

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА
ФАКУЛТЕТ ПО ЕЛЕКТРОНИКА
КАТЕДРА “КОМУНИКАЦИОННА ТЕХНИКА И
ТЕХНОЛОГИИ”

инж. Илиян Йорданов Илиев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОСТРАНСТВЕНИ
ХАРАКТЕРИСТИКИ НА КРЪГЪЛ
АКУСТИЧЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “ДОКТОР”

Професионално направление: 5.3 Комуникационна и
компютърна техника

Докторска програма: „Теоретични основи на
комуникационната техника“

Научен ръководител: доц. д-р инж. Екатеринослав Сираков

Рецензенти:

1.

2.

Варна
2016

**Дисертационният труд е обсъден на __.__.2016 г. в катедра
“Комуникационна техника и технологии” на катедрен съвет,
протокол №..... / г. и насочен за защита.**

Автор: инж. Илиян Йорданов Илиев

Заглавие: Изследване на пространствени характеристики на
кръгъл акустичен преобразувател

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

**ФАКУЛТЕТ ПО ЕЛЕКТРОНИКА
КАТЕДРА “КОМУНИКАЦИОННА ТЕХНИКА И
ТЕХНОЛОГИИ”**

инж. Илиян Йорданов Илиев

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОСТРАНСТВЕНИ
ХАРАКТЕРИСТИКИ НА КРЪГЪЛ
АКУСТИЧЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “ДОКТОР”**

**Професионално направление: 5.3 Комуникационна и
компютърна техника**

**Докторска програма: „Теоретични основи на
комуникационната техника“**

Варна
2016

Дисертационният труд съдържа 138 страници, включително 90 фигури, 1 таблица и 3 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 99 заглавия, от които 15 на кирилица и 84 на латиница.

**Защитата на дисертационния труд ще се състои на Г.
от Ч. В
на открито заседание на жури, сформирано със заповед на
Ректора № / Г.**

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение във ФД “Докторанти”, стая 318 НУК.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема: През последните няколко десетилетия изследването на пространствените характеристики на акустичен преобразувател доведе до разработване на насочени и свръх насочени такива, които се използват в редица области като медицина, археология, архитектурна акустика, хидро-, радио- локация и др.

Насочени преобразуватели в радиолокацията и хидроакустиката се използват от една страна за откриване, следене и съпровождане на цели, насочване на оръжия (ракети, торпеда и т.н.), а от друга за търсене и спасяване, навигация и позициониране.

В медицината се използват ултразвукови преобразуватели за различни видове диагностика. Насочени микрофони намират приложение и при хора страдащи от слухов дефицит.

Насочени преобразуватели и микрофони често се използват и в архитектурната акустика (при проектиране на студия, помещения, концертни зали и др.).

В днешно време нараства нуждата от увеличаване на изследванията в много близката (по повърхността на преобразувател), близката и далечната зона на звуковото поле. Интерес представлява наличието или липсата на граници между близката и далечната зона, за което няма утвърден ясен критерий и единно мнение в научната общност.

Мобилните комуникации, високото изискване за качество и минимизиране на аудио системите и внедряването на системи за диагностика с ултразвук в различни отрасли (машиностроене, медицина, сеизмология, архитектурна акустика и др.) превръщат близката зона в обект на задълбочени изследвания. Анализа на свойствата и параметрите на близката зона, нейното влияние върху законите на разпространение на звуковите сигнали, методите за измерването ѝ, представляват все по-голям интерес.

В тази връзка все повече се изследва и същността на звуковата вълна и физическите закони, на които се подчинява нейното разпространение във въздушното пространство, твърдо тяло или течност. Интерес представляват механичните вибрации в много близката зона (по повърхността) на различни видове преобразуватели върху възпроизвеждания от тях звук.

С цел да се минимизират грешки, породени от различни смущенията при измерванията, се разглеждат и изследват безехови камери, имитиращи условия близки до свободно поле. Търсят се подобрени методи и начини за измерване на амплитудно-честотни характеристики (АЧХ) и диаграми на насоченост (ДН) на преобразуватели, както и визуализиране и симулиране на деформациите по повърхността на мембраната на даден преобразувател.

Обект на изследването: кръгъл акустичен преобразувател (високоговорител, чиято мембрана има кръгла форма).

Предмет на изследването: пространствените характеристики на кръгъл акустичен преобразувател.

Цел на изследването: Формулиране на критерий за определяне на границите на зони на Fresnel на базата на модифицирани, аналитични и графични зависимости, определящи пространствените характеристики на кръгъл акустичен преобразувател.

Задачи на изследването:

1) изграждане на методика за единен подход при изследване на пространствените характеристики (в частност ДН и АЧХ) на кръгъл акустичен преобразувател;

2) дефиниране на обобщен израз за определяне на общото звуковото налягане в близка и далечна зона;

3) дефиниране на критерий за определяне границите на зоните на Fresnel;

4) получаване на потвърдителни резултати от известната теория относно деформациите на мембраната на преобразувател в много близката зона и наличието на минимума и максимуми в звуковото налягане създавано от него в зоните на Fresnel;

5) изграждане чрез съвременни измервателни средства на изпитателна лабораторна постановка за изследване на пространствените характеристики на кръгъл акустичен преобразувател в различна среда.

Място на изследването: Технически университет – Варна, лаборатория по мултимедийна техника 507Е, лаборатория по аудиотехника 510Е, лаборатория 607Е (електромагнитна безехова камера).

Методи на изследване:

- теоретични изследвания, основани на математически анализ;
- симулационен и експериментален анализ в лабораторни условия и в безехова камера;
- компютърни симулации.

Научна новост на изследването: Изградена и приложена е методика за единен подход при изследване на пространствените характеристики (АЧХ и ДН) на кръгъл акустичен преобразувател.

Дефиниран е обобщен модифициран израз за изчисляване на общото звуковото налягане, създавано от кръгъл акустичен преобразувател в близка и далечна зона.

Предложен е критерий за определяне на граници на зоните на Fresnel при разпределение на звуковото налягане около кръгъл акустичен преобразувател.

При експерименталните изследвания е използвана изпитателна лабораторна постановка, базирана на съвременни измервателни средства и системи.

Практическа ценност на изследването: Получените научно-приложни резултати могат да се използват при:

- формулиране на изискванията за електрическите параметрите на акустичните преобразуватели и подобряване на качеството на възпроизведения от тях звук;

- определяне на критерии за избор на материала, формата и конструкцията при производство на мембраните на акустични преобразуватели.

Използваната специализирана изпитателна постановка създава предпоставки за високотехнологична среда и постигане на научно значими резултати при научните изследвания.

Дисертационният труд притежава и учебно-методическа полезност, изразяваща се в достъпното и методически последователно разгръщане на основната теория за звуковото поле. Систематизирано са обяснени някои от пространствените характеристики на кръгъл акустичен преобразувател и влиянието на близката и далечната зона на звуковото поле създавано от него.

Апробация на изследването: По темата на дисертационния труд са докладвани и публикувани доклади и статии в следните научни форуми и списания:

1. Рецензирани научни издания в страната:

- списание Акустика, ISSN: 1312-4897, през 2013 г. и 2014 г.

2. Рецензирани научни издания в чужбина:

- TEM Journal, ISSN: 2217-8309, през 2014 г.;

- Romanian Journal of Acoustics and Vibration (RJAV), ISSN 1584-7284, през 2015 г.;

- Electronic Journal "Technical Acoustics", ISSN: 1819-2408, през 2015 г.

3. Международни конференции:

- International Scientific Conference UNITECH, ISSN: 1313-230X, през 2013 г.

Финансово осигуряване на изследването:

- договор № НП7/12.04.2013 г. „Изследване на електродинамични и електроакустични антени в безехова камера”, ТУ-Варна, Ръководител: доц. д-р инж. Екатеринослав Събев Сираков;

- договор № НП6/12.04.2014 г. „Изследване на електромагнитни и акустични преобразуватели в контролирана среда”, ТУ-Варна, Ръководител: доц. д-р инж. Екатеринослав Събев Сираков;

- договор № ПД4/12.04.2015 г. „Изследване на пространствени характеристики на кръгъл акустичен преобразувател”, ТУ-Варна, Ръководител: доц. д-р инж. Екатеринослав Събев Сираков.

Структура и обем на дисертационния труд: Дисертационният труд съдържа 138 страници, включително 90 фигури и 1 таблица, списък на използваната литература от 99 заглавия, от които 15 на кирилица и 84 на латиница и 3 приложения. Основният текст е изложен на 120 страници и се състои от анотация, съдържание, списък на използваните означения, четири глави, заключение, списък на приносите, списък на публикациите по темата на

дисертационния труд, списък на използваната литература. Приложенията са в обем от 17 страници – разработена програмна в средата на Matlab® за анализ и измерване на акустичен отразен сигнал в правоъгълно помещение/безехова камера, снимки от експериментални измервания, снимки на опитни постановки, експериментални резултати използвани при разработката на дисертационният труд.

В автореферата е приета номерация на фигурите, таблицата и формулите, съответстваща на тази от дисертацията.

КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Увод. Проследени са етапите на теоретично и експериментално изследване на разпространението на механичните звукови вълни до обособяването на акустиката като самостоятелна наука. Представено е достигнатото до момента ниво в изследванията на пространствените характеристики на кръгъл акустичен преобразувател и областите, в които се прилагат свойствата и характеристиките на звуковите вълни. Показани са същността и актуалността на проблема. Представени са обектът и предметът на изследване, формулираните цел и задачи в дисертационния труд.

Глава I. Основни понятия и зависимости в акустиката

В първа глава са разгледани основните параметри и характеристики на звуковото поле. Показани са основните уравнения в акустиката и някои техни свойства и области на приложение. Представени са характерните зони на звуковото поле в пространството. Чрез първа глава е реализирана учебно-методичната (образователна) компонента на дисертационния труд.

Показано е уравнението на движението на мембраната:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{Eh^2}{12\rho_s(1-\nu^2)} \nabla^4 w = 0, \quad (1.39)$$

където $w(x, y)$ изразява провисването на мембраната;

E - модул на еластичност;

h - дебелина на мембраната (пластината);

ν - коефициент на Poisson;

∇ - оператор на Laplace;

ρ_s - плътност на средата.

Представена е зависимостта на Huyghens-Fresnel, позната в акустиката като интеграл на Rayleigh, определяща звуковото налягане p_a , създавано от акустичен преобразувател (с кръгла, правоъгълна, елиптична и т.н. форми) на дадено разстояние r в пространството и времето:

$$p_a(\theta, f, r, t) = j\rho_s f v_m \iint_Q \frac{e^{j(\omega t - kr)}}{r} dQ. \quad (1.57)$$

където p_a е звуково налягане;

θ - ъгъл на насочване;

f - честота;

v_m - моментна амплитуда на скоростта на разпространение на частиците;

Q - повърхност на преобразувателя;

$\omega = 2\pi f$ - кръгова честота;

$k = \frac{2\pi f}{c}$ - вълново число;

c - скорост на звука.

Численото решение на интеграла в израз (1.57) може да се раздели на два етапа:

- изчисляване на звуковото налягане p_a , създавано от кръгъл акустичен преобразувател в далечна зона (решение на Fraunhofer):

$$p_{aFar}(\theta, f, r) = \frac{\rho_s f v_m}{r} e^{j\omega t} \int_0^a x dx \int_0^{2\pi} e^{-j\frac{2\pi f}{c}(r+x\sin\theta\cos\alpha)} d\alpha; \quad (1.58)$$

- изчисляване на звуковото налягане p_a , създавано от кръгъл акустичен преобразувател в близка зона, по оста на излъчване (частно решение на Fresnel):

$$p_a(0, f, r) = 2\rho_s f v_m \left| \sin \left\{ \frac{\pi f}{c} \left[\sqrt{r^2 + a^2} - r \right] \right\} \right|. \quad (1.59)$$

Глава II. Изследване на много близка, близка и далечна зона на кръгъл акустичен преобразувател

Разгледани са процесите протичащи в близката и много близката зона (по повърхността на кръгъл акустичен преобразувател). Показано е влиянието на модите върху някои пространствени характеристики на кръгъл акустичен преобразувател. Изградена и приложена е методика за единен подход при изследване на някои пространствени характеристики (АЧХ и ДН) на кръгъл акустичен преобразувател. Сравнено е звуковото поле в близката зона и звуковото поле в далечната зона на кръгъл акустичен преобразувател.

