

ОПРОСТЕНИ ИЗМЕРВАНИЯ НА ВИСОКОГОВОРИТЕЛИ ПРИ НИСКИ ЧЕСТОТИ

Ричард Смол

Ефективната честотна характеристика за свободно поле и хармоничните изкривявания на високоговорителна системи с директно излъчване при ниски честоти могат да бъдат измерени без да се установяват условия за излъчване при ниски честоти. Техниката се базира на измерване а звуковото налягане в затворения обем на системата е проста и евтина. Тя дава полезни измервания на характеристиката до около 200 Hz, а на хармоничните изкривявания да около 100 Hz.

БЕЛЕЖКА НА ИЗДАТЕЛЯ

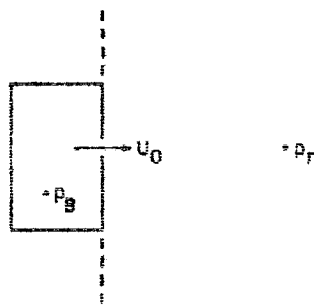
Една безехова камера за измерване на високоговорителна система до 20 Hz е ужасяващо скъпа конструкция. Нито моя Университет, нито Университета на м. Смол имат такива възможности, и до сега не съм убеден, че данните на една безехова камера съвпадат достатъчно добре със средата в дома и аудиторията, за да убеждавам университетите да инвестират дефицитни средства за такива приспособления. Даже по-уместен за повечето от членовете на Акустичното дружество е фактът, че само малко щастливци имат достъп до тези камери, докато броят на желаещите да измерват високоговорителни системи вероятно надвишава няколко хиляди.

Техниката за измерване на открито, така добре описана от Шеърмен [1] е подходяща, но аз мога да свидетелствувам от личен опит, че вятър, дъжд (сняг в Колорадо) и шум от моторни превозни средства са достатъчно смущаващи, за да бъде силно необходим един друг метод. Това дава Смол и елегантната простота на неговия метод го препоръчва на вашето внимание и употреба.

Имах удоволствието да представя тази статия на 41^{та} конференция на Акустичното дружество и запознаването с тази работа води до очакване на вашия въпрос "валиден и точен ли е методът?". По своя скромнен начин Смол поставя (част 5) по-ниско точността на метода. В една предишна работа един от моите студенти измери налягането в басрефлексен бокс и честотната характеристика по оста на открито, за да провери известни решения с изчислителна машина. Ние не бяхме достатъчно умни да оценим значението на отличните съвпадения на налягането в бокса с теорията, но доказахме, че основните предположения, направени от Смол са съвсем валидни. Някои от моите студенти сега правят експериментална работа, необходима да даде потвърждение на метода на Смол. За представяне на това потвърждения след няколко месеца ще публикуваме съобщение. Междувременно, ако вие желаете да направите просо и точно измерване на изкривяванията и нискочестотната характеристика на вашата високоговорителна система, аз ви съветвам първо да измерите и след това да задавате въпроси.

І. ВЪВЕДЕНИЕ

Измерването на параметрите на високоговорителна система обикновено се извършва при условия на излъчване в свободно звуково поле, така, че то да отразява само свойствата на високоговорителната система, а не тези на околната среда. Обаче, често е трудна да се установят условия на излъчване при свободно звуково поле при ниски честоти. Известно е, че е трудно да се установят и поддържат измервателни условия на открито [1], докато дори големите безехови камери не дават истинско свободно поле при много ниски честоти и трябва грижливо да се калибрират.



Фиг. 1.

Високоговорителна система, излъчваща в полусферично поле.

Измервателния метод, описан в тази статия се основава на факта, че нискочестотната излъчване на малка директно излъчваща високоговорителна система е директно свързано със звуковото налягане в затворения обем на системата. Това налягане по същество не се влияе от акустичното патоварване на системата и е едно и също в рсверберационни и безехови условия.

