

# Analiza piezoelektričnih pretvornika velikih energija emitiranog impulsa

---

**Halavanja, Aleksandar**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2010**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:895437>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-22**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Aleksandar Halavanja

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Aleksandar Halavanja

Zagreb, 2010.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **ALEKSANDAR HALAVANJA**

Mat. br.: 0035147697

Naslov: **ANALIZA PIEZOELEKTRIČNIH PRETVORNIKA VELIKIH ENERGIJA  
EMITIRANOG IMPULSA**

Opis zadatka:

Ultrazvučni valovi uobičajeno se dobivaju primjenom piezoelektričnog učinka. Različiti piezoelektrični materijali izliveni su u pretvornike čiji su oblici i dimenzije vrlo različiti. Frekvencija, stupanj monokromatičnosti i ukupna energija emitiranog impulsa pritom generiranih valova kreću se u velikom rasponu, uključivo vrlo velike energije prenesene u emitirani impuls. One omogućavaju obradu velikog broja vrsta materijala odvajanjem čestica. Generirani ultrazvučni valovi mogu biti različiti polarizacija, longitudinalne ili transverzalnih.

U prvom dijelu završnog rada potrebno je navesti vrste materijala upotrebljivanih za dobivanje ultrazvučnih valova. Pritom treba istaknuti materijale koji omogućavaju dobivanje ultrazvučnih valova velikih energija emitiranog impulsa, tijekom većeg vremenskog intervala. Nadalje, potrebno je navesti raspon frekvencija pripadnih ultrazvučnih valova.

Na osnovi stečenog uvida, potrebno je analizirati prikladnost pojedine kombinacije oblika i vrste materijala piezoelektričnog pretvornika za dobivanje ultrazvučnog snopa tražene prostorne raspodjele polja tlaka i zahtijevanih energetske značajki.

Zadatak zadan:

11. prosinca 2009.

Zadatak zdao:

  
Prof. dr. sc. Damir Markučić

Rok predaje rada:

Prosinac 2010.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Dubravko Majetić

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se stečenim znanjem i navedenom literaturom.*

*Zahvala:*

*Zahvaljujem voditelju rada, Prof. dr. sc. Damiru Markučiću na podršci, korisnim savjetima i usmjeravanju pri izradi rada.*

## SAŽETAK RADA

Piezoelektrični pretvornici pretvaraju jednu vrstu energije u drugu (električnu u mehaničku i obratno, električnu u akustičnu, itd.). U ovom radu opisana je fizika zvuka, vala i ultrazvuka. Uz osnovne pojmove te piezoelektrični efekt, poseban naglasak imaju piezoelektrični materijali i njihova svojstva. Istaknuti su najčešće upotrebljavani materijali s izraženim piezoelektričnim svojstvima te podjela istih na prirodne i umjetne. Navedene su prednosti umjetnih materijala nad prirodnima, kratak opis svojstava te istaknuta njihova niska proizvodna cijena kojom danas konkuriraju na tržištu proizvodnje. Također, detaljno se razmatraju piezoelektrične konstante, proces polarizacije i smjer djelujućih sila na piezoelektričnom elementu, a u cilju dimenzioniranja piezoelektričnih pretvornika. Uz navedeno, opisana je podjela piezoelektričnih uređaja na osnovne kategorije; opis istih s naglaskom na ultrazvučne pretvornike i načine dobivanja ultrazvučnih valova velikih energija emitiranog impulsa te njihova praktična primjena u današnjoj modernoj tehnologiji, kao i velika civilizacijska važnost.

## Sadržaj

UVOD.....	1
<b>1.0. PRIMJENA PIEZOELEKTRIČNOG UČINKA NA ULTRAZVUČNE VALOVE .....</b>	<b>2</b>
1.1 ZVUK .....	2
1.2 ŠIRENJE I OSNOVNE VRSTE VALOVA .....	2
1.3 ULTRAZVUČNI VALOVI .....	3
1.4 PIEZOELEKTRIČNI EFEKT .....	4
<b>2.0. PIEZOELEKTRIČNE KONSTANTE .....</b>	<b>7</b>
2.1. POLARIZACIJA I SMJER SILA NA PIEZOELEKTRIČNOM ELEMENTU .....	7
2.1.1. <i>Nabojna piezoelektrična konstanta</i> .....	7
2.1.2. <i>Naponska piezoelektrična konstanta</i> .....	8
2.1.3. <i>Permitivnost</i> .....	8
2.1.4. <i>Konstanta proporcionalnosti</i> .....	9
2.1.5. <i>Young-ov modul elastičnosti</i> .....	9
2.1.6. <i>Elektromehanički koeficijent sprezanja</i> .....	9
2.2. NAJČEŠĆE KORIŠTENE KONSTANTE I JEDNADŽBE .....	10
<b>3.0. OBLICI I VRSTE MATERIJALA PIEZOELEKTRIČNOG PRETVORNIKA.....</b>	<b>14</b>
3.1. UMJETNI PIEZOELEKTRIČNI MATERIJALI.....	14
3.2. POLI(VINILIDEN- FLUORID) (PVDF).....	14
3.2.1. <i>PVDF parametri</i> .....	17
3.3. OLOVNI CIRKONAT- TITANAT (PZT).....	18
<b>4.0. PIEZOELEKTRIČNI UREĐAJI.....</b>	<b>22</b>
4.1. SENZORI.....	22
4.2. AKTUATORI.....	22
4.3. ULTRAZVUČNI PRETVORNIK.....	24
4.3.1. <i>DIMENZIJE PRETVORNIKA</i> .....	26
4.4. UPORABA PIEZOELEKTRIČNIH PRETVORNIKA VELIKIH ENERGIJA .....	29
<b>5.0 . ZAKLJUČAK .....</b>	<b>31</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>32</b>

