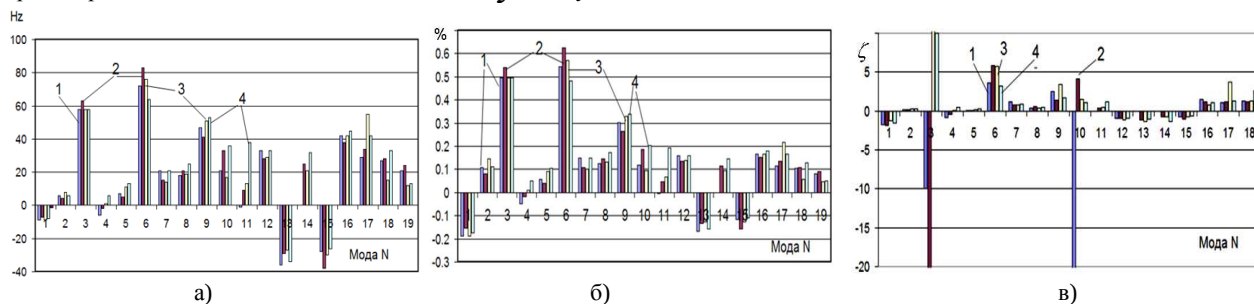


Фиг. 10. Динамично изследване на възли от повърхнината на запънато в долния си край бутало и динамично натоварено в другия край.



Фиг. 11. Резултати от симулацията за различните възли от динамично натоварване в долния край на буталото.

На фиг. 12 са показани теоретични резултати за честотно изменение на модите на буталото при наличие на нееднородност тип „канал“, получена в резултат на недобро реализиране на отливката на буталото. Тук са приети следните означения за резултатите: 1 – канал 10°, 2 – 30°, 3 – 60°, 4 – 90°. Забелязва се честотно изменение на модите в рамките на -10 – 60 Hz и относително изменение - 0.1 – 0.5%. Тези стойности са обнадеждаващи за нуждите на безразрушителния контрол, но за подобряване на разпознаването на дефектите тук е направен опит за изследване на нов параметър. Въвежда се отношението ζ между

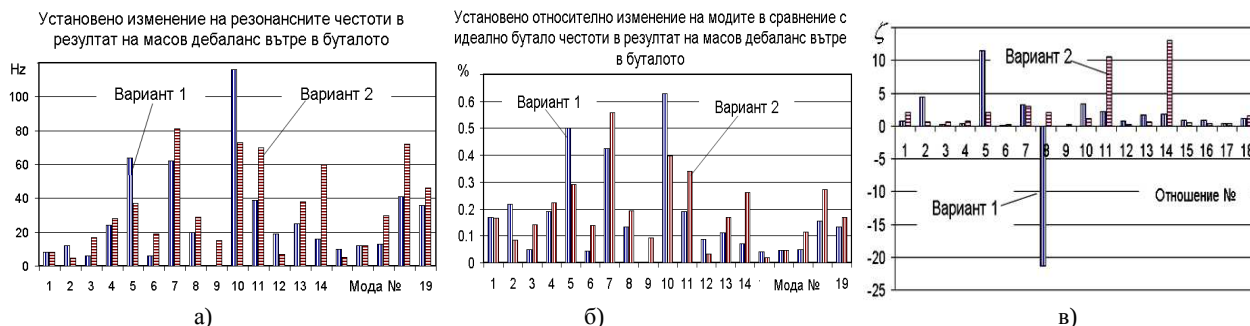


Фиг. 12. Резултати от изследване на изменението на модите в резултат от дисбаланса вътре в конструкцията на буталото; а) – честотно изменение; б) – относително изменение; в) отношения между относителното изменение на модите.

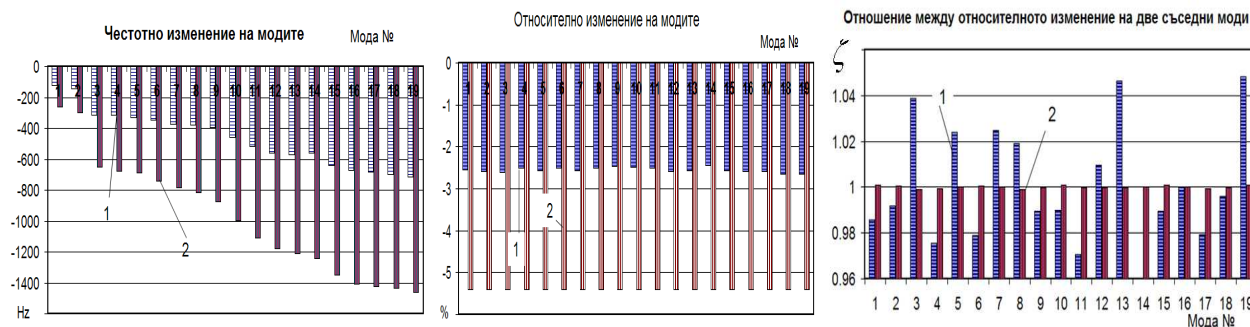
На фиг. 13 са показани теоретични резултати за изменение на модите на буталото при наличието на дисбаланс вътре в конструкцията на самото бутало за описаните по-горе варианти на изследване. За разширяване на областта на изследване е изчислено изменението на модите с честота до 26 kHz. Основните моди с номера 1 – 4 се изменят в рамките на 10 – 30 Hz. Други по-високо честотни моди се променят, като максималната стойност е в рамките на 80 – 120 Hz.

относителното честотно изменение на модите θ_i / θ_{i+1} за изследвания честотен диапазон, където $\theta_i = \Delta f_i / f_i$, Δf_i е честотното изменение на модата i с честота f_i , i е номер на модата, т.е. $\zeta = \theta_i / \theta_{i+1}$. Резултатите са показани на фиг. 12. в). Наблюдава се неравномерност в изследвания нов параметър и тя варира в рамките на -1 – 5 пъти и повече за основните моди, а някои стойности достигат до 20.

Относителното изменение на модите $\theta_i = \Delta f_i / f_i$ е показано на фиг. 13 б) и е установено, че то се променя неравномерно и е в границите на 0.05 – 0.15% за основните моди. Наблюдава се неравномерност в изследвания нов параметър ζ и тя варира в рамките на 0.5 – 4.5 за основните моди, а някои стойности достигат до 10 - 12.



Фиг. 13. Резултати от изследване на изменението на модите в резултат от наличието на еднородна порестост на алуминиевата сплав в цялата конструкция на буталото; а) – честотно изменение; б) – относително изменение; в) отношения между относителното изменение на модите.



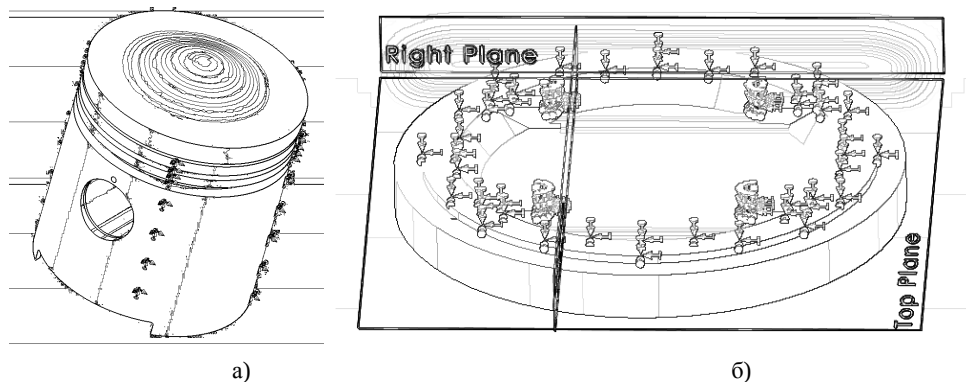
Фиг. 14. Резултати от изследване на изменението на модите в резултат от наличието на еднородна порестост на алуминиевата сплав в цялата конструкция на буталото; а) – честотно изменение; б) – относително изменение; в) отношения между относителното изменение на модите.

На фиг. 14 са показани теоретични резултати за изменение на модите на буталото вследствие на

порестост 5 и 10%. Поради липса на експериментални данни за конкретната алуминиева сплав тук се приема, че

характерът на изменението на еластичните свойства при наличие на порестост съответства на данните в [3]. Отчетените стойности по същество съответстват на данните в [4]. Резултатите показват, че измененията на модите на буталото са значителни; те са в рамките на 100 до 600 Hz за основните моди и достигат до стойности над 1000 Hz за други. Относителното изменение на модите също е значително, то достига до 2,5 – 5%. Забелязва се равномерно честотно изместване на всички моди. Следователно наличието на равномерна порестост в

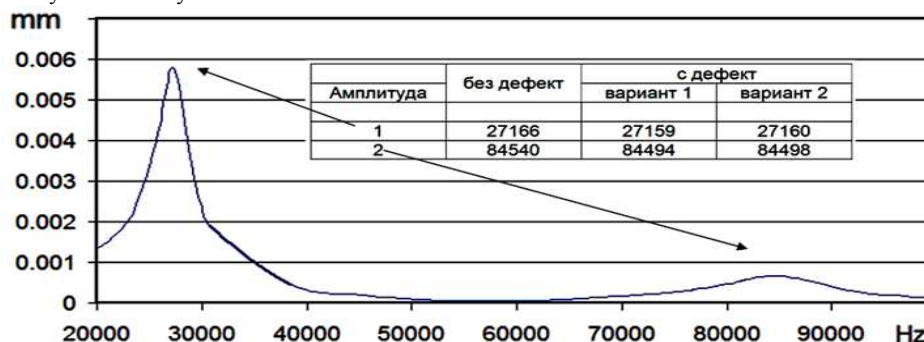
материала може бързо да се диагностира чрез резонансния метод. Въведеният параметър „отношение между съседни моди“ ζ се изменя в тесни граници, в рамките на 0.97 – 1.05. Чрез едновременното изследване на изменението на θ и ζ бързо може да се диагностира за наличието на равномерна порестост в сплавта на буталото.



Фиг. 15. Постановка на задачата за вибро-акустично изследване на челото на буталото; схема на запъване; опростен вариант за теоретичен анализ

Изследвано е влиянието на малки дефекти (с едрина 0.5 mm) от вътрешната стена на челото на буталото. Резултатите, получени при свободно трептящо бутало показват минимално изменение на резонансните честоти, а именно в рамките на 1.7 – 12 Hz за първите 4 моди. Тези стойности са твърде малки за нуждите на диагностиката. На практика тези отклонения може да се дължат в резултат на минимални геометрични отклонения, допустими за надеждната работа на буталото. Затова тук е направено допълнително изследване на челото на буталото. Буталото е фиксирано по външната и вътрешната цилиндрични повърхнини. На практика това е дейност лесно реализуема чрез специално механично устройство. За получаване на решение на задачата челото на буталото е разглеждано самостоятелно и са зададени опорна реакция тип „запъване“ в преходния участък към цилиндричната стена. Постановка на задачата е показана на фиг. 15. Първоначално са определени честотите на модите, а след това е приложено динамично натоварване в рамките на 100 N в челото буталото в установения честотния

диапазон на модите: 20 – 100 kHz. Изчислено е вибрационното поведение в центъра на буталото откъм външната повърхнина непосредствено до приложената външна сила. Резултатите от изследването са показани на фиг. 16. Установено е сложно натоварване в челото на буталото, максимумите на амплитудите се намират близо, но не съвпадат с предварително изчислените честоти на модите. Вероятно това се дължи на наслагване на вибрации на съседни моди. Направен е подробен числен експеримент за стесняване на честотната зона в областта на 80 kHz, но не бе получен друг резултат. Установено е изменение на амплитудите при наличие на изследваните дефекти в рамките на 7 – 40 Hz. Като се има предвид високата честота на изследване, това изменение не е значително при механично възбуждане на вибрации. За практическото приложение установения факт е необходимо разработка и използване на други методи за динамично възбуждане.



Фиг. 16. Динамично поведение в централната област на буталото и стойности на установените амплитуди за разглежданите варианти.

3. Основни изводи от изследването

На базата на направените симулационни и експериментални резултати може да се направят следните основни изводи:

- Чрез резонансния метод се установяват изменения на масите, а така също и дебаланс в резултат от нееднаква плътност на материала. Перспективен от практическа гледна точка е въвеждане и използване на нов информационен параметър за оценка, основаващ се на отношение между относителните изменения на съседните моди.

- Чрез едновременното изследване на изменението на модите и на отношенията между съседните моди може да се съди за наличието на порестост в сплавта на буталото.

- Дефекти с минимални размери от порядъка на 0.5 mm по челата на буталата трудно могат да бъдат диагностицирани чрез резонансния метод за безразрушителен контрол. По принцип е установена теоретичен подход за решаването на тази задача, но е необходимо да се приложат нови методи за възбуждане на вибрации в алуминиеви сплави в диапазона до 100 kHz и много точно измерване на вибрациите.

Литература

1. Federal Mogul develops advanced aluminum piston for high-performance light-duty diesel engines. Green Car Congress, 2012.
2. Scholz, O., Oeckl, S., and Kube, M., "High-Speed Inline Production Testing of Cast Pistons Using 3D-CT and a Digital X-Ray Detector," SAE Technical Paper 2013-01-1426, 2013.
3. Asmani M. and all. Influence of porosity of Youn's modulus and Poission's ratio in alumina ceramics. Jurnal of the European Ceramics Society 21. 2001.
4. Миховски М. Комплексно използване на безразрушителните методи за изследване на структурата и физикомеханичните свойства на метални материали. Дисертация за присъждане на научната степен „доктор на техническите науки”, Институт по механика и биомеханика – БАН, София

Благодарности: Този доклад е създаден в рамките на проект „Иновационен резонансен метод за безразрушителен контрол на машинни елементи в транспортното машиностроене”, финансиран от Висшето транспортно училище „Тодор Каблешков”.

ОПТИМИЗИРАНЕ ИЗСЛЕДВАНЕТО НА ВИБРО-АКУСТИЧЕСКИ ПАРАМЕТРИ ЗА БЕЗРАЗРУШИТЕЛНА ОЦЕНКА НА ДЕФЕКТИ В СИСТЕМИ

Иван Коларов

Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”

Ул. „Гео Милев” № 158, 1574, София

1. Въведение

Честотното изследване на собствените моди успешно се използва за бърза оценка на техническото състояние на машинни елементи с опростени конструктивни форми. За целта се използват теоретични модели за определяне на модите, като съобразно конкретната форма на елементите те се представят като тънкостенни черупки, пръти, греди на Тимошенко и др. Изменението на регистрираните резонансни честоти е белег за отклонения на геометрични размери и на механични свойства на телата [1]. В [2] е представено теоретично динамично изследване на проста гредата на Тимошенко с пукнатина. Гредата се разглежда като система от две греди, свързани с безмасова пружина с коравина, изразяваща деформационното поведение на плътното сечение в зоната на пукнатината. Но реалната форма на машинни конструкции трудно подлежи на теоретично описание чрез горе изброените модели. Допълнително влияние върху модите оказват допустими отклонения на физико-механичните свойства на използваните материали. Това е причина за наличие на значителни отклонения между теоретични резултати, определени чрез опростени модели и експериментални данни (20 – 30% и повече) при изследване на модите на реални конструкции [1].

По-точни резултати от изследване на модите при оценка на техническото състояние на реални машинни елементи се получават чрез метода на крайните елементи (FEA). Обикновено е налице минимално отклонение между експериментални и теоретични резултати, което се отдава на геометрични и механични несъответствия между реален и симулиран модел. Чрез FEA се симулира деформация при възбуждане на резонанс за конкретни моди, а така също и локално динамично поведение на машинните елементи.

Чрез измерване на модите на машинните елементи след тяхното динамично извеждане от равновесно състояние може бързо да се даде качествена оценка на тяхното качество. За целта е необходимо формулирането на критерии за изменение на вибро-акустическите параметри в зависимост от големината на дефекта в различни зони. В съвременните условия с увеличаване на експлоатационните натоварвания нарастват и изискванията на потребителите за намаляване на допустимите размерите на дефектите с цел гарантиране на предварително зададен ресурс. В същото време, въпреки използването на съвременни числени методи за анализ са налице трудно диагностируеми участъци - краища на капаци на кутии и участъци с голяма коравина, където преместването е незначително. Възможно е и едновременно възбуждане на значителен

брой моди с близка честота, което е причина за затрудняване на измерването. Също така, при използване на FEA са налице противоречиви изисквания при оценка на модите на машинни елементи със сложна форма (сложна трептяща система) и тяхното изменение от несъвършенства в конструкцията: Необходимо е да се създаде достатъчно подробен модел с гъстота съобразена с техническите отклонения (с цел постигане на сходимост на резултатите); Времето за постигане на крайно решение трябва да бъде реално (напр. 1 час за решаване на модела, 5 – 10 мин. за получаване на конкретно решение). Проведени са от автора значителен брой симулационни изследвания за влиянието на дефекти в машинни елементи от транспортното машиностроене, като времето за постигане на решение е достигало рамките на 24 часа, а достигането на желано решение – в рамките на час. Тези дейности са неефективни от потребителска гледна точка.

Цел на работата е предложи подход за оптимизиране на измерването на вибро-акустически параметри с цел опростяване на получаваните решения за безразрушителна оценка на качеството на машинни елементи.

2. Постановка на изследването

Възбуждането на собствените моди на една система е свързано с движение на енергията за извеждане на системата от равновесие по начин в зависимост от конкретната конструкция. Уравнението на движение на едномасова хармонична система се дава във вида [1]:

$$(-\omega^2 \cdot m + i \cdot \omega \cdot b + c) \cdot d = F, \quad (1)$$

където ω е честотата, m - масата, b - коефициент на демпфиране, c - коравината, d - векторът на преместването, F - приложената сила. За подробно изследване на машинен елемент със сложна форма и след разделяне на обема на n на брой крайни елементи уравнението добива вида:

$$[-\omega^2 \cdot M + i \cdot \omega \cdot B + (1 + i \cdot \eta)C] \cdot D = F \quad (2)$$

Тук M , B и C са матрици от данни, описващи масата, демпфирането и коравината и определени чрез геометричните и механични свойства, D - вектор на преместването в резултат на действието на вектора на силата F , $i = \sqrt{-1}$, η - коефициент на загубите.

Първата мода за една система се определя от широко приложимата зависимост [3]:

$$\omega_{p1} = \sqrt{c/m} \quad (3)$$

където C е обща коравина, за система от паралелни и последователно свързани еластични елементи се използват зависимостите, съответно, $C = \sum_{i=1}^n c_i$

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i}, \text{ за комбинирани системи се използва}$$

комбинация от тези зависимости, описващи конкретна схема, m - маса на системата.