ІІ. ОСНОВНА ТЕОРИЯ

На фиг. 1 е показана директно излъчваща високоговорителна система, излъчваща в полусферично свободно поле (2π стерадиана). Установеното ефективно налягане в затворения обем е p_b , общата изходна обемна скорост на границата на затворения обем е U_0 и ефективната стойност на звуковото налягане на разстояние r е означено с

Ако затворения обем има пренебрежими загуби от поглъщане, при много ниски честоти той може да се представи с една акустична гъвкавост C_{AB} , която е свързана с вътрешния обем въздух V_B с израза [2, стр. 129]:

$$C_{AB} = \frac{V_B}{\rho_0 c^2} \quad (1)$$

където ρ_0 е плътността на въздуха ($1,18 \text{ kg/m}^3$) и c е скоростта на звука във въздуха (345 m/sec).

Фиг.2 представлява акустичната еквивалентна схема на такъв затворен обем (импедансна аналогия). От анализа на тази схема намираме отношението между изходната обемна скорост и вътрешното налягане:

$$U_0 = p_B \omega C_{AB} \quad (2)$$

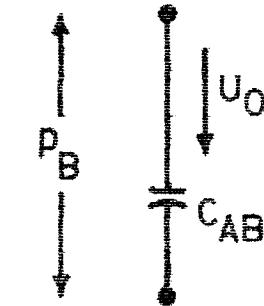
където ω е установената ъглова честота.

Взаимотношението между p_r и U_0 за условията на излъчване от фиг.1, без оглед на типа на системата и броя на отворите в обема, допринасящи за общата U_0 е:

$$p_r = \frac{\rho_0}{2\pi\Gamma} \cdot \omega U_0 \quad (3)$$

И за общата мощност:

$$P_A = \frac{\rho_0}{2\pi\Gamma} (\omega U_0)^2 \quad (4)$$



Фиг.2. Акустична заместваща схема на затворен обем без загуби.

Ако високоговорителната система бъде изнесена от безеховата камера, налягането p_r и обемната скорост U_0 не се променят значително. Тези величини не се влияят забележимо от акустичния товар при условие, че околната среда не е акустически резонатор с висок качествен фактор Q и е голяма в сравнение със затворения обем. Тогава е възможно да се определи осевата честотна характеристика за ниски честоти в свободно поле и изходната мощност на директно излъчващата високоговорителна система чрез измерване на налягането в обема, когато системата е разположена в нормална околна среда и тогава да се използват взаимотношенията от уравнение (1) до (4).

Сигналят, представляващ изходната обемна скорост се получава чрез умножаване на налягането в затворения обем с фактор, пропорционален на честотата, както се изисква от уравнение (2). Този процес трябва да се повтори, за да се получи сигнал, представляващ звуковото налягане в свободно поле, както се изисква от уравнение (3). Една електронна диференцираща верига има точно желаните свойства т.е., усилване пропорционално на честотата, така, че две такива вериги ще извършат желаните действия. За изчисляване на излъчената мощност преобразувателят, измерител на налягане, трябва да бъде калибриран и гъвкавостта на обема и времеконстантите на диференциране трябва да се познаят точно. Но ако се изисква само относителна честотна характеристика, калибровка не е необходима.

ПОКОРЕКЦИИ

Предишната теория предлага прости средства за получаване на характеристиката в свободно поле на високоговорителна система, която има пренебрежими загуби в обема, но само за много ниски честоти. Но специално, уравнение (1) е валидно т.е. C_{AB} е константа, само за честоти, достатъчно ниски така, че дължината на вълната да бъде по-голяма от осем пъти най-малкия размер на бокса. Това е честотна граница от около 50 Hz за бокс със средни размери.

За нещастие, тази ширина на лентата те е достатъчна за изследване на високоговорителните системи. Характеристиката на много от високоговорителните системи за тази честота е все още ниска и за да се наблюдава задоволително пълното поведение на срязване на системата е необходимо да се получи обхват до около 200 Hz. Това може да се направи с достатъчно добра точност чрез коригиране на факторите, внасящи грешки при високите честоти.