2.1. Изследване на механичните вибрации в много близката зона на кръгъл акустичен преобразувател

При възникване на трептене, в зависимост от конструктивните особености и материала, мембраната на преобразувателя започва да се деформира с някаква амплитуда. Тази амплитуда ще нараства при приближаване на честотата на трептенето до основната резонансна честота f_{mn} и ще достигне максимум, когато двете честоти се изравнят. Съществуват няколко резонанси честоти (определени от химически състав, размери и начин на закрепване на мембраната). Тези резонанси водят до различни деформации по повърхността на мембраната, наречени моди. От конструктивна гледна точка е важно да се знаят честотите, за които мембраната на преобразувателя резонира. За изчисляването им се използва изрза:

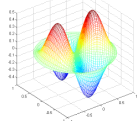
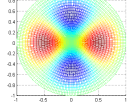
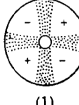
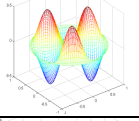
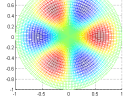
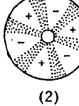
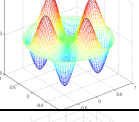
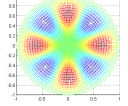
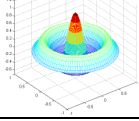
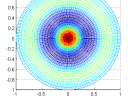

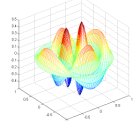
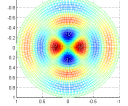

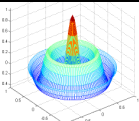
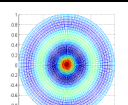
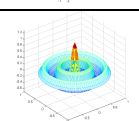
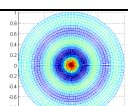

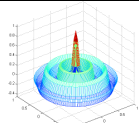
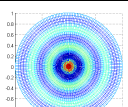
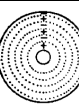
$$f_{mn} = \frac{\pi h}{2a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} (\beta_{mn})^2. \quad (2.11)$$

където a - радиус на мембраната;

ρ - плътност на материала;

β_{mn} - коефициент, чрез който се намират корените на уравнението на движение на мембраната – израз (1.39).

Таблица 1

№	β_{mn}	f_{mn}, Hz	Matlab (3D)	Matlab (2D)	мода/ честота
1	$\beta_{21} = 1.87$	$f_{21} = 341$			 420 CPS (1)
2	$\beta_{31} = 2.27$	$f_{31} = 499$			 500 CPS (2)
3	$\beta_{41} = 2.65$	$f_{41} = 681$			682 Hz – 886 Hz
4	$\beta_{03} = 3.00$	$f_{03} = 872$			 940 CPS (4)
5	$\beta_{23} = 3.94$	$f_{23} = 1505$			 2150 CPS ($\lambda/2$) (6)
6	$\beta_{04} = 4.00$	$f_{04} = 1548$			1548 Hz – 2012 Hz
7	$\beta_{05} = 5.00$	$f_{05} = 2417$			 2800 CPS (λ) (7)
8	$\beta_{06} = 6.00$	$f_{06} = 3480$			 3800 CPS (8)

В Таблица 1 са визуализирани в средата на Matlab[®] някои от модите за кръгъл преобразувател (четвърта и пета колона) и са сравнени с получени експериментални и симулационни резултати на други автори (шеста колона).

2.2. Единен подход при разглеждане на пространствените характеристики на кръгъл акустичен преобразувател. Изследване на пространствените характеристики в акустична близка зона на кръгъл акустичен преобразувател

Изследването на изрази (1.58) и (1.59) показва, че звуковото налягане p_a в дадена точка $A(\theta, r)$, ще зависи от честотата f , разстоянието r и ъгъл на насочване θ . Тази зависимост е графично представена на фиг. 2.4.

Разглеждането на графиката от фиг. 2.4 е необходимо да се извършва по съвкупности (sets) от сечения, всяко от които представлява отделни семейства (families) АЧХ или ДН. Част от тези съвкупности може да се тълкуват еднозначно, доколкото има установени разбирания за представените зависимости. Други нямат конвенционална интерпретация. При разглеждането на фиг. 2.4 се различават:

- съвкупност от хоризонтални сечения, изразяващи зависимостта $p_a(\theta, r)$ за различни честоти f . Самата зависимост $p_a(\theta, r)$ може да се тълкува като семейство от ДН като е взето предвид, че звуковото налягане p_a спада обратнопропорционално на разстоянието r ;

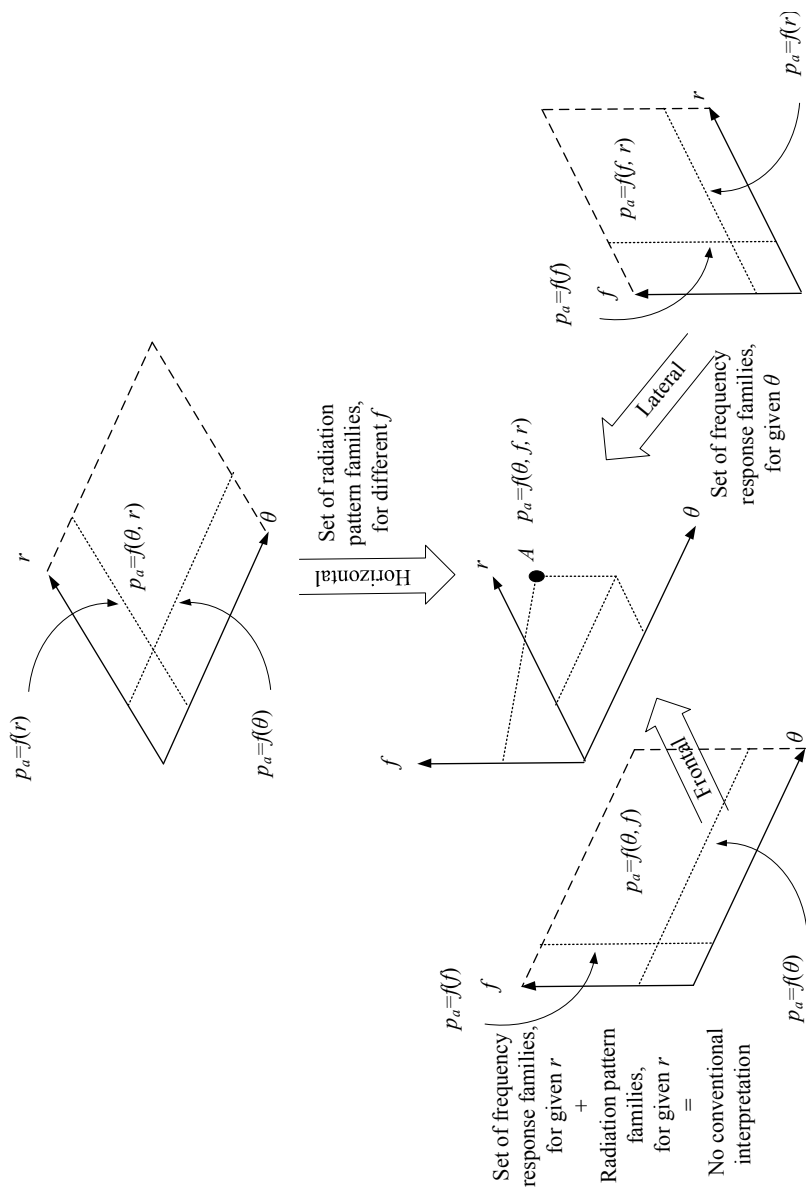
- съвкупност от латерални сечения, изразяващи зависимостта $p_a(f, r)$ за различни ъгли θ . Самата зависимост $p_a(f, r)$ може да се тълкува като семейство от АЧХ като е взето предвид, че звуковото налягане p_a спада обратнопропорционално на разстоянието r ;

- съвкупност от фронтални сечения, изразяващи зависимостта $p_a(\theta, f)$ за различни разстояния r . Самата зависимост представлява кръстосани семейства АЧХ и ДН, които не се поддават на конвенционална интерпретация.

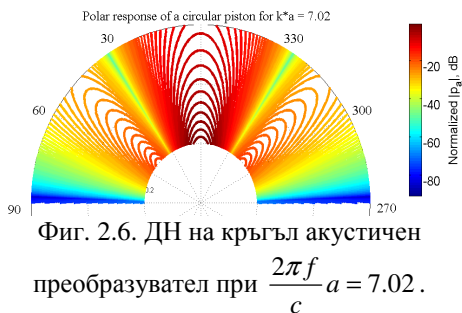
2.3. Сравнение на звуковото поле в близка и в далечна зона на кръгъл акустичен преобразувател

За да се моделира и визуализира диаграмата на насоченост на даден преобразувател в далечна зона, се използва израз (1.58). На фиг. 2.6 е показана ДН на кръгъл акустичен преобразувател за различни разстояния r при постоянна честота $f = const$.

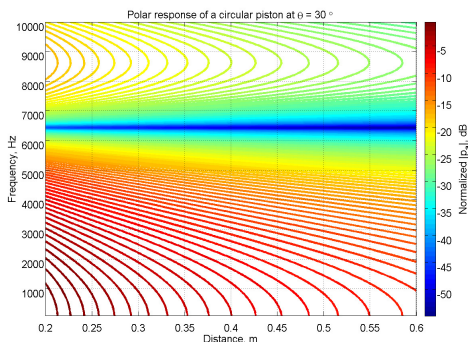
На фиг. 2.7 е показана зависимостта между честотата f и разстоянието r за произволен ъгъл на насочване $\theta = 30^\circ$.



Фиг. 2.4. Разпределение на звуково налягане p_a около кръгъл акустичен преобразувател (в зависимост от θ , f и r).



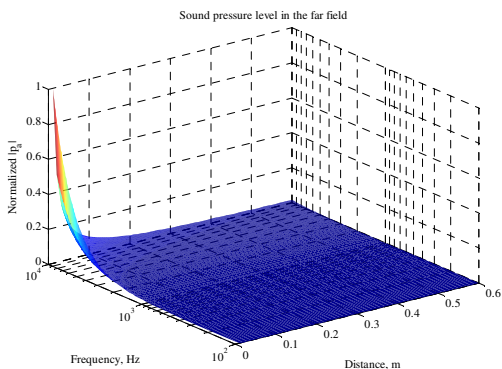
Фиг. 2.6. ДН на кръгъл акустичен преобразувател при $\frac{2\pi f}{c} a = 7.02$.



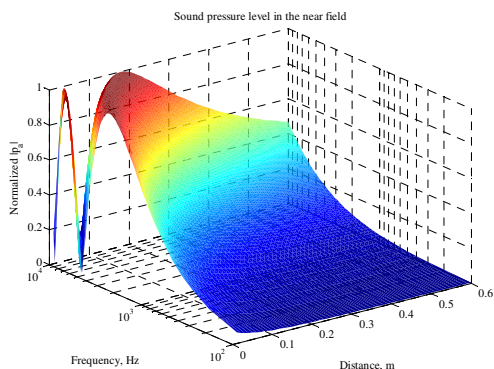
Фиг. 2.7. Разпределение на звуковото налягане p_a в зависимост от r и f при $\theta = 30^\circ$.

За да се моделира и визуализира разпространението на звуковото налягане p_a в пространството около преобразувател, се използват възможностите на програмния продукт Matlab[®]. Програмният продукт решава изрази (1.58) и (1.59) съответно за далечна и за близка зона на високоговорител VVK201, чийто радиус е $a = 0.08 \text{ m}$.

Резултатите са представени на фиг. 2.9 (далечна зона) и фиг. 2.10 (близка зона).



Фиг. 2.9. 3D модел на разпределение на нормирано звуково налягане p_a в далечна зона – израз (1.58).



Фиг. 2.10. 3D модел на разпределение на нормирано звуково налягане p_a в близка зона – израз (1.59).

От представените 3D модели се забелязва несъответствие между стойностите изчислени по израз (1.58) и израз (1.59) непосредствено пред преобразувателя. Използването на израз (1.58) за определяне на звуковото налягане p_a в близката зона ще води до погрешен резултат.

Анализът на израз (1.59) показва, че за определени точки от пространството (по оста) звуковото налягане p_a ще приема екстремални стойности (минимални и максимални) поради наличието на синус функция. Тези екстремуми се определят от решението на синус функцията в израз (1.59):

$$\frac{\pi f}{c} \left[\sqrt{r^2 + a^2} - r \right] = m\pi, m = 0, 1, 2, \dots n. \quad (2.12)$$

За да се получат разстоянията r , за които звуковото налягане p_a ще приема минимална или максимална стойност, е необходимо да се пресметне израз (2.12) относно разстоянието r :

$$r_m = \frac{a^2}{m\lambda} - \frac{m\lambda}{4}, \quad (2.13)$$

където $\lambda = \frac{c}{f}$ е дължина на вълната.