## POPIS SLIKA

SLIKA 1. LONGITUDINALNI VAL, [2].....	3
SLIKA 2. TRANSVERZALNI VAL, [2].....	3
SLIKA 3. PIEZOELEKTRIČNI PRETVORNIK, [5].....	5
SLIKA 4. PIEZOELEKTRIČNI EFEKT, [5].....	6
SLIKA 5. SMJER SILA KOJE DJELUJU NA PIEZOELEKTRIČNI ELEMENT, [6].....	7
SLIKA 6. PROCES POLARIZIRANJA, [8].....	16
SLIKA 7. ORIJENTIRANJE PVDF UZORKA, [8].....	17
SLIKA 8. STRUKTURA PZT I $\text{BaTiO}_3$ PRIJE I NAKON ŠTO JE ELEKTRIČNO POLJE DOVEDENO NA KRISTAL, [10].....	18
SLIKA 9. PROCES POLARIZACIJE, [6].....	19
SLIKA 10. PIEZOELEKTRIČNI PRETVORNICI, [11].....	22
SLIKA 11. TRANSVERZALNI $d_{31}$ AKTUATOR, [11].....	23
SLIKA 12. VIŠESLOJNI AKTUATOR, [11].....	23
SLIKA 13. DVOSLOJNI TRANSVERZALNI AKTUATOR, [11].....	24
SLIKA 14. DIMENZIJE DISKA/ŠTAPA, [11].....	26
SLIKA 15. DIMENZIJE PLOČICE/ŠTAPA, [11].....	27
SLIKA 16. DIMENZIJE CJEVČICE, [11].....	27
SLIKA 17. TITRANJE PIEZOELEKTRIČNIH KOMPONENTI, [10].....	28
SLIKA 18. SONOTRODA S PIEZOKERAMIČKIM DISKOVIMA, [10].....	29
SLIKA 19. PRIMJER ULTRAZVUČNOG ZAVARIVANJA, [12].....	30

## POPIS TABELA

TABELA 1. MEHANIČKA I ELEKTRIČNA SVOJSTVA PVDF FILMA.....	15
TABELA 2. USPOREDBA KARAKTERISTIKA "MEKE" I "TVRDE" KERAMIKE, [6].....	20
TABELA 3. PRIMJER "TVRDE" PZT KERAMIKE, [10].....	21



## POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

- A.....površina [ $m^2$ ]
- B..... širina frekventijskog područja
- d..... nabojna piezoelektrična konstanta [C/N]
- $D_\phi$ .....radijus diska ili štapa[m]
- $\epsilon_0$ .....permitivnost vakuumu ( $8.85 \times 10^{-12}$  farad/m)
- $\epsilon^T$ .....permitivnost keramike pri konstantnom naprezanju [farad/m]
- F.....sila
- $f_m$ .....rezonantna frekvencija [Hz]
- $f_n$ .....anti-rezonantna frekvencija [Hz]
- $f_p$ .....paralelna rezonantna frekvencija [Hz]
- $f_s$ .....serijska rezonantna frekvencija [Hz]
- g.....naponska piezoelektrična konstanta [Vm/N]
- h.....visina (debljina) keramike [m]
- k.....elektromehanički koeficijent sprezanja
- $k_{eff}$ .....efektivni faktor sprezanja
- $K^T$ .....relativna dielektrična konstanta (pri konstantnom naprezanju)
- l.....početna dužina keramike [m]
- N.....frekvencijska konstanta [Hz\*m]
- $Q_m$ .....kvalitativni mehanički faktor
- $\rho$ .....gustoća keramike [ $kg/m^3$ ]
- s.....konstanta proporcionalnosti [ $m^2/N$ ]
- S.....deformacija
- $T_C$ .....Curie-eva temperatura [ $^\circ C$ ]
- T.....naprezanje
- w.....širina keramike [m]
- E....Young-ov modul elastičnosti [ $N/m^2$ ]
- v....brzina zvuka u keramici [m/s]
- $Z_m$ .....minimalna impedancija pri  $f_m$  [ $\Omega$ ]