Изменение на гъвкавостта

При много ниски честоти всички въздух в бокса се съгъства или разрежда еднакво и уравнение (1) е валидно. При по-високи честоти компресията вече не е еднаква и ефективната гъвкавост се намалява. Главният фактор за това намаляване е масата на въздуха от задната страна на мембраната, която се движи заедно с нея при високи честоти без да се подлага на компресия. Величината на този ефект зависи от ефективния обем на този въздух, сравнен с обема на бокса; той е пренебрежим за малък високоговорител в голям бокс, но може да

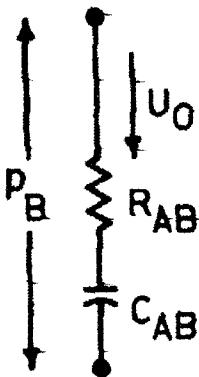
предизвика грешка до няколко децибела за голям високоговорител в малък бокс. Обемът, зает от тази въздушна маса е обикновено $2,2 \cdot a^2$, където a е ефективния радиус на мембраната.

Изменението на гъвкавостта може да се коригира чрез прекарване на сигнала през лентов атенюатор със затихване при високи честоти, съответстващо на намаляването на гъвкавостта. Затихването трябва да бъде най-ефективно на честотата, при която масата на задния въздух резонира с гъвкавостта на обема. Тази честота зависи до известна степен от формата на бокса, но обикновено е около $100/a/V_B^{1/2}$ Hz, където a е в метри, V_B е в кубически метри. Добри експериментални резултати бяха получени при настройване на лентовия коректор при една трета от тази честота, но не беше установено строго теоретическо потвърждение на това настройване.

Загуби в затворения обем

Наличието на загуби от поглъщане в бокса означава, че той не може повече да бъде представен с чиста гъвкавост, а вместо това може да бъде представен със серийни гъвкавост и съпротивление, както е показано на фиг.3. R_{AB} е серийното акустично съпротивление, дължащо се на загубите в бокса. Ако се предположи, че стойността на R_{AB} е независима от честотата, съотношението между налягането в бокса и обемната скорост става:

$$U_0 = P_B \left| \frac{j\omega C_{AB}}{1 + j\omega C_{AB} R_{AB}} \right| \quad (5)$$



Фиг.3. Акустична заместваща схема на затворен обем с абсорбционни загуби.

Тогава наличието на R_{AB} може да бъде компенсирано чрез поставяне на съпротивление с подходяща стойност последователно на входния кондензатор на диференциращата верига, използвана за осъществяване на уравнение (2). Точната стойност на съпротивлението може да бъде определена чрез измерване на импеданса на звуковата бобина на системата и последващо изчисление на загубите в затворения обем. Методът за измерване е даден в приложението.

Даже когато загубите в затворения обем са много малки е препоръчително да се включва съпротивление с малка стойност в серия и с двата диференциращи кондензатора за ограничаване на честотата на диференциране до около 1 kHz. Това предпазва от внасяне на шум от високи честоти в полезния сигнал от звуково налягане.

Равномерност на налягането и стоящи вълни

При честоти над около 50 Hz, но все още достатъчно ниски, щото дължината на вълната да бъде по-голяма от размерите на бокса, налягането в затворения обем става забележимо неравномерно.

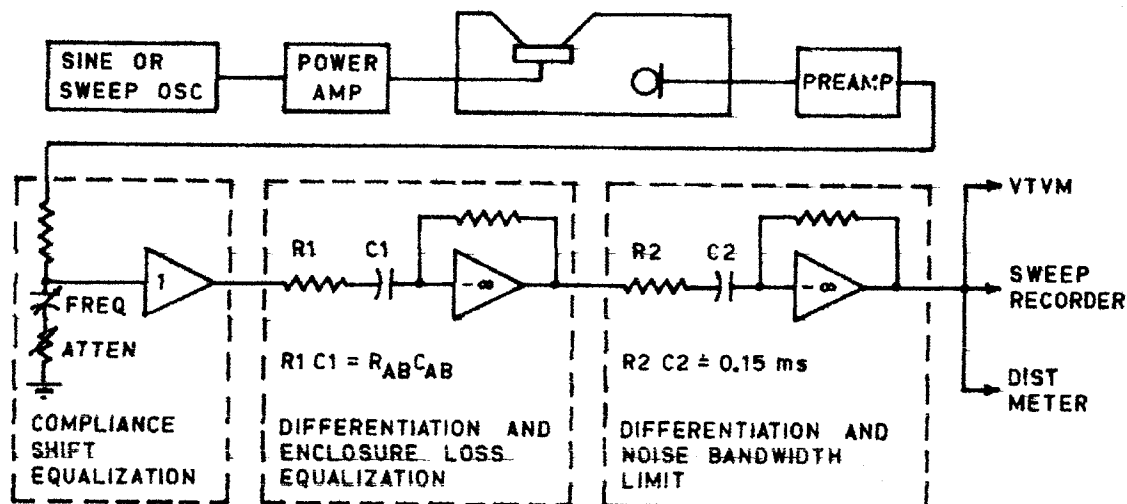
Областта, най-близка до високоговорителя е под средното налягане, докато областта най-далече от високоговорителя е над средното налягане. Тези явления нарастват силно, когато дължината на вълната се доближава до размерите на бокса, но техните въздействия могат да бъдат направени по-умерени чрез грижливо разполагане на преобразувателя за измерване на налягането. Най-доброто разположение на преобразувателя може да се намери чрез последователно приближение; то често е близо до геометричния център на обема на бокса. Над около 200-250 Hz големината и градиента на промените на налягането в развитието на стоящи вълни в бокса правят метода неизползуваем.