Следователно, първи максимум в разпределение на звуковото налягане p_a ще се появи при:

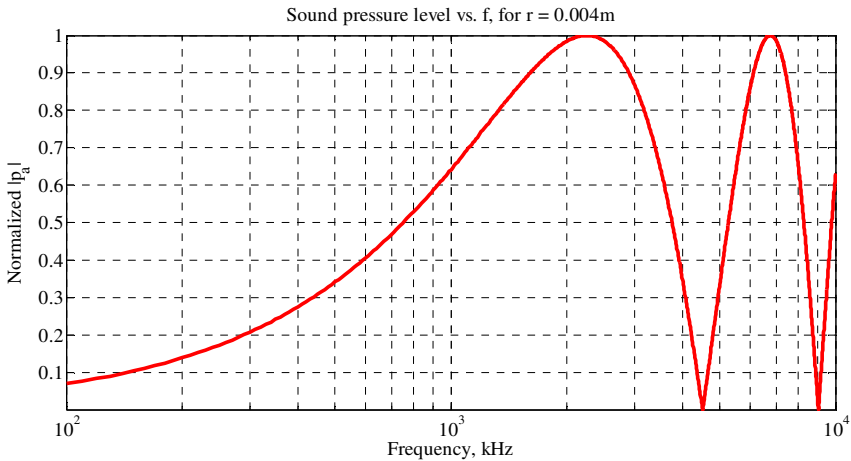
$$r_{\max 1} = \frac{a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4}. \quad (2.14)$$

Съгласно израз (2.12) звуковото налягане p_a , създавано от преобразувател (с радиус $a = 0.08 m$), ще приеме за честота $f = 4500 Hz$ минимална стойност на разстояние $r = 0.004 m$. На фиг. 2.12 е представена зависимостта (сечението) на звуковото налягане p_a и честотата f (изчислена по израз 1.59) за посоченото разстояние $r = 0.004 m$.

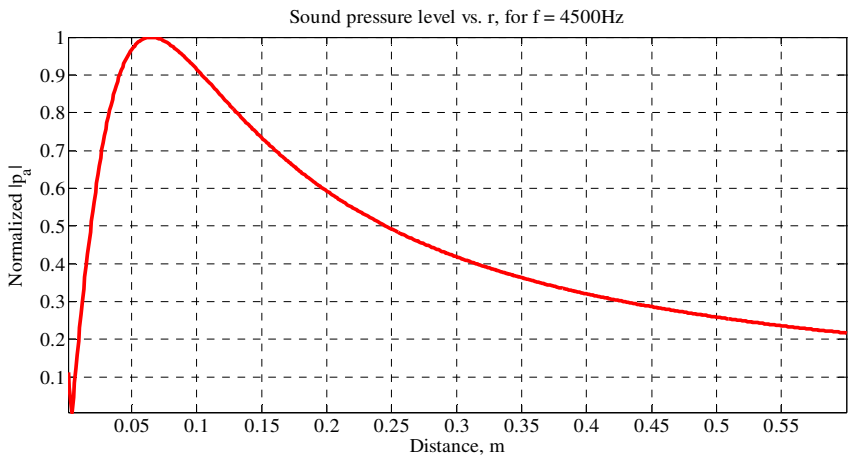
Вижда се, че съществуват честоти, за които звуковото налягане p_a приема минимална стойност. Първи минимум се забелязва на споменатата честота $f = 4500 Hz$.

На фиг. 2.14 е представена зависимостта на звуковото налягане p_a от разстоянието r (изчислена по израз 1.59) за честота $f = 4500 Hz$.

По аналогичен начин на фиг. 2.15 е дадено сечението за честота $f = 4900 Hz$ на различни разстояния r , а на фиг.2.16 е показано сечението за разстояние $r = 0.012 m$ (близка зона) за различни честоти f .

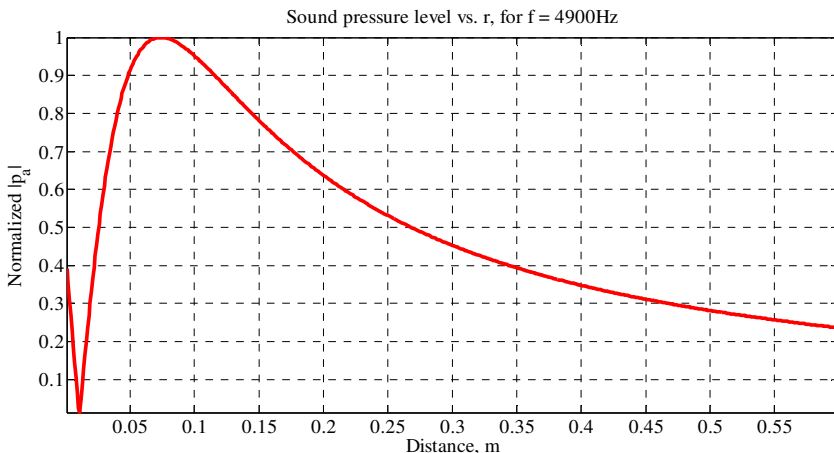


Фиг. 2.12. Зависимост между нормирано звуково налягане p_a и честота f в близка зона (за разстояние $r = 0.004 m$) – израз (1.59).

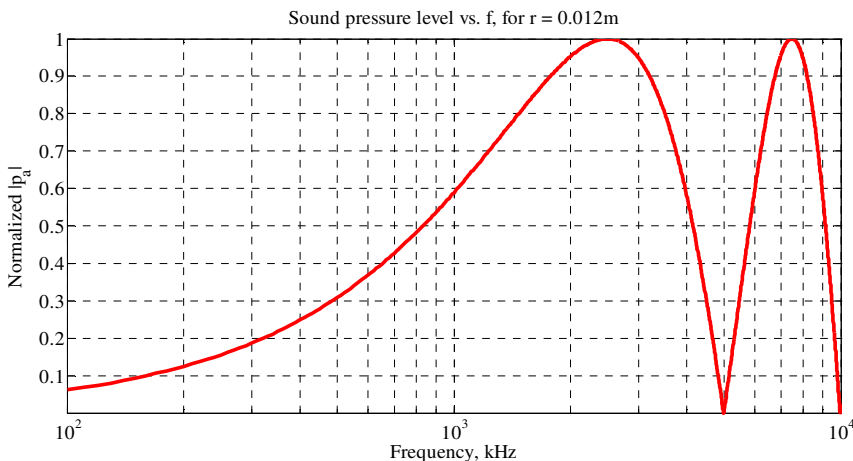


Фиг. 2.14. Зависимост между нормирано звуково налягане p_a и разстояние r в близка зона (за честота $f = 4500 Hz$) – израз (1.59).

От фиг. 2.15 и фиг. 2.16 се вижда, че за честота $f = 4900 Hz$ и разстояние $r = 0.012 m$ звуковото налягане p_a приема минимална стойност (става равно на атмосферното налягане p_s).



Фиг. 2.15. Зависимост между нормирано звуково налягане p_a и разстояние за честота $f = 4900\text{ Hz}$.



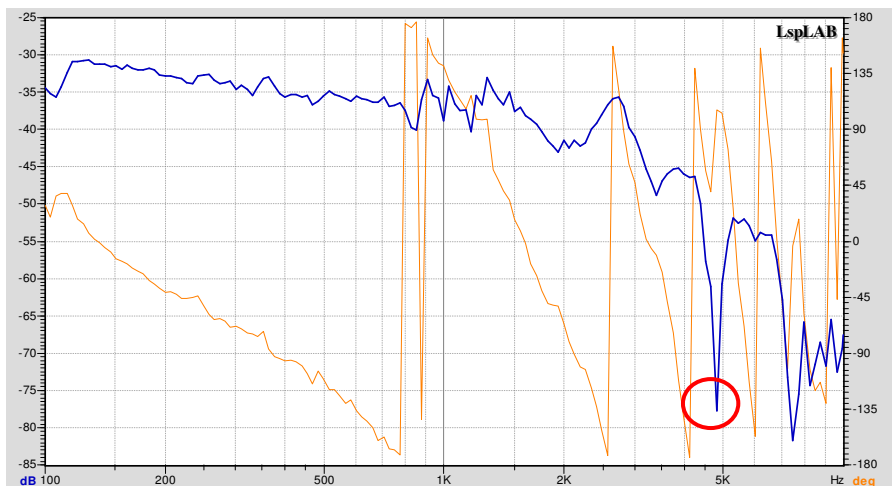
Фиг. 2.16. Зависимост между нормирано звуково налягане p_a и честота f за разстояние $r = 0.012\text{ m}$.

2.4. Изследване на акустична близка зона на кръгъл акустичен преобразувател

За да се потвърди теоретичният анализ и решението на израз (1.59), както и за да се докаже наличието на минимума и максимуми в амплитудно-честотната характеристика, показана на фиг. 2.16, е необходимо да се измери

АЧХ на нискочестотен високоговорител тип VVK201 на разстояние $r = 0.012\text{ m}$ с помощта на chirp сигнал (on-axis). Използват се звукомер Robotron Präzisions с микрофон МК221, звукова карта Realtek High Definition Audio и специализирани софтуерни продукти. Измерванията са извършени в безеховата камера в Технически университет-Варна. По време на експериментите са отчетени температура в безеховата камера 25°C и ниво на фонов шум 28 dB с професионален мултиметър MS6300.

Пространствените характеристики са изчислени със софтуерни продукти като резултатите са представени на фиг. 2.17 и фиг. 2.18.

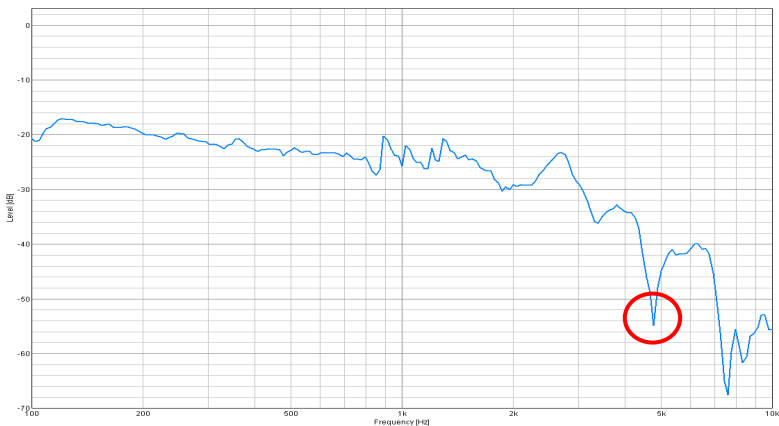


Фиг. 2.17. АЧХ на високоговорител VVK201 измерена на разстояние $r = 0.012\text{ m}$ с програмнен продукт LoudSpeaker LAB.

От фиг. 2.17 и фиг. 2.18 се вижда, че на разстояние $r = 0.012\text{ m}$ от високоговорителя съществува минимум (отбелязан с червен кръг) в разпределението на звуковото налягане за честота $f = 4900\text{ Hz}$.

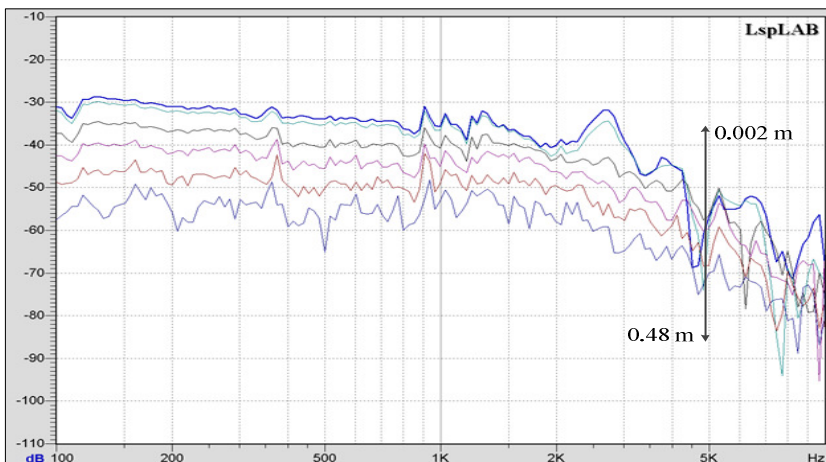
За да се докаже, че звуковото налягане p_a спада обратнопропорционално на разстоянието r , е необходимо да се измери АЧХ на високоговорителя за няколко разстояния (фиг. 2.19) за честота $f = 4900\text{ Hz}$.