## UVOD

Piezoelektrični pretvornici omogućuju stvaranje mehaničkih titraja u širokom rasponu frekvencija. Danas su najbrojniji među pretvornicima ultrazvučnih uređaja, obzirom da se ultrazvučni valovi uobičajeno dobivaju primjenom piezoelektričnog učinka. U daljnjem tekstu najviše pozornosti posvetit će se materijalima i oblicima pretvornika velikih energija emitiranog impulsa. Također, analizirat će se prikladnost pojedine kombinacije oblika i vrsta materijala piezoelektričnog pretvornika za dobivanje ultrazvučnog snopa tražene prostorne raspodjele polja tlaka i zahtijevanih energetske značajki.

## **1.0. PRIMJENA PIEZOELEKTRIČNOG UČINKA NA ULTRAZVUČNE VALOVE**

### **1.1 Zvuk**

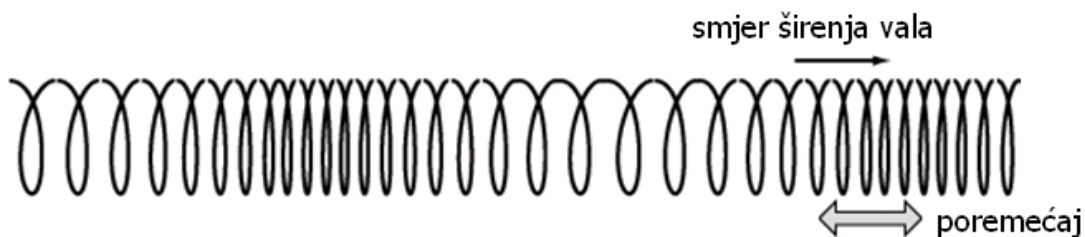
Pod pojmom zvuka razumijevamo pojavu koju možemo registrirati sluhom. Zvuk je longitudinalni mehanički val koji se može prostirati u čvrstim tijelima, tekućinama i plinovima. Mehaničke valove koje registrira ljudsko uho nazivamo zvukom u užem smislu. To su longitudinalni valovi frekvencije od 20 Hz do 20000 Hz, koji mogu zatitati bubnjić našeg uha i tako proizvesti osjećaj zvuka. Zvučne valove ispod 20 Hz nazivamo infrazvuk, a iznad 20000 Hz ultrazvuk. Ključni događaj koji je doveo da razvitka ultrazvuka je otkriće piezoelektriciteta od strane braće Curie, 1880. g., te postupka konverzije električnog signala u mehanički i obrnuto. Početkom 20. stoljeća najznačajniju ulogu na području akustike ima Lord Rayleigh ( John W. Strutt). Rayleigh izdaje knjigu *The Theory of Sound, 1889.* u kojoj donosi definitivne studije i otkrića principa akustike. [1]

### **1.2 Širenje i osnovne vrste valova**

Jedan od načina prenošenja energije kroz prostor je valovito gibanje. Val je poremećaj koji se širi prostorom pri čemu se prenosi energija. Mehanički valovi se mogu širiti samo kroz neku tvar (medij), dok se elektromagnetski valovi mogu širiti i kroz vakuum. Mjesto iz kojeg se val širi naziva se *izvor vala*, [3].

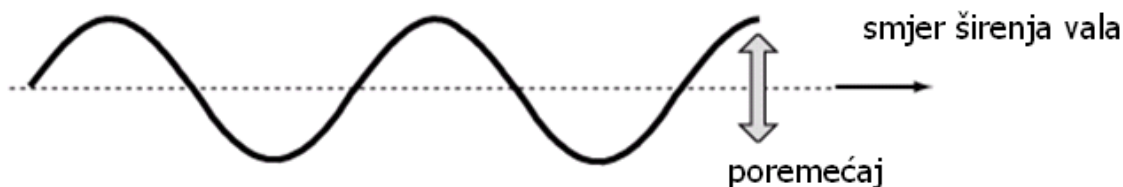
Razlikujemo dvije osnovne vrste valova:

- Longitudinalni – nastaje ako čestice koje prenose val titraju paralelno na smjer širenja vala, prikazan na slici 1.



**Slika 1. Longitudinalni val, [2]**

- Transverzalni – nastaje ako čestice titraju poprečno na smjer širenja vala, prikazan na slici 2.