IV. ПРИЛОЖЕНИЯ

Когато е налице калибриран преобразувател на налягане, възможно е да се измерят и калибрират звукови източници и измервателни камери под около 50 Hz. С внимателно коригиране може да се измери честотната характеристика на малки директно излъчващи високоговорителни системи до около 200 Hz.

Може също да се измерят хармоничните изкривявания на високоговорителна система, ако всички главни Фурие-компоненти на сигнала, изразяващ звуковото налягане попадат в честотния обхват, за който измерването е валидно. Това обикновено включва основните честоти до 50 Hz с полезни резултати до 100 Hz.

Идеален преобразувател за измерване на звуковото налягане в затворения обем е



Фиг.4. Измервателна установка за измерване при ниски честоти.

кондензаторен микрофон с FET-предусилвател. Този вид преобразувател има честотна характеристика, която е равна до 2 Hz и висококачествените модели обикновено се придружават от калибрационни криви.

Като преобразувател може също така да се използва високочестотен високоговорител със затворено шаси и висока резонансна честота (над 1 kHz). При ниски честоти изходното напрежение на този преобразувател е пропорционално на скоростта на промяна на налягането в обема, т.е. той вече включва една от необходимите диференциращи вериги и за това работи с по-проста верига. За нещастие, механичният резонанс с висок качествен фактор, обикновено наличен за този тип преобразуватели, прави измерването на изкривяванията трудно поради неизбежните резонансни компоненти на изхода, които се подчертават от диференцирането.

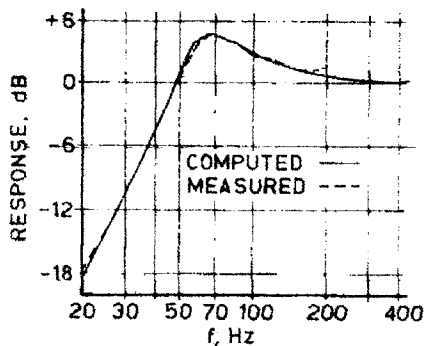
Типична измервателна схема за измерване на честотната характеристика и хармоничните изкривявания, включително и компенсационните вериги е показана на фиг.4. Ако като преобразувател се използва високочестотен високоговорител, второто диференциращо стъпало не се използва.

Простотата на техниката за измерване подчертава нейната пригодност както за проектиране, така и за оценка. Тя особено добре подхожда за крайна настройка на високоговорителните системи, проектирани по приблизителни аналитични методи, понеже измервателната характеристика включва всички въздействия на всички загуби на системата и всяка честотна зависимост на стойностите на компонентите на системата с изключение на съпротивлението на затворения обем. Това приложение е аналогично на използваната позната техника на настройка при окончателното нагласяване на характеристиката на теоретически проектирани електрически филтри или настройка на усилватели.

