

6 PIEZOELEKTRIČNI ELEMENTI

- 6.1 UVOD
- 6.2 PIEZOELEKTRIČNI EFEKT
- 6.3 KVARČNI KRISTALI
- 6.4 PIEZOKERAMIČNI VZBUJEVALNIKI
- 6.5 ELEMENTI NA POVRŠINSKE ZVOČNE VALOVE

6.1 UVOD

V nekaterih kristalih se pojavijo pod vplivom mehanske obremenitve poleg mehanske deformacije tudi električni dipolni momenti oz. dielektrična polarizacija materiala . Ta pojav imenujemo običajno direktni piezoelektrični efekt. Obstoja tudi obraten pojav, ko se pod vplivom pritiskane napetosti pojavi mehanska deformacija kristala, kar imenujemo inverzni piezoelektrični efekt.

Piezoelektrični elementi pri svojem delovanju izkoriščajo omenjene piezoelektrične efekte. Zato bo v nadaljevanju najprej podana obravnava teh efektov. Nato bodo pregledane še značilnosti nekaterih osnovnih piezoelektričnih elementov.

6.2 PIEZOELEKTRIČNI EFEKT

Ker so pri piezoelektričnih efekti poleg električnih veličin vpletene tudi nekatere veličine s področja mehanike, se v tem primeru ne moremo izogniti nekaterim osnovnim pojmom tega področja.

Mehanska obremenitev oz. pritisk je podana s silo F na dano površino A in jo v mehaniki običajno označimo s črko T (Tension)

$$T = \frac{F}{A} \quad [N / m^2] \quad \text{Equation Section 6(6.1)}$$

Mehanska obremenitev T ima torej enoto $[N/m^2]$, kjer je N simbol za enoto sile (Newton). Po dogovoru velja pri nategu $T > 0$, pri stisku pa $T < 0$.

Mehanska deformacija je definirana kot relativna sprememba dimenzije telesa zaradi mehanske obremenitve in jo označimo običajno s črko S (Strain)

$$S = \frac{\Delta l}{l} \quad (6.2)$$

Po dogovoru je pri nategu deformacija oz. relativni raztezek pozitiven ($S > 0$) in obratno je pri stisku deformacija oz. relativni skrček negativen ($S < 0$).

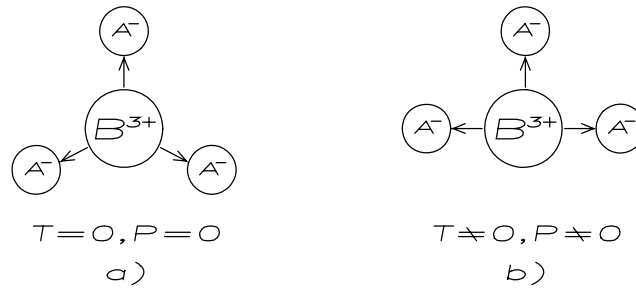
Dokler obremenitve niso prevelike, lahko predpostavimo, da velja med deformacijo S in obremenitvijo T kar linearna zveza (Hookeov zakon)

$$S = s T \quad (6.3)$$

kjer je $s[m^2/N]$ koeficient elastičnosti danega materiala.

Piezoelektrični efekt oz. nastanek električnih dipolov pod vplivom mehanske obremenitve lahko enostavno razložimo z opazovanjem posamezne molekule materiala pri mehanski obremenitvi.

Na Sl 6.1 je prikazana tipična molekula piezoelektričnega materiala, sestavljena iz dveh vrst atomov, A in B , zgradbe B^3+A_3 . Sl 6.1a prikazuje molekulo brez mehanske obremenitve. Zaradi simetrične porazdelitve nabojev v tem primeru centra pozitivnih in negativnih nabojev sovpadata, dipolni moment posamezne molekule in s tem dielektrična polarizacija materiala P v celoti so enaki 0!