Ако се отчете нивото на звуковото налягане p_a при честота $f = 4900\text{ Hz}$ от всички измервания, представени на фиг. 2.19, ще се получи графиката от фиг. 2.20.

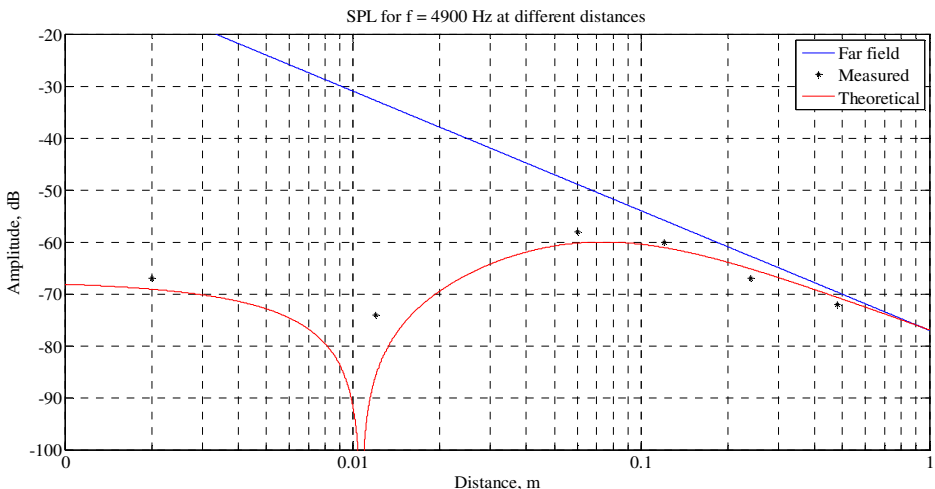


Фиг. 2.18. АЧХ на високоговорител VVK201 измерена на разстояние $r = 0.012\text{ m}$ с програмен продукт Realtime Analyzer.

Забелязва се добро съвпадение между резултатите от експеримента и теоретичния анализ. Доказва се наличие на минимум (съответно максимум) в разпределение на звуковото налягане p_a , което кръгъл акустичен преобразувател създава, както и спадането на амплитудата му с нарастване на разстоянието r .



Фиг. 2.19. АЧХ на високоговорител VVK201 измерена на разстояния $r = 0.002\text{ m}, 0.012\text{ m}, 0.06\text{ m}, 0.12\text{ m}, 0.24\text{ m}, 0.48\text{ m}$.



Фиг. 2.20. Измерено, нормирано звуково налягане p_a за честота $f = 4900$ Hz и разстояния $r = 0.002$ m, 0.012 m, 0.06 m, 0.12 m, 0.24 m, 0.48 m.

Получените минимуми и максимуми в разпределение на звуковото налягане са характерни за зоните на Fresnel.

2.5. Заключение

Изградена е методика за единен подход при изследване на пространствените характеристики на кръгъл акустичен преобразувател. Нужно е да се отбележи, че подобен подход е иновативен и лесно приложим, благодарение на все по-бързо развиващите се софтуерни продукти (напр. Matlab[®]).

От експерименталното изследване на близката зона се наложиха следните извода:

- за определени честоти f и разстояния r от високоговорителя съществуват минимуми в разпределението на звуковото налягане p_a . В тези точки (изчислени по израз (1.59)) няма да е възможно приемането на акустичен сигнал;

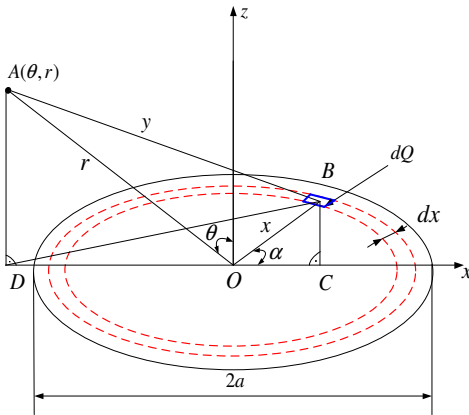
- теорията и практическите резултати може да се използват при проектиране на високоговорители и при избор на подходящ сигнал за дадена система.

Глава III. Изследване на прехода между близка и далечна зона на кръгъл акустичен преобразувател

Дефиниран е обобщен модифициран израз за определяне на звуковото налягане p_a , създавано от кръгъл акустичен преобразувател. Разгледани са зоните на Fresnel. На базата на теоретичен анализ и проведени експерименти върху пространствените характеристики е предложен критерий за определяне на граници на зоните на Fresnel на кръгъл акустичен преобразувател.

3.1. Извеждане на обобщен модифициран израз за определяне на звуковото налягане, създавано от кръгъл акустичен преобразувател

За да се разгледа звуковото налягане p_a в далечна зона се използва постановката, представена на фиг. 3.1.



Фиг. 3.1. Геометрия на кръгъл акустичен преобразувател

От фиг. 3.1 може да се определи повърхността на точков излъчвател dQ :

$$dQ = x dx d\alpha. \quad (3.1)$$

Звуковото налягане p_a , което преобразувателят от фиг. 3.1 създава в далечна зона, може да се намери по израз (1.58) след интегриране по α :

$$p_a(\theta, f, r) = \frac{\rho_s f v_m}{r} e^{-j \frac{2\pi f}{c} r} \int_0^a J_0 \left(\frac{2\pi f}{c} x \sin \theta \right) x dx, \quad (3.2)$$

където J_0 е функция на Bessel от нулев ред и първи вид.

След интегриране по x :

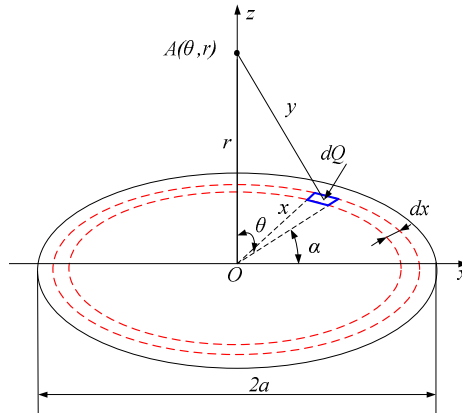
$$p_a(\theta, f, r) = \frac{\rho_s f v_m a^2}{r} e^{-j \frac{2\pi f}{c} r} \frac{J_1\left(\frac{2\pi f}{c} a \sin \theta\right)}{\left(\frac{2\pi f}{c} a \sin \theta\right)}, \quad (3.3)$$

където J_1 е функция на Bessel от първи ред и първи вид.

Отношението на звуковото налягане в произволно направление $p_{a\theta}$ към това, създавано по акустичната ос на излъчващата повърхност p_{a0} , се нарича диаграма на насоченост $G(\theta, f)$ на акустичен преобразувател, която в далечна зона е:

$$G(\theta, f) = \frac{2J_1\left(\frac{2\pi f}{c} a \sin \theta\right)}{\left(\frac{2\pi f}{c} a \sin \theta\right)}. \quad (3.9)$$

Поради наличието на функция на Bessel от първи вид и първи ред, в диаграмата на насоченост $G(\theta, f)$ ще съществуват ъгли, за които звуковото налягане p_a ще приема нулеви стойности (на практика звуковото налягане p_a ще е равно на атмосферното p_s). Тези ъгли зависят от корените на функцията на Bessel.



Фиг. 3.6. Геометрия на кръгъл акустичен преобразувател (относно звуково налягане по оста).

За близка зона чрез използване на математическите зависимости от фиг. 3.6 може да се дефинира израз за изчисляване на звуковото налягане p_a по оста на акустичния преобразувател:

$$p_a(0, f, r, t) = j\rho_s f v_m e^{j\omega t} \int_0^a \frac{e^{-j\frac{2\pi f}{c}\sqrt{r^2+x^2}}}{\sqrt{r^2+x^2}} 2\pi x dx \quad (3.10)$$

или общото, комплексно звуково налягане p_a е:

$$p_a(0, f, r, t) = \rho_s f v_m \left\{ 1 - e^{-j\frac{2\pi f}{c}(\sqrt{r^2+a^2}-r)} \right\} e^{j\left(\omega t - \frac{2\pi f}{c}r\right)}. \quad (3.12)$$

Моментната амплитуда на звуковото налягане p_a при пренебрегване на фазата е скаларна величина, която в дадена точка от близката зона на разстояние r от източника на звуковата вълна може да се изчисли по израз (1.59).

Често се допуска, че разстоянието y – между точков излъчвател dQ и точката на измерване A и разстоянието r – между преобразувател и точката на измерване A са равни (фиг. 3.1 и фиг. 3.6). За далечна зона грешката при определяне на звуковото налягане p_a ще е пренебрежимо малка за разлика от грешката в близката зона. Това налага необходимостта от дефиниране на обобщен модифициран израз, чрез който да се определя звуковото налягане p_a във всяка точка от пространството около преобразувателя.

От направените по-горе разсъждения става ясно, че вместо разстоянието r – между преобразувател и точката на измерване A в извеждане на интеграла на Rayleigh ще се ползва разстоянието y – между точков излъчвател dQ и точката на измерване A .

От фиг. 3.1, където ъгъл $DCB = 90^\circ$, могат да се дефинират няколко равенства:

$$\overline{DC} = \overline{DO} + \overline{OC} = r \sin \theta + x \cos \alpha; \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \overline{BD}^2 &= \overline{DC}^2 + \overline{CB}^2 = \\ &= (r \sin \theta + x \cos \alpha)^2 + x^2 \sin^2 \alpha = \\ &= r^2 \sin^2 \theta + 2rx \sin \theta \cos \alpha + x^2; \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \overline{AB}^2 &= \overline{DB}^2 + \overline{AD}^2 = \\ &= r^2 \sin^2 \theta + 2rx \sin \theta \cos \alpha + x^2 + r^2 \cos^2 \theta. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Израз (3.15) може да се представи като:

$$y = \sqrt{r^2 + x^2 + 2rx \sin \theta \cos \alpha}. \quad (3.17)$$

Елементарното звуково налягане dp_θ в направление ъгъл θ , което всеки точков източник създава е:

$$dp_\theta = \frac{\rho_s c k v_m e^{j(\alpha x - ky)}}{2\pi y} dQ. \quad (3.18)$$

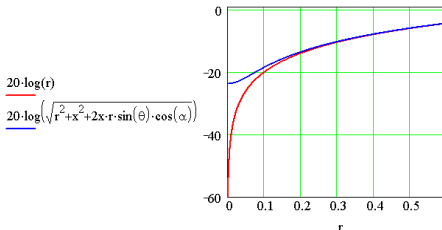
След като се използва равенството – израз (3.1) в израз (3.18) се записва:

$$dp_\theta = \frac{\rho_s c k v_m e^{j(\alpha x - ky)}}{2\pi y} x dx d\alpha. \quad (3.19)$$

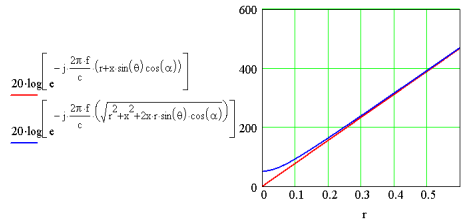
След заместване на израз (3.17) в израз (3.19) и интегриране по цялата площ на кръглия акустичен преобразувател се получава модифициран израз за изчисляване на общото звуковото налягане p_a , създавано от всички точкови излъчватели dQ :

$$p_{aTotal}(\theta, f, r) = \rho_s f v_m e^{j\alpha a} \int_0^a x dx \int_0^{2\pi} \frac{e^{-j\frac{2\pi f}{c}(\sqrt{r^2+x^2+2rx\sin\theta\cos\alpha})}}{\sqrt{r^2+x^2+2rx\sin\theta\cos\alpha}} d\alpha. \quad (3.20)$$

За далечна зона, когато разстоянието е много по-голямо от радиуса на преобразувателя ($r \gg a$) се приема, че знаменателят в произведението на втория интеграл е $\sqrt{r^2+x^2+2rx\sin\theta\cos\alpha} = r$ (фиг. 3.7), а числителят $e^{-j\frac{2\pi f}{c}(\sqrt{r^2+x^2+2rx\sin\theta\cos\alpha})} = e^{-j\frac{2\pi f}{c}(r+x\sin\theta\cos\alpha)}$ (фиг. 3.8).



Фиг. 3.7. Относно знаменателят във втория интеграл в израз (3.20).



Фиг. 3.8. Относно числителят във втория интеграл в израз (3.20).

