

Морско инженерство

Избор на кристал за пиезокерамичен преобразовател

Атанас Ал. Атанасов

Институт по океанология, БАН (Варна)

На основата на функционалната акусто-електроника се строят и разработват необходими и важни за практиката прибори и устройства, известни като апарати от четвърто поколение — телеметрични акустични линии за предаване на информация, запаметяващи устройства, ултразвукова апаратура за диагностика и измерване.

Развитието на електроакустиката е съпроводено с разработването и създаването на широка гама пиезоелектрични преобразователи с най-различни свойства. В последните години се появиха публикации, в които се посочват резултатите от изследването на свойствата на новите акустически кристали и възможностите за приложението им в практиката (Б о н и й и др., 1973; Д а м о н и др., 1974; D u t o i t, 1973; A n d e r s o n, 1972 и др.). Съществена трудност при конструирането на най-разнообразна акустична апаратура е изборът на акустичния кристал.

Известно е, че основните характеристики на акустичните антени (резонансна честота, качествен фактор, коефициент на електромеханична връзка и др.) са тясно свързани със статичния и динамичния капацитет, динамичната индуктивност и активното съпротивление, включени в еквивалентните им схеми.

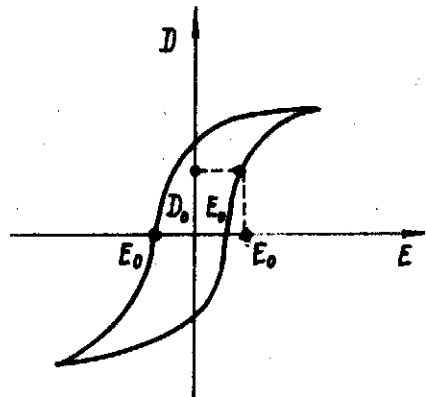
Стойностите на тези активни и реактивни съпротивления зависят от геометричните размери на пиезоелектричните преоб-

разователи (примерно за кръгли акустични пластини — радиус и дебелина).

Познанието на параметрите на еквивалентната схема на акустичните антени позволява доброто им съгласуване с входните или с изходните електрически вериги, към които те се свързват.

Цел на тази статия е да се предложи методика за избор на кристали за пиезоелектричен преобразовател в началния стадий на проектиране на акустична антена.

Акустичните кристали притежават нелинейна характеристика на преобразуване $D = F(S)$. Тази нелинейна връзка се определя от нелинейността между приложеното електрично поле E на електродите на



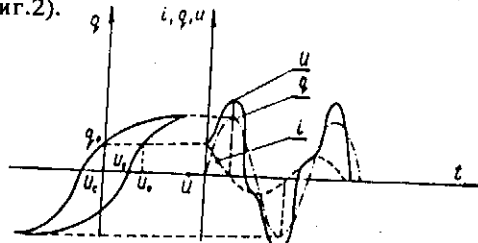
Фиг.1. Работна характеристика на акустичен кристал $D = F(E)$

акустичните кристали и електричната индукция D , от нелинейността на механичното напрежение T и механичната деформация S (П л у ж и к о в, С е м е н о в, 1971). В действителност тези нелинейни връзки са многофазни и се представят от съответните им хистерезисни криви. За всеки акустичен кристал е валидна характеристика $D = F(E)$, показана на фиг.1.

От своя страна електричният заряд $q = K_1 D$, а напрежението, приложено на електродите на акустичните кристали, е $U = K_2 E$, където K_1 и K_2 са коефициенти на пропорционалност, които зависят от типа на акустичния кристал, използван за направа на пиезокерамичния преобразовател.

Познаването на коефициентите K_1 и K_2 позволява от хистерезисната характеристика $D = F(E)$, показана на фиг.1, да се получи хистерезисната характеристика $q = F(U)$, показана на фиг.2.

Приема се, че са известни формата и амплитудата на работното напрежение U_0 , което постъпва на електродите на пиезоелектричния преобразовател. По подобие на линейните връзки може да се определи статичният нелинеен капацитет $C_0 = q(U_0)/U_0$ по хистерезисната крива $q = F(U)$ (фиг.2).



Фиг.2. Хистерезисна крива $q = F(U)$ с характеристики на електрическия заряд $q(t)$, електрическият ток $i(t)$ и напрежението $U(t)$

Допуска се, че в момент t_0 на електродите на акустичния кристал действа U_0 . За тази работна точка от хистерезисната крива, показана на фиг.2, съответства q_0 . Избира се произволно нарастване ΔU в U_0 , което води до нарастване на електричния заряд q_0 с Δq .