SI 6.1 Neobremenjena (a) in obremenjena (b) molekula piezoelektričnega materiala

Na SI 6.1b je prikazana ista molekula v primeru mehanske obremenitve. Zaradi obremenitve se molekule materiala deformirajo, posledica je premik nabojev kot prikazuje SI 6.1b, centra pozitivnih in negativnih nabojev ne sovpadata oz. se razmakneta.

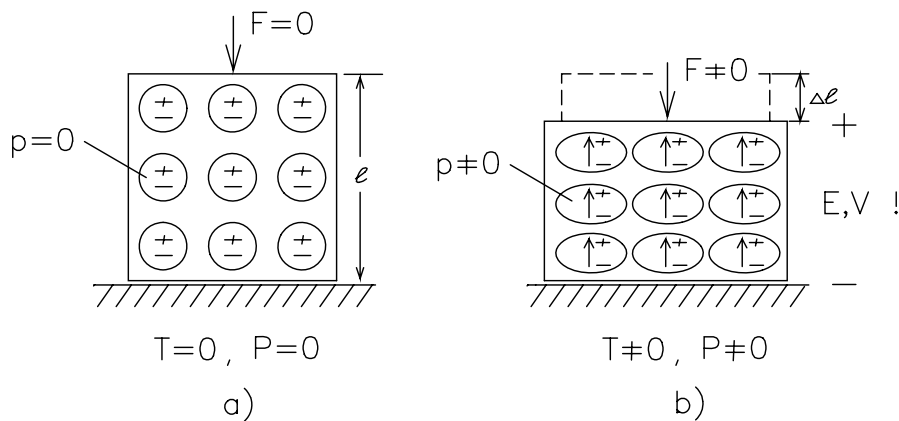
Posledica tega razmika naboja je induciran električni dipolni moment p opazovane molekule

$$p = q l \tag{6.4}$$

Posledica nastanka dipolnih momentov v dielektričnem materialu je dielektrična polarizacija. Dielektrična polarizacija materiala P je določena s prispevkom vseh dipolov po obravnavanem volumnu V oz. je po dogovoru enostavno vektorska vsota vseh dipolnih momentov, deljena z volumnom obravnavanega materiala

$$P = \frac{1}{V} \sum p_i \tag{6.5}$$

Kot posledica dielektrične polarizacije materiala se pojavi v kristalu, kot prikazuje SI 6.2, v obremenjenem piezoelektričnem materialu tudi električno polje E in s tem električna napetost V med zgornjo in spodnjo površino !



SI 6.2 Razmere v neobremenjenem(a) in obremenjenem(b) piezoelektričnem materialu

Pri dovolj majhnih obremenitvah je zveza med dielektrično polarizacijo P in mehansko obremenitvijo T linearna

$$P = d T \tag{6.6}$$

kjer je $d[\mu\text{m}/\text{V}]$ piezoelektrična napetostna konstanta, ki podaja, kolikšna napetost $V[\text{V}]$ se pojavi na danem materialu pri deformaciji za $1\mu\text{m}$.

Električno polje v piezoelektričnem materialu v splošnem primeru tako električne (εE) kot omenjene mehanske (P) dielektrične polarizacije določimo iz izraza za gostoto električnega polja D ob upoštevanju obeh prispevkov

$$D = \varepsilon E + d T \quad (6.7)$$

Električno polje v piezoelektričnem materialu je torej podano z izrazom

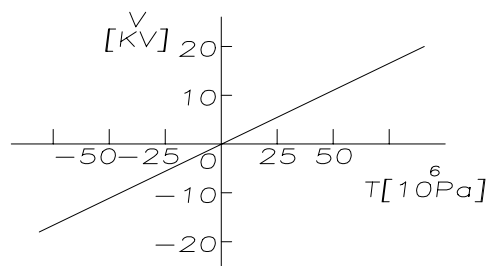
$$\begin{aligned} E &= -\frac{d}{\varepsilon} T + \frac{1}{\varepsilon} D \\ &= -g T + \frac{1}{\varepsilon} D \end{aligned} \quad (6.8)$$

kjer smo vpeljali piezoelektrično konstanto naboja $g = d/\varepsilon [\mu\text{m}^2/\text{As}]$. Konstanta g podaja ploskovni naboj, ki se pojavi zaradi obremenitve.