Измерването на модите на еластични структури със сложна форма е тясно свързано с разпространение на енергията в тях, в т.ч. направата на статистически анализ на енергията на модите и възможността да възникне честотна интерференция на модите. Честотното препокриване на модите е тясно свързано с честотната модалната плътност. Определя се параметърът средна модална плътност $n(\omega)$, който зависи от геометричните и механични особености на субсистемата и за една субсистема се определя от броя на модите в зададен честотен интервал $\Delta\omega$, а именно [4]:

$$n(\omega) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{N(\omega + \Delta\omega) - N(\omega)}{\Delta\omega} \quad (4)$$

където $N(\omega)$ е броят на собствените честоти в диапазона до ω . Енергията Π'_{21} , преминаваща от едната система в друга се определя от зависимостта:

$$\Pi'_{21} = \langle B_{\alpha\alpha} \rangle, N_1 \cdot N_2 \cdot (E_1^m + E_2^m), \quad (5)$$

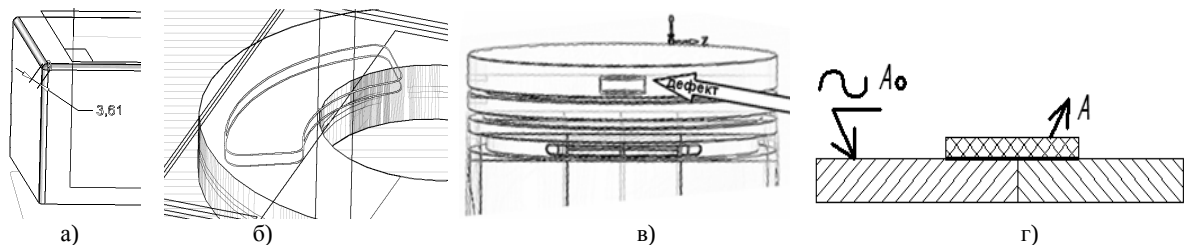
където $E_i^m = E_i^{tot} / [n(f) \cdot \Delta f]$ е средна модална енергия, E_i^{tot} е обща енергия на субсистема i , $\langle B_{\alpha\alpha} \rangle$ - средно модално свързване. Енергийни загуби η_{21} при преминаване на енергията между две структурни системи се определя от зависимостта:

$$\eta_{21} = \frac{c_{g1}}{2 \omega S_1} \tau_{21} \quad (6)$$

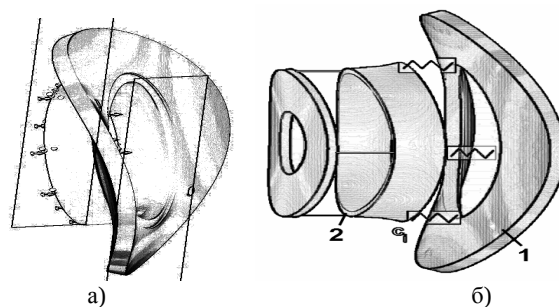
Тук с τ_{21} е означен коефициентът на полезно действие при преминаване на енергията от система 1 към система 2, c_{g1} е груповата скорост на вълните в система 1, S_1 е площта на системата 1, а L е дължината на съединителния участък.

При оценка на енергийните загуби от преминаване на енергията в машинен елемент, формално създаден от две структурни системи дължината на съединителния участък зависи от конкретната конструкция. При $L \rightarrow 0$ следва, че и енергийните загуби при преминаване на енергията между двете субсистеми $\eta_{21} \rightarrow 0$. Когато L има реална стойност, например в контактен слой между две (или повече) субструктури (фиг. 1 г), тогава $\eta_{21} \neq 0$ и ще зависи от състоянието на контактният слой. Горната зависимост не описва особеностите на преминаване на ултразвукови вълни през контактен слой, изложени в [5].

На фиг. 1 са показани типични отклонения в машинните елементи, а именно: наличие на несъвършенство в област, близка до стена в кутия, където деформацията от динамично въздействие е незначителна (фиг. 1 а), наличие на подповърхностни и повърхностни пукнатини (фиг. 1 б) и на дефекти с големина от порядъка на 0.5 mm в чело на бутало от ДВГ, но важни от гледна точка на експлоатацията (фиг. 1 в), участък от съединение между два елемента, повърхностно уякчен чрез залепен неметален материал (фиг. 1 г). Общото за тези примери е, че е необходим значителен изчислителен ресурс за оценка на очакваните изменения на модите при наличието на дефекти с различна големина, а така също и честотно наслагване на моди от други участъци. За опростяване на моделите тук се предлага опростен подход за изследване чрез условно разделяне на детайла на два участъка от гледна точка на експлоатацията – работен (отговорен) и конструктивен (спомагателен). В този случай подробно се изследва на отговорния участък, а конструктивния се замества с еквивалентна коравина и маса или силно се демпферира вълновите процеси в него.



фиг. 1. Типични проблеми при оценка на дефекти в машинни елементи; а) - прекъснатост в участък с голяма коравина; б) - наличие на подповърхностно разслоение или повърхностна пукнатина в участък от метала; в) - дефект в сложна трептяща система; г) при наличие на контактен слой.

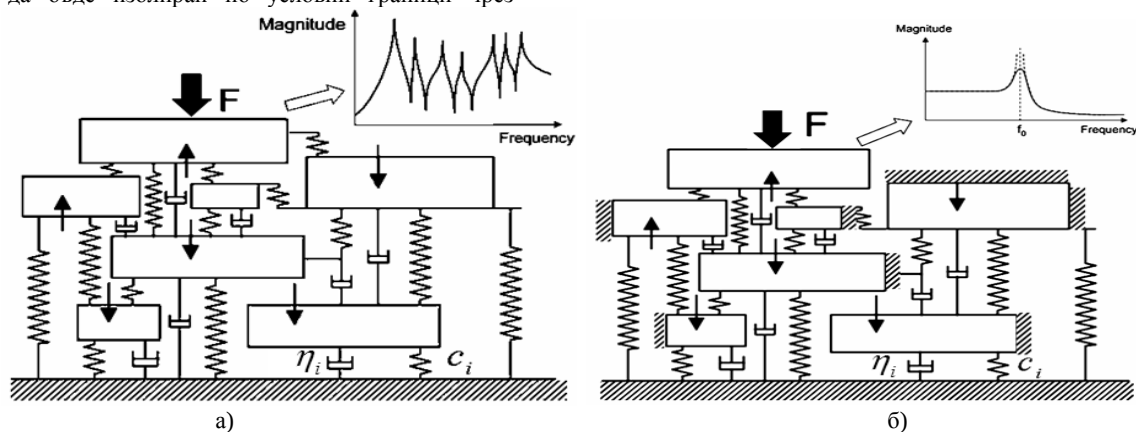


фиг. 2. Пример за реализиране на подхода за анализ на работни участъци в машинни елементи със сложна форма – невентилиран спирачен диск за автомобил; а) – определяне на модите на целия диск; б) – определяне на модите чрез заместване на чашата с еквивалентна маса и коравина.

На фиг. 2 е показан пример за реализиране на изложения по-горе подход за условно разделяне на невентилиран спирачен диск на два участъка - работен и конструктивен. Наличието на дефект във фрикционната част на диска е от особено значение за неговата работоспособност. Този участък се натоварва топлинно от плъзгане със спирачните накладки при спиране, охлажда се вследствие попадане на вода от околната среда, износва се. Предварително е установено, че в областта на първите три моди се предизвикват максимални резонансни премествания и те са във фрикционния участък на диска. Дискът условно е разделен на два участъка, като за отговорен е избран фрикционната му част 1 (фиг. 2 б), а чашата на диска 2 – като конструктивен. Чашата на диска се състои от два конструктивни участъка с прости форми (диск и цилиндър) и е зададена твърда връзка между тях. Определена е коравината C_l и масата на цялата конструктивната част чрез симулационен експеримент.

В някои случаи отговорният участък на системата е удачно да бъде изолиран по условни граници чрез

демпфериране, с което изкуствено се подтискат близки по честоти моди в конструктивния участък. За целта отговорния участък се застопорява с прости механични приспособления, в т.ч. и чрез активно демпфериране на границите и се имитира присъединителна маса m' в тези участъци с големина $m' > 500.m$ (m е масата на изследваната система), така че да не се променят модите на [5]. Схематично този подход е показан на фиг. 3. При нормално състояние на системата е показан значителен брой моди в тесен честотен диапазон (фиг. 2 а [7]), а след прилагане на подхода се намалява близките моди се подтискат и се остава само информационно съществената мода. Чрез регулиране на областта на запъване се регулира по (2) диапазона на очакваната резонансна честота f_p , като се има предвид общата зависимост $f = 2\pi.\omega$.



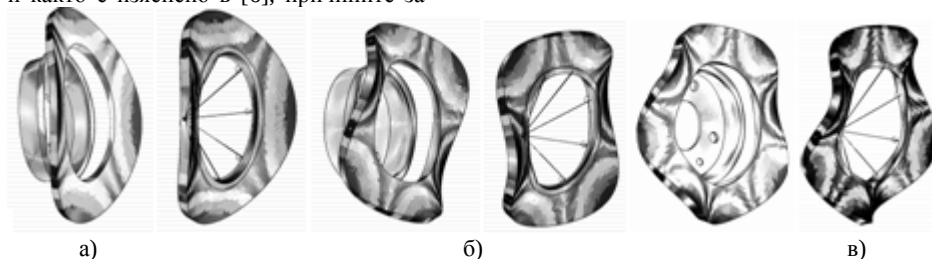
Фиг. 3. Схематично представяне на изследване на участък от конструкция със сложна форма; а) – нормално динамично поведение на участъците на системата [7]; б) - динамично поведение след фиксиране на неважните за едно измерване участъци.

3. Аprobация на подхода за оптимизиране на измерването

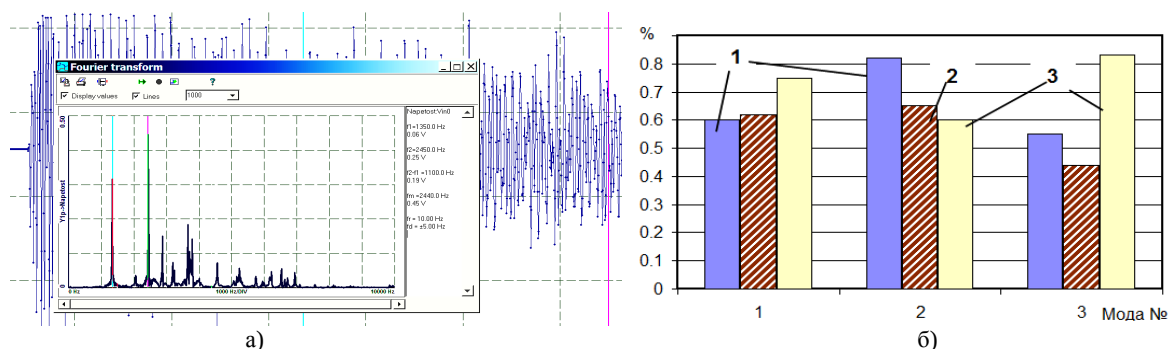
На фиг. 4 са показани резултати от изследване на невентилиран спирачен диск от автомобил за първа мода (фиг. 4 а), втора (фиг. 4 б) и трета моди (фиг. 4 в), получени при изследване на цялостната конструкция на диска и след прилагане на изложения по-горе подход. Честотите на тези моди са, съответно 1330, 2440 и 3830Hz. Деформациите в отговорния участък на диска при двете изследвания са идентични. Честотите на теоретично определените моди съвпадат в количествено отношение. Направено е сравнение между

симулационните резултати, получени чрез предложения подход и серия експериментални резултати на качествен диск и диск с дефект тип „пукнатина“ с дълбочина 8 mm. На фиг. 5 а) са показани типичен цифров запис и амплитудно-честотен анализ на експериментално изследване на динамично поведение на невентилиран спирачен диск след импулсно въздействие [6]. Резултатите са получени софтуер e-ProLab, а точността за определяне на модите е в рамките на 3 – 5 Hz. На фиг. 5 б) е показано сравнение между относителното изменение на честотите на модите, получени чрез експеримент и сумалация чрез предложения подход за дълбочина на пукнатина 8 mm във фрикционния участък

на диска. Наблюдава се разлика в рамките на 0.01 – 0.11% за теоретичното относителното изменение на модите, получено чрез FEA по класическия начин и чрез прилагане на предложения подход. Разликата между теоретичните и експериментални резултати е в рамките на 0.14 – 0.4% и както е изяснено в [6], причините за



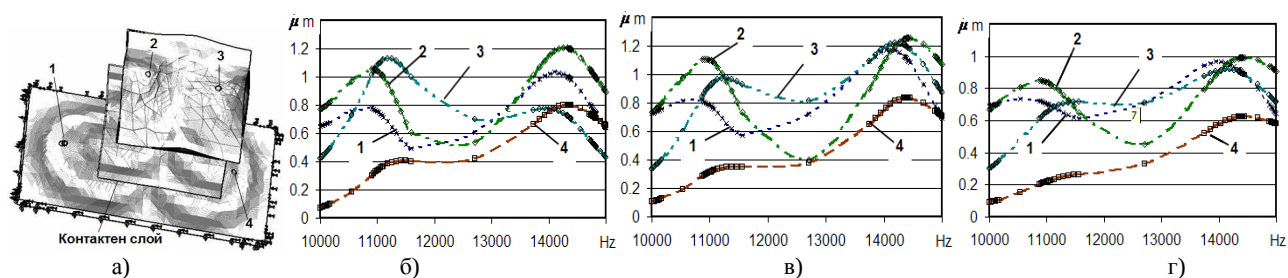
фиг. 4. Деформационно поведение на невентилиран спирачен диск с реални размери и на изследван участък от диска след заместване на част от конструкцията с еквивалентна маса и коравина за основни моди: а) – първа, б) – втора, в) – трета.



Фиг. 5. Типични сигнал и амплитудно-честотен спектър от експеримент със свободно окачени спирачни дискове (а) и сравнение за относителното изменение на модите при наличие на дълбочина на пукнатина 8 mm във фрикционния участък на диска (б), 1 – симулационно изследване на целия диск [6]; 2 – симулационно изследване на фрикционния участък чрез предложения подход; 3 – експеримент.

На фиг. 6 са показани резултати от изследване на виброакустичното поведение на вибросистема, съставена от два или повече контактуващи елемента. Системата е изследвана съгласно схемата на фиг. 1 г), като ламарината е изработена от обикновена стомана с дебелина е 10 mm, а уякчаващия участък – от епоксидна смола с дебелина 5 mm и ширина 50 mm. Контактния слой е с дебелина 0.5 mm и плътност 3000 kg/m^3 , модули на линейна и ъглова деформация, съответно, $2 \cdot 10^9$ и $8 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. Разгледани са три случая за коефициентите на демпфиране в контактния слой: $\eta = 0.02$, $\eta = 0.2$ и $\eta = 1$, изразяващи различно състояние в слоя и адхезия между свързаните материали, вкл. при наличие на окиси между тях. Размерите на изследвания участък са $100 \times 50 \text{ mm}$, симетрично разположени от двете страни на уякчаващия участък и са формирани в средата на SolidEdge. Предварително са определени собствените моди на изследвания участък и за първите две е установено, че се намират в диапазона 11000 – 14000 Hz. Системата е

натоварена по оста на симетрия и на разстояние 25 mm от уякчаването е приложена сила 100 N в точка 1 (фиг. 6 а) в честотния диапазон 10000 – 15000 Hz в средата на Solidworks/Cosmos. Изследвано е динамичното поведение в точките 1-4. Резултатите, получени чрез симулация са показани на фиг. 6 б), в) и г). Промяната на условията в слоя е причина за изменение на динамичното натоварване в отчетените точки. Увеличението на коефициентът на демпфиране в слоя за стойности значително превишаващи коефициента на демпфиране в основния метал е причина за нарастване на широчината и намаляване на амплитудите в областта на модите. От практическа гледна точка е удачно измерване на минимумите и максимумите на преместванията. Така например, за точка 2 отношението между максималните и минимални премествания за първа и втора мода са 3 пъти (9 dB) за $\eta = 0.2$ и 1.4 пъти (3 dB) и са перспективни за създаване на диагностични признаци. Установено е и честотно изместване на регистрираните моди в рамките до 3%.



Фиг. 6. Типични деформации и точките на измерване (а), и резултати от изследване на преместването при коефициент $\eta = 0.02$ - (б), $\eta = 0.2$ - (в) и $\eta = 1$ - (г).

4. Основни изводи от изследването

Изследването на системи със сложни геометрични форми може целенасочено да се опрости чрез условно разделяне на два участъка: отговорен (работен) и конструктивен (спомагателен). При теоретично изследване изменението на собствените моди от дефект с различна големина в някои случаи подробно може да се изследва само работния участък, а спомагателният да бъде заменен с еквивалентна маса и коравина. Това ще намали броят на изследваните елементи и ще ускори процеса на получаване на теоретичните резултати. В обосновани случаи работният участък може да бъде ограничаван чрез силно демпфиране на вълновите процеси по неговите краища и изследване на параметри на очакваните моди в този участък.

Предложеният подход е апробиран при изследване на дефект тип „пукнатина“ с дълбочина 8 mm във фрикционния участък на невентилиран автомобилен спирачен диск. Установено е добро сходство на резултатите от симулационно класическо изследване на диска с тези, получени след прилагане на подхода и чрез експеримент за значимите за безразрушителния контрол моди. Изследвани са параметри на моди на система от слоисти материали, вкл. с контактен слой с различен коефициент на демпфиране, изразяващи различно състояние в слоя. Установено е, че увеличението на коефициентът на демпфиране е причина за нарастване на широчината и амплитудите на възбудените моди. Част от тези закономерности са значими и могат да бъдат използвани за диагностика на състоянието на контактния слой.

Литература

1. Stephen A. Hambric. STRUCTURAL ACOUSTICS TUTORIAL Acoustics Today, October 2006.
2. J.A. Loya, L. Rubio, J. FernándeZ-Sa´ez Natural frequencies for bending vibrations of Timoshenko cracked beams. Journal of Sound and Vibration, vol. 290, n. 3-5, 7 mar. 2006. Pp. 640-653.
3. Димчев Коларов Машинни елементи.
4. Statical Energy Analysis (SEA). Compendium in Structure-borne Sound. Материал на Техническия университет в Берлин.
5. Миховски М. Комплексно използване на безразрушителните методи за изследване на структурата и физикомеханичните свойства на метални материали. Дисертация за присъждане на научната степен „доктор на техническите науки“, Институт по механика и биомеханика – БАН, София.
6. Коларов И. ВЛИЯНИЕ НА АНИЗОТРОПИЯТА НА МАТЕРИАЛА ВЪРХУ СОБСТВЕНИТЕ МОДИ НА МАШИНИ ЕЛЕМЕНТИ ПРИ ОЦЕНКА НА ТЯХНОТО КАЧЕСТВО.
7. Introduction to shock and vibration. Sound and Vibration Measurement. Brüel & Kjær 1998.

ВИБРО-АКУСТИЧЕСКО ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕВЕНТИЛИРАНИ АВТОМОБИЛНИ СПИРАЧНИ ДИСКОВЕ С ПОВЪРХНОСТНИ РАЗСЛОЕНИЯ

Иван Коларов

Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”

Ул. „Гео Милев” № 158, 1574, София

1. Въведение

В изследването са представени резултати от виброакустическо изследване на разслоения в невентилирани автомобилни спирачни дискове. Основание на изследването: срещани в експлоатацията разслоения в спирачните дискове в резултат на значителни температурни промени от интензивно нагряване до висока температура и бързо охлаждане от попаднала вода. Това причинява подповърхностни пукнатини в успоредно на триещите повърхнини стени на диска. Тези пукнатини в процеса на експлоатация нарастват, свързват се една с друга и при по-значително натоварване внезапно настъпва повърхностно разрушаване на диска. Следствието е загуба на пълна или частична спирачна способност на автомобила. В резултат на това благоприятният изход е транспорт на автомобила до автосервиз, а неблагоприятният – пътно-транспортно произшествие.