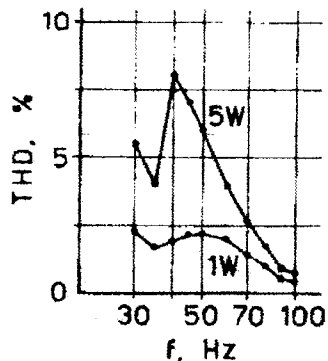
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗМЕРВАНИЯ

За илюстриране на техниката на измерване бяха избрани две високоговорителни системи, едната от затворен тип и една басрефлексна. Нискочестотните параметри на всяка система при малък сигнал, изчислена от измервания на импеданса на звуковата бобина са показани в Табл.1

ПАРАМЕТРИ	ЗАТВОРЕН ОБЕМ	БАСРЕФЛЕКС
Физически параметри		
Обем на бокса, L	28	38
Диаметър на високоговорителя, m	0,25	0,35
Радиус на мембраната, m	0,10	0,14
Параметри при малък сигнал		
Резонанс на високоговорителя, Hz	25	25
Резонанс на бокса, Hz	61	60
Резонанс на басрефлекса, Hz	-	45
Отношение на гъвкавостта	5,3	5,1
Фактор на системата	1,65 при	0,22 при 25 Hz
Фактор на обема	15 при 61 Hz	12 при 45 Hz



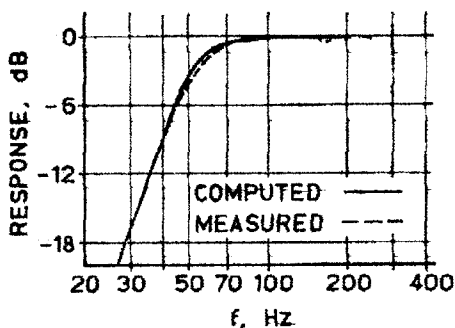
Фиг.5.Честотна характеристика на затворена система.



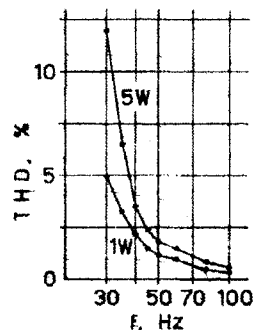
Фиг.6.Измерени общи хармонични изкривявания на затворена система.

Тези параметри бяха използвани при изчисляване на очакваните параметри на системата, за определяне на необходимото коригиране на загубите на затворения обем (виж приложението).

Фиг.5. представлява изчислената характеристика на затворена система, заедно с характеристиката, измерена с кондензаторен микрофон, поставен в бокса на място, където



Фиг.7.Честотна характеристика на басрефлексна система.



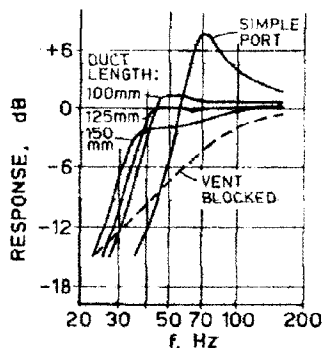
Фиг.8. Измерени общи хармонични изкривявания на басрефлексна система.

промените на налягането бяха най-малко смущаващи. Съвпадението на двете характеристики е съвсем добро до около 180 Hz. То е даже по-добро отколкото може да се очаква, като се има пред вид предположенията и приближенията, възприети при двата метода. На фиг.6 са дадени кривите на изкривяванията при затворена система, получени при използването на същата експериментална установка. Максимумът на изкривяванията непосредствено под резонансната честота на системата отразява голямото преместване на мембраната на тази по същество слабо демпфана система.

Фиг.7 представя изчислената характеристика на басрефлексна система, заедно с характеристиката, получена с микрофон вътре в бокса. Съвпадението пак е съвсем добро, в този случай до 250 Hz. Криви за изкривяванията на басрефлексната система са дадени на фиг.8. Те са типични за добре проектирана басрефлексна система, нарастващи при честота под резонанса отвор-обем.

Експерименталните резултати не могат да бъдат проверени в истинска безехова камера, но опити да се получи характеристика в реверберационни условия показват, че характеристиката изведена от налягането в бокса и в двата случая изглежда по-точна, отколкото характеристиката, изчислена от измерените параметри.

Фиг.9 илюстрира приложението на техниката за крайна настройка на високоговорителна система. За няколко условия на настройка на бокса е



Фиг.9.Честотни характеристики на басрефлексна система за различни условия на настройка на бокса.