Napetost V , ki se pojavi na piezoelektričnem materialu kot posledica mehanske obremenitve, je pri znanem električnem polju E in debelini materiala l določena z enostavnim izrazom

$$V = E l \quad (6.9)$$

Diagram na Sl 6.3 podaja napetost na nekem piezoelektričnem materialu v odvisnosti od mehanske obremenitve. Zanimivo je, da imajo lahko nastopajoče napetosti zelo visoke vrednosti. Opazimo tudi, da pride pri prehodu od natezne obremenitve ($T > 0$) na tlačno oz.stisk ($T < 0$) do spremembe predznaka inducirane napetosti.



Sl 6.3 Napetost na piezoelektričnem kristalu v odvisnosti od mehanske obremenitve

Obstojata tudi obratni (inverzni) piezoelektrični efekt: če pritisnemo na piezoelektrični kristal električno polje, se zaradi električnih sil na naboje v materialu ($F = q E$) le-ta deformira! Tudi v tem primeru velja, da je pri majhnih deformacijah zveza med deformacijo zaradi električnega polja S_E in poljem E linearna

$$S_E = d E \quad (6.10)$$

kjer je d že znana piezoelektrična konstanta.

V splošnem imamo lahko poleg te deformacije prisotno še deformacijo zaradi mehanske napetosti, ki jo opisuje že omenjeni Hookeov zakon ($S_T = s T$). Deformacijo piezoelektričnega kristala S lahko v splošnem zapišemo torej kot vsoto obeh prispevkov

$$S = d E + s T \quad (6.11)$$

Tipična vrednost maksimalnih deformacij pri teh materialih, ki jo lahko dosežemo pri velikih enosmernih električnih poljih ($E \sim 500 \text{ V/mm}$), znaša $S_E = \Delta l/l = 10^{-4}$ oz. 0.1%. Pri izmeničnih razmerah lahko v resonanci dobimo še znatno višje vrednosti deformacije kristala.

Opisane zveze med mehansko inducirano električno napetostjo na piezoelektričnem kristalu ter pripadajočo mehansko deformacijo kristala, torej direktni ali indirektni piezoelektrični efekt, so našle številne zanimive aplikacije v različnih področjih elektronike in senzorike.

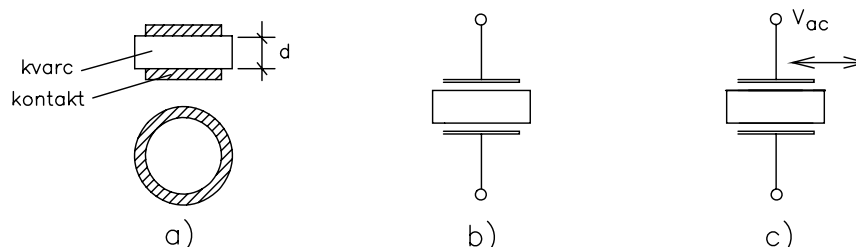
6.3 KVARČNI KRISTALI

Kot pove že ime, so ti elementi izdelani iz materiala kvarca, torej po kemijski zgradbi iz silicijevega dioksida SiO_2 . To je izredno stabilen material glede na razne vplive kot npr. čas, temperatura, električno polje itd.

Osnovna lastnost teh piezoelektričnih kristalov je, da pri vzbujanju z neko izmenično napetostjo v bližini resonančne frekvence mehansko nihajo z izredno stabilno frekvenco.