Хипотеза на изследването е възможността за акустико-резонансна диагностика на разслоения в спирачните дискове. Предварително е направено проучване на световния опит в областта на технологиите за производство и контрол на спирачни дискове. Типични методи за безразрушителен контрол с приложение и за контрол на спирачни дискове са ултразвуковия, радиоактивния, виброакустическия, вихротоковия. Често пъти качеството на продукцията се контролира чрез радиоактивния метод (напр. фирма YXLON), който е скъп метод (с надеждност около 50%), но даващ обективен документ за качеството на изделието. Затова чрез този метод обикновено се контролират избрани дискове от една партида. Фирмата Blum-Novotest GmbH представя автоматизирана система на за тестване на спирачни дискове. Дисковете се изследват чрез вихрови токове. Контролират се надлъжни и напречни повърхностни пукнатини практически във всички зони на диска, а времето за тестване е 14 s. Литературното проучване установи използването акустико-резонансния метод за контрол на качеството на спирачни дискове, в т.ч. изработени от карбонатни материали. Фирмата Vibrant NDT Ltd в сътрудничество с BLOODHOUND Engineering Team оценява риска за експлоатация на карбонови дискове чрез портативно устройство за виброакустическо тестване. Някои технически параметри на това устройство са: честотна резолюция – по-чувствителна от 1 Hz, прилагане на статистическа оценка на резултатите за диагностика на дисковете. В проспекта фирмата представя и графична зависимост за оценка на Q – фактора на дисковете. Ултразвуковия метод е срещан с приложение за оценка на карбонови дискове на стенд с помощта на C – scan дефектоскоп по метода на пропускането и компютризирана система за управление.

Цел на работата е да направи теоретична и експериментална оценка на разслоения чрез акустико-резонансния метод в често използвани в практиката невентилирани дискове от спирачната уредба на автомобили.

2. Постановка на изследването

Образците от дискове са изследвани теоретично чрез симулационно динамично натоварване в компютърна чертожна среда и експериментално чрез виброматрично и акустическо измерване на информационни параметри. Целта на симулационното изследване е принципно установяване на динамичното поведение в зоните около разслоенията, а на експерименталните изследвания – потвърждение на теоретичните резултати.

За провеждане на симулационното натоварване дисковете са конструирани с пълни подробности чрез в средата на Solid Edge и транслирани в средата на Solid Works, след което са анализирани чрез модула Cosmos. За целта на всички дискове е зададен еднотипен материал (лята стомана), създадена е ситна мрежа с минимална едрина, съответстваща на размерите на диска, но не по-голяма от едрината на дефектите. С помощта на мрежата дискът е разделен на крайни елементи, след което е проведено изследването.

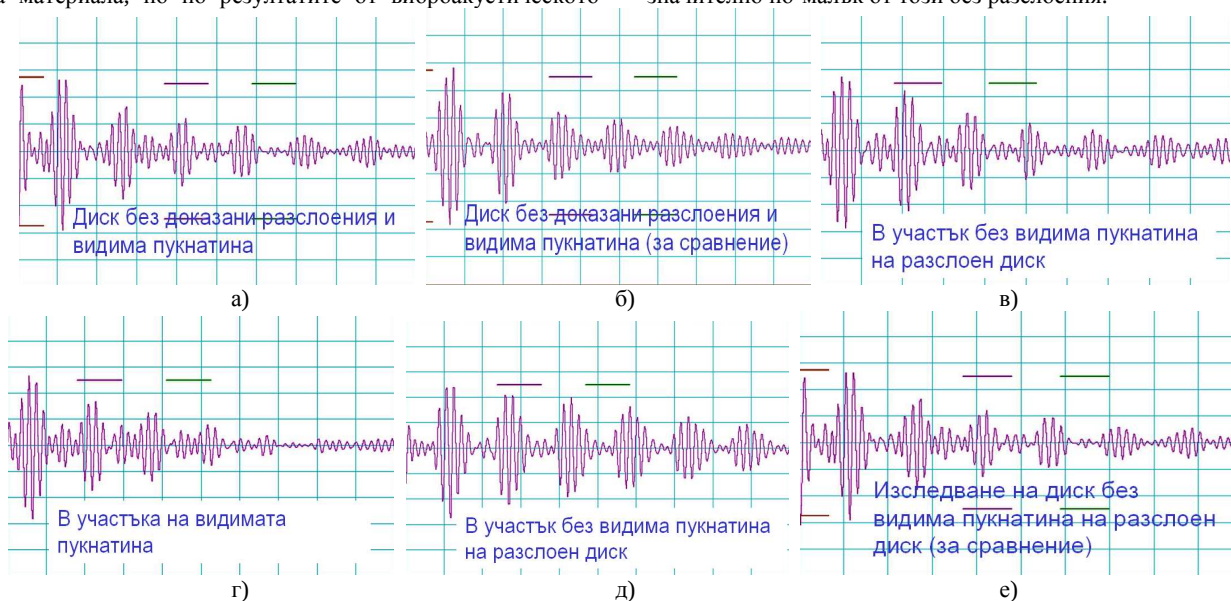
Чрез симулация са определени теоретично модите, основните информационни моди при фиксирано състояние на детайла, визуализирани са допълнителни моди в резултат на разслоенията.

Акустическите изследвания са проведени чрез измервателен микрофон с керамична мембрана и с линейна характеристика в диапазона 20 Hz - 20 kHz. Експерименталната проверка на честотната лента не потвърди характеристиката на производителя. Регистриран е повишено ниво на записа в рамките на 6 dB в областта 20 kHz, което ограничи изследванията до 18 kHz. Записът е извършен в цифров вид с резолюция 16 bit и скорост на регистрация, осигуряващ амплитудно-честотен анализ в горния диапазон. За избягване на ниско честотни шумове е приложена филтрация на сигналите до 500 Hz. Регистрира се едновременно в текущо време амплитудата на сигнала (във волтове) и амплитудно-честотната характеристика по максимални стойности на амплитудата в дискретни стойности на честотата.

Вибрации са измерени чрез сензор за регистрация на ускорения (акселератор), виброусилвател (виброизмервателна апаратура), записът е извършен в цифров вид чрез модул SIM2 и софтуер e-ProLab 2 при честота на записа 50 и 100 kHz. Връзката между модула SIM2 и компютъра е чрез серийния порт на компютъра. Амплитудно-честотната характеристика е направена чрез вграден модул в софтуера.

Предварително са експериментално изследвани дисковете и е установено минимални отклонения в едноименните им размери. Не е правен химически анализ на материала, но по резултатите от виброакустическото

изследване може да се твърди, че те са изработени от материали с различни физикомеханични параметри: коефициентът на затихване в дисковете с разслоения е значително по-малък от този без разслоения.



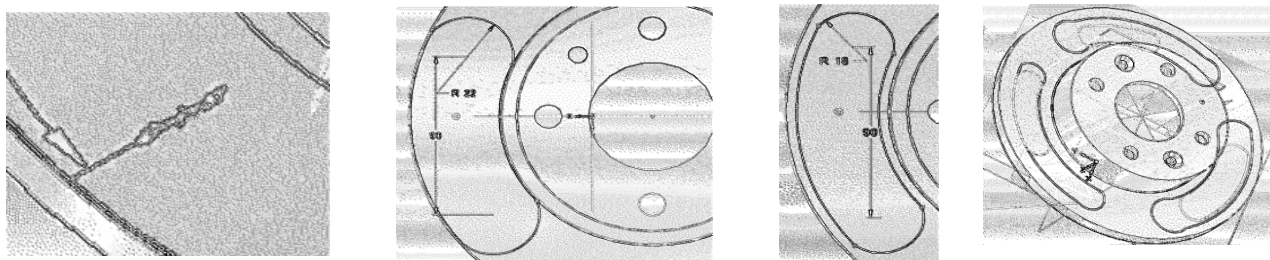
Фиг. 1. Типични резултати от ултразвуково изследване на фрикционната част на дисковете; а) и б) – диск без доказани разслоения, в) и г) – диск с доказани разслоения и повърхностна пукнатина, д) и е) – диск с разслоения, но без видима пукнатина.

Всички дискове са свалени от употреба. Два от дисковете са експлоатирани едновременно и причините за демонтиране от автомобила са своевременно забелязани повърхностни разслоения поне в единия от тях. Проведени са ултразвукови изследвания на фрикционните участъци от дисковете. Използван е сензор с честота 2 MHz и диаметър на пиезопластината 25 mm за генериране и приемане на сигнали. Към сензорът е подаван филтриран на честота 2,5 MHz сигнал от цифров дефектоскоп. Експерименталните резултати са показани на фиг.1. Установени са различия на коефициенти на затихване в дисковете по големината на отразените еха. За наличието на разслоенията в дисковете се съди по възникването на допълнителни еха между основните дънни еха и по форма на сигналите от различни участъци на дисковете. Изображение на диск с разслоения и външна пукнатина е показано на фиг. 2 а, а момент от изследване на дисковете след запъване на преса е показан на фиг. 2 б.

На фиг. 3 са показани формата на симулираните в дисковете дефекти с дебелина 0.2 mm, съответстваща приблизително на дебелината на установените видими разслоения. Разработени са четири варианта, като за сравнение отклонението в първият е повърхностна пукнатина с дължина около 14 mm (съответстваща на забелязаната видима пукнатина). Вторият вариант е формулиран като разслоение на дълбочина 0.2 mm и форма на част от пръстен с диаметрална разлика 44 mm. Разслоението има заоблени краища и е образувано от завъртането на окръжност с радиус 22 mm. Разстоянието между центровете на двете крайни положения на окръжността е 90 mm. Вариант 3 е подобен на вариант 2, но широчината на разслоението е 36 mm. Разслоенията и в двата варианта са формирани от страната на фланеца, подобно на повърхностната пукнатина в дефектирания диск. Във вариант 4 са формирани подповърхностни разслоения с различни размери и от двете страни на фрикционната част на диска.



Фиг. 2. Изображение на диск с доказани разслоения и видими повърхностни пукнатини (а) и момент на изпитване на фиксиран диск (б)



а) - Вариант 1

б) - Вариант 2

в) - Вариант 3

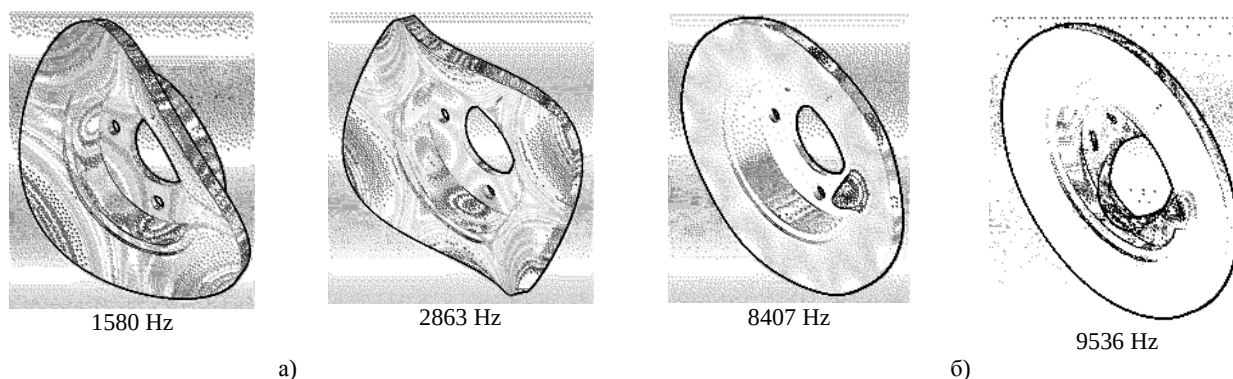
г) - Вариант 4

Фиг. 3. Форма и някои размери на симулираните разслоения в дисковете.

С така изложените изкуствено формирані дефекти в дисковете са определени собствените им моди в свободно състояние и при запъване. Запъването се реализира по фланеца на диска, чрез което се имитира неговото състояние след монтиране върху барабаните на моста на автомобила. В това запънато положение диск с разслоение 2 е динамично изследван с хармонично променяща се сила с амплитуда 50 N и честота в диапазона 1000 – 8000 Hz. Силата е приложена в участък без разслоение и на ъгъл около 160° от него. За преодоляване несъответствията между местоположенията на желаното силово въздействие и участъка на изследваното динамично поведение в дисковете са създадени допълнителни площадки с дебелина 0.1 mm и диаметър 2 mm с цел по-точно симулационно измерване.

3. Резултати от изследването

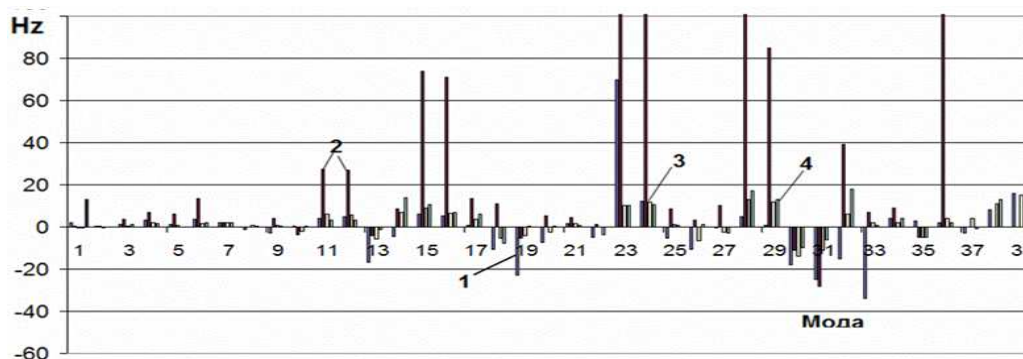
Типични резултати от изследване на деформациите на дисковете с разслоение 2 и 3 при някои моди са показани на фиг. 4 а и б. Налице са основни моди, като тези с честота 1580 Hz и 2863 Hz и др., които се променят съобразно с изменението на коравината на машинния елемент. В същото време при други (например тези с честоти 8407 Hz за диск вариант 2 при които деформира изключително зоната около разслоението. При други моди, например с честоти 9536, Hz за диск вариант 2 зоните около разслоенията деформират заедно с целия обем на дисковете като на практика предизвикват повишено звуково налягане, респективно, изменение на амплитудите на вибрации в тези зони.



а)

б)

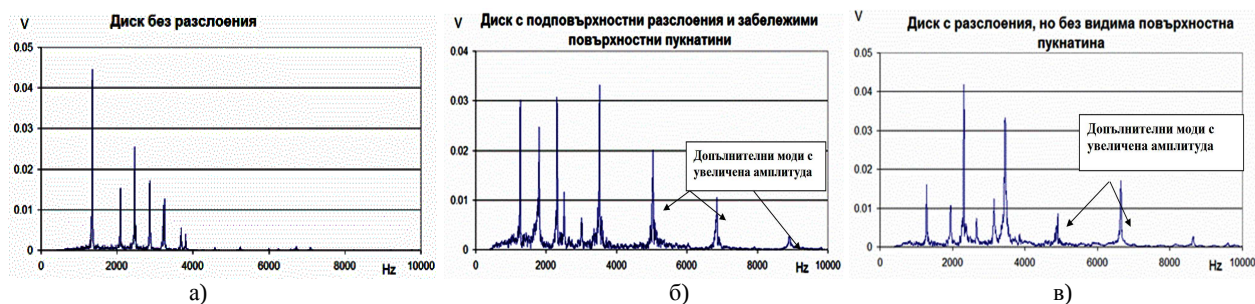
Фиг. 4. Деформации на свободен диск вариант 2 при някои моди; а) – деформации характерни за всички дискове (разслоен и неразслоен); б) – специфични деформации, дължащи се на разслоението.



Фиг. 5. Честотно изменение на модите в зависимост от изследваните дефекти, получено чрез симулация; 1 - измененията на модите на диск с пукнатина 0.2 mm; с 2, 3, 4 са означени измененията на модите на дисковете варианти 2, 3, 4.

На фиг. 5 са показани резултати за относителното изменение на модите на дискове варианти 1, 2, 3, 4. Очаквано съобразно вече изложените резултати за диск с дефект, имитиращ пукнатина, модите при вариант 1 имат незначително изменение, което е по – малко от влиянието на други фактори (допуски на размерите, анизотропия на

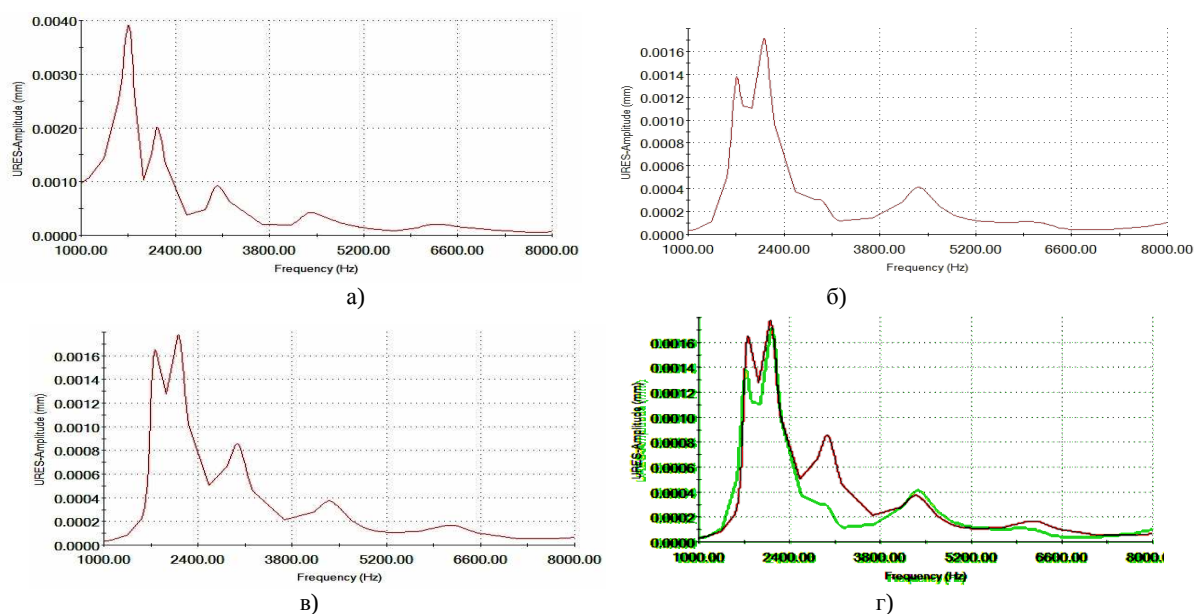
матерала, точност на измерване на честотите и др.) върху тяхната стойност. Модите от 1 до 13 (и с честоти в диапазона до 5 – 6 kHz) имат максимално изменение в размер на 18 – 22 Hz. За моди с номера подред 23, 24, 28, 29 и др. са установени теоретични изменения в рамките на 100 Hz.