показана честотната характеристика на басрефлексната система, първоначално проектирана съгласно теорията. При тези измервания, които бяха направени с използване на високочестотен високоговорител като преобразувател, ясно е показана дължината на басрефлексната тръба, която дава най-равната характеристика (125 mm). Първоначалната проектна стойност на дължината на тръбата беше 150 mm. Хлътването на характеристиката с този отвор се дължи на малко прекаленото демпфване на високоговорителя в сравнение с теоретичното изискване и на приноса на загубите в обема, не взети пред вид при първоначалните изчисления на конструкцията.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаната измервателна техника е полезно средство за получаване на нискочестотната характеристика и изкривяванията на малки директно излъчващи високоговорителни системи за целите на конструирането и оценката. Тя е проста и евтина в сравнение с установената техника в свободно поле.

Теоретичната точност на техниката при много ниски честоти позволява използването и като средство за измерване и калибровка на звукови източници, безехови и реверберационни камери.

При по-високи честоти методите за корекция изискват по-нататъшно изследване и точността на метода трябва да се провери чрез сравняване с измервания в истинско свободно поле.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИБЛИЗИТЕЛНО ИЗМЕРВАНЕ НА ЗАГУБИТЕ ОТ ПОГЛЪЩАНЕ НА ОЗВУЧИТЕЛНО ТЯЛО

Загубите от поглъщане са само един вид загуби, който може да се появи във високоговорителните боксове. Трудно е да се отделят различните видове загуби, но е относително лесно е да се получи сведение за общите загуби. В някои случаи загубите от поглъщане преобладават и тогава измерените общи загуби са задоволителна индикация за загубите от поглъщане.

Загубите от поглъщане могат да се разглеждат преобладаващи при затворените системи, които са изцяло напълнени с демпващи материали и са херметизирани. Те рядко преобладават в басрефлексните системи, освен ако боксът съдържа демпващи материали, които или са разположени далече от стените, или висят в средата на обема като завеси. В тези случаи измервателните методи за общите загуби, дадени по-долу, могат да се използват за оценка на загубите от поглъщане за целите на коригирането. Във всички други случаи R_{AB} вероятно ще бъде твърде малко, за да изисква коригиране и другите налични загуби точно ще се изразят в измерването на характеристиката с техния директен ефект върху общата скорост на системата.

Измерването на загубите изисква определянето на честотите, при които импедансът на звуковата бобина на системата достига минимална или максимална стойност. В повечето случаи при тези честоти фазата на импеданса е нула и честотите могат да се определят по-бързо и точно с измерване на фазата. Обаче, ако нулевата фаза не се явява много близо до стойностите на максимума или минимума, тогава честотата на последните трябва да се измерят колкото е възможно по-грижливо и да се използват в изчисленията.

Затворена система

Измерва се грижливо постоянноотоковото съпротивление R_E на звуковата бобина и след това стойността на импеданса на звуковата бобина като функция от честотата; отначало високоговорителя е на открито, а след това в бокса. За високоговорител на открито се намира честотата f_S , за която импеданса на звуковата бобина е максимален. Отношението на този максимален импеданс към постоянноотоковото съпротивление на звуковата бобина се определя като r_0 . След това се намират двете честоти, за които импеданса е $R_E \sqrt{r_0}$. При това $f_1 < f_S$ и $f_2 > f_S$. Тогава се изчислява :

$$Q_{MS} = \frac{f_S \sqrt{r_0}}{f_2 - f_1} \quad (6)$$

$$Q_{ES} = \frac{Q_{MS}}{r_0 - 1} \quad (7)$$

По подобен начин за високоговорителя в бокса се намира честотата f_c , за която импеданса на звуковата бобина е максимален и нека отношението на максималния импеданс към постояннотоковото съпротивление бъде r_{0c} . Намират се двете честоти f_{1c} и f_{2c} както по-горе и се изчисляват:

$$Q_{MC} = \frac{f_c \sqrt{r_{0c}}}{f_{2c} - f_{1c}} \quad (8)$$

$$Q_{EC} = \frac{Q_{MC}}{r_{0c} - 1} \quad (9)$$

Ако механичното съпротивление на високоговорителя е независимо от честотата, приносът на това съпротивление към Q_{MC} означен с $Q_{MC(s)}$ е просто:

$$Q_{MC(s)} = Q_{MS} \frac{f_c}{f_s} \quad (10)$$

Това би била стойността на Q_{MC} ако нямаше загуби в бокса.