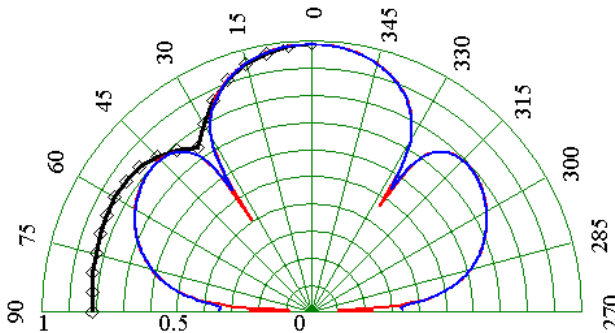
След като се заместят новите числител и знаменател в израз (3.20), се получава добре известният израз (1.58) за определяне на звуковото налягане p_a в далечна зона.

3.2. Експериментални изследвания на обобщен модифициран израз за определяне на звуковото налягане, създавано от кръгъл акустичен преобразувател

Практическите измервания се реализирани с помощта на звукомер Robotron Präzisions, микрофон МК221, звукова карта Realtek High Definition Audio, измервателен комплекс Velleman-PCSGU250, лаптоп и програма в средата на Matlab®. Експериментите са извършени в безеховата камера в Технически университет-Варна. По време на изследването с професионален мултиметър MS6300 са отчетени температурата в камерата 26°C и ниво на фонов шум 26.7 dB .

Измерва се диаграмата на насоченост (звуково налягане p_a на даден ъгъл θ) на високоговорител *JBL* с номинален диаметър 0.13 m . Параметрите са подбрани по начин, по който $\frac{2\pi f}{c}a = 7.02$.

Резултати от измервания на разстояния – $r = 2.40\text{ m}; 0.60\text{ m}; 0.15\text{ m}$ са представени съответно на фиг. 3.9, фиг. 3.10 и фиг. 3.11.



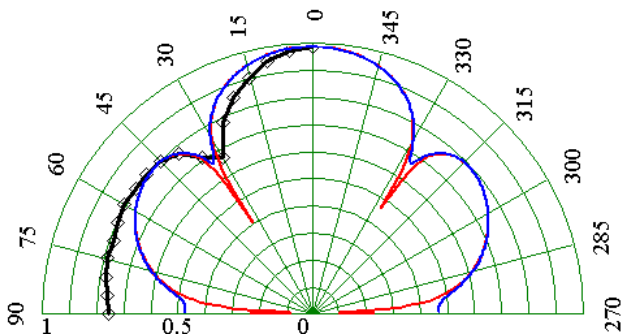
Фиг. 3.9. Звуково налягане p_a на $r = 2.40\text{ m}$ от преобразувателя при

$$\frac{2\pi f}{c}a = 7.02$$

Синьо – модифициран израз (3.20);

Червено – известен израз (1.58);

Черно с диаманти – измерване от $(0^{\circ} \div 90^{\circ})$.



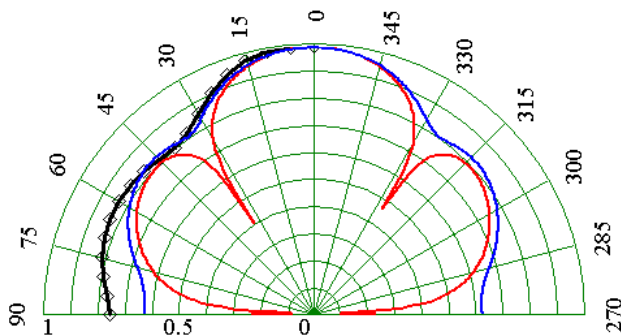
Фиг. 3.10. Звуково налягане p_a на $r = 0.60\text{ m}$ от преобразувателя при

$$\frac{2\pi f}{c} a = 7.02$$

Синьо – модифициран израз (3.20);

Червено – известен израз (1.58);

Черно с диаманти – измерване от ($0^\circ \div 90^\circ$).



Фиг. 3.11. Звуково налягане p_a на $r = 0.15\text{ m}$ от преобразувателя при

$$\frac{2\pi f}{c} a = 7.02$$

Синьо – модифициран израз (3.20);

Червено – известен израз (1.58);

Черно с диаманти – измерване от ($0^\circ \div 90^\circ$).

От получените резултати представени на фиг. 3.9 ÷ 3.11 се вижда, че експериментално получената диаграма на насоченост се приближава повече до теоретично получената диаграма на насоченост по дефинирания модифициран израз (3.20).

3.3. Зони на Fresnel в звуковото поле на кръгъл акустичен преобразувател

Звуковото поле в непосредствена близост до преобразувател е много сложно поради наличието на минимума и максимуми в звуковото налягане p_a . Такава интерференция в разпределение на звуковото налягане p_a е характерна за зоните на Fresnel.

В далечната зона характерът на разпространение на звуковото налягане p_a спада обратнопропорционално на разстоянието r . Тази зона се нарича зона на Fraunhofer.

От изградената методика за единен подход при разглеждане на пространствените характеристики на кръгъл акустичен преобразувател стана ясно, че звуковото налягане p_a зависи освен от разстоянието r и от честотата f . Представените експерименти доказват, че минимумите и максимумите в разпределение на звуковото налягане p_a са различни за различни честоти f . Следователно границата между зоните с интерференции (зони на Fresnel) и зоната, в която звуковото налягане p_a спада монотонно (зона на Fraunhofer), ще се изменя по разстояние r и по честота f .

Долната граница по честота на зоните на Fresnel $f_{\min \text{ Fresnel}}$ може да се намери чрез израз (2.14), който ще има физически смисъл само ако $r_{\max 1} > 0$:

$$\frac{a^2 f}{c} - \frac{c}{4f} > 0 \quad (3.21)$$

или:

$$f_{\min \text{ Fresnel}} > \frac{c}{2a}. \quad (3.22)$$

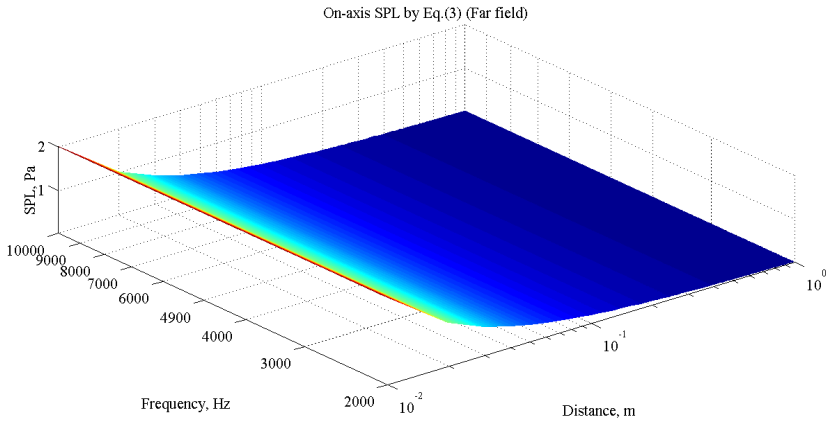
За горна граница по честота на зоните на Fresnel $f_{\max \text{ Fresnel}}$ може да се приеме горната граница на честотния диапазон, който преобразувателят е способен да възпроизведе.

Горната граница по разстояние $r_{\max \text{ Fresnel}}$ на зоните на Fresnel се определя по начин, подобен на определянето на спектралната плътност на поредица от правоъгълни импулси или времеконстанта на RC – верига, т. е. изборът зависи от практически съображения. Определянето на горната граница по разстояние $r_{\max \text{ Fresnel}}$ на зоните на Fresnel се базира на разликата между изрази (3.20) и (1.58):

$$\Delta p_a(\theta, f, r) = \frac{P_{a\text{Total}} - P_{a\text{Far}}}{P_{a\text{Far}}} \cdot 100. \quad (3.23)$$

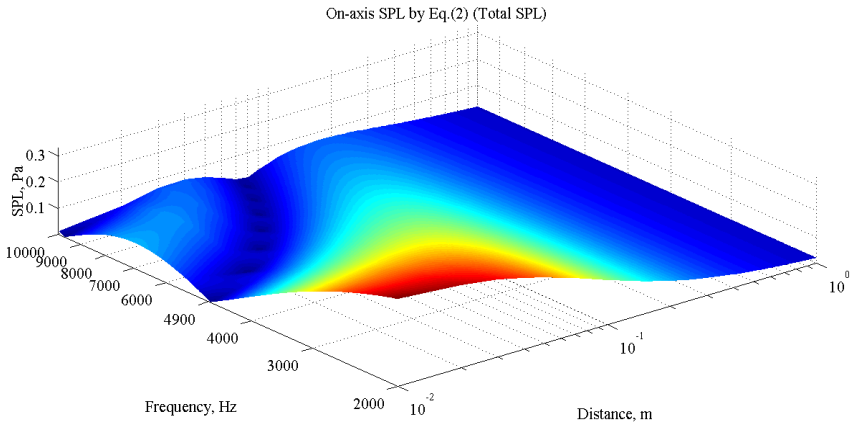
Моментът (количествено изразен в проценти), в който двата израза стават еднакви, се взема за горна граница на зоните на Fresnel.

На фиг. 3.12 е показано звуковото налягане p_{aFar} по оста, характерно за далечната зона (израз 1.58), за преобразувател с радиус $a = 0.08\text{ m}$.



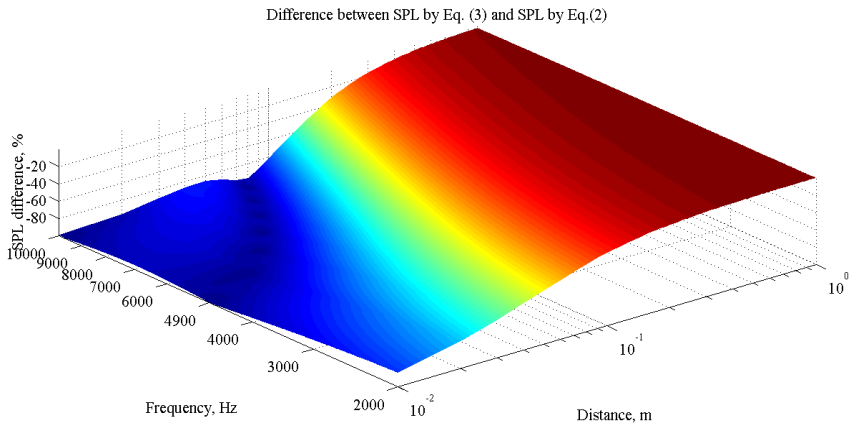
Фиг. 3.12. Звуково налягане p_{aFar} , по оста в далечна зона, създадено от преобразувател с радиус $a = 0.08\text{ m}$.

На фиг. 3.13 е показано звуковото налягане p_{aTotal} по оста (израз 3.20), за преобразувател с радиус $a = 0.08\text{ m}$.

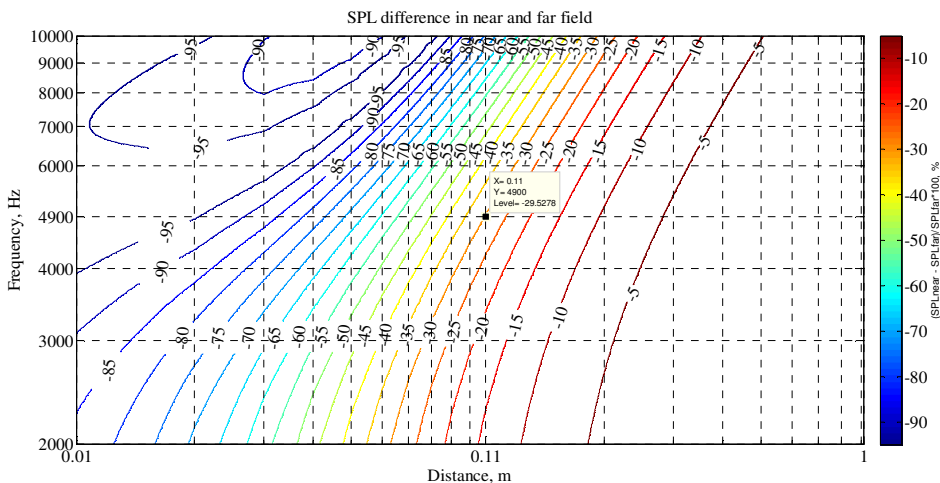


Фиг. 3.13. Звуково налягане p_{aTotal} , по оста, създадено от преобразувател с радиус $a = 0.08\text{ m}$.