Фиг. 6. Резултати от акустическо експериментално изследване на собствените моди за свободно окачени дискове с различно техническо състояние.

На фиг. 6 а), б) и в) са показани акустически изследвания на спирачните дискове с различно техническо състояние, свободно окачени на идеално гъвкава нишка. Приложен е единичен импулс върху дисковете, с което са възбудени звукови налягания около

тях с приблизително еднаква интензивност. Забелязва се, че в честотната зоната над 4000 Hz за дисковете с наличие на разслоения са регистрирани амплитуди със значително по-голяма амплитуда.

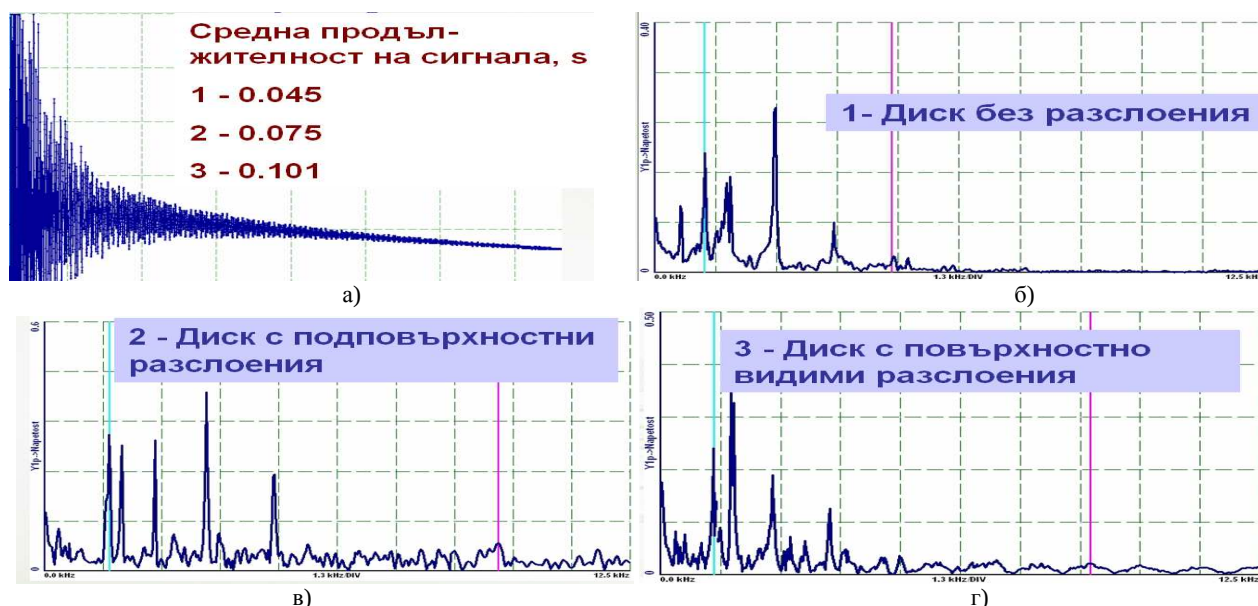


Фиг. 7. Динамично поведение на диска; а) под външно приложената сила в участък без разслоение, б) под силата в участък над разслоението, в) в страни от силата в близост до разслоението, г) – графично сравнение между резултатите от б) и в).

Резултатите от симулационно изследване на запънат по фланеца за монтаж диск са показани на фиг. 7. Установено е различно поведение на изследваните локални области в зависимост наличието на разслоения и местоположението на измерването в диск с разслоения. Наличието на разслоение променя динамичното поведение в локалните зони, а така също и на големината на регистрираните амплитуди.

На фиг. 8 са показани експериментално изследване на модите във фрикционния участък на дисковете, получени при тяхното запъване на преса. В участъка за монтиране на дисковете към спирачните барабани на автомобила е приложена статична сила с големина 190 – 200 kN (фиг. 2 б). Резултатите са получени чрез измерване на вибрациите чрез акселерометър и вибро-измервателна апаратура. Вибросензорът е поставен върху фрикционния участък на диска и закрепен с тънък слой твърда смазка. Върху дисковете е въздействано импулсно чрез предмет с висока резонансна честота (извън измервания диапазон), така че амплитудата на сигналите да бъде съпоставима по големината.

Измерена е средната продължителност на регистрираните сигнали и са установени времената за вариантите 1, 2 и 4 (фиг. 7 б, в и г) съответно 0.0452, 0.0753 и 0.101 s. На базата на този факт, може да се твърди, че изследваните дискове са изработени от материали с различно вътрешно триене. Получените резултати потвърждават резултатите, записани чрез микрофон и получени чрез свободно окачени дискове. И при двата вида изследване се забелязват амплитуди с по-висока от 4 kHz честота, което е удачно да се използва като индикатор за наличие на разслоения в дисковете. Генерираните сигнали от дисковете в запънато състояние са изследвани и чрез микрофон. Времето за запис е в рамките на 50 ms, което е минималната стойност на използвания софтуер. В рамките на изследването е установено значително акустическо замърсяване на резултатите. Замърсяването би могло да се дължи на трептящи системи, които са част от пресата и са възбуджани едновременно със запънатите дискове.



Фиг. 8. Сравнение между собствените честоти на фланеца в дискове с различна степен на разслояване.

3. Анализ на резултатите и изводи от изследването

На направените симулационни и експериментални резултати са получени следните по-важни резултати:

- Акустико-резонансния метод е подходящ за диагностиката на разслоения в автомобилни спирачни дискове;

- Наличието на разслоения предизвиква възникване на нови моди с по-висока честота, дължащи се на локални около разслоенията резонансни явления;

- При тестване на дисковете в монтирано състояние чрез акустически методи е възможно да възникнат нежелателно акустическо замърсяване, факт установен в лабораторни условия;

- За нуждите на диагностиката на разслоения с цел подобряване на точността на измерването е подходящо изследването на локалните моди в зоната на измервателния сектор.

На базата на получените резултати е удачно създаването на технология за превантивна диагностика на разслоения във фрикционния участък на невентилирани спирачни дискове за автомобили.

Благодарности: Този доклад е създаден в рамките на проект „Иновационен резонансен метод за безрушителен контрол на машинни елементи в транспортното машиностроене“, финансиран от Висшето транспортно училище „Тодор Каблешков“.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА АКУСТИЧНА ИМПУЛСНО - ДОПЛЕРОВА ИЗМЕРВАТЕЛНА СИСТЕМА СЪС СИНТЕТИЧНА АПЕРТУРА

AN EXPERIMENTAL ACOUSTIC SYNTHETIC APERTURE PULSE-DOPPLER MEASUREMENT SYSTEM

ДОЦ. Д-Р Н. Ж. КОЛЕВ, ИНЖ. П. В. ИВАНОВ

Висше военноморско училище „Н. Й. Вапцаров“ - Варна, България, nzkolev@abv.bg, ivanov5ar@abv.bg

Abstract

An experimental test tank pulse measurement system is proposed. A model for the 2D pulse Doppler signal in a bistatic setup with „start-stop” approximation of the process is developed. A Model for the Doppler frequency relation with scene spatial coordinates is presented. Results from real sonar test tank Doppler measurements are discussed.

Keywords: Pulse-Doppler , synthetic aperture, sonar, test tank.

УВОД

Ефектът на Доплер се използва широко в различни по предназначение морски и корабни хидроакустични системи с военно и гражданско приложение. Във военноморски хидроакустични системи намира приложение за класификация на контакта с подвижни цели при активна хидролокация и компенсация на корабния доплеров ефект предизвикан от движението в подкилни системи. Доплеровият лаг е основен корабен електро-навигационен прибор за измерване на скоростта на кораба спрямо прилежащата морска водна среда. Широко се използва за намиране на скоростта на морски течения в морски океанографски системи и прибори.

Най-съвременен вид сензорни активни системи са импулсно доплеровите системи, които са намерили приложение както в специализираната медицинска диагностична апаратура и неразрушителния контрол на материали, така и в радиолокацията и хидроакустиката. За разлика от радиолокацията където импулсно доплеровите кохерентни системи са на разположение от 50-те години на миналия век и в момента се счита, че са достатъчно развити, както технологично, така и по отношение на методите за обработка на сигнала, в областта на хидроакустиката те все още се изследват във връзка с приложението им при сонари със синтезирана апертура на подводни автономни апарати [3].

Импулсно доплеровите системи позволяват синтез на изображения на обекти в радиолокацията и хидроакустиката на основа на прецизно кохерентно измерване на разсеяните сигнали от отделните блестящи точки на обектите при обработка на достатъчен брой последователни отразени импулси от сцената предмет на наблюдение. Разрешението на тези системи в напречна посока (перпендикулярна на посоката на излъчване) се определя от ширината на диаграмата на насоченост на антената. При използване на антена с реална апертура това е ограничително условие, още повече, че разрешаващата способност при това намалява с увеличаване на разстоянието между излъчвателя и сцената предмет на

изследване. Това ограничение се преодолява за сметка на синтеза на виртуална (синтезирана) апертура на антената при взаимното изместване между сцената и антената на системата. Разрешението в надлъжна посока се повишава чрез използването на кратковременни импулси или разширяване на спектъра чрез импулси с вътрешно импулсна модулация (честотна или фазова).

Съществено ограничение на импулсно-доплеровите системи в измерването на доплеровата честота в сравнение със системите с непрекъснато излъчване се налага от честотата на повторение. Тъй като импулсите са кратки, за измерване на доплеровата честота се използва натрупването на дефазирание между импулсите в импулсна поредица с достатъчна продължителност. Максималната доплерова честота, която може да бъде измерена еднозначно е половината от честотата на повторение на излъчваните импулси. Основната разлика между радарите и сонарите със синтезирана апертура е необходимостта от решетка от хидрофони при приемане на отразените звукови сигнали, тъй като скоростта на звука във водата в сравнение със скоростта на електромагнитната вълна във въздушна среда е много по-малка, което обуславя по-малката честота на повторение на импулсите [1]. Това от своя страна води до изискване за много по-малка скорост на движение за да се получи еднозначно изображение. За оптимален апертурен синтез пространствената дискретизация трябва да се извършва на стъпки много по-малки от половината дължина на вълната - $\lambda/2$, съответстваща на максимална пространствена честота - $2/\lambda$. За единичен приемник това съответства на максимално ограничение в скоростта на движение $\lambda/(2T)$, където T е периода на повторение на импулсно доплеровата система. На практика това води до появата на странични листи в изображението и за подобряването му се изисква много по-малък период на повторение или респективно много по-висока пространствена честота на дискретизация. Някои от първите експериментални приложения за формиране на подводни изображения със синтезирана апертура в

института IFREMER (Institut Francais de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) са описани в [2].

Методология и алгоритми за формиране на изображения чрез хидрофонна приемна решетка както и реални изображения на подводни обекти, формирани със сонара със синтезирана апертура на автономния подводен апарат HUGIN AUV са представени в [3]. Значителен интерес е насочен към формиране на изображения на подводни обекти чрез синтезирана апертура в лабораторни хидроакустични басейни [4,5]. Формирането на изображения чрез апертурен синтез е възможно не само с насочени но и с ненаочени антени [8].

Основни задачи, които се поставят за реализация на експериментална импулсно доплерова система за синтез на изображения в хидроакустичния басейн на ВВМУ е разработването на математически модел на измерването, генерирането и записването на кохерентна последователност от импулси, излъчени при взаимно движение между ХА системата и обектите в сцената, предмет на наблюдение, построяване на матрица на приетите сигнали и оценка на някои техни параметри свързани с движението на системата и формирането при това на синтезирана апертура. Анализът на матрицата на приетите сигнали води до определяне на доплеровата скорост на подвижна система и в последствие е предпоставка за построяване на изображение.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ИМПУЛСНО - ДОПЛЕРОВ СИГНАЛ И МЕТОД ЗА ОБРАБОТКА

Известно е, че при подвижен източник на звук честотата на приетия сигнал се променя в следствие на ефекта на Доплер. При импулсно доплеровите системи доплеровата честота се определя чрез измерване на фазовата разлика между излъчена кохерентна импулсна последователност и отразените (предадените през средата) сигнали [6].

1.1. МОДЕЛ НА ИМПУЛСНО-ДОПЛЕРОВ СИГНАЛ

Нека дистанцията от предавателя до приемника $r(t)$ е функция на времето и радиалната скорост е $v_r(t) = \frac{d}{dt}r(t)$. В следствие на движението, закъснението на звуковия импулс $\tau(t)$ също е функция на времето, където с t се дефинира времето при приемника. Излъченият сигнал на импулсно доплеровата система има вида [6]:

$$(1) \quad s_t(t) = A_t E(t) \cos(\omega_0 t) = \Re\{A_t E(t) \exp(j2\pi f_0(t))\}$$

където A_t е амплитуден множител пропорционален на излъченото звуково налягане, $E(t)$ е функцията на обвиващата на излъчения сигнал. Идеален точков отражател ще създаде закъсняла реплика на излъчения сигнал в местото на приемника:

$$(2) \quad s_r(t) = \Re\{A_r E(t - \tau) \exp(j2\pi f_0(t - \tau))\}$$

където времезакъснението за бистатична система е

$$\tau = \frac{r_1 + r_2}{c},$$

Където r_1 и r_2 са съответно разстоянията от предавателя до целта и от целта до приемника. За директен сигнал времезакъснението се определя само от разстоянието от предавателя до приемника. При импулсна последователност излъченият сигнал има следния вид:

$$(3) \quad s_t(t) = \Re\{A_t E(t) \exp(j2\pi f_0(t + mT))\} \quad m=1, \dots, M,$$

където T е периодът на дискретизация (периодът на излъчване на импулсната поредица), а M е броят на излъчените импулси.

Приетият сигнал е закъсняла реплика на излъчения звуков импулсен сигнал.

$$(4) \quad s_r(t) = s_t(t + mT - \tau(t)) = \Re\{s_t(t - \tau(t)) \exp(j2\pi f_0(t + mT - \tau(t)))\}$$

Съществено значение при моделирането има анализа на функцията на доплеровата честота.

1.2. ФУНКЦИЯ НА ДОПЛЕРОВАТА ЧЕСТОТА

Доплеровата честота се дефинира [7]:

$$(5) \quad F_0(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} [2\pi f_0 \tau(t)] = f_0 \frac{d}{dt} \tau(t)$$

Ако радиалната скорост на източника е толкова малка, че местоположението му в момента на излъчване и местоположението му в момента на приемане са много по-малки от дължината на звуковата вълна, преместването за времето на разпространение на звуковата вълна може да се пренебрегне. Тогава може да се счита че източникът е спрял за времето на излъчването и приемането на звуковия импулс (и това на практика няма да промени честота на приетия импулс спрямо излъчения). Движението се възстановява със същите параметри на скоростта след приемането на импулса. Това е така наречената „старт-стоп” апроксимация на процеса в импулсно доплеровата система.

В този случай $\tau(t) \approx \frac{v_r(t)}{c_0}$, като се пренебрегва, че в

момента на приемането разстоянието е малко по-различно от разстоянието в момента на излъчването $r(t)$. При това

$$\text{предположение} \quad \frac{d}{dt} \tau(t) = \frac{v_r(t)}{c_0} :$$

Доплеровата честота тогава е:

$$(6) \quad F_0(t) = f_0 \frac{v_r(t)}{c_0} = \frac{v_r(t)}{\lambda}$$

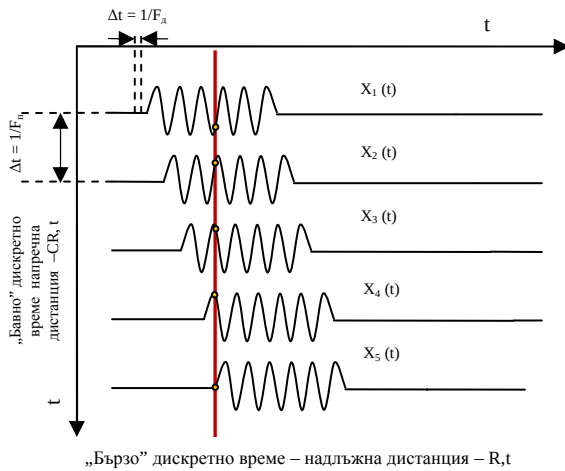
$$\text{като } \lambda = \frac{c_0}{f_0}$$

В настоящето изследване се приема „старт-стоп” апроксимацията на физическия процес при импулсно доплеровата система, доколкото реализираните скорости на движение на предавателя и периодът на дискретизация на пространствения сигнал в напречна посока са достатъчно по-малки в сравнение с дължината на генерираната акустична вълна. Така движението би е отразило като постепенно изменение на началната фаза на приетите импулсни сигнали без да се отрази на изменение на носещата честота на приетия сигнал (или това изменение е пренебрежимо).

1.3. МАТРИЧНО ПРЕДСТАВЯНЕ НА ПРИЕТИЯ СИГНАЛ

Структура на двумерна матрица построена на основа на приетия сигнал на носещата честота на импулсната система е представена на *фиг.1*. За формиране на двумерната сигнална матрица може да се използва както записан сигнал на носещата честота, така и сигнал след преобразуване на честотата, при невъзможност да се извърши директна дискретизация на носещата честота, например след преобразувател на честота и квадратурен

кохерентен детектор представен със синусна и косинусна съставни на резултатната обвиваща.



Фиг.1. Двумерна матрица на сигнала в неподвижен приемник създаден от подвижен предавател на кохерентна последователност високочестотни импулси с правоъгълна обвиваща

Сигналите от извадките $X_1(t)$, $X_2(t)$, ..., $X_5(t)$ се подреждат в двумерна матрица. Сигналите по т.н. „бърза“ надлъжна дистанция се състоят от дискретни стойности на приетия сигнал по време, предизвикан от един излъчен импулсен сигнал. Периодът на дискретизация на тези сигнали, $\Delta t = 1/F_d$, се определя от ширината на спектъра по време на излъчения сигнал и е сравнително малък за кратковременни импулсни сигнали¹.

Сигналите, които се използват за определяне на скоростта на подвижния предавател се състоят от дискретни стойности на приетия сигнал, за едно и също дискретно времезакъснение, съответстващо на една и съща надлъжна дистанция (срез на сигналната матрица по вертикалната линия на фиг. 1). Тези сигнали са подредени по т.н. ос на „бавно“ време с период на дискретизация определен от честотата на повторение на импулсната система² - $\Delta t = 1/F_n$. Този характерен сигнал определя т.н. **пространствена Доплерова честота**. Общото време за формиране на двумерната сигнална матрица се нарича още **кохерентен интервал на обработка**³.