Po strukturi so kvarčni kristali izdelani običajno v obliki ploščic z vakuumsko nanešenimi tankoplastnimi elektrodami (SI 6.4a). Elementi so hermetično zaščiteni pred vplivi okolice s tem, da so zaprti v metalno ali stekleno ohišje. Električni simbol kvarca prikazuje SI 6.4b.

Osnovna aplikacija kvarčnega kristala, ki mu pogosto v praksi pravimo krajše kar kvarc ali kristal, je v oscilatorjih kot vzbujevalni element nihanja z izredno stalno frekvenco, ki je neodvisna od različnih vedno prisotnih zunanjih vplivov (npr. spremembe temperature, vlage, električne in druge motnje, časa itd.). Poleg tega jih najdemo tudi v raznih drugih elektronskih vezjih (filtri, merilniki temperature itd.).



SI 6.4 Struktura kvarčnega kristala(a), električni simbol(b) in strižno nihanje kristala(c)

Pri vseh teh aplikacijah izkoriščamo dejstvo, da je kvarc piezoelektrični material : če pritisnemo med elektrodi kvarčnega kristala neko električno napetost, se kristal mehansko deformira, in obratno . Pri tem gre običajno za strižne deformacije oz. nihanja (SI 6.4c).

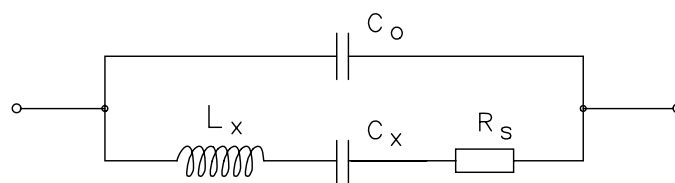
Če vzbujamo kristal z neko izmenično napetostjo, se izkaže, da bo kristal najintenzivneje nihal s ti. lastno oz. resonančno frekvenco kristala f_{res} . Ta je določena pri danem kristalu z njegovimi snovno-geometrijskimi lastnostmi, zlasti z debelino ploščice d , velja sorazmerje

$$f_{res} \propto \frac{1}{d} \quad (6.12)$$

Drugi pomembni faktor kristala je njegova kristalografska orientacija oz. kristalografski rez (cut), s katerim je bila ploščica izrezana iz osnovnega materiala. Obstaja več rezov, pri generatorjih nihanja je npr. v uporabi ti. AT rez, za katerega je značilno, da so temperaturne spremembe resonančne frekvence zanemarljive oz. minimalne. V aplikacijah, pri katerih nastopa kristal kot senzor temperature, ki jo registriramo kot spremembo frekvence, so v uporabi drugi rezi, pri katerih je temperaturni koeficient resonančne frekvence maksimalen.

Osnovne (fundamentalne) resonančne frekvence kvarčnih kristalov so tipično od 1kHz pa do 20MHz . Kristali bi bili za višje frekvenčno področje v skladu z omenjeno odvisnostjo frekvence od debeline ploščice že pretanki in bi bili mehansko neobstojni. Zato se pri višjih frekvencah do 200MHz uporabljajo debelejši kristali pri višjih harmonskih frekvencah, ki so mnogokratniki osnovne frekvence (3., 5., 7. ali 9.).

Nadomestno vezje kvarčnega kristala v bližini resonančne frekvence prikazuje SI 6.5. Paralelna kapacitivnost C_0 je določena z elektrodama in debelino ploščice ($C_0 = \epsilon A/d$). Odvisna je tudi od kristalografskega reza ploščice. Tipične vrednosti C_0 so $3 \div 15\text{pF}$. Elementi v serijski veji L_x , C_x , R_s se imenujejo tudi gibalni (motional) elementi kristala in služijo za dober opis frekvenčnih lastnosti. V splošnem sta L_x in C_x funkciji frekvence. Serijska upornost R_s v splošnem upada s frekvenco npr. za tipičen kristal : $200\text{k}\Omega$ pri 1kHz, $1\text{k}\Omega$ pri 100kHz in 10Ω pri 20MHz .