С отношението $C_g = \Delta q / \Delta U$ се определя динамичния капацитет $C_g(U_0)$ толкова по-правдиво, колкото изменението на ΔU води до промяна на $\Delta q \rightarrow 0$.

Следователно от характеристика $D = F(E)$ на акустичните кристали при известна амплитуда на входното напрежение U_0

могат да се получат очакваните стойности на два основни елемента от популярната електрична еквивалентна схема на пиезокерамичния преобразовател — статичен капацитет C_0 и динамичен капацитет C_g .

Познаването на развитието на тока i и напрежението U във времето позволява добро съгласуване на акустичните антени с входните и изходните вериги.

Допуска се, че се работи по хистерезисната крива без да се навлиза в зоната на насищане. Стойностите на $\pm U_{\max}$ съответстват на върховете на хистерезисната крива (фиг.2).

Приема се, че механичната деформация на акустичния кристал се развива по закона $S = S_{\max} \sin \omega t$, където S_{\max} е максимална амплитуда на деформацията, а ω — кръгова честота. Тази деформация води до изменение на електричния заряд $q = q_{\max} \sin \omega t$, където q_{\max} е максимална стойност на електричния заряд.

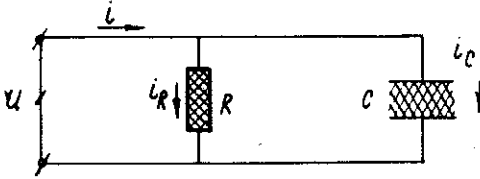
При това $\pm q_{\max}$ съответства на $\pm U_{\max}$. Хистерезисната крива $q = F(U)$ и приетия закон за изменение на електричния заряд $q(t)$ са добра основа за илюстриране на развитието на тока i и напрежението U във времето. Левият клон на хистерезисната крива оформя „нарастването“ на зависимостта $U = f(t)$, а по десния клон — „намалването“ на зависимостта $U = f(t)$ в съответствие със закона на изменение на $q(t)$ (фиг.2). Законът за изменение на тока $i = f(t)$, показан на фиг.2, се получава от уравнението $i(t) = dq(t)/dt = i_{\max} \cos \omega t$, където максималната стойност на тока $i_{\max} = q_{\max} \omega$.

От фиг.2 се вижда, че „хармониката“ на тока $i(t)$ изпреварва кривата на напрежението $U(t)$ с $\omega t < \pi/2$. При чист капацитивен товар „хармониката“ на $i(t)$ би трябвало да изпреварва „хармониката“ на $U(t)$ с $\omega t = \pi/2$.

Тези загуби се обясняват от многофазната характеристика $E = F(D)$ на акустичния кристал. Приема се, че те се моделират от нелинейно активно съпротивление, включено паралелно на нелинейния капацитет (фиг.3). Токът, който протича през акустичния кристал $i(t) = i_C(t) + i_R(t)$.

Познаването на големината на тези токове, както и стойностите на R и C позволява да се оцени електричният качествен фактор $Q = P_p / P_a$, където $P_p = \int i_C(t)$ е ре-

активната мощност; $P_a = \int [i_R(t)]$ е активната мощност, разсеяна в нелинейното активно съпротивление R (фиг.3).



Фиг.3. Еквивалентна електрическа схема на акустичен кристал

От фиг.2 се пренася онази част от хистерезисната крива $q = F(U)$, която се намира над абсисната ос, показана на фиг.4.

Кривата $U_C(q)$, която определя пада върху нелинейния кондензатор C , се получава от кривата $U_1(q)$ (десния клон) и $U_2(q)$ (левия клон) от уравнение $U_R(q) = [U_1(q) - U_2(q)]/2$.

Кривата $U_R(q)$ се припокрива с кривата $U_C(q)$ и представлява огледалния образ при пренасянето ѝ в четвърти квадрант. Това е в съответствие на изходната еквивалентна схема, показана на фиг.3, съгласно която $U(t) = U_R(t) = U_C(t)$.

За определяне на активното нелинейно съпротивление R на нелинейния кондензатор C са необходими волт-амперните характеристики $U_R(i)$ и $U_C(i)$. Това налага преобразуването на ординатната ос от електричен заряд q в електричен ток i .