**Slika 2. Transverzalni val, [2]**

Valovi nastaju u izvoru vala, a titranje se određenom brzinom proširi kroz sredstvo. Brzina vala ovisi o osobinama (elastičnosti i gustoći) sredstva kroz koje val prolazi. Kada val prelazi iz jednog sredstva u drugo ili se prostire u nehomogeno sredstvo, brzina i valna duljina se mijenjaju, a frekvencija ostaje ista. Frekvencija ima inverznu vezu prema pojmu valna duljina. Frekvencija  $f$  jednaka je brzini  $v$  vala podijeljena s valnom duljinom  $\lambda$  vala prema formuli (1.1):

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1.1)$$

### 1.3 Ultrazvučni valovi

Ultrazvučni valovi, kao i sve druge vrste valova, slijede zakonitost valnog gibanja te se mogu širiti samo u sredstvu. Ovisno o jakosti polja ultrazvuk se u primjeni bitno razlikuje. Dvije osnovne grupe čine polja:

- Velike snage 1W – 10Kw ;  
primjena: čišćenje, zavarivanje, medicinska terapija, ...
- Male snage 0,001 – 1W  
primjena: kontrola i mjerenje u tehnici, medicinska dijagnostika, alarmi, ...

Ultrazvuk je moguće generirati na više načina. Za proizvodnju ultrazvučne energije najčešće se koristi piezoelektrični efekt te je isti stavljen na prvo mjesto u redoslijedu mogućih načina generiranja ultrazvuka.

## 1.4 Piezoelektrični efekt

Piezoelektrični efekt (*grč.* piezo - gurati) je pojava stvaranja vezanih električnih naboja na površini nekih čvrstih tvari prilikom njihove mehaničke deformacije (vrijedi i obratna tvrdnja). Takve tvari se nazivaju piezoelektričnim tvarima ili piezoelektricima. Prve pretpostavke o postojanju takvog efekta postavio je Coulomb (1815.), pretpostavivši da je moguće proizvesti elektricitet deformacijom čvrstog tijela. Becquerel je 1820.g. predložio pokuse sa kristalima minerala u tom smislu, a iste su 1880.g. izveli braća Pierre i Jacques Curie u svojoj 21., odnosno 24. godini, postavši otkrivačima piezoelektričnog efekta. Naime, još prije njihovog otkrića bilo je poznato svojstvo pojave električnih polova različitih predznaka na suprotnim krajevima kristala kada bi kristali bili izloženi promjeni temperature - ta pojava naziva se *pirelektricitet* (*grč.* pyr - vatra). Naziv *piezoelektricitet* predložen je 1881.g. (Hankel), a iste godine postavljena je pretpostavka o postojanju suprotnog efekta - mehaničke deformacije kristala ako mu se na suprotne krajeve dovedu raznoimeni električni naboji.

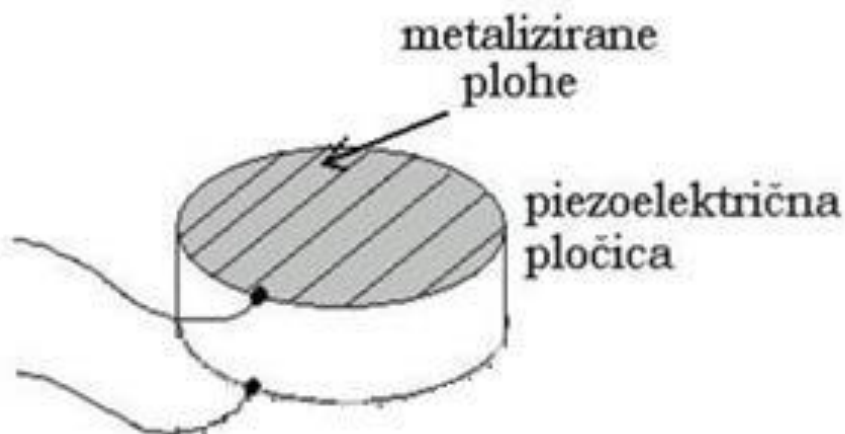
Teorijsku osnovu za razumijevanje piezoelektričnog efekta postavio je Kelvin (1893.), a tenzorske jednadžbe koje opisuju (linearnu) vezu između deformacije i električnog polja kod piezoelektričnih kristala dao je Voight 1894. Do prvih praktičnih primjena piezoelektričnog efekta došlo je za vrijeme I. svjetskog rata, kada su proizvedeni prvi sonarni uređaji za otkrivanje podmornica. Sljedećih godina otkriveni su novi piezoelektrični materijali, i unaprijeđivano je teorijsko razumijevanje pojave. Danas je pažnja usmjerena na nove tehnološke primjene i otkrivanje novih piezoelektričnih materijala (posebno korisnima su se pokazale piezoelektrične keramike i sintetski polimeri).

Ovim otkrićima otvorena su vrata velikom napretku u razumijevanju fizike čvrstog stanja, a njihove tehnološke primjene i civilizacijska važnost su goleme.

Postoje dvije vrste piezoelektričnih materijala. Prvu grupu čine prirodni materijali, koji piezoelektričnost posjeduju radi asimetrije kristalne strukture. Karakteristični predstavnik ove grupe je kvarc, koji je dugo vremena bio i jedini materijal iz kojeg su se izrađivali pretvornici, aktivni dio ultrazvučne sonde.