Приетите сигнали подредени в двумерна матрица представляват интерес за обработка в сензорни системи с различно предназначение. Едно от възможните приложения например е, чрез въвеждането на подходящи времезакъснения, да се достигне до кохерентното им сумиране и по такъв начин увеличаване на отношението сигнал/шум, използвайки парадигмата за кохерентен интервал на обработка или кохерентно интегриране. Друго приложение на двумерната сигнална матрица е разглеждането и като пространствено времева матрица, предполагаща многоканална пространствено-времева обработка на сигнала. Трето приложение е синтеза на изображение на сигнала, което по същество също е пространствено времева обработка и използване на

принципа на синтезираната апертура за повишаване на разрешаващата способност по **напречна дистанция**. В настоящата статия се цели изследването на пространствения доплеров спектър и измерване на скоростта на движение на обект, която е проектирана в различното времезакъснение на приетите импулсни сигнали спрямо референтно начало на отчета.

2. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

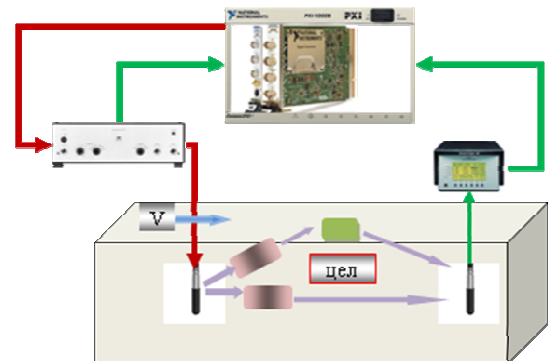
Създаден бе виртуален инструмент за генериране, запис на импулсна последователност и движение в същото време на предавателната антена в ХА басейн на ВВНУ на основа на наличната измервателна апаратура. Схемата на опитната постановка е представена на *фиг. 2*

При експеримента се реализира линейна скорост на движение на предавателната система $V = 0.057 \frac{m}{s}$. Ако се

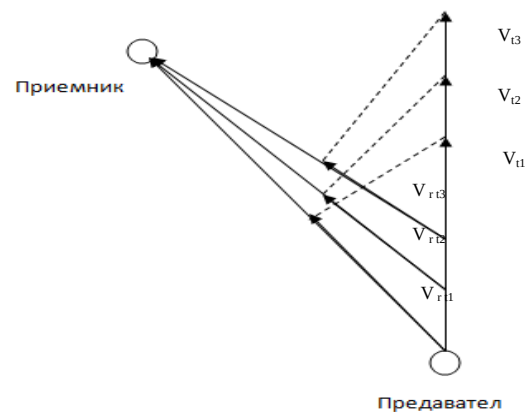
приеме, че движението е по посока на приемника това би генерирало доплерова честота -

$$F_0(t) = f_0 \frac{v_r(t)}{c_0} = \frac{v_r(t)}{\lambda} = \frac{0.057}{0.03} = 1.9, Hz.$$

Тази малка Доплерова честота би била възможно да бъде измерена при единичен сигнал със значително по-голяма продължителност от продължителността на използваните импулсни сигнали – 100 μs и единствената възможност за измерване на кратковременни сигнали е да се използва фазовото изместване в последователност от импулсни сигнали представено на *фиг.1*. На *фиг. 3* е представен модел на изменението на радиалната скорост при реализираната скорост на движение в експеримента в приемник изместен от направлението на движение.



Фиг. 2 Схемата на експерименталната постановка в хидроакустичния басейн на ВВНУ

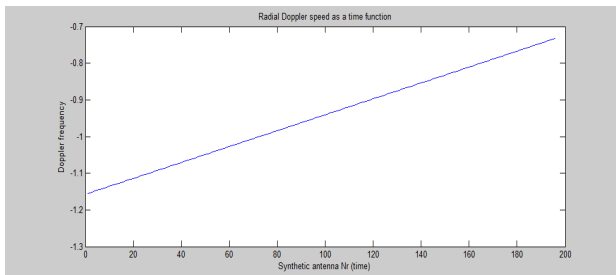


Фиг. 3.1 Модел на изменение на радиалната скорост

¹ При експерименталните изследвания е използвана честота на дискретизация $F_d = 400000$ Hz за импулсни сигнали с продължителност 100 μs .

² Периодът на повторение на импулсната последователност е $\Delta t = 25$ mS.

³ Coherent processing interval - CPI.



Фиг. 3.2 Графика от модел на MATLAB на изменението на радиалната скорост при линейно движение между предавателя и приемника

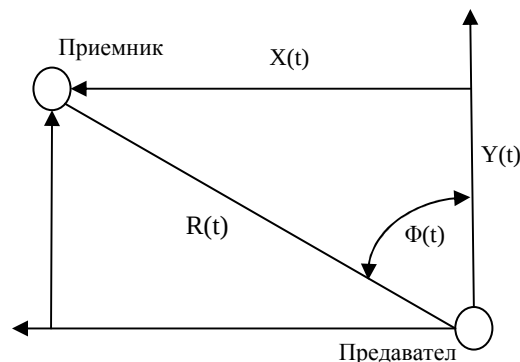
2.1. ВРЪЗКА МЕЖДУ ИЗМЕРЕНАТА ДОПЛЕРОВА ЧЕСТОТА И ПРОСТРАНСТВЕНИТЕ КООРДИНАТИ

Възможността да се измери доплеровата честота (6) създадена от движението на излъчвателя може да послужи за построяване на изображение на приетия сигнал като функция на две ортогонални пространствени координати $x(t)$ и $y(t)$ при известно разстояние $R(t)$. Доплеровото изменение на честотата $F_D(t)$ е функция на пространствените координати – фиг. 4:

$$(7) \quad F_D(t) = \frac{v_r(t)}{\lambda} = \frac{v(t)}{\lambda} \cos[\varphi(t)] = \frac{v(t)}{\lambda} \frac{y(t)}{R(t)}$$

От (7) следва:

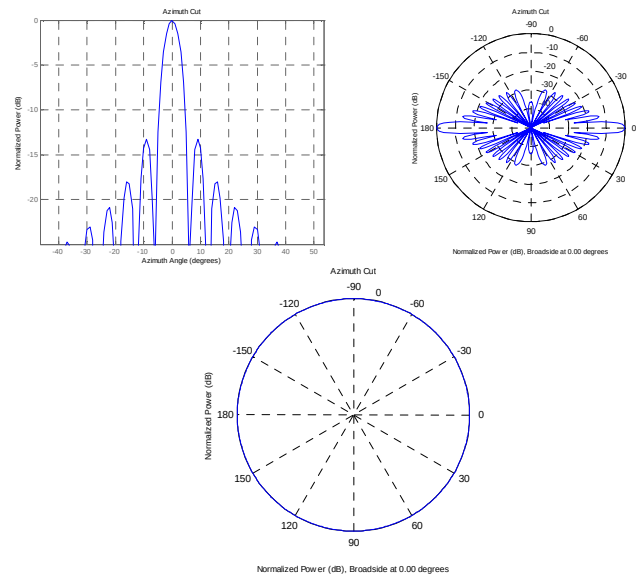
$$(8) \quad y(t) = \frac{F_D(t)\lambda}{v(t)} R(t), \quad x(t) = \sqrt{R(t)^2 - y(t)^2}$$



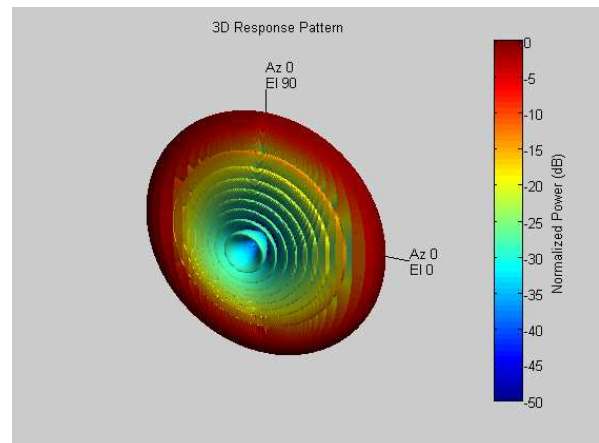
Фиг. 4. Двумерна пространствена координатна система

2.2. МОДЕЛ НА СИНТЕТИЧНА ЛИНЕЙНА АНТЕННА РЕШЕТКА ФОРМИРАНА ОТ ДВИЖЕНИЕТО

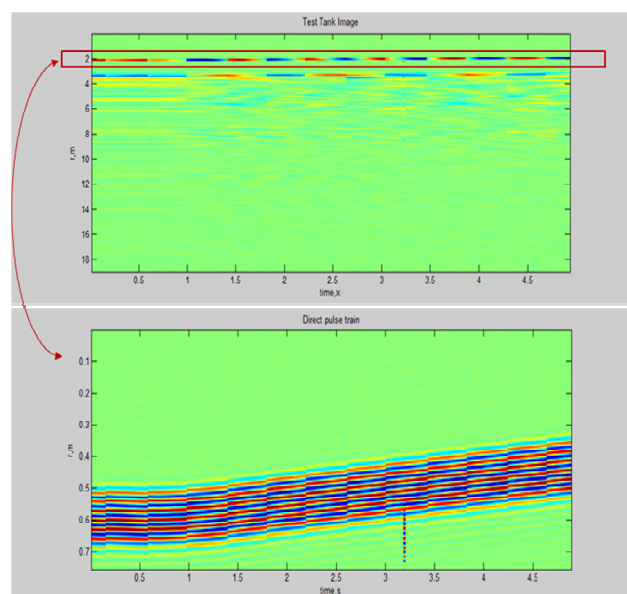
Посредством движение на моста на позициониращото устройство на ХА басейн се синтезира изкуствена апертура на линейна антенна решетка с дължина $L_a = 0.28, m$ и брой на елементите 196. При това се реализира разстояние между елементите на еквилиантната решетка $d = \frac{L_a}{n} = \frac{0.28}{196} = 0.0014, m$. С тези параметри се моделира на MATLAB диаграмата на насоченост на синтетичната антенна решетка. Диаграмата на насоченост на антенната решетка е представена на фиг.5 и фиг. 6.



Фиг. 5 Диаграма на насоченост на единичен елемент и множител на насоченост на линейна еквилиантната система от 196 ненасочени елемента



Фиг. 6. Теоретична тримерна диаграма на насоченост на синтетичната антена

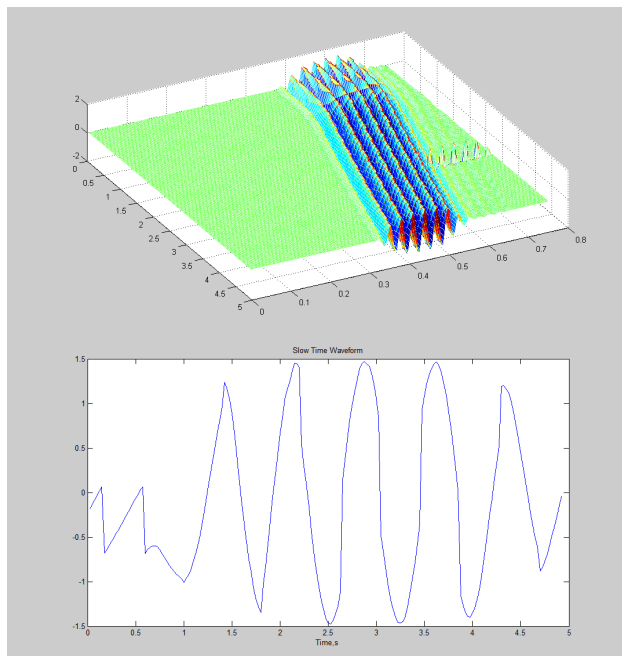


Фиг. 7 Експериментални импулсни последователности.

За апертюра по-дълга от дължината на вълната условието за измерване в далечната зона се изпълнява за дистанции от

$$r \geq \frac{L_a^2}{4\lambda} = \frac{0.28^2}{4 * 0.03} = 0.65m$$

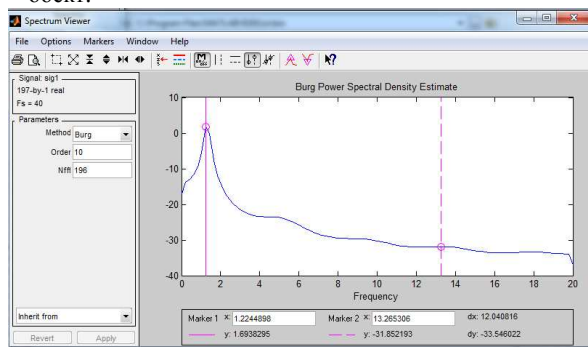
Експериментални резултати за записани импулсни последователности и спектрална оценка на доплеровата честота са представени на *фиг. 7, фиг. 8 и фиг. 9.*



Фиг. 8 Тримерен вид на импулсната последователност на директната звукова вълна и срез на импулсната последователност за едно и също разстояние.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработена е експериментална импулсно - доплерова измервателна система.
- Моделирано е влиянието на ефекта на Доплер при импулсно-доплеровата измервателна система.
- Представена е връзка между измерената доплерова честота и пространствените двумерни координати на обект.



Фиг. 9 Оценка на спектралната плътност с метод на Бърге на MATLAB, показваща Доплеровата честота.

- Моделирана е линейна еквиливантна синтезирана антенна решетка вследствие на линейното движение на предавателя по отношение на приемника на системата.
- Разработената импулсно-доплерова система се разглежда като базова за осъществяване на бъдещи натурни експерименти за апертурен синтез на изображения на подводни обекти в условията на хидроакустичния басейн на ВВМУ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Hayes M., P. Gough, Synthetic Aperture Sonar: A Review of Current Status, *IEEE Journal of Ocean Engineering*, Vol. 34, No.3, July 2009, pp. 207-224;
- [2]. Alais P., P.Cervenka, P.Challande, P. Janvrin, J. Marchal, Two underwater examples of imaging by multi-look synthesis., *Proceedings of the Twenty-Fifth International Symposium on Acoustical Imaging*, edited by Michael Halliwell and Peter N. T. Wells, Vol. 25., 2001, Kluwer Academic Publishers, pp.217-224, ISBN 0-306-46516-7;
- [3]. Hansen R., Introduction to Synthetic Aperture Sonar, *Sonar Systems*, edited by N. Kolev, InTech, pp.1-28, ISBN 978-953-307-345-3;
- [4]. Sammelmann G., Simulation, Beam-forming, and Visualization of Bistatic Synthetic Aperture Sonar, *Technical Report, Naval Surface Warfare Center Panama City Division, Code X11,110 Vernon Avenue, Panama City, FL, 32407-7001*;
- [5]. Follett J. L., J.Stroud, P.Malvoso, J. Lopes, R. Lim, Study of Multiaspect and Multistatic Sonar Systems Using a Small-Scale Test Bed, *Technical Report, Naval Surface Warfare Center Panama City Division, Code X11,110 Vernon Avenue, Panama City, FL, 32407-7001*;
- [6]. Klemm R., Principles of space-time adaptive processing, IEE 2002, ISBN 0 85296 172 3;
- [7]. Ender J., Introduction to Radar, Scriptum of a lecture at the Ruhr-Universitat Bochum;
- [8]. Ali F., A.Urban, M.Vossiek, A Short Range Synthetic Aperture Imaging Radar with Rotating Antenna, *Intl Journal of Electronics and Telecommunications*, 2011, vol. 57, no. 1, pp. 97-102.

СИНТЕЗ НА АКУСТИЧНО ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ПОДВОДЕН ОБЕКТ С ПОМОЩТА НА НЕПОДВИЖЕН ПРИЕМНИК И ПОДВИЖЕН ИЗЛЪЧВАТЕЛ

SYNTHETIC IMAGE OF UNDERWATER ACOUSTICAL OBJECT WITH FIXED RECEIVER AND MOVING TRANSMITTER

ИНЖ. П. В. ИВАНОВ, ДОЦ. Д-Р Н. Ж. КОЛЕВ,
Висше военноморско училище „Н. Й. Вапцаров“, Варна

ivanov5ar@abv.bg

nzkolev@abv.bg

Abstract

This paper describes an application of synthetic aperture imaging method for detection and location of the objects with acoustic field. Experimental results for detection of a real object with this method in a test tank are presented.

Keywords: acoustic field, multistatic, Fourier transform, synthetic aperture imaging

УВОД

Изучаването на определена част от пространството е задача, която се решава с помощта на технически средства, предназначени за тази цел и обикновено се нарича „наблюдение“. Най-често целта на наблюдението е да се установи дали в това пространство има обекти и да се определи тяхното местоположение. Един от начините, които се прилагат за извършване на наблюдение е като се използва вълново поле, което да взаимодейства с обектите, намиращи се в това пространство, или се излъчва от тях. Измервайки определени параметри на това поле се установява дали то е действало с обект и къде се е намирал той. По този начин представянето на това взаимодействие показва влиянието на обекта върху физическото поле, като функция на пространствените координати и често бива наричано “синтез на изображение” на този обект. Какво поле ще бъде използвано зависи от средата, в която то ще се разпространява и от обектите, с които ще взаимодейства. Начините и методите за обработка на получените данни за параметрите на използваното поле са идентични, независимо от неговата физическа същност. За водна среда могат да се използват различни физични полета, но много от тях имат ограничено пространствено приложение и основно се прилага звуково поле за наблюдение на големи пространства.

1. СИНТЕЗ НА ХИДРОАКУСТИЧНО ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ПОДВОДЕН ОБЕКТ

Синтезът на изображение на обект може да бъде извършен по много начини и зависи от задачата, която трябва да бъде решавана, от това как се провежда наблюдението и от вида на изобразяваната информация. Когато имаме неподвижен обект и подвижна станция за наблюдение се прилага метода за синтезирана апертура за да може да се повиши нейната разделителната способност по направление.

Прилагането на този метод в хидроакустичните станции за страничен обзор с цел, да се осигури висока разделителна способност по направление при обследване

на морското дъно е съпроводено със значителни трудности, които са предизвикани от особеностите на водната среда. Този метод е заимстван от радиолокацията, където е приложен за първи път. Основната идея за формиране на изображение с помощта на алгоритъма за синтезирана апертура, може да бъде приложена независимо от физическата същност на използваното вълново поле.

За подобряване на разделителната способност по направление на подвижна хидроакустична станция се прилага свиване на диаграмата на насоченост на антената, като се извършва синтезиране на апертура, по-голяма от реалната. За целта се извършва съхраняване на данните от няколко последователни наблюдения на определена област от пространството от различни точки, в които е била хидроакустичната станция при своето движение и след това тези данни се обработват по определен алгоритъм.

Целта на това изследване е да бъде създаден алгоритъм за синтез на изображение чрез обработка на получаваните реални данни от измервания на акустичното поле в хидроакустичен басейн с помощта на ненасочени хидрофони.