Нормираната разлика между общото звуковото налягане p_{aTotal} (израз (3.20)) и звуковото налягане p_{aFar} в далечна зона (израз (1.58)), изчислена по израз (3.23), е показана на фиг. 3.14. Същата зависимост, но изразена в проценти, е показана на фиг. 3.15.



Фиг. 3.14. Нормирана разлика - по израз (3.23).



Фиг. 3.15. Нормирана разлика – по израз (3.23) изразена в проценти.

Фиг. 3.15 показва, че зоните на Fresnel съществуват само за някои честоти f и някои разстояния r (например точките с разлика в звуковото налягане Δp_a

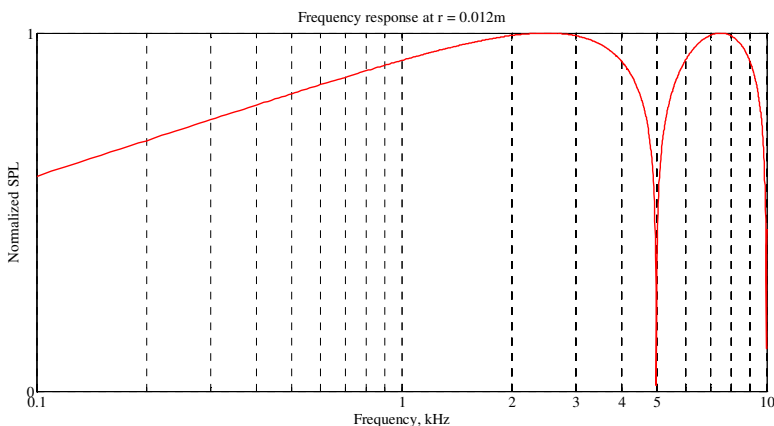
по-голяма от 30%). В настоящата работа като горна граница на зоните на Fresnel се приема (по аналог - ниво 0.707), моментът, в който $\Delta p_a \leq 30\%$.

3.4. Експериментални изследвания върху зоните на Fresnel. Критерий за определяне границите на зоните на Fresnel на кръгъл акустичен преобразувател

Практическите измервания са реализирани с измервателен комплекс Velleman-PCSGU250, лаптоп, звукомер Robotron Präzisions, микрофон МК221, високоговорител – VVK 201 (номинален радиус $a = 0.08m$) и софтуерна програма Loudspeaker Lab. Експериментите са извършени в безеховата камера в Технически университет-Варна. По време на изследването с професионален мултиметър MS6300 са отчетени температурата в камерата $19.7^\circ C$ и ниво на фонов шум $26.8dB$.

За високоговорител с радиус $a = 0.08m$ долната граница по честота $f_{\min Fresnel}$ на зоните на Fresnel (израз (3.22)) е $f_{\min Fresnel} > 2147 Hz$ (при скорост на звука $c = 343.22 m/s$).

За горна граница по честота на зоните на Fresnel се приема горната граница на работния диапазон на високоговорителя - $f_{\max Fresnel} = 10000 Hz$ (за разглеждания високоговорител). От фиг. 3.15 се вижда, че за разстояния по-големи от $r > 0.065m$ при честота $f = 2200 Hz$ и разстояния по-големи от $r > 0.21m$ при честота $f = 10000 Hz$ звуковото налягане спада монотонно, обратнопропорционално на разстоянието r (няма минимума и максимуми – няма зони на Fresnel), следователно е налична зона на Fraunhofer.



Фиг. 3.16. Теоретична АЧХ на кръгъл акустичен преобразувател на разстояние $r = 0.012m$, изчислена по израз (3.20).

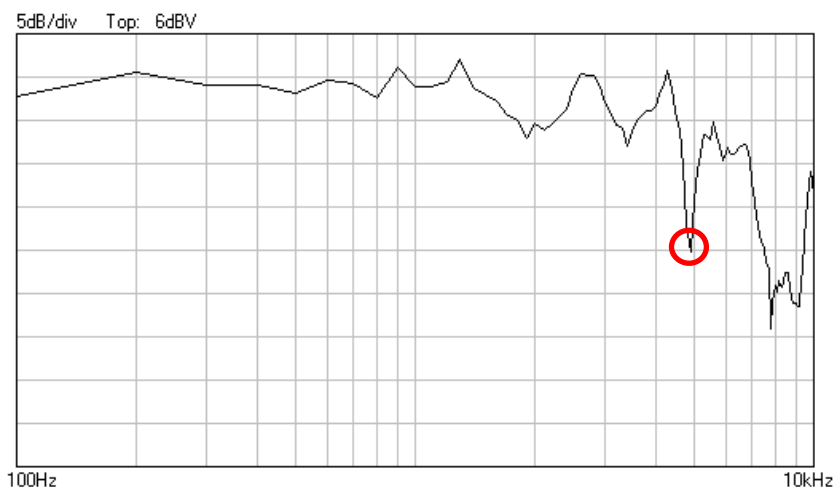
Теоретична АЧХ на високоговорител с аналогичен радиус ($a = 0.08m$) на разстояние $r = 0.012m$ е показана на фиг. 3.16. Теоретичната крива (червен цвят) представлява разрез на 3D графиката от фиг. 3.13. Вижда се наличието на минимум за честота $f = 4900 Hz$.

На фиг. 3.17 е показан резултат от експериментално измерване на АЧХ на разглеждания високоговорител за същото разстояние.

Забелязва се съвпадение между експериментално получената АЧХ (фиг. 3.17) и теоретичната АЧХ (фиг. 3.16). И в двете графики съществува минимум за честота $f = 4900 Hz$ в разпределение на звуковото налягане p_a за разстояние $r = 0.012m$.

От фиг. 3.17 се виждат силно изразени минимума и максимуми в АЧХ за честоти $f > 2147 Hz$. Някои от тези минимума се дължат на зоните на Fresnel (например силно изразеният минимум за честота $f = 4900 Hz$, отбелязан с червен кръг).

За разглеждания високоговорител при честота $f = 4900 Hz$ звуковото налягане p_a спада монотонно за разстояния $r > 0.11m$, както може да се определи и по предложеният критерий. От графиката на фиг. 3.15 се вижда, че за честота $f = 4900 Hz$ и разстояния $r > 0.11m$ разликата е $\Delta p_a \leq 30\%$, което означава (по предложениия критерий), че е налична зона на Fraunhofer.



Фиг. 3.17. Измерена АЧХ на кръгъл акустичен преобразувател на разстояние $r = 0.012m$.

3.5. Заключение

От анализа на експерименталните данни за близката зона на кръгъл акустичен преобразувател и тяхното графично представяне (фиг. 3.7 ÷ 3.11) може да се заключи:

- предложеният обобщен модифициран израз за определяне на звуковото налягане p_{aTotal} - израз (3.20) е по-точен в сравнение с известния израз (1.58) що се отнася за близка зона и следва да се използва за определяне на общото звуковото налягане p_a в близка и далечна зона;

- с увеличаване на разстоянието графичното представяне на двата израза, предложеният (3.20) и известният (1.58), се прекрива и в далечната зона става напълно идентично.

От анализа на експерименталните данни върху прехода между близка и далечна зона на кръгъл акустичен преобразувател може да се заключи:

- експериментално полученият минимум в разпределение на звуковото налягане за $f = 4900 \text{ Hz}$, представен на фиг. 3.17, се наблюдава и в теоретично получената АЧХ от фиг. 3.16, което доказва съществуването на минимума и максимуми (зони на Fresnel) за дадената честота f на даденото разстояние r за даден високоговорител (с определен радиус a);

- от фиг. 3.17 се вижда, че за разстояния r , близки до преобразувателя, и $f = 4900 \text{ Hz}$ се наблюдава минимум в звуковото налягане (характерен за зоните на Fresnel). За достатъчно големи разстояния r експериментално полученото звуково налягане p_a започва да спада монотонно, обратнопропорционално на разстоянието r (характерно за зоната на Fraunhofer);

- ако се приложи предложеният критерий може да се определят, за дадения високоговорител с радиус $a = 0.08 \text{ m}$, зоните на Fresnel по честота f и по разстояние r . Зоните на Fresnel започват от $f_{\min \text{ Fresnel}} > 2147 \text{ Hz}$ до максималния работен диапазон - $f_{\max \text{ Fresnel}} = 10000 \text{ Hz}$ по честота. След като се приложи условието $\Delta p_a \leq 30\%$, разстоянието r , на което се разпростират зоните на Fresnel, се получава различно за различната честота f . Например, за честота $f = 4900 \text{ Hz}$ (по фиг. 3.15) зони на Fresnel има за разстояния $r < 0.11 \text{ m}$; за честота $f = 2200 \text{ Hz}$ - зоните на Fresnel съществуват за разстояния $r < 0.065 \text{ m}$ и т.н.;

- колкото по-голям преобразувател (с по-голям радиус a), толкова по-обширни ще са зоните на Fresnel (зоните на Fresnel нарастват по разстояние, пропорционално с нарастване на радиуса a на преобразувателя);

- колкото по-висока честота f , толкова по-обширни ще са зоните на Fresnel (зоните на Fresnel нарастват по разстояние, пропорционално с нарастване на честотата f);

- колкото по-голяма дължина на вълната λ , толкова по-малки зони на Fresnel (зоните на Fresnel намаляват по разстояние, пропорционално с увеличаване на дължината на вълната λ);

- колкото по-голяма скорост на звука c , толкова по-малки зони на Fresnel (зоните на Fresnel намаляват по разстояние, пропорционално с увеличаване на скоростта на звука c).

Нужно е да се отбележи, че съществуват и други методи базирани на изрази (подобни на 2.14), даващи последният максимум в разпределение на звуковото налягане p_a , по който се определя горната граница по разстояние на зоните на Fresnel. Съществува и хибриден метод на интензитета (hybrid intensity method) за определяне на граница между близка и далечна зона (между зони на Fresnel и зона на Fraunhofer).

За разлика от предложения от автора критерий за определяне на границите на зоните на Fresnel използваните методи (цитирани по-горе) имат недостатъци. Те са или твърде груби и неточни, или пък твърде сложни и трудно приложими на практика.

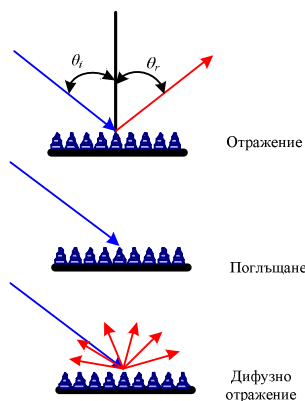
Глава IV. Особенности при акустическите измервания. Избор на тестови сигнали. Акустични измервания в свободно поле и в безехова камера

Засегнати са някои специфични моменти при акустичните измервания: избор на подходящ тестов сигнал; особености при акустични измервания в свободно поле и безехова камера. Експерименталните изследвания и измервания, подкрепящи изложението представено в гл. II и гл. III, са извършени чрез изпитателни лабораторни постановки, използващи съвременни измервателни средства и системи.

4.1. Особенности при акустичните измервания. Избор на тестови сигнали

Безеховата камера в Технически университет-Варна е с размери: ширина – 3.3m, дължина – 5.6m и височина – 3.1m. Стените, подът и таванът на помещението са изработени от бетон, с голяма плътност и са покрити с три вида облицовки, с клиновидна форма, разположени по различен начин. Поради това, че камерата е електромагнитна, има и екранировка срещу електромагнитни влияния.

За оценка на акустическите качества на помещението се прилага лъчевата теория. Приема се, че звуковата вълна представлява лъч (фиг. 4.1).

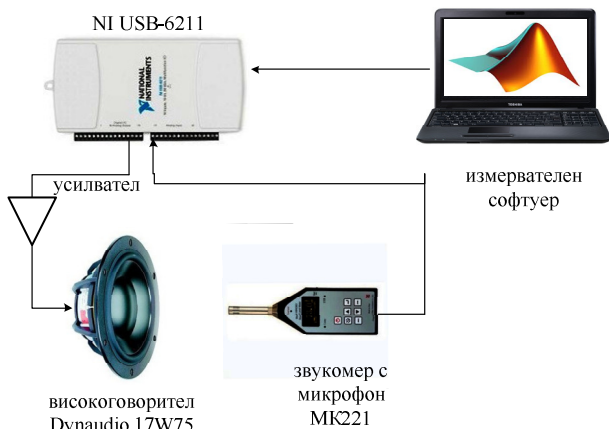


Фиг. 4.1. Отражение, поглъщане, дифузно отражение.