Druga grupa piezoelektričnih materijala je umjetna. U pravilu, umjetni materijali su čvršći i kemijski inertni. Odlikuju se niskom proizvodnom cijenom i jednostavnošću primjene u odnosu na alternativna rješenja. Često nazivani sintetički pretvornici spadaju u ovu grupu, a proizvode se polariziranjem pločica po debljini, tako da se podudaraju smjer električnog i elastičnog polja. To su polikristalne keramike.

Piezoelektrični pretvornik se sastoji od komada piezoelektričnog materijala s bar s dvije elektrode postavljene na dijelu površine, vidljivo na slici 3., [5].

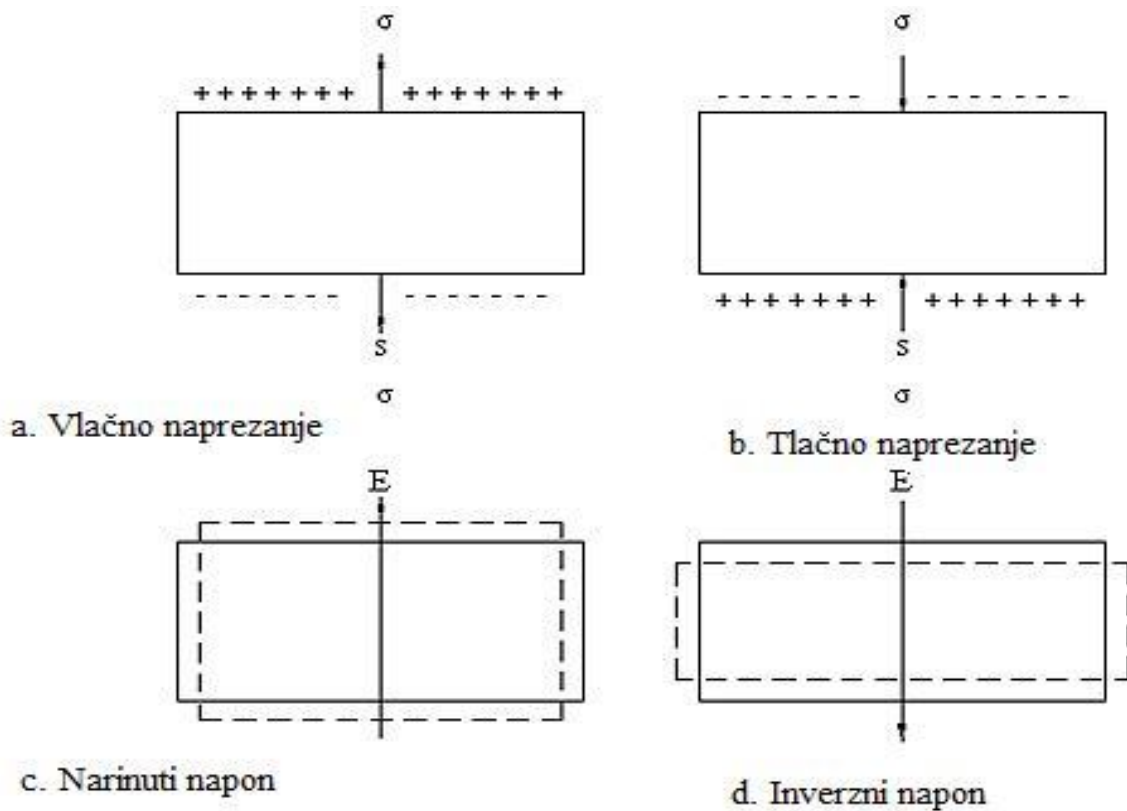


**Slika 3. Piezoelektrični pretvornik, [5]**

Osnovna je prednost piezoelektričnih pretvornika u tome što omogućuju stvaranje mehaničkih titraja u širokom rasponu frekvencija. Oni su danas najbrojniji među pretvornicima ultrazvučnih uređaja. Piezoelektrični efekt je prirodno svojstvo nekih kristala poput kvarca ( $\text{SiO}_2$ ) ili turmalina, koji su ujedno i najpoznatiji piezoelektrici. Za ultrazvučne pretvornike u najvećoj mjeri se primjenjuju umjetno dobiveni materijali koji imaju znatno prikladnija svojstva od prirodnih kristala.

Princip piezoelektričnog efekta (vidljivo na slici 4., [6]) jest da se pri deformaciji nekih kristala u određenim smjerovima na njihovim površinama pojavljuje električni naboj, tj. oni se polariziraju. Ova pojava se naziva *direktni piezoeffekt*. Dakle, elastičnom deformacijom stvori se električni naboj (jedna strana pločice se nabije pozitivno, a druga negativno, tj. kristal postaje električki polariziran).