1.1. ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА НА АПЕРТУРНИЯ СИНТЕЗ

Съществуват множество начини за синтезиране на изображение от системите за обработка, но по своята същност те се свеждат до реализацията на оптимален приемник [7]. Синтезираното изображение се описва с израз:

$$(1) \quad J_i(\eta) = \left| \dot{J}_i(\eta) \right| = \left| \int_{-T/2}^{+T/2} \dot{\xi}_i(t+\eta) \dot{h}(t) dt \right|,$$

където $J_i(\eta) = J_i(\chi/V)$ е сигнала съответстващ на изображението, $\dot{J}_i(\eta)$ е сигнала на изхода на линейната част на системата за обработка, T е периода за който се извършва синтезирането, $\dot{h}(t)$ е опорната функция, а η и χ са времето и пространственото изместване (по оста X)

между сигнала $\xi(t)$ и опорната функция $\dot{h}(t)$, които изпълняват ролята на координати на изображението. Като опорна функция се избира такава, която с точност до началната си фаза да отговаря на отразения от точкова цел сигнал:

$$(2) \quad \dot{h}(t) = H(t) \exp[j\Phi(t)], \quad \Phi(t) = 2\pi V^2 \frac{t^2}{\lambda r_0},$$

където $H(t)$ е реална тегловна функция, която зависи от избрания подход за синтез, а $\Phi(t)$ – закона за изменение фазата на опорната функция. Продължителността на опорната функция (3) по времеви и пространствени координати съответства на интервала са синтезиране на апертурата на антената, а реалната (4) и имагинерната (5) съставляващи представляват комплексната обвиваща на сигнала:

$$(3) \quad \dot{h}(t) = h_c(t) + h_s(t) = \begin{cases} H(t) \exp\left[j2\pi V^2 \frac{t^2}{\lambda r_0}\right], & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}, \\ 0, & |t| > T/2 \end{cases}$$

$$(4) \quad h_c(t) = H(t) \cos\left[2\pi V^2 \frac{t^2}{\lambda r_0}\right],$$

$$(5) \quad h_s(t) = H(t) \sin\left[2\pi V^2 \frac{t^2}{\lambda r_0}\right],$$

Чрез формална замяна на променливите $t_1 = -t$ съотношението (1) може да бъде преобразувано до израз от типа на конволюята:

$$(6) \quad J_i(\eta) = \left| \int_{-T/2}^{+T/2} \xi_i(\eta - t_1) \dot{g}(t_1) dt_1 \right| = \left| \int_{-T/2}^{+T/2} \xi_i(\eta - t) \dot{h}(t) dt \right|,$$

където $\dot{g}(t) = \dot{h}(-t)$ е импулсната характеристика на системата за апертурен синтез. При страничен обзор опорната функция е четна и $\dot{g}(t) = \dot{h}(t)$.

Изразите (1) и (6) имат следният физически смисъл. Ако се приеме, че тегловната функция е постоянна, т.е. $H(t) \equiv 1$, изразът (1) описва работата на корелационен приемник, а изразът (6) – на съгласуван (оптимален) филтър, който осигурява приемането на сигнала $\dot{s}(t)$ на фона на бял шум $\dot{h}(t)$.

От теорията на сигналите е известно, че конволюцията във временната област е еквивалентна на операцията умножение в честотната област. Затова на пръвия сигнал $s(t)$ се прилага Фурие - преобразуване във времевата област и се определя неговия честотен спектър $S(\omega)$.

$$(7) \quad S(\omega) = F\{s(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-j\omega t) dt$$

където $F\{\bullet\}$ е символът на Фурие - преобразуването.

На опорния сигнал се прилага същата обработка.

$$(8) \quad H(\omega) = F\{h(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \exp(-j\omega t) dt$$

За получаване на изображението $J(t)$ двата спектъра $S(\omega)$ и $H(\omega)$ се умножават (9) и се прилага обратно Фурие - преобразуване (10):

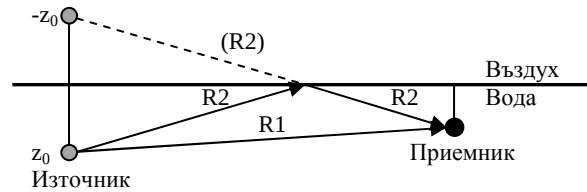
$$(9) \quad J(\omega) = S(\omega)H(\omega)$$

$$(10) \quad J(t) = F^{-1}\{J(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} J(\omega) \exp(j\omega t) d\omega$$

1.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАНОВКА ЗА ПРАКТИЧЕСКО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АЛГОРИТЪМА ЗА АПЕРТУРЕН СИНТЕЗ НА ИЗОБРАЖЕНИЕ

За да се синтезира изображение на акустичното поле създадено или преотразено от обект, намиращ се в измервателен хидроакустичен басейн първо се решава задачата с разпространението на акустичните сигнали в тази среда.

Измервателният хидроакустичен басейн представлява затворен обем с определени размери, запълнен със сладка вода. На стените на басейна са монтирани конични отражатели за дифузно разсейване на падащите върху тях акустични вълни. Това е направено за да се намалят отраженията и времето на реверберация на хидроакустичния басейн. Единствено повърхността на водата представлява акустически мека граница, която огледално отразява акустическите сигнали и обръща тяхната фаза.

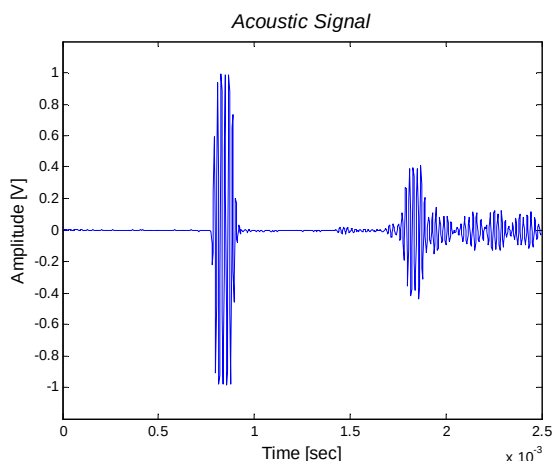


фиг. 1. Схематично представяне на лъчевата картина на прекия и отразения сигнали между излъчвателя и приемника.

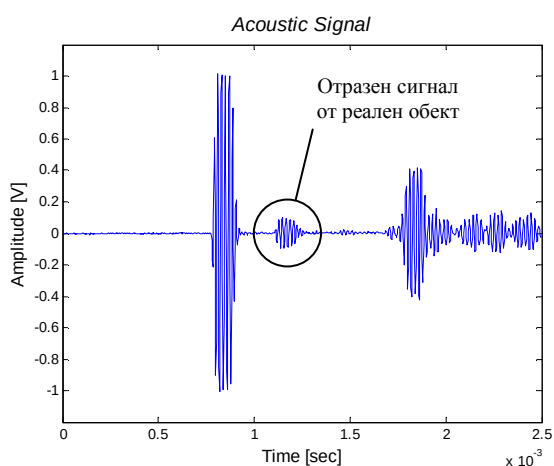
Когато се излъчват импулсни сигнали от определена точка с определена носеща честота и продължителност те достигат до друга точка със закъснение, което зависи от скоростта на звука във водна среда. В точката, където е разположен акустическият приемник първо пристига прекия сигнал от излъчвателя защото изминава най-краткото разстояние между двете точки, а след това първото отражение от най-близката граница. След това пристигат и отраженията от останалите граници, някои от които са многократни.

Схематично геометрията на разпространението на акустичните сигнали с отчитане на влиянието на границата „вода-въздух“ е представено на фиг. 1, а запис на реален сигнал, излъчен в измервателния хидроакустичен басейн – на фиг. 2.

На фиг. 2 се вижда ясно, че след края на прекия импулс следва зона, в която няма акустични сигнали до първия отразен сигнал, а след него има сигнали от многократни отражения. Това означава, че само в тази зона между прекия сигнал и първото отражение може да се наблюдава отразен сигнал от обект, разположен в измервателния хидроакустичен басейн (фиг. 3). Тази особеност налага условието за подбор на мястото за разполагане на обекта за наблюдение. Времето, след което отразения от обекта сигнал пристига в приемника трябва да е по-малко от времето, след което пристига сигнала от първото отражение.



фиг. 2. Запис на реален акустичен сигнал разпространяващ се между излъчвателя и приемника.

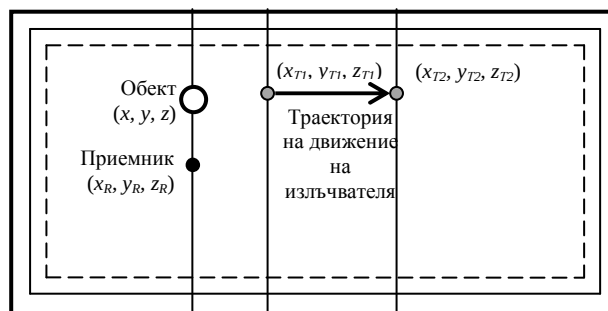


фиг. 3. Запис на отразен акустичен сигнал от реален обект разположен в измервателния хидроакустичен басейн.

За да се синтезира хидроакустично изображение на подводен обект се създава акустично поле със следните параметри. Източникът на сигнала е подвижен и ненасочен. Той се движи праволинейно от точка с координати (x_{T1}, y_{T1}, z_{T1}) до точка с координати (x_{T2}, y_{T2}, z_{T2}) със постоянна скорост V_m , като излъчва импулсни сигнали с носеща честота 50 kHz, продължителност 0,1 ms и период на повторение 25 ms. Приемникът и обекта са неподвижни. Те са разположени в точки с координати (x_R, y_R, z_R) и (x, y, z) . Приемникът е ненасочен. От записаните данни беше създадена двумерна матрица, като броят на редовете на която да съответства на броя на излъчените импулси. Бе разработена двумерна опорна функция, която да съответства на сигнала от обекта.

Синтезът на изображението се извършва по метода на оптималния филтър, като конволюцията между опорната функция и записания сигнал се извършва като се умножават техните честотни спектри и се извърши обратно Фурие - преобразуване от честотната във временната област.

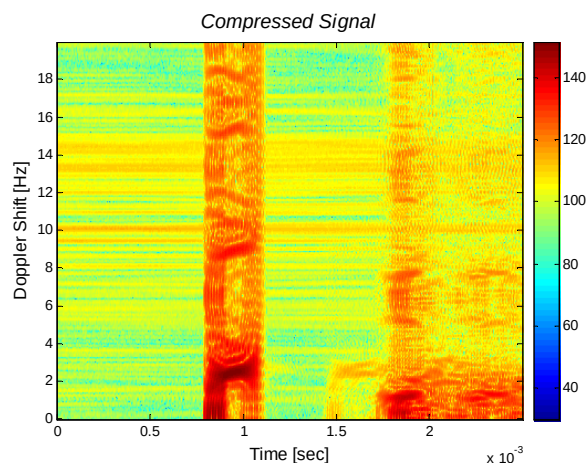
На фиг. 4 е представено разположението на приемника и обекта, както и траекторията на движение на излъчвателя в хидроакустичния басейн.



фиг. 4. Схема на разположението на приемника, обекта и траекторията на движение на излъчвателя в хидроакустичния басейн.

2. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

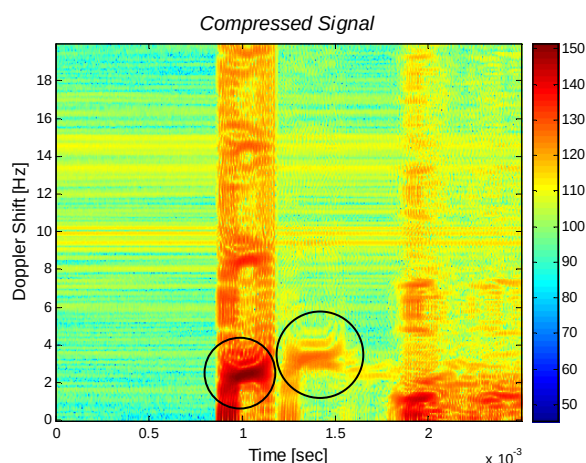
На фиг. 5 е показана амплитудната стойност на двумерния честотен спектър на реалния сигнал при движение на излъчвателя без обект в създаденото от него акустично поле, а на фиг. 6 – с обект разположен в хидроакустичния басейн.



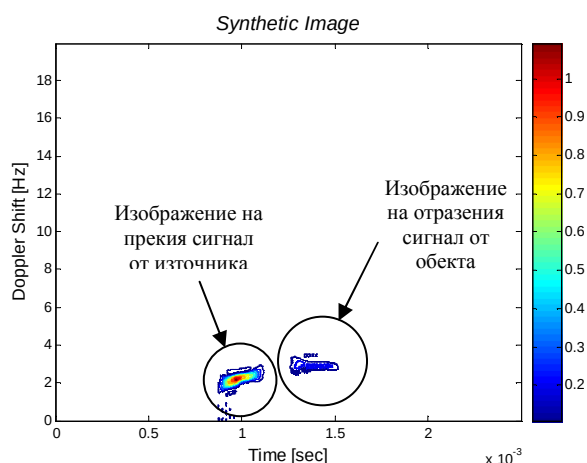
фиг. 5. Фурие - преобразуване на реален сигнал от подвижен източник на звук без обект в акустичното поле.

На основата на горепосочените условия и на разположението на отделните елементи, като приемник, обект и излъчвател бе създаден модел на опорен сигнал, който да отчита прекия и отражения от обекта сигнали. На фиг. 7 е показана амплитудната стойност на двумерния честотен спектър на моделирания опорен сигнал. Резултатите от синтеза на изображение от реален и моделиран опорен сигнали по метода на оптималния приемник с използването на изрази (7), (8), (9) и (10) са представени на фиг. 8 и 9.

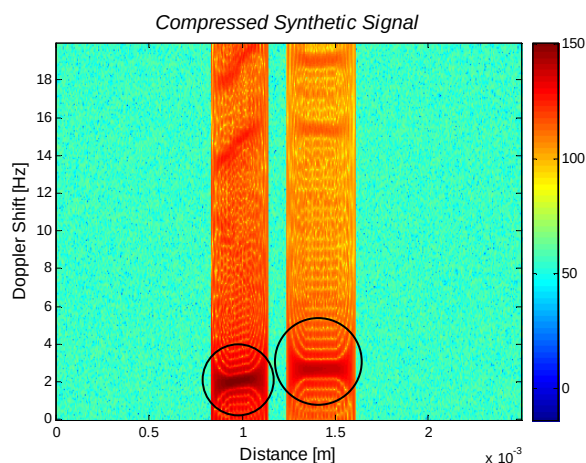
След прилагането на право Фурие-преобразуване на реалните и моделираните сигнали се получиха аналогични двумерни зависимости. Тези зависимости показват, че амплитудата на спектъра е функция от времето и скоростта на движение на източника на акустичното поле. От получените изображения може да бъде определено закъснението на приетия сигнал и доплеровото отместване на неговата честота.



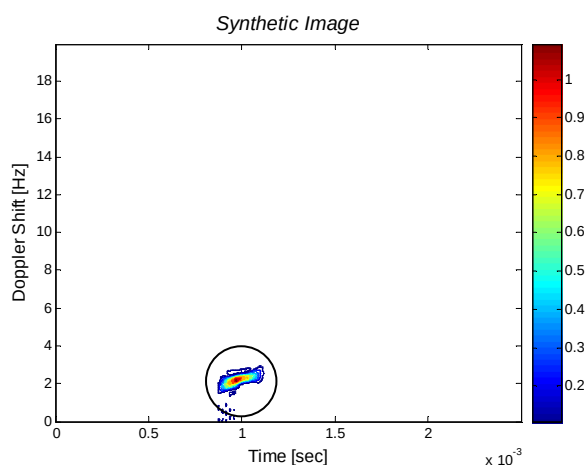
фиг. 6. Фурие-преобразуване на реален сигнал получен от подвижен източник на звук и обект, намиращ се в акустичното поле.



фиг. 8. Синтезирано изображение на реален сигнал от подвижен източник на звук и обект в акустичното поле с помощта на моделиран опорен сигнал.



фиг. 7. Фурие-преобразуване на синтезиран сигнал имитиращ подвижен източник на звук и обект, намиращ се в акустичното поле.



фиг. 9. Синтезирано изображение на реален сигнал от подвижен източник на звук без обект в акустичното поле с помощта на моделиран опорен сигнал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

След анализ на получените резултати могат да се направят следните заключения:

1. В хидроакустичния басейн могат да се създават акустични полета и да се наблюдават отражения от обекти разположени по определен начин спрямо излъчвателя на звукови вълни и приемника.
2. Освен от взаимното разположение на излъчвателя, приемника и обекта, условията за наблюдение на отразен сигнал зависят и от продължителността и честотата на излъчения сигнал.
3. Синтезираният опорен сигнал има честотен спектър подобен на спектъра на реалния сигнал (фиг. 7 и фиг. 8).
4. Синтезираният опорен сигнал може да се използва като модел за изучаване на влиянието, което оказват върху реалния сигнал различни фактори.
5. От синтезираното изображение може да бъдат определени закъснението на приетия сигнал и доплеровото отместване на неговата честота.

В това изследване са представени реални резултати от проведени експерименти в хидроакустичния басейн на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“. За изпълнението на експериментите бяха използвани ненасочени излъчвател и приемник на звуково налягане (хидрофони). Тези резултати показват, че може да бъде синтезирано акустично изображение на подводен обект. Бяха определени условията за наблюдаемост на такъв обект в хидроакустичния басейн. Беше създаден модел, който да описва добре акустичните сигнали разпространяващи се в този басейн. Бе разработен алгоритъм за синтезиране на акустично изображение на подводен обект. Синтезираното двумерно изображение носи информация за закъснението на приетия сигнал и доплеровото отместване на неговата честота. Използването на полученото синтезирано изображение за определяне на пространствените координати и формата на обект или източник на сигнал налага разработеният алгоритъм да бъде усъвършенстван, като се продължат изследванията в това направление.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
- [2]. Бурдик В. С. Анализ гидроакустических систем/ Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1988.
- [3]. Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. - 1072 с.
- [4]. Гренандер У. Лекции по теории образов: Синтез образов. Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 385 с.
- [5]. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. — 488 с, ил.
- [6]. Зверев В. А. Физические основы формирования изображений волновыми полями. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1998. – 252 с.
- [7]. Радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов, А. Н. Кулин и др.; Под ред. В. Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988 – 304 с.

 Година XV	АКУСТИКА Национална конференция “Акустика 2013”	Варна 11 - 12.10.2013 г. София 29 - 30.11.2013 г. Декември 2013 г.
	□ Брой 15	

ФАЗОВА РЕШЕТКА- ИНОВАТИВЕН МЕТОД ЗА КОНТРОЛ НА ЗАВАРЕНИ СЪЕДИНЕНИЯ

PHASED ARRAY - INNOVATIVE METHOD OF INSPECTION OF WELDED JOINTS

Павел ЧУКАЧЕВ

p.chukachev@multitest.bg

Мултитест ООД, гр.Варна, 9009, България

Summary: Introducing in practice the innovative ultrasonic "phased array" method has improved quality and speed of inspection. This report presents the experience of Multitest Ltd. in mastering the new phase array ultrasonic technology and ambition of the company to participate in design, production and implementation in practice of automated ultrasonic systems operating using the "phased array" principle.

Key words: phased array, scanning system, welded joints, non-destructive testing

Увод

Обемните методи на безразрушителен контрол: радиографичен и ултразвуков претърпяха съществено развитие, запазвайки принципа на метода, но променяйки начина на събиране и обработка на информацията. Прогресът на компютърните технологии съществено промени облика на тези два метода. В радиографичните методи за контрол бяха въведени нови дигитални системи, от които информацията от контрола впоследствие се трансформира в дигитално изображение.