В най-добрия случай разпространяващата се звукова вълна в безеховата камера ще се абсорбира от порестото покритие на стените, подът и таванът ѝ. На практика е по вероятно да се получи дифузно отражение, при което падащата звукова вълна ще се разпадне на множество отразени вълни с много малки амплитуди. Най-неблагоприятният вариант за акустични измервания е да се получат отразени звукови вълни, които ще замаскират директния сигнал.

4.2. Акустични измервания в свободно поле и в безехова камера

За да се изследват възможностите на безеховата камера за електроакустични измервания, се използват система за сбор на данни NI USB-6211, звукомер Robotron Präzisions с микрофон МК221, високоговорител *Dynaudio 17W75* и програма в средата на Matlab®. Схема на изпитателната лабораторна постановка е показана на фиг. 4.7.



Фиг. 4.7. Схема на опитна постановка.

В първия случай (фиг. 4.8) микрофонът и високоговорителят се намират на разстояние $d_{direct} = 1\text{ m}$. Директният сигнал се очаква да пристигне на входа на измервателната система в момент:

$$t_{direct} = \frac{d_{direct}}{c}. \quad (4.18)$$

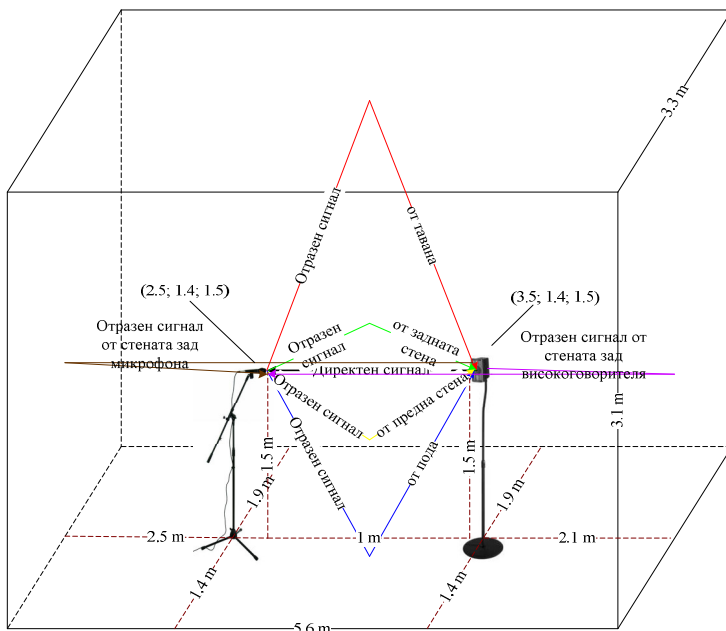
Скоростта на звука може да се изчисли по приблизителна формула изведена, чрез използване на редове на Taylor:

$$c = 331.4 + 0.6 \cdot C. \quad (4.19)$$

По време на експеримента с професионален мултиметър MS6300 са отчетени температурата в безеховата камера 28°C и ниво на фонов шум 26.8 dB .

От израз (4.18) следва, че директният сигнал ще пристигне в момент:

$$t_{direct} = \frac{1}{331.4 + 0.6 \cdot 28} = 0.00287\text{ s}. \quad (4.20)$$



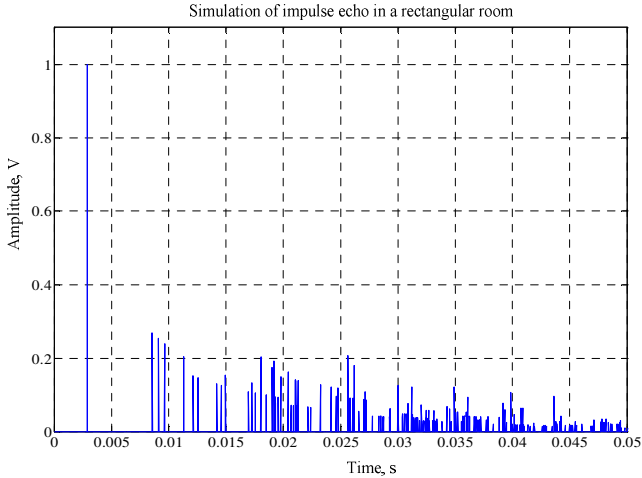
Фиг. 4.8. Отразени звукови вълни в безеховата камера в Технически университет - Варна (първи случай).

Пътят, който отразеният от тавана сигнал изминава, може да се изчисли по питагорова теорема:

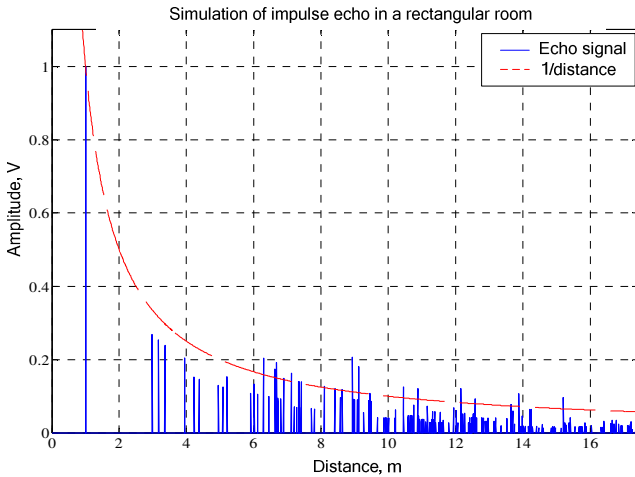
$$d_{ceilref} = 2 \cdot \sqrt{1.6^2 + 0.5^2} = 2.72 \text{ m} \quad (4.21)$$

и ще пристигне в момент:

$$t_{ceilref} = \frac{2.72}{331.4 + 0.6 \cdot 28} = 0.00781 \text{ s}. \quad (4.22)$$



Фиг. 4.10. Отразени сигнали във функция на времето t (постановката от първия случай).



Фиг. 4.11. Отразени сигнали във функция на разстоянието d (постановката от първия случай).

По аналогичен начин се намира момента на пристигане на всички първично отразени сигнали.

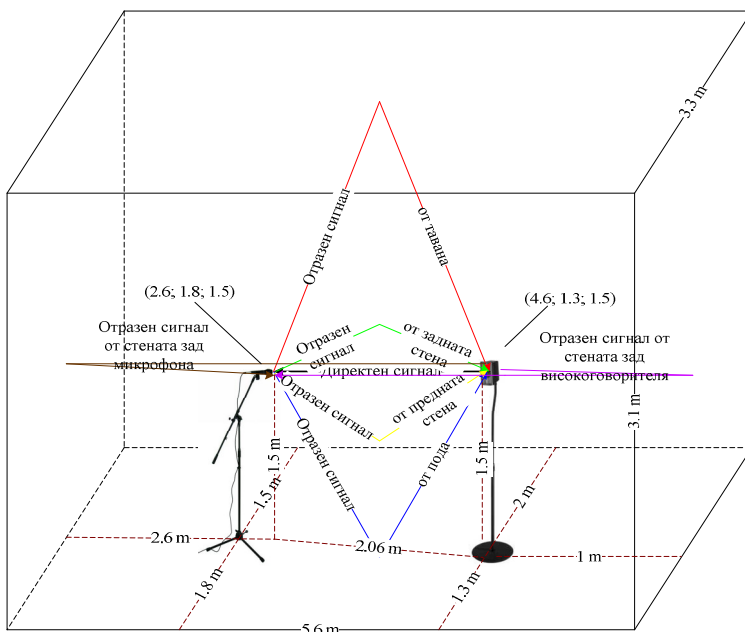
На фиг. 4.10 са показани теоретично изчислените по авторска програма в средата на Matlab® (Приложение 1), времена на закъснение на отразените сигнали, а на фиг. 4.11 – разстоянието d , което е изминал всеки един от тях.

При втория случай (фиг. 4.12), когато микрофонът и високоговорителят се намират на разстояние $d_{direct} = 2.06\text{ m}$ директният сигнал ще пристигне в момент:

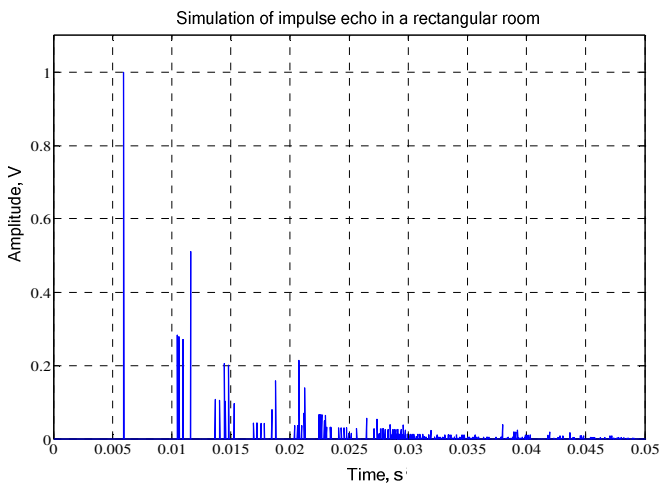
$$t_{direct} = \frac{2.06}{331.4 + 0.6 \cdot 28} = 0,00591\text{ s}. \quad (4.23)$$

На фиг. 4.13 са показани теоретично изчислените времена на закъснение на отразените сигнали, а на фиг. 4.14 – разстоянието, което е изминал всеки един от тях.

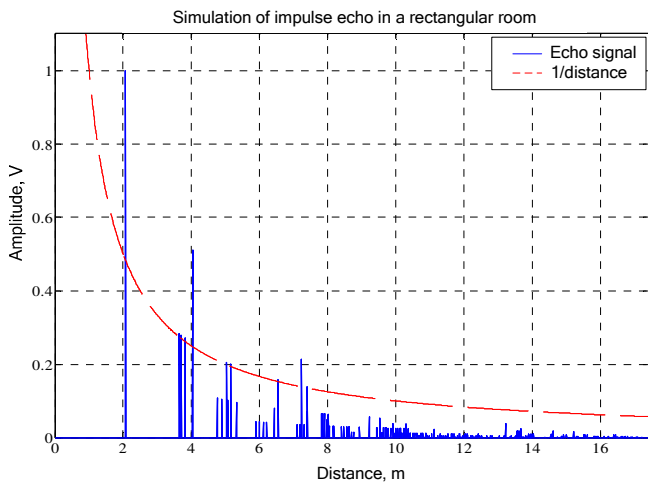
Като измервателен сигнал в настоящата работа се използва претеглен синусоидален сигнал с честота $f = 4\text{ kHz}$, продължителност $t = 1\text{ ms}$ и обвиваща – тегловната функция на fon Hann (Hanning window; raised cosine).



Фиг. 4.12. Отразени звукови вълни в безеховата камера в Технически университет-Варна (втори случай).

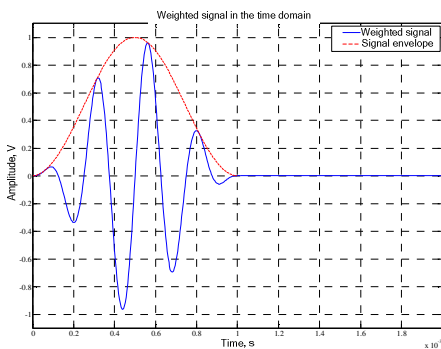


Фиг. 4.13. Отразени сигнали във функция на времето t (постановката от втория случай).

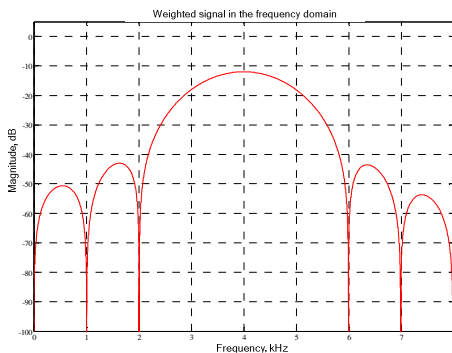


Фиг. 4.14. Отразени сигнали във функция на разстоянието d (постановката от втория случай).

На фиг. 4.15 е показан изместен по честота f и време t тестов сигнал и неговата обвиваща използвани за някои от измерванията в настоящия дисертационен труд.