Deformacija, tj. promjena dimenzija kristala pod djelovanjem električnog polja naziva se *indirektni piezoeffekt*. U određenim uvjetima isti pretvarač se može koristiti i kao prijemni i kao predajni element. Primjerice, ako na pločicu kvarca dovedemo napon, pod utjecajem polja dipoli se orijentiraju. Ako na ploču dovedemo izmjenični napon, pločica će vibrirati frekvencijom tog napona. Frekvencije titranja su reda MHz [4].



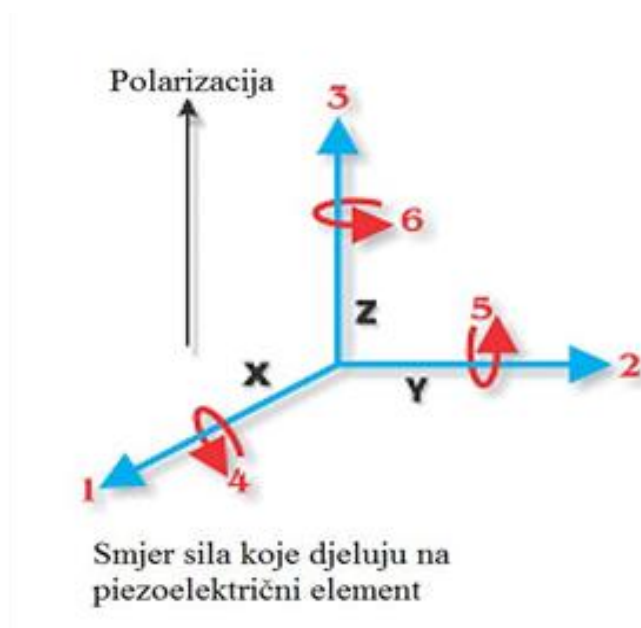
Slika 4. Piezoelektrični efekt, [5]

## 2.0. PIEZOELEKTRIČNE KONSTANTE

### 2.1. Polarizacija i smjer sila na piezoelektričnom elementu

Kako je piezoelektričan element anizotropan (svojstva su mu različita u pojedinim smjerovima), fizikalne konstante odnose se na smjer mehaničke ili električne sile te na smjer okomit od primjenjene sile. Slijedom toga, svaka konstanta ima 2 donja indeksa koji označavaju smjer dvije povezane veličine, kao što su *naprezanje* (sila na element/površina elementa) te deformacija (relativna promjena duljine elementa/originalna duljina elementa).

Smjer pozitivne polarizacije obično se podudara sa Z osi. Smjer normalnih naprezanja X,Y ili Z osi obilježen je donjim indeksom 1,2 ili 3, a tangencijalnih naprezanja X,Y ili Z donjim indeksom 4,5 ili 6, [Slika 5.].



Slika 5. Smjer sila koje djeluju na piezoelektrični element, [6]

#### 2.1.1. Nabojna piezoelektrična konstanta

Nabojna piezoelektrična konstanta,  $d$ , je polarizacija po jedinici primjenjenog vanjskog mehaničkog naprezanja (T) na piezoelektrični materijal ili, alternativno, mehanička deformacija (rastezanje) (S) piezoelektričnog materijala po jedinici primjenjenog vanjskog električnog polja. Prvi donji indeks kod  $d$  označuje smjer polarizacije stvoren u materijalu kada je električno polje,  $E$ , jednako nuli ili, alternativno, je smjer jakosti polja.



Drugi donji indeks je smjer naprezanja, odnosno, inducirane deformacije (rastezanja). Konstanta  $d$  je važni indikator prikladnosti materijala za deformacijski ovisne aplikacije (aktuatore).

$d_{33}$  – pobuda polarizacije u smjeru 3 (paralelno u smjeru u kojem je element polariziran) po jedinici primjenjenog vanjskog naprezanja u smjeru 3 ili pobuda deformacije (rastezanja) u smjeru 3 po jedinici primjenjenog vanjskog električnog polja u smjeru 3

$d_{31}$  – pobuda polarizacije u smjeru 3 (paralelno u smjeru u kojem je element polariziran) po jedinici primjenjenog vanjskog naprezanja u smjeru 1 (okomito na smjer u kojem je element polariziran) ili pobuda deformacije (rastezanja) u smjeru 1 po jedinici primjenjenog vanjskog električnog polja u smjeru 3

### **2.1.2. Naponska piezoelektrična konstanta**

Naponska piezoelektrična konstanta,  $g$ , je stvoreno električno polje nastalo piezoelektričnim materijalom po jedinici primjenjenog vanjskog mehaničkog naprezanja ili, mehanička deformacija (rastezanje) koja djeluje na piezoelektrični materijal po jedinici primjenjenog vanjskog električnog pomaka. Prvi donji indeks kod  $g$  označava smjer električnog polja stvorenog u materijalu ili, smjer električnog pomaka. Drugi donji indeks je smjer napreznja ili izazvane deformacije. Konstanta  $g$  je važna za procjenu prikladnosti materijala za senzore.