Методът „фазова решетка“ се утвърди като основен и надежден метод на безразрушителния контрол, постигащ високи резултати при контрол на челни заварени съединения, заварени съединения тръба- фланец, колена, сложни по геометрия продукти, както и за контрол на корозия. [2], [9]. Конфигурацията на два основни елемента е важна, за да бъде осъществен контрола на различен вид продукт: сканиращата система и призмата на осезателя. [3]

Ултразвуковите вълни са механични трептения, предизвикани в еластична среда чрез пиезокристалния осезател, възбуден от електрически импулс. При конвенционалния ултразвуков контрол се използват монокристални осезатели (едноелементни). Наличието на един ъгъл на сканиране създава ограничения при откриване и определяне на размера на дефектите. Проблемите на контрола стават по-трудни, ако компонентът има сложна геометрична форма. С цел повишаване качеството на контрола бяха разработени и внедрени в практиката осезатели с фазова решетка. Един осезател за фазова решетка може да бъде разглеждан като съставен от много отделни осезатели (многоелементна структура). Всеки елемент може да се разглежда като линеен източник на цилиндрични вълни. Фронтите на вълните от всеки елемент ще взаимодействат, образувайки

общ фронт на вълна с области на конструктивно и деструктивно действие. Фронтът на вълната на всеки елемент може да бъде забавен във времето и синхронизиран по фаза и амплитуда по такъв начин, че фронтите на всички елементи да образуват сноп. Този фронт на вълната се базира на конструктивна интерференция и произвежда ултразвуков фокусиран сноп с възможност за направляване. Управлението на отделните елементи се осъществява от хардуерната компонента на системата за фазова решетка. Основният принцип на ултразвуковия метод фазова решетка е компютърно управляваното възбуждане (амплитуда и закъснение) на отделните елементи в един много-елементен осезател тип фазова решетка. Възбуждането на пиезокомпозитните елементи може да се управлява чрез софтуера на системата, като при това се създават ултразвукови снопове с определени параметри като ъгъл, фокусно разстояние и размер на фокусното петно. Генерирането на сноп във фаза и с конструктивна интерференция се реализира само, ако различните фронтите имат еднакво общо пристигане в точката на интерференция. Това се реализира, ако отделните елементи на осезателя са активирани с леко различни времена. Реализират се два процеса: на предаване и приемане. В процеса на предаване се генерират електрически импулси, като всеки отделен елемент приема само един импулс. На принципа на обратния пиезоелектричен ефект се генерира ултразвукова вълна. Сигналите от множеството елементи създават сноп със специфичен ъгъл и фокусиран на специфична дълбочина. Снопът достига дефекта и се отразява от него. При процеса на приемане ултразвуковите вълни достигнали до всеки елемент, на принципа на правия пиезоелектричен ефект се трансформират в електрически импулс. Ехосигналите, приети във всеки елемент от осезателя фазова решетка са

изместени във времето преди да бъдат сумирани. Процесът на приемане на сигналите се реализира като те пристигат с различни стойности на време на преминаване, след това те се изместват във времето за всеки елемент в съответствие със закономерността на фокусиране за приемане. Фазовите решетки не променят физиката на ултразвука. Те са просто иновативен метод за генериране и приемане на вълни от многоелементни осезатели. [6]

В практиката се използват 3 основни метода за контрол по метода фазова решетка:

- електронно сканиране (линейно, E- сканиране): сканирането се осъществява при фиксиран ъгъл и по дължината на осезателя с фазова решетка от група активни елементи, наречена действаща апертура на осезателя (VPA).

- секторно сканиране (ъглово, S-сканиране): ултразвуковият сноп има определен обхват от ъгли, използвайки едни и същи елементи.

- динамично фокусиране в дълбочина (DDF)– използват се различни дълбочини на фокусиране.

Наличието на голям обхват от ъгли при метода фазова решетка позволява при сканиране да се извършва движение на осезателя в една линия (one line scan), за разлика от конвенционалния ултразвуков метод, при който се извършва растерно сканиране (raster scan), необходимо за сканиране на целия обем на завареното съединение.

При механичното сканиране информацията от контрола се представя в различни изображения:

- A scan- метода фазова решетка използва много развивки тип A в пакет;
- B scan- поглед на завареното съединение отстрани;
- D scan- поглед на завареното съединение откряя;
- C scan- поглед на завареното съединение отгоре;
- S scan- секторно представяне на завареното съединение.

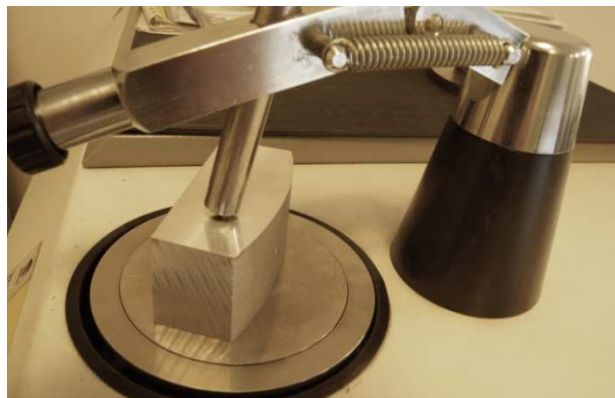
Наличието на високи технологични изисквания към всеки един от елементите от системата фазова решетка: цветно-кодиращ мултиплициращ ултразвуков дефектоскоп, многоелементни пиезо-композитни осезатели, призми, софтуер, сканираща система, налага непрекъснато да се предлагат нови решения, които в основната си част се утвърждават поради своя иновативен характер.[11]

Изложение

В работата са представени създадени сканиращи моторизирани системи отговарящи на най-високите изисквания за качество. Обхватът на контролираните тръбни продукти е от 4" (101,6 mm) до 18" (457,2 mm). Съществуващите в момента сканиращи системи на фирма Olympus се използват за контрол на тръби с диаметри от 0.84" (21,3 mm) до 4.5" (114,3mm), които са разположени на разстояние 10 mm едни от други. [10]

Произвежданите сканиращи системи се използват при контрол на челни заварени съединения, контрол на заварени съединения тръба-тръба, тръба-фланец и тръба-коляно. Независимо от своето основно приложение, благодарение на гъвкавостта на системите, те могат бързо да се приспособяват за контрол на различните видове заварени съединения.

С цел гарантиране качеството на продукцията се провеждат серия от тестове. Извършва се анализ на химичния състав на метала, използван за направа на сканиращи системи съгласно стандарт ASTM A 751 (Фиг.1).



Фиг.1. Определяне на химичен състав чрез спектрален анализатор.

Исходният материал алуминий, необходим при производството на самоходните сканиращи системи се подлага на изпитване на опън съгласно EN ISO 6892-1 (Фиг.2).



Фиг. 2. Образци след изпитване на опън.

При производството на новите сканиращи системи се използва последно поколение пет-осен вертикален обработващ център DMU 80 MonoBlock DECKEL MAHO, осигуряващ прецизност на металообработващите операции (Фиг.3).

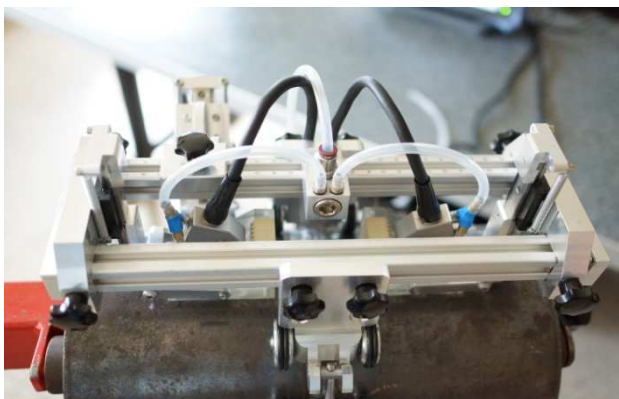


Фиг. 3. Вертикален обработващ център

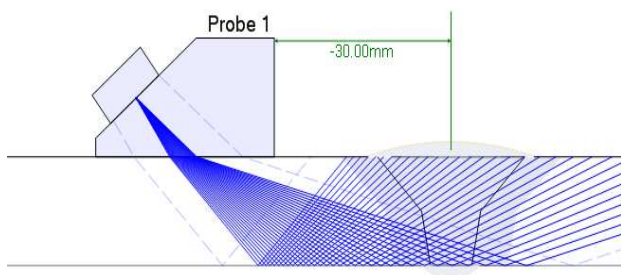
Във връзка с правилното конфигуриране на контрола се използва специализиран софтуер на Olympus- NDT Setup Builder и ES Beam Tool. [4] С тяхна помощ се осигурява предварително избор на осезател, призма, конфигуриране на системата от елементи, избор на вид сканиране: секторно, линейно, комбинация между тях, избор на обхват от ъгли за секторното сканиране и фиксиран ъгъл реализиран при

активирането на фазовите закони при линейното сканиране, както и правилното позициониране на системата призма-осезател спрямо централната ос на завареното съединение. [1]

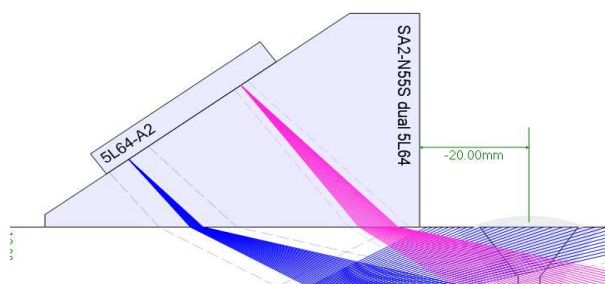
Чрез автоматизирания скенер за контрол на челни заварени съединения (тръба- тръба) е възможен двустранен контрол включващ заварено съединение- ЗТВ чрез прилагане на секторно или линейно сканиране или комбинация между тях. (Фиг.4,5,6,7,8,9) [9].



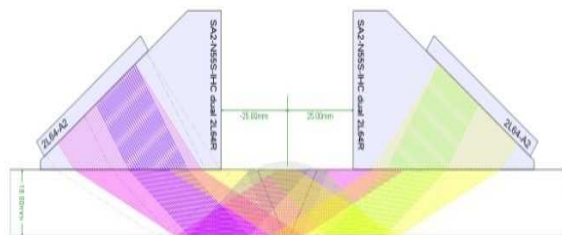
Фиг. 4. Автоматизирана сканираща система



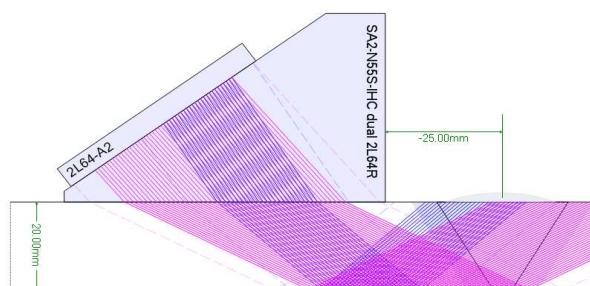
Фиг. 5. Секторно сканиране (една активна група).



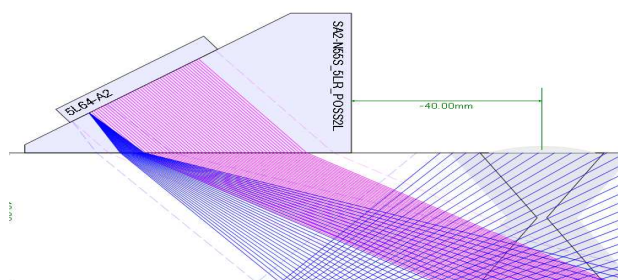
Фиг. 6. Секторно сканиране (две активни групи).



Фиг. 7. Линейно (електронно) сканиране (двустранен контрол)

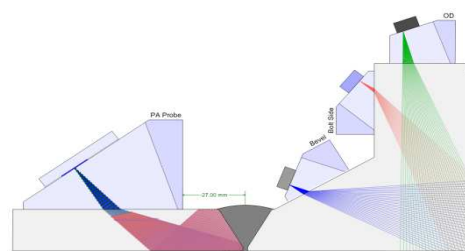


Фиг. 8. Линейно (електронно) сканиране (две активни групи).



Фиг. 9. Линейно и секторно сканиране.

Чрез сканираща система за контрол на заварени съединения тръба- фланец или тръба-коляно се постига пълно покритие на необходимия за изпитване обем (Фиг. 10). [8]



Фиг. 10. Секторно сканиране тръба- фланец

Анализът на резултатите от контрола може да бъде извършен както директно чрез ултразвуковата мултиплицираща система, така и с компютър, като използваният софтуер предоставя възможност за автоматично генериране на протокол от изпитването. С възможностите за представяне на изгледа на завареното съединение в различни развивки (сканирания): A-, B-, C-, S- и Ray Tracing се онагледява завареното съединение като в 2D. Критичността на несъвършенствата се представя от ултразвуковата система за фазова решетка с опцията за цветно кодиране на амплитудата, с което се гарантира точност при оценката на индикациите Фиг.11 (Фиг. 11.).



Фиг. 11. Резултати от изпитване.

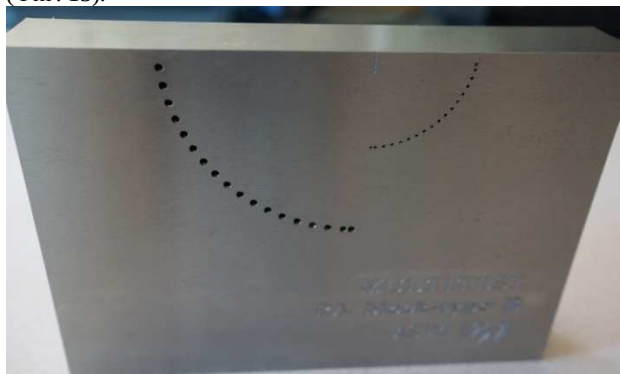
Ново направление в дейността е проектиране, производство и внедряване на призми като елемент от системите за фазова решетка. Предпочитан материал за производството им е Rexolite. Предимствата му пред Plexiglass са лесна обработваемост, висока химическа устойчивост, ригидност и стабилност на размерите при температурни колебания от $20\text{ }^{\circ}\text{C} \div 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, равномерно разпределение на звуковите вълни в сечението (Фиг.12).



Фиг.12. Призми за фазови осезатели.

Параметрите на призмите се определят въз основа на използвания многоелементен фазов осезател и размери на контролирания детайл [7].

Важен елемент от системите за фазова решетка са калибровъчните блокове. Основното им приложение е като работни еталони, използвани както за настройка на основни параметри като скорост, закъснение в призмата, чувствителност, DAC, TCG, разделителна способност и др., така и за проверка дългосрочната стабилност на показанията във времето на ултразвуковия дефектоскоп (Фиг. 13).



Фиг. 13. Калибровъчен блок за метода фазова решетка.

Проектирането на калибровъчни блокове по метода фазова решетка е базирано на стандарти ASME BPVC Section V, ASTM E 1961 и др.

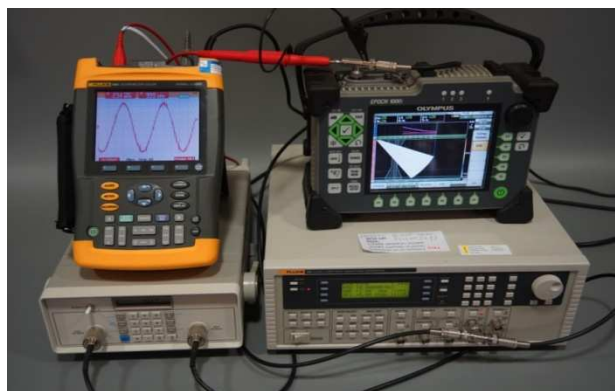
С цел да се гарантира точност на последваща настройка на скорост на ултразвуковите вълни се извършва анализ на химическия състав на материала.

Последен етап от производството на ултразвуковите блокове е тяхното калибриране, чрез което се осигурява калибровъчен блок придружен със сертификат за калибриране (Фиг. 14).



Фиг. 14. Калибриране на средства за измерване на дължина

За да се гарантира точността на контрола, както и поради необходимостта използваното ултразвуково оборудване да отговаря на европейски и международни стандарти се осъществява калибриране на ултразвуковите цветнокодирани мултиплициращи системи (Фиг. 15).



Фиг. 15. Система за проверка и калибриране на ултразвукови системи

Следваща стъпка е разработване и внедряване на комбинирана автоматизирана система за ултразвуков контрол с фазова решетка и TOFD метод с радиосистема, която ще позволява данните от контрола да се наблюдават в реално време в офиса на възложителя или от супервайзорите.

Заклучение

Представените в настоящата статия специализирани сканиращи системи отговарят на най- високите изисквания за такъв вид оборудване, свързани с работата му в агресивни среди, високи температури и високо натоварване. Доказателство за качеството на оборудването са проведената серия от изпитвания. Чрез серията от тестове се доказват следните предимства на системите:

- Точност: Наличието на високопрецизни ултразвукови системи, осигуряващи разделителна способност над 0.2 mm, изисква и постоянна скорост на сканиране. [5]. Чрез създаването на напълно автоматизирани ултразвукови скенери се постига точност на контрола, запазване на първоначално определената посока на сканиране, което осигурява по-добър обхват на снопа и фокусиране.

- Гъвкавост: модулният характер на сканиращите системи позволява те бързо да бъдат конфигурирани към различен диаметър или друг вид детайл

- Скорост: Благодарение на лесната поддръжка на системите с техния портативен характер се осурява възможност за повишаване броя на инспекциите.

- Ниска цена: Сравнени с произведените в САЩ, Канада и Германия представените сканиращи системи са до 7 пъти по-евтини при същото и по-добро качество.

- Съвместимост: към системите могат да бъдат монтирани призми и сензори (осезатели) на различни производители.

Усъвършенстваните технологии за ултразвуков контрол: фазова решетка и TOFD са методите, които навлизат масово при контрола на заварените съединения. Чрез внедряване на нови сканиращи системи и елементи от системата за фазова решетка се създават условия за точност и увеличена скорост на контрола.