Фиг. 4.15. Тестов сигнал и неговата обвиваща



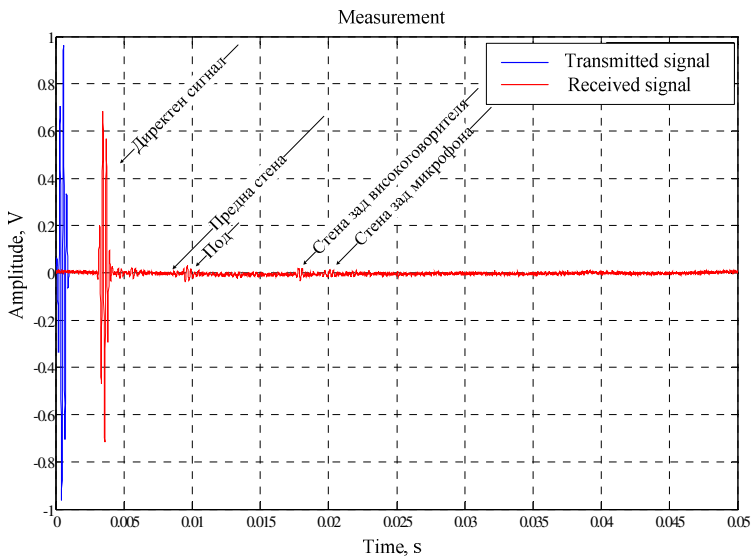
Фиг. 4.16. Спектър на претегляния сигнал

Спектърът на изместения по честота f и време t прозорец на Hann е показан на фиг. 4.16.

Използването на този прозорец допринася за по-малката скорост на нарастване на измервателния сигнал (slew rate), при запазване на неговата честота f . Последното предпазва механичните части на измервателната система – електродинамичен високоговорител и микрофон от проява на тяхната инертност, както в началото, така и в края на въздействие на измервателния сигнал. Продължителността на последния се определя като $t_{sig} < t_{direct}$ и зависи както от конфигурацията на изпитателната постановка, така и от размерите на помещението.

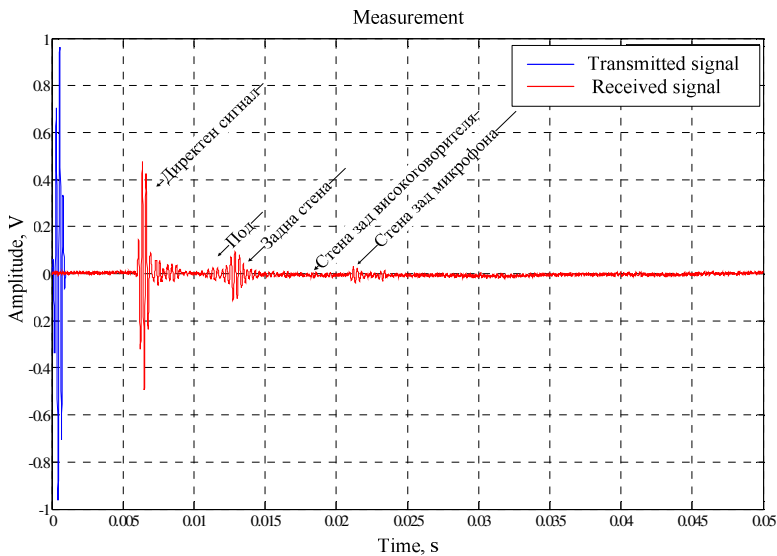
Енергията на използваната прозоречна функция е 0.75% от енергията на класическия правоъгълен прозорец, продължителността на пакета е 2 пъти по-голяма, а на ниво 6dB – същата. При това за изравняване в енергийно отношение е необходимо амплитудата на пакета да се увеличи с коефициент 1.155. В главния лист на прозореца на fon Hann, е съсредоточена 99.95% от енергията на сигнала срещу 90.28%, при употреба на правоъгълен прозорец.

Резултати от практическо измерване, когато микрофонът и високоговорителят се намират в позиции от първия случай, са представени на фиг. 4.17.



Фиг. 4.17. Измерване при постановката от първия случай (фиг. 4.8)

Резултати от практическо измерване, когато микрофонът и високоговорителят се намират в позиции от втория случай, са представени на фиг. 4.18.



Фиг. 4.18. Измерване при постановката от втория случай (фиг. 4.12)

4.3. Заключение

От резултатите представени на фиг. 4.17 и фиг. 4.18 се вижда, че при разстояние $d = 1m$ почти липсват отразени сигнали, а при разстояние $d = 2.06m$ се регистрират само първичните отражения. Разликата между директният и първият отразен сигнал при разстояние $d = 2.06m$ е $13.6dB$. Разликата между директният и първият отразен сигнал при разстояние $d = 1m$ е $26.4dB$.

Забелязва се съвпадение между теоретично получените резултати (представени на фиг. 4.10, 4.11, 4.13 и 4.14) и тези от практическото измерване (фиг. 4.17 и 4.18).

Може да се заключи, че електромагнитната безехова камера в Технически университет-Варна е подходяща за електроакустични измервания при следните условия:

- измервания в областта на по-високите честоти от звуковия диапазон;
- продължителност на тестовия сигнал $\tau \leq 0.01s$, ограничена от физическите размери на безеховата камера;
- отношение между обемите на измервания детайл и безеховата камера 1:200.

Заключение

Дисертационният труд е посветен на изследването на пространствените характеристики на кръгъл акустичен преобразувател (високоговорител с кръгла форма) – диаграма на насоченост и амплитудно-честотна характеристика.

Поставените в дисертационния труд **задачи са изпълнени**, както следва:

- 1) Изградена и приложена е методика за единен подход при изследване на пространствените характеристики (в частност диаграма на насоченост и амплитудно-честотна характеристика) на кръгъл акустичен преобразувател;
- 2) Дефиниран е модифициран обобщен израз (3.20) за определяне на общото звуковото налягане p_{aTotal} създавано от кръгъл акустичен преобразувател.
- 3) Предложен и приложен е критерий за определяне на границите на зоните на Fresnel. Критерият се базира на множество измервания на пространствените характеристики на кръгъл акустичен преобразувател. За разлика от съществуващите критерии предложеният в настоящата дисертация критерий се прилага лесно и бързо като дава задоволително точни резултати. Нужно е да се отбележи гъвкавостта при определяне на границите на зоните на Fresnel;
- 4) От изследванията върху механичните вибрации в много близката зона, както и изследването на минимумите и максимумите в разпределение на звуковото налягане p_a , създавано от кръгъл акустичен преобразувател, са получени потвърдителни резултати. Доказва се, че изкривяванията по

повърхността на мембраната на високоговорителя влияят върху неговата амплитудно-честотна характеристика.

5) Представено е цялостно решение относно измервания в акустиката. Изградена е изпитателна лабораторна постановка (фиг. 4.7) базирана на съвременна система за сбор на данни – NI USB-6211, софтуер в средата на Matlab[®], звукомер Robotron Präzisions и лаптоп. В допълнение с наличната безехова камера в Технически университет-Варна постановката може да се използва за редица качествени акустични измервания.

Разработената авторска програма в средата на Matlab[®] (Приложение 1) може да се използва за теоретичен акустичен анализ на отразени сигнали в правоъгълно помещение с различно покритие на стени, под и таван.

С изпълнението на поставените задачи е **постигната целта** на дисертационния труд: дефинирани са аналитични и графични зависимости за определяне пространствени характеристики на кръгъл акустичен преобразувател, на базата на които е формулиран критерий за определяне на границите на зони на Fresnel.

Изложението е подкрепено с числени експерименти в средата на Matlab[®] и експериментални изследвания с професионална измервателна апаратура и специализирани софтуерни продукти като Realtime Analyzer, LoudSpeaker LAB и др.

Практическо приложение, теоретичните и експериментални резултати от дисертационния труд могат да бъдат приложени при проектиране на различни видове преобразуватели.

При известни радиус a и честота f могат да се предсказват минимумите и максимумите в разпределение на звуковото налягане p_a , създавано от кръгъл акустичен преобразувател.

Предложеният критерий е разбираем и лесен за прилагане. Гъвкавостта при определяне на границите на зоните на Fresnel (определяне на горна граница по разстояние) позволява критерият да се прилага при различни експлоатационни условия.

Бъдещо развитие по тематиката на дисертационния труд може да се търси в следните направления:

- критерий за определяне на зоните на Fresnel при преобразуватели с друга геометрична форма (различна от кръгла);
- изследване на механичните вибрации в много близката зона при преобразуватели с друга геометрична форма (различна от кръгла).

Научни, научно-приложни и приложни приноси

■ Научно-приложен принос (доказване с нови средства на съществени нови страни на съществуващи научни проблеми): Предложени, теоретично обосновани и експериментално потвърдени са: методика за единен подход при изследване на пространствените характеристики на кръгъл акустичен

преобразувател и критерий, служещ за определяне на границите на зоните на Fresnel или за определяне на граница между зоните на Fresnel и зоната на Fraunhofer;

■ Научен принос (доказване с нови средства на съществени нови страни на съществуващи научни проблеми): Дефиниран, теоретично обоснован и експериментално потвърден е обобщен модифициран израз (3.20) за изчисляване на общото звуково налягане p_{aTotal} в близка и в далечна зона;

■ Приложен принос (получаване на потвърдителни факти): От извършените редица експерименти в глава II, както и в целия дисертационен труд са получени потвърдителни резултати на известната теория що се отнася за деформациите по повърхността на мембраната на преобразувателя в много близката зона и наличието на минимума и максимуми в зоните на Fresnel и определянето им по израз (1.58);

■ Приложен принос (създаване на нова опитна постановка): Изградена е изпитателна лабораторна постановка (фиг. 4.7), базирана на съвременна система за сбор на данни NI USB-6211 и софтуер в средата на Matlab®. В допълнение с наличната безехова камера в Технически университет-Варна постановка може да се използва за редица акустични измервания (диаграми на насоченост, амплитудно-честотни характеристики и т.н.) в различна среда.

Публикации по темата на дисертационния труд

[1] Ек. Сираков, И. Илиев. Изследване на механични вибрации при кръгъл излъчвател. *Списание Акустика*, ISSN: 1312-4897, бр. 15, 2013, стр. 83-86.

[2] I. Iliev, H. Zhivomirov. On the Spatial Characteristics of a Circular Piston. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, ISSN: 1584-7284, Vol. XII, Iss. 1, 2015, pp. 29-34;

[3] И. Илиев, Ек. Сираков, Хр. Живомиров. Изследване на акустичната близка зона на кръгъл излъчвател. *Conference Proceedings UNITECH'2013*, Gabrovo, Bulgaria, ISSN: 1313-230X, Vol. II, 2013, pp. II-59–II-63;

[4] I. Iliev. Polar Response of a Circular Piston. *TEM Journal*, ISSN 2217-8309, Vol. 3, Iss. 3, 2014, pp. 230-234;

[5] I. Iliev. On the Fresnel Zones of a Circular Transducer. *Electronic Journal "Technical Acoustics"*, ISSN 1819-2408, 2015, 10;

[6] I. Iliev, E. Sirakov, H. Zhivomirov. Acoustic examination of the anechoic chamber at Technical University - Varna. *Journal of Acoustics*, Vol. 16, 2014, pp. 131-138.

Благодарности

За успешното написване на този дисертационен труд бих искал да благодаря на моята съпруга Боряна и на сина ни Самуил, за подкрепата, помощта и търпението през годините, докато пишех. Бих искал да изкажа искрена благодарност на д-р инж. Христо Живомиров и на моят ръководител доц. д-р инж. Екатеринослав Сираков за помощта и идеите, които са ми давали.

Examination of the Spatial Characteristics of a Circular Transducer

Iliyan Iliev

(ABSTRACT)

The presented Ph.D. dissertation is focused on the theoretical analysis and the empirical examination (measurement) of the spatial characteristics of a circular transducer.

The theoretical fundamentals for definition of sound field are presented. Modified equation (3.20) for sound pressure calculation in the near and far field is proposed. An experiment is conducted to confirm the theoretical data and the accuracy of the proposed expression.

An unified approach for explaining the acoustic transducers' spatial characteristics is obtained. The polar responses and the frequency responses of given circular transducers are modeled and visualized by means of Matlab[®]-based scripts.

A criterion for determining the borders of Fresnel zones is proposed. The criterion is based on multiple examinations, researches and measurements of the spatial parameters and characteristics and some of the electrical parameters and characteristics of circular transducers (loudspeakers).

Possibilities of conducting acoustic measurements in the electromagnetic anechoic chamber at Technical University - Varna are discussed. Definition for an electroacoustic anechoic chamber is given. The anechoic chamber at Technical University - Varna, is presented.

A short review of the used measurement signals and their envelopes is made.

The theoretical statement is substantiated by Matlab[®] numeric computations and visualizations and multiple measurements of different circular transducers. NI USB-6211 data acquisition system is also used.