$g_{33}$  – inducirano električno polje u smjeru 3 (paralelno u smjeru u kojem je element polariziran) po jedinici napreznja u smjeru 3 ili izazvana deformacija u smjeru 3 po jedinici električnog pomaka u smjeru 3

$g_{31}$  – inducirano električnog polje u smjeru 3 (paralelno u smjeru u kojem je element polariziran) po jedinici napreznja u smjeru 1 (okomito na smjeru u kojem je element polariziran) ili izazvana deformacija u smjeru 1 po jedinici električnog pomaka u smjeru 3

### **2.1.3. Permitivnost**

Permitivnost ili dielektrična konstanta,  $\epsilon$ , za piezoelektrični materijal je dielektrični pomak po jedinici električnog polja.  $\epsilon^T$  je permitivnost pri konstantnom napreznju,  $\epsilon^S$  je permitivnost

pri konstantnoj deformaciji (rastezanju). Prvi donji indeks kod  $\epsilon$  označava smjer dielektričnog pomaka; drugi donji indeks označava smjer električnog polja.

Relativna dielektrična konstanta,  $K$ , je omjer od  $\epsilon$ , količina naboja elementa koju materijal može pohraniti, u odnosu na apsolutnu dielektričnu konstantu,  $\epsilon_0$ , naboja koji može biti pohranjen na istim elektrodama koje su odvojene vakuumom, pri istoj voltaži ( $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  farad/metar).

$\epsilon_{11}^T$  - permitivnost za dielektrični pomak i električno polje u smjeru 1 (okomito na smjer u kojem je element polariziran), pri konstantnom naprezanju

$\epsilon_{33}^S$  - permitivnost za dielektrični pomak i električno polje u smjeru 3 (paralelno sa smjerom u kojem je element polariziran), pri konstantnoj deformaciji (rastezanju)

#### **2.1.4. Konstanta proporcionalnosti**

Konstanta proporcionalnosti,  $s$ , je recipročna od modula elastičnosti ( $E$ ) (za smjerove 11 i 33).

$s_{11}^V$  – konstanta proporcionalnosti za naprezanje u smjeru 1 (okomito na smjer u kojem je element polariziran) i pripadajućom deformacijom (rastezanjem) u smjeru 1, pri konstantnom električnom polju

$s_{33}^D$  – konstanta proporcionalnosti za naprezanje u smjeru 3 (paralelno sa smjerom u kojem je element polariziran) i pripadajućom deformacijom (rastezanjem) u smjeru 3, pri konstantnom električnom pomaku

#### **2.1.5. Young-ov modul elastičnosti**

Young-ov modul elastičnosti,  $E$ , je pokazatelj elastičnosti materijala.

#### **2.1.6. Elektromehanički koeficijent sprezanja**

Elektromehanički koeficijent sprezanja,  $k$ , je pokazatelj učinkovitosti piezoelektričnog materijala kojim isti pretvara električnu energiju u mehaničku i obratno. Prvi donji indeks kod

k označuje smjer u kojem se primjenjuju elektrode; drugi donji indeks označuje smjer kojim se primjenjuje mehanička energija, ili stvara. Pri nižim ulaznim frekvencijama tipična piezoelektrična keramika može pretvoriti između 30 i 75% energije iz jednog oblika u drugi, ovisno o vrsti keramike i smjeru u kojem sile djeluju. Visoki k je obično poželjan kod učinkovite pretvorbe energije, ali k ne uzima u obzir dielektrični pomak ili mehaničke gubitke, niti povratak pretvorbene energije.

Točna mjera korisnosti je omjer pretvorene, korisne energije dostavljene od piezoelektričnog elementa do ukupne energije uzete elementom. Prema toj mjeri, piezoelektrična keramika ima korisnost veću od 90%.

## 2.2. Najčešće korištene konstante i jednadžbe

- Širina frekvencijskog pojasa (1.2):

$$B \cong kf_p \quad (1.2)$$

- Dielektrična konstanta (1.3):  
(permitivnost keramičkog materijala/ permitivnost vakuuma)

$$K^T = \varepsilon^T / \varepsilon_0 \quad (1.3)$$

- Konstanta proporcionalnosti (1.4, 1.5, 1.6, 1.7):  
(dobiveno rastezanje/ primjenjeno naprezanje; inverzni Young-ov modul elastičnosti)

$$s_{33}^D = 1 / E_{33}^D \quad (1.4)$$

$$s_{33}^E = 1 / E_{33}^E \quad (1.5)$$

$$s_{11}^D = 1 / E_{11}^D \quad (1.6)$$

$$s_{11}^E = 1 / E_{11}^E \quad (1.7)$$

- Elektromehanički faktor sprezanja (1.8, 1.9, 1.10, 1.11, 1.12, 1.13, 1.14):  
(pretvorena mehanička energija/ unešena električna energija ili pretvorena električna energija/ unešena mehanička energija)