SI 6.5 Nadomestno vezje kvarčnega kristala v bližini resonance

Analiza nadomestnega vezja pokaže, da ima kvarc dve resonančni frekvenci, pri katerih ima absolutna impedanca ekstrem : resonančno frekvenco f_r in antiresonančno frekvenco f_a .

Resonančna frekvenca f_r , ki jo imenujemo tudi serijska resonančna frekvenca ali nizkoimpedančna (low impedance) resonančna frekvenca, je tista frekvenca, pri kateri ima kristal minimum absolutne impedance in je primerna za oscilatorje.

Pri predpostavki $R_s \ll 1/\omega C_0$, ki je običajno dobro izpolnjena, velja

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x C_x}}$$

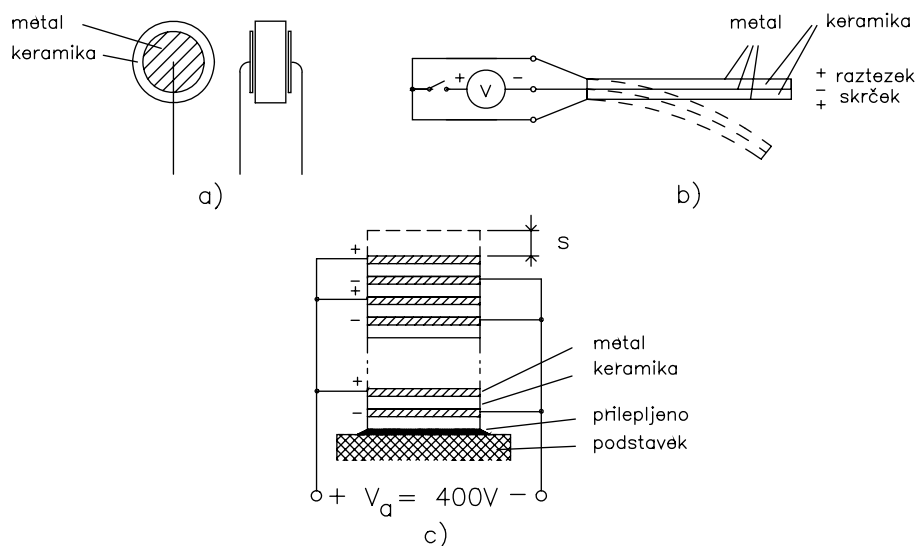
$$f_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x \frac{C_x C_0}{C_x + C_0}}} \quad (6.13)$$

Ker je običajno dobro izpolnjen tudi pogoj $C_0 \gg C_x$, hitro ugotovimo, da sta običajno obe resonančni frekvenci zelo blizu skupaj in da je resonančna frekvenca f_r nižja od obeh ($f_r < f_a$)

6.4 PIEZOKERAMIČNI VZBUJEVALNIKI

Piezokeramični vzbujevalniki ali aktuatorji so elementi, pri katerih s pomočjo piezoelektrnega učinka dosežemo pretvorbo električne energije v mehansko, ali obratno.

Struktura elementa je običajno ploščica piezoelektrnega materiala okrogle ali pravokotne geometrije, z nanešenimi Ni ali Ag kontakti, na katere lahko tudi sami prispajkamo potrebne dovode (Sl 6.6a). Pri tem je treba strogo upoštevati morebitna navodila proizvajalca glede sestave spajke, saj trše spajke pomenijo višje temperature spajkanja, kar bi morda lahko povzročilo uničenje elementa. Za ojačitev efekta vzbujanja se lahko več vzporedno več elementov hkrati!



SI 6.6 Struktura piezoelektrnega vzbujevalnika(a), uklonski element(b) in močnostni vzbujevalnik(c)

V praksi srečamo mnogovrstne uporabe teh elementov. V nadaljevanju si bomo pogledali nekaj tipičnih aplikacij.