Благодарности

Представеното изследване беше осъществено с финансовата поддръжка и материалната база в лабораториите на Мултитест ООД- Варна, за което сърдечно благодарим.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Anandamurugan S.: Manual Phased Array Ultrasonic Technique for Weld Application, Proceeding of the national

Seminar & Exhibition on Non-destructive Evaluation , 10-12 Dec 2009, Bangalore, India

[2] Cziraki D., Ph. Cyr: Ultrasonic Phased Array Inspection Technique Development Tools, 2006

[3] Dube N.: Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications, Olympus NDT, MA, USA, 2007

[4] Feldstein J.: American Society for Mechanical Engineers. ASME Section V Article 4: Boiler and Pressure Vessel Code. ASME 2010, 2011 rev

[5] Ginzel E., D. Jonson: Phased-Array Resolution Assessment Techniques, July 2008

[6] Kass D., M. Moles, T. Nelligan: Phased Array Testing. Basic Theory for Industrial Applications, November 2010

[7] Landrum J., M. Dennis: Manual Phased Array UT Techniques for Piping and Dissimilar Metal Pipe Welds, December 2004

[8] MacDonald D., J. Landrum, M. Dennis, G. Selby: Application of Phased Array UT Technology to Pipe Examinations, 2nd EPRI Phased Array Inspection Seminar, Montreal, Canada, August 2001

[9] Moles M., Gaetan Fortier: Phased Arrays for Pipeline Girth Weld Inspections, IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires, October 2007

[10] Moles M., M. Davis, Ch. Magruder, P. Ciorau: Phased Array Technical Guidelines. Useful Formulas, Graphs, and Examples, May 2005

[11] Moles M., S. Labbe: Special Phased Array Applications for Pipeline Girth Weld Inspections, 2006

СЪДЪРЖАНИЕ

1	Борис Михайлов, Татяна Георгиева <u>АКТУАЛНИ НОВИНИ В ОБЛАСТТА НА ШУМА И ВИБРАЦИИТЕ ОТ СПЕКТРИ ЕООД</u> СПЕКТРИ ЕООД, ул. „Св. Теодосий Търновски“ 30, София, 1421 spectri@spectri.net, www.spectri.net	3-6
2	Борис Михайлов <u>РАЗШИРЕНИЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ И ОБХВАТА НА РАЗРАБОТВАНИЯ И ПОДДЪРЖАН ОТ СПЕКТРИ ЕООД СОБСТВЕН ПОРТАЛ ЗА МОНИТОРИНГ НА ПАРАМЕТРИ НА ОКОЛНАТА И РАБОТНА СРЕДА – WWW.WEBNOISE.EU. ПРЕДСТАВЯНЕ НА НОВ ПРОДУКТОВ АКЦЕНТ ОТ СПЕКТРИ, ТЕРМИНАЛ ЗА МОНИТОРИНГ НА ШУМ В ОКОЛНА СРЕДА ТИП ESMU</u> СПЕКТРИ ЕООД, София, spectri@spectri.net, www.spectri.net	7-12
3	Борис Михайлов¹, Милчо Георгиев² <u>КОНФИГУРИРАНЕ НА СИСТЕМИ БАЗИРАНИ НА ИЗМЕРВАНЕ НА ЗВУКОВ ИНТЕНЗИТЕТ, ОПРЕДЕЛЯНЕ И РАМКИРАНЕ НА ЗВУКОВИ ИЗТОЧНИЦИ</u> ¹ СПЕКТРИ ЕООД, София, ² ТУ-София, georgievm@spectri.bg	13-15
4	Милчо Георгиев¹, Татяна Георгиева² <u>МОДЕЛИРАНЕ И МЕРКИ ЗА ОБЕЗШУМЯВАНЕ ПРИ ИЗГРАЖДАНЕ НА ЖИЛИЩНИ И ТЪРГОВСКИ ОБЕКТИ</u> ¹ ТУ-София, georgievm@spectri.bg ^{1, 2} СПЕКТРИ ЕООД, София, office@spectri.net, www.spectri.net	16-19
5	Милчо Георгиев¹, Татяна Георгиева² <u>ИЗМЕРВАНЕ И АНАЛИЗ НА РЕАГИРАНЕТО НА СТОМАНОБЕТОННАТА КОНСТРУКЦИЯ – ВИБРОРАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА ВИБРАЦИИТЕ ГЕНЕРИРАНИ ОТ РАБОТАТА НА ПРОМИШЛЕНИ ВИБРАЦИОННИ СИТА</u> ¹ ТУ-София, georgievm@spectri.bg ^{1,2} СПЕКТРИ ЕООД, София, office@spectri.net, www.spectri.net	20-23
6.	Милчо Георгиев¹, Борис Михайлов² <u>КОНФИГУРИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИСТЕМИ ЗА КАЛИБРИРАНЕ ПРИ НИСКИ ЧЕСТОТИ</u> ¹ ТУ-София, georgievm@spectri.bg ^{1, 2} СПЕКТРИ ЕООД, София, spectri@spectri.net, www.spectri.net	24-26
7.	Христо Драганчев, Хр.Пировски, С. Вълчев <u>ХОЛИСТИЧЕН ПОДХОД ЗА НАМАЛЯВАНЕ НА ВИБРАЦИИТЕ И ШУМА НА КОРАБИТЕ</u> ТУ – Варна, Корабостроителен факултет, катедра „Корабни машини и механизми“	27-34

8	Иван Кралов, Анна Пискова, Красимир Неделчев <u>ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА НОВ АБСОРБЕР ЗА АКУСТИЧЕН ШУМ ОТ РЕЛСОВИ ПЪТИЩА</u> ТУ- София, България	35-43
9	Т. Трифонов¹, Г. Димков², И. С. Иванов³ <u>КОМПЛЕКСНИ ЧИСЛА И СПЕКТРИ</u> ¹Великотърновски университет „Св. св. Кирил и Методий”, катедра „Алгебра и геометрия”, В. Търново, България ²Българска академия на науките, Институт по математика и информатика, София, България ³Национален военен университет „В. Левски”, катедра „Комуникационни и информационни системи”, В. Търново, България	44-47
10	В.С.Дидковский¹, С.А.Лунева¹, В.П. Заец¹, А.И.Лунев², Т. Трифонов³ <u>АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОРТЕПИАННОГО ЗВУЧАНИЯ В КОНЦЕРТНОМ ЗАЛЕ</u> ¹Национальный Технический Университет Украины „Киевский Политехнический Институт”, Украина ²Национальная Музыкальная Академия Украины Им.П.Чайковского, Украина ³Великотърновски университет „Св. св. Кирил и Методий”, Фак. математики и информатики, каф. „Алгебра и геометрия”, България	48-54
11	Георги Стоянов, Тодорка Георгиева <u>VoIP РАЗГОВОР МЕЖДУ АБОНАТИ ПРЕЗ ETHERNET И E1 ИНТЕРФЕЙС</u> Технически университет - Варна, България	55-58
12	Пламен Ангелов <u>МОДИФИЦИРАН МЕТОД ЗА СИНТЕЗ НА КЛАС АВ АУДИО УСИЛВАТЕЛ НАТОВАРЕН С КОМПЛЕКСЕН ТОВАР – ЧАСТ 1</u> Бургаски Свободен Университет, Център по информатика и технически науки, Бургас e-mail: pangelov@bfu.bg	59-62
13	Пламен Ангелов <u>МОДИФИЦИРАН МЕТОД ЗА СИНТЕЗ НА КЛАС АВ АУДИО УСИЛВАТЕЛ НАТОВАРЕН С КОМПЛЕКСЕН ТОВАР – ЧАСТ 2</u> Бургаски Свободен Университет, Център по информатика и технически науки, Бургас e-mail: pangelov@bfu.bg	63-66
14	Петър Петров <u>„М&Q – МОДИФИКАЦИЯ” НА МНОГОКАНАЛЕН MC-CDMA – ПРЕДАВАТЕЛ НА БАЗОВА СТАНЦИЯ ОТ НОВО ПОКОЛЕНИЕ</u> Технически университет - Варна, България	67-70

15	Петър Петров <u>МНОГОКАНАЛЕН ХИБРИДЕН M&Q MC-CDMA/TDMA – ПРЕДАВАТЕЛ ЗА БАЗОВА СТАНЦИЯ ОТ НОВО ПОКОЛЕНИЕ</u> Технически университет - Варна, България	71-74
16	Петър Петров <u>МНОГОКАНАЛЕН ХИБРИДЕН M&Q MC- CDMA/ TDMA- ПРЕДАВАТЕЛ С ЕДИННА КОДОВА ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТ И РАЗЛИЧНИ НАБОРИ ОРТОГОНАЛНИ ПОДНОСЕЩИ ЧЕСТОТИ</u> Технически университет - Варна, България	75-78
17	Петър Попов <u>АКУСТИЧНО ПРОЕКТИРАНЕ НА ЗАЛА С ОБЩО ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ</u> Технически университет - Варна, България. E-mail: petar.vt@gmail.com	79-82
18	Екатеринослав Сираков, Илиан Илиев <u>ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕХАНИЧНИ ВИБРАЦИИ ПРИ КРЪГЪЛ ИЗЛЪЧВАТЕЛ</u> Технически университет - Варна, България. E-mail: katio@mail.bg , ilian_tatoo@abv.bg	83-86
19	Христо Живомиров, Илиан Илиев <u>ГЕНЕРИРАНЕ НА ИЗМЕРВАТЕЛНИ СИГНАЛИ С ПРИЛОЖЕНИЕ НА МАТЛАВ</u> Технически университет - Варна, България	87-90
20	Красимир Стайков¹, Дамян Ганчев² <u>МЕТОД ЗА ОТКРИВАНЕ НА ЛОКАЛНА КОРОЗИЯ В СТОМАНЕНИ ТРЪБИ С ДИАМЕТЪР ДО 40 mm ПОСРЕДСТВОМ НОРМАЛНИ УЛТРАЗВУКОВИ ВЪЛНИ</u> Технически университет - София, България	91-94
21	Александър Попов <u>УЛТРАЗВУКОВА ДЕБЕЛОМЕТРИЯ НА ПЕТРОЛНИ РЕЗЕРВОАРИ</u> Институт по механика-БАН	95-96
22	В. Грозев¹, М. Миховски², Б. Генов³, Г. Генов¹ <u>ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ИЗПОЛЗВАНЕ НА АКУСТИЧНИ МЕТОДИ ЗА КОНТРОЛ БЕЗ РАЗРУШАВАНЕ НА ЕЛЕМЕНТИ ОТ БОЕПРИПАСИ</u> ¹Шуменски университет „Епископ Константин Преславски”, Шумен, България, valgroz@abv.bg ²Българска академия на науките, Институт по механика, София, България, nntdd@imbm.bas.bg ³Институт по отбрана, София, България, genov@abv.bg	97-100

23	Иван Коларов <u>ВИБРО-АКУСТИЧЕСКО ИЗСЛЕДВАНЕ НА БУТАЛО ОТ ДВГ</u> Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”, София	101-110
24	Иван Коларов <u>ОПТИМИЗИРАНЕ ИЗСЛЕДВАНЕТО НА ВИБРО-АКУСТИЧЕСКИ ПАРАМЕТРИ ЗА БЕЗРАЗРУШИТЕЛНА ОЦЕНКА НА ДЕФЕКТИ В СИСТЕМИ</u> Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”, София	111-115
25	Иван Коларов <u>ВИБРО-АКУСТИЧЕСКО ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕВЕНТИЛИРАНИ АВТОМОБИЛНИ СПИРАЧНИ ДИСКОВЕ С ПОВЪРХНОСТНИ РАЗСЛОЕНИЯ</u> Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”, София	116-120
26	Н. Колев, П. Иванов <u>ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА АКУСТИЧНА ИМПУЛСНО - ДОПЛЕРОВА ИЗМЕРВАТЕЛНА СИСТЕМА СЪС СИНТЕТИЧНА АПЕРТУРА</u> Висше военноморско училище „Н. Й. Вапцаров“- Варна, България nzkolev@abv.bg, ivanov5ar@abv.bg	121-125
27	П. Иванов, Н. Колев <u>СИНТЕЗ НА АКУСТИЧНО ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ПОДВОДЕН ОБЕКТ С ПОМОЩТА НА НЕПОДВИЖЕН ПРИЕМНИК И ПОДВИЖЕН ИЗЛЪЧВАТЕЛ</u> Висше военноморско училище „Н. Й. Вапцаров“- Варна, България	126-130
28	Павел ЧУКАЧЕВ <u>ФАЗОВА РЕШЕТКА- ИНОВАТИВЕН МЕТОД ЗА КОНТРОЛ НА ЗАВАРЕНИ СЪЕДИНЕНИЯ</u> Мултитест ООД, Варна, България	131-135

СЕРТИФИКАЦИОННА И КВАЛИФИКАЦИОННА ОБЕЗПЕЧЕНОСТ



Вие търсите професионален партньор и сертифицирана организация, гарантираща Ви качествено изпълнение и поддръжка. СПЕКТРИ прилага система за управление на качеството в съответствие с изискванията на международния стандарт ISO 9001:2008. Обхватът на дейностите включва: 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.

СПЕКТРИ ЕООД се стреми максимално да удовлетвори изискванията на пазара за професионална инженерингова и консултантска дейност в областта на шума и вибрациите. Фирма СПЕКТРИ Ви предоставя следните услуги в областта на ШУМА и ВИБРАЦИИТЕ:



- Изработване на карти за шум и проекти за редукция влиянието на шума от основен източник
- Акустични проекти за измерване, анализ и оценка на шума, проекти за мониторинг, диагностика и верифицирано моделиране
- Вибродиагностика и анализ състоянието на въртящи се машини, виброанализ мониторинг и балансиране
- Инсталации, монтаж и инженеринг, пълно сервизно обслужване
- Изграждане и поддръжане на платформа за мониторинг на параметри на околната и работна среда



spectri

СПЕЦИАЛИСТИТЕ ПО ШУМ И ВИБРАЦИИ

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

Основни партньори:

Brüel & Kjær 
BEYOND MEASURE

Brüel & Kjær S&V A/S
www.bksv.com



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

 **Instantel**
The World's Most Trusted Vibration Monitors
Instantel • www.instantel.com



Eesiflo • www.eesiflo.com

 **Odeon**
ROOM ACOUSTICS SOFTWARE
Odeon • www.odeon.dk



Българска Асоциация за Обществен Контрол и Управление на Шума
www.nonoise-bg.com

За контакт: СПЕКТРИ ОФИС
1421 София, ул. „Св. Т. Търновски“ 30
Тел.: (02) 963-0464, Факс: (02) 963-1074
www.spectri.net, e-mail: spectri@spectri.net

ПРОИЗВОДСТВО, ИНЖЕНЕРИНГ И ДОСТАВКИ НА ЦЯЛОСТНИ РЕШЕНИЯ И ОБОРУДВАНЕ

Вие се нуждаете от качествено, надеждно и съвременно оборудване за диагностика, анализ, мониторинг, измерване и контрол. СПЕКТРИ ЕООД Ви предлага:

- 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



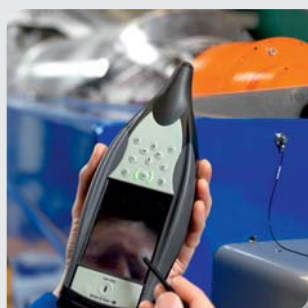
Преносими шумомери и акустични анализатори



Многоканална, мултипараметърна и многозадачна система за шум и вибрации, PULSE LAN-XI



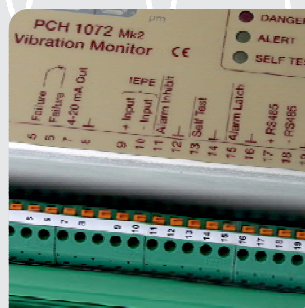
Преносими и стационарни терминали за мониторинг на шум, вибрации и параметри на околната среда



Преносими вибрационни анализатори и вибромери



Системи за звук и интензитет, звукова мощност и оценяване на шумови източници



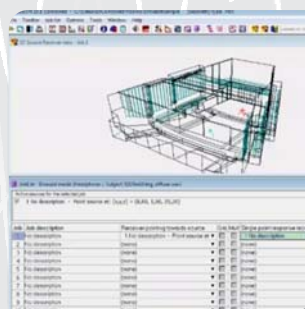
Системи за постоянен мониторинг и виброконтрол на въртящи се машини и съоръжения



Безконтактно ултразвуково измерване и контрол на дебит



Вибрационни и сеизмични мониторингови системи



Акустичното моделиране в строителната акустика. Акустика на помещения

spectri

СПЕЦИАЛИСТИТЕ ПО ШУМ И ВИБРАЦИИ

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

Основни партньори:

Brüel & Kjær 

BEYOND MEASURE

Brüel & Kjær S&V A/S
www.bksv.com

PCH
ENGINEERING

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

InstanTel
The World's Most Trusted Vibration Monitors

InstanTel • www.instanTel.com

Eesiflo
Measuring Flow Worldwide

Eesiflo • www.eesiflo.com

Odeon
ROOM ACOUSTICS SOFTWARE

Odeon • www.odeon.dk



Българска Асоциация
за Обществен Контрол
и Управление на Шума
www.nonoise-bg.com

За контакт: СПЕКТРИ ОФИС
1421 София, ул. „Св. Т. Търновски“ 30
Тел.: (02) 963-0464, Факс: (02) 963-1074
www.spectri.net, e-mail: spectri@spectri.net



TV 100

Компактен анализатор за прогнозна поддръжка на производствени машини

За проверка на дисбаланс, несъосност, лагери, зъбни колела и др.

Капацитет за съхранение на 10 тестови резултати

Пиезоелектрически акселерометър с магнитна основа

Голям честотен обхват

Вграден принтер

VG100, VG110, VG120

Компактен анализатор за прогнозна поддръжка на производствени машини

За проверка на дисбаланс, несъосност, лагери, зъбни колела и др.

Нискочестотен режим LO-RMS за тестване на слаби вибрации

Високочестотен режим, за проверка на средното ускорение (Hi AVE) и изместването при един пик (Hi PEAK)



TV 200

Компактен анализатор за прогнозна поддръжка на производствени машини

За проверка на дисбаланс, несъосност, лагери, зъбни колела и др.

Капацитет за съхранение на 10 тестови резултати

Пиезоелектрически акселерометър с магнитна основа

Голям честотен обхват



OmniScan SX

По-малък, по-лек ... и все още OmniScan

Новите ултразвукови дефектоскопи OmniScan® SX използват натрупаният от Olympus повече от 20 години опит в разработването на апарати с фазова решетка и е най-новото попълнение към семейството OmniScan. В сравнение с OmniScan MX2, OmniScan SX е 33% по-лек и 50% по-малък, предлагащ изключителна рентабилност и безпрецедентно ниво на преносимост.

OmniScan SX работи в режим „единична група“, разполага с две ос кодиране и възможности за запис на данни, както и модернизирания сензорен екран интерфейс за двата налични модела:

- SX PA: 16:64 конфигурация с фазова решетка и един UT канал за P / E, PC, или TOFD инспекция.
- SX UT: един UT канал за P / E, PC, или TOFD инспекция.



OmniScan SX PA



OmniScan SX UT



НАЦИОНАЛНА СЕКЦИЯ ПО АКУСТИКА



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ, ЛАБ.
„ВИБРАЦИИ И АКУСТИЧЕН ШУМ“**



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА



**БЪЛГАРСКА АСОЦИАЦИЯ ПО ОБЩЕСТВЕН КОНТРОЛ И
УПРАВЛЕНИЕ НА ШУМА**



**СЪЮЗ ПО ЕЛЕКТРОТЕХНИКА, ЕЛЕКТРОНИКА И
СЪОБЩЕНИЯ**



**ИНСТИТУТ ПО МЕХАНИКА – БАН, ЛАБ. “МЕХАНИКА,
ДИАГНОСТИКА И БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН КОНТРОЛ”**



СПЕКТРИ ЕООД

ДОКЛАДИ ОТ КОНФЕРЕНЦИЯ „АКУСТИКА 2013“:

Вж. http://www.nonoise-bg.com/?p=p_10

КОНФЕРЕНЦИЯ