- Niže frekvencije

Keramička pločica

$$k_{31}^2 = d_{31}^2 / (s_{11}^E \epsilon_{33}^T) \quad (1.8)$$

Keramički disk

$$k_p^2 = 2d_{31}^2 / ((s_{11}^E + s_{12}^E) \epsilon_{33}^T) \quad (1.9)$$

Keramički štap

$$k_{33}^2 = d_{33}^2 / (s_{33}^E \epsilon_{33}^T) \quad (1.10)$$

- Više frekvencije

Keramička pločica

$$k_{31}^2 = \frac{(\pi/2) (f_n / f_m) \operatorname{tg} [(\pi/2) ((f_n - f_m) / f_m)]}{1 + (\pi/2) (f_n / f_m) \operatorname{tg} [(\pi/2) ((f_n - f_m) / f_m)]} \quad (1.11)$$

Keramički disk

$$k_p \cong \sqrt{[2.51 (f_n - f_m) / f_n] - ((f_n - f_m) / f_n)^2} \quad (1.12)$$

Keramički štap

$$k_{33}^2 = (\pi/2) (f_n / f_m) \operatorname{tg} [(\pi/2) ((f_n - f_m) / f_n)] \quad (1.13)$$

Bilo koji oblik

$$k_{\text{eff}}^2 = (f_n^2 - f_m^2) / f_n^2 \quad (1.14)$$

- Nabojna piezoelektrična konstanta (1.15., 1.16, 1.17, 1.18):  
(stvoreno električno polje/ primjenjeno naprezanje ili rastezanje keramičkog elementa/  
primjenjeno električno polje)

$$d = k \sqrt{(s^E \boldsymbol{\varepsilon}^T)} \quad (1.15)$$

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{(s_{11}^E \boldsymbol{\varepsilon}_{33}^T)} \quad (1.16)$$

$$d_{33} = k_{33} \sqrt{(s_{33}^E \boldsymbol{\varepsilon}_{33}^T)} \quad (1.17)$$

$$d_{15} = k_{15} \sqrt{(s_{55}^E \boldsymbol{\varepsilon}_{11}^T)} \quad (1.18)$$

- Naponska piezoelektrična konstanta (1.19, 1.20, 1.21, 1.22):  
(stvoreno električno polje/ primjenjeno naprezanje ili rastezanje keramičkog elementa/  
primjenjeni električni pomak)

$$g = d / \boldsymbol{\varepsilon}^T \quad (1.19)$$

$$g_{31} = d_{31} / \boldsymbol{\varepsilon}_{33}^T \quad (1.20)$$

$$g_{33} = d_{33} / \boldsymbol{\varepsilon}_{33}^T \quad (1.21)$$

$$g_{15} = d_{15} / \boldsymbol{\varepsilon}_{11}^T \quad (1.22)$$

- Young-ov modul elastičnosti (1.23):  
(primjenjeno naprezanje/ dobiveno rastezanje)

$$E = (F / A) / (\Delta l / l) = T / S \quad (1.23)$$

- Relacija između  $d$ ,  $\epsilon^T$ ,  $g$  (1.24):

$$g = d / \epsilon^T \text{ ili } d = g \epsilon^T \quad (1.24)$$

- Faktor dobrote (1.25):

(karakterizira "jačinu rezonancije" piezoelektričnog tijela (rezonatora))

Faktor dobrote  $Q$  je omjer pohranjene energije u rezonatoru naprema izgubljenoj energiji u jednoj periodu. Što je veći  $Q$  to je manji gubitak energije u odnosu na pohranjenu energiju rezonatora, oscilacije traju duže.

$$Q_m = f_n^2 / (2\pi f_m C_0 Z_m (f_n^2 - f_m^2)) \quad (1.25)$$

Navedene formule vrijede za piezokeramiku, [6].

### **3.0. OBLICI I VRSTE MATERIJALA PIEZOELEKTRIČNOG PRETVORNIKA**

#### **3.1. Umjetni piezoelektrični materijali**

Za potrebe pretvorbe električnih impulsa u mehaničke pomake i obratno najprikladniji materijali su piezoelektrične keremike, poput PZT-a, i polimerni piezoelektrici. Piezoelektrična svojstva se često kombiniraju sa nekim drugim fizikalnim svojstvima materijala, da bi se dobili materijali novih svojstava. Najpoznatiji umjetni piezoelektrični materijali su: litijski niobat ( $\text{LiNbO}_3$ ), barijev titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ), *olovni cirkonat- titanat* (PZT), *poli(viniliden- fluorid)* (PVDF) te *poli(viniliden- fluorid) - trifluoroetilenski kopolimer* (P(VDF- TrFE)). Uz navedene materijale u novije vrijeme koriste se i kompozitni materijali koji se tvore od piezoelektričnih keramika i polimera.

#### **3.2. POLI(VINILIDEN- FLUORID) (PVDF)**