Сега, ако Q_B се определи като отношение на реактивното към активно съпротивления в бокса при f_c , т.е.,

$$Q_B = \frac{1}{2\pi f_c C_{AB} R_{AB}} \quad (11)$$

тогава измерената стойност на Q_{MC} ще бъде такава, че :

$$\frac{1}{Q_{MC}} = \frac{1}{Q_{MC(s)}} + \frac{1}{Q_B (C_{AT} / C_{AB})} \quad (12)$$

където C_{AT} е общата гъвкавост на системата, т.е. обем и окачване на високоговорителя, действащи заедно. Ако C_{AS} е гъвкавостта на окачването на високоговорителя, тогава:

$$\frac{1}{C_{AT}} = \frac{1}{C_{AS}} + \frac{1}{C_{AB}} \quad (13)$$

и може да бъде показано, че:

$$\frac{C_{AT}}{C_{AB}} = 1 + \frac{f_s Q_{ES}}{f_c Q_{EC}} \quad (14)$$

От комбинирането на уравнения 10, 12 и 14 получаваме:

$$Q_B = \left[1 - \frac{f_s Q_{ES}}{f_c Q_{EC}} \right] \frac{f_c Q_{MC} Q_{MS}}{f_c Q_{MS} - f_s Q_{MC}} \quad (15)$$

Така от горните измервания се изчислява стойността на Q_B и се използва за определяне на времеконстантата на коригиращата верига от уравнение 11:

$$C_{AB} R_{AB} = \frac{1}{2\pi f_c Q_B} \quad (16)$$

Басрефлексна система

Измерва се R_E и импеданса на звуковата бобина като функция от честотата при високоговорителя във въздуха както по-горе и се намират f_c , r_0 , Q_{MS} , Q_{ES} .

При високоговорител, монтиран в басрефлекса, отново се измерва импеданса на звуковата бобина като функция от честотата. Намира се f_L най-ниската честота, за която импеданса има максимум, f_H , следващата по-висока честота на максимален импеданс, честотата между f_L и f_H , за която импеданса f_M е минимален. Отношението на минималния импеданс при f_M към постояннотоковото съпротивление на звуковата бобина R_E се определя като r_M . Сега се изчислява :

$$\alpha = \frac{(f_H + f_M)(f_H - f_M)(f_M + f_L)(f_M - f_L)}{f_H^2 f_L^2} \quad (17)$$

Тогава с достатъчна приближение:

$$Q_B = \frac{1}{\alpha Q_{ES}} \cdot \frac{f_M}{f_s} \cdot \frac{1}{r_M - 1} \quad (18)$$

където Q_B е отношението на реактивното към активното съпротивление при f_M . Тогава, както при затворения обем, необходимата времеконстанта за коригиране е :

$$C_{AB}R_{AB} = \frac{1}{2\pi f_M Q_B} \quad (19)$$

БЛАГОДАРНОСТ

Основната идея за измервателния метод, описан тук беше дадена преди няколко години от А.Тиле, който също внуши простата алтернатива за използване на високочестотен високоговорител като преобрезувател.

Експерименталното потвърждение на метода и изследването на корекционните методи беше извършено в Школата по Електроинженерство в Сидней, като част от програма за следдипломни изследвания на поведението при ниски честоти на директно излъчващи електродинамични високоговорителни системи.

Авторът желае да благодари на проф. Ешли за неговото щедро сътрудничество в представянето на тази статия на 41-та конференция на Акустичното дружество.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] I.H.Sherman "Assessment of Loudspeaker Quality" Proc IREE (Australia) vol.31 p.165 (June 1970)
- [2] L.L.Beranek, Acoustics (McGraw-Hill, New York, 1954)
- [3] J.E.Benson, "Theory and design of Loudspeaker Enclosures" Proc.IREE (Australia), vol.30 p.261, (Sept.1969).
- [4] A.N.Thiele "Loudspeakers in vented Boxes" J.Audio Eng.Soc.,vol 19 pp. 382-392 (May 1971) and pp.471-483 (June 1971).