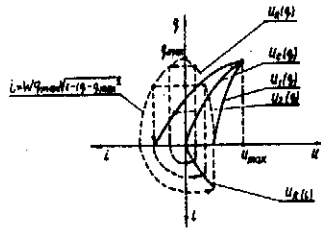
Съгласно приетия закон за изменение на електричния заряд q ординатната ос може да се мащабира по зависимостта

$$i = wq_{\max} \sqrt{1 - (q/q_{\max})^2}$$

за всяка стойност на електрическия заряд q .

Това мащабиране на ординатната ос може да се постигне и геометрично. Повдигането на двете страни на зависимостта $i = f(q)$ на квадрат води до уравнение на елипса от вида $(i/wq_{\max})^2 + (q/q_{\max})^2 = 1$. За мащабни коефициенти от вида $K_q = K_i w$, където K_q е мащабен коефициент на ординатната ос, а K_i е мащабен коефициент на абсисната ос, уравнението на елипса се трансформира в уравнение на окръжност.

При валидността на тази връзка между мащабните коефициенти K_q и K_i се постига лесното пренасяне на кривата $U_R(q)$ от



Фиг.4. Схема на волтамперните характеристики $U_R(i)$ и $U_C(i)$ съгласно еквивалентната схема

трети в четвърти квадрант като $U_R(i)$ (фиг.4).

Независимо от направените допускания от хистерезисната крива $D = F(E)$, валидна за акустичния кристал, са получени две основни волт-амперни характеристики $U_R(i)$ и $U_C(i)$ на пиезокерамичния преобразовател.

При известно входно напрежение U_0 не представлява трудност определянето на токовете i_R и i_C , респективно на нелинейното активно съпротивление R и на нелинейния кондензатор C , включени в приетата еквивалентна електрическа схема, показана на фиг.3.

Стойността на нелинейния кондензатор C за амплитуда на входното напрежение U_0 е прецизираната стойност на статичния кондензатор C_0 , определен по зависимостта $C_0 = q(U_0)U_0$.

Тази методика е приложима и за закон на изменение на входното въздействие, различен от синусоиден.

Приетата еквивалентна схема, показана на фиг.3, може да се обогати с включването на динамичния кондензатор C_g и динамичната индуктивност L_g последователно на активното съпротивление R . В резултат на това се получава популярна електрична еквивалентна схема на акустична антена (Г е й е, С а б а т и е, 1967; К а м п, 1972, и др.).

Представа за очакваната стойност на динамичната индуктивност L_g може да се получи от векторната сума на реактивните и активното съпротивление, построена в съответствие на популярната електрична еквивалентна схема

$$(1) z = X_{C_0} X_P / X_{C_0} + X_P,$$

където $X_{C_0} = 1/jwC_0$ е реактивното съпротивление от статичния кондензатор C_0 ; $X_P = 1/jwC_g + jwL_g + R$ — сумарното реактивно съпротивление в последователния клон на еквивалентната електрична схема; w — кръговата честота.

Тъй като акустичните антени са с под-

чертан капацитивен характер се приема, че ъгълът, сключен между вектора на активното съпротивление R и векторната сума z е $\varphi = \pi/2$. Познването на векторната сума X_p позволява определянето на реактивното съпротивление XL_g от наличието на динамична индуктивност по зависимостта

$$(2) XL_g = j\omega L_g = X_p - (R + 1/j\omega C_g).$$

Предложената методика за избор на акустичен кристал за пиезокерамичен преобразовател позволява по основната характеристика на акустичния кристал $D = F(E)$ и очаквано входно напрежение U_0 да се прогнозира стойностите на съответ-

ните елементи на популярната еквивалентна електрическа схема на пиезокерамичния преобразовател. Познването на тази еквивалентна схема дава възможност да се оценят основните характеристики на пиезокерамичните преобразователи. В случай, че прогнозираните основни характеристики на акустичните антени за даден акустичен кристал не удовлетворяват изискванията, поставени от практиката по демонстрираната методика се оценява друг акустичен кристал със своя основна изходна $D = F(E)$.

Choice of a crystal for piezoceramic transducer

Atanas Al. Atanasov

(Summary)

On the basis of the characteristic $D = F(E)$ of an acoustic crystal and the input voltage amplitude of piezoceramic transducer a method for choice of an acoustic crystal has been devised. It allows to define the structural

elements of the traditional equivalent scheme of a piezoceramic transducer. Estimate of these elements present satisfactory data for the practical application of piezoceramic transducers.

Постъпила на 15.09.1987 г.