1. Uklonski elementi

Drugo ime za te elemente je bimorf (bimorph, flexure element). S pomočjo pritisnjene napetosti povzročimo uklon elementa. Na Sl 6.6b je prikazana izvedba za večje pomike z dvema ploščama, ki sta vezani paralelno. Pri obratu polaritete pride do uklona na nasprotno stran. Za majhne moči se uporabljajo palice, za večje moči pa širše plošče piezokeramičnega materiala.

2. Močnostni vzbujevalniki

Ti elementi (Sl 6.6c) pretvarjajo priključeno električno napetost oz. energijo v mehansko silo. Po strukturi so to izmenjujoče se naložene piezokeramične ploščice in bakrene folije, medsebojno zlegirane ali zlepljene ter kontaktirane kot prikazuje slika. Pri taki strukturi pride aplicirana napetost V_a na vsako ploščico, s tem je električno polje in zato piezoeft N-krat močnejši kot v primeru nelamelirane strukture.

3. Pretvorniki (ultra)zvočnega nihanja

Na osnovi piezoelektričnega efekta delujejo tudi razni pretvorniki zvočnega in ultrazvočnega (UZ) nihanja. Obstojajo tako izvori (zvočniki, UZ generatorji itd.) kot detektorji (mikrofoni, merilniki sil, pospeškov itd.) zvočnega in ultrazvočnega nihanja.

4. Visokonapetostni generatorji

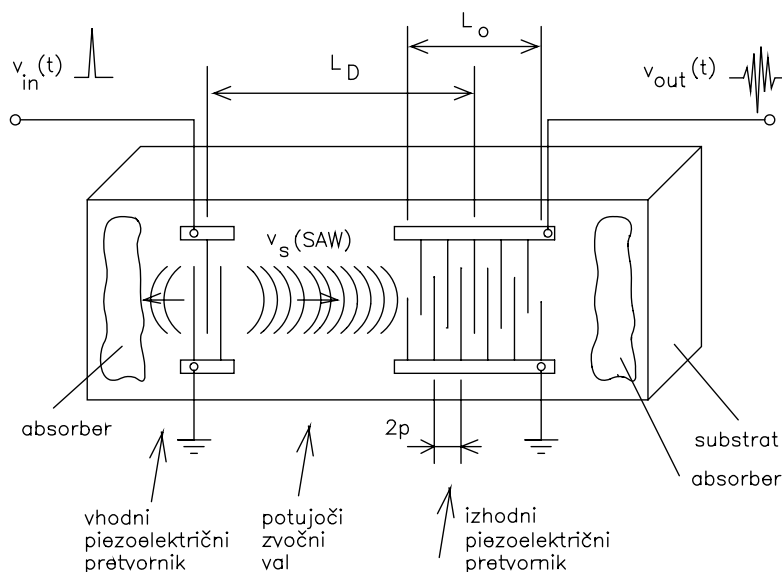
Tu se mehanski pritisk pretvori v visoko napetost. Uporabljajo se zlasti kot dajalci iskre za vžig pri plinskih štedilnikih in vžigalnikih itd.

Poleg naštetih srečamo še številne druge aplikacije, saj ti elementi igrajo bistveno vlogo tudi pri nekaterih izvedbah stikal, pri ink jet printerjih, senzorjih majhnih pomikov, merilnikih pretoka itd.

6.5 ELEMENTI NA POVRŠINSKE ZVOČNE VALOVE

Elementi na površinske zvočne valove so znani tudi pod krajšim imenom SAW (Surface Acoustic Wave) elementi. Vse več se ti elementi v zadnjem času uporabljajo za izdelavo odličnih (velik Q) zakasnilnih linij, filtrov, oscilatorjev itd. v radiotehniko in TV tehniki, telekomunikacijah pri zelo visokih frekvencah nad 5 MHz vse do nekaj GHz.

Tipična struktura teh elementov je prikazana na Sl 6.7. Substrat je ploščica primerne piezoelektričnega kristala, npr. litijev niobat LiNbO_3 . Na površini substrata se nahajajo vakuumsko nanešene tankoplastne metalne elektode, običajno aluminij Al. Površinska topologija elektrod (število prstov, razdalje med njimi itd.) v največji meri določa električne lastnosti danega SAW vezja.



SI 6.7 SAW zakasnilna linija

Princip delovanja SAW elementov je osnovan na izkoriščanju piezoelektričnih efektov pri generaciji, razširjanju in detekciji površinskih zvočnih valov v materialu.

Električni vhodni signal, pritisnjen na vhodni piezoelektrični pretvornik (transducer), povzroči ustrezna mehanska nihanja kristala in s tem emisijo površinskih zvočnih valov. Ti potujejo skozi kristal, pridejo primerno preoblikovani do izhodnega pretvornika, ki jih z obratnim piezoelektričnim efektom ponovno pretvori v električne, izhodne signale.

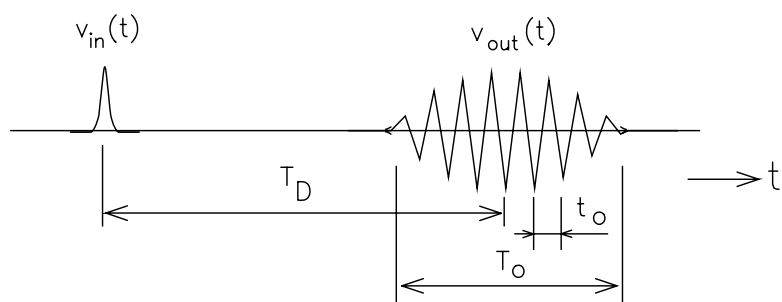
Primer takega SAW vezja, zakasnilne linije, prikazuje SI 6.7. Vzbujeno zvočno valovanje se razširja v danem materialu z zvočno hitrostjo (sound velocity, v_s) tega materiala, ki znaša tipično $v_s \sim 3000\text{m/s}$. Zato je zakasnitev izhodnega signala T_D , v skladu z oznakami na SI 6.7 in SI 6.8, podana z enostavnim izrazom

$$T_D = \frac{L_D}{v_s} \quad (6.14)$$

Podrobnejša analiza pokaže, da geometrija elektrod določa tudi druge lastnosti zakasnilne linije, npr. v skladu z oznakami na SI 6.8

$$\begin{aligned} T_0 &= \frac{L_0}{v_s} \\ t_0 &= \frac{2p}{v_s} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Na osnovi teh zakonitosti so podobno izvedeni tudi drugi SAW elementi in vezja (npr. filtri, resonatorji oz. oscilatorji itd.).



SI 6.8 Oblika vhodnih in izhodnih signalov SAW zakasnilne linije

REFERENCE

- 1) PHILIPS, "Piezoelectric ceramics", Components and materials Book C19, 1986.
- 2) C.Kittel, "UVOD U FIZIKU čVRSTOG STANJA", Savremena administracija, Beograd, 1970.
- 3) PHILIPS, "Piezoelectric quartz devices", Components and materials Book C19, 1986.
- 4) Matthys, "Crystall Oscillator Circuits", (Bostjan)
- 5) M.Kaufman, A.H.Seidman, "HANDBOOK for ELECTRONICS ENGINEERING TEHNICIANS", McGraw-Hill, USA, 1984.
- 6) Jordan, "Reference Data for ...", (Bostjan)
- 7) SIEMENS, "Surface Acoustic Wave Filters for CCIR Multi-Standard IF Concepts", 1987/88.
- 8) PHILIPS, "Surface acoustic wave devices", Data handbook, Book S12, 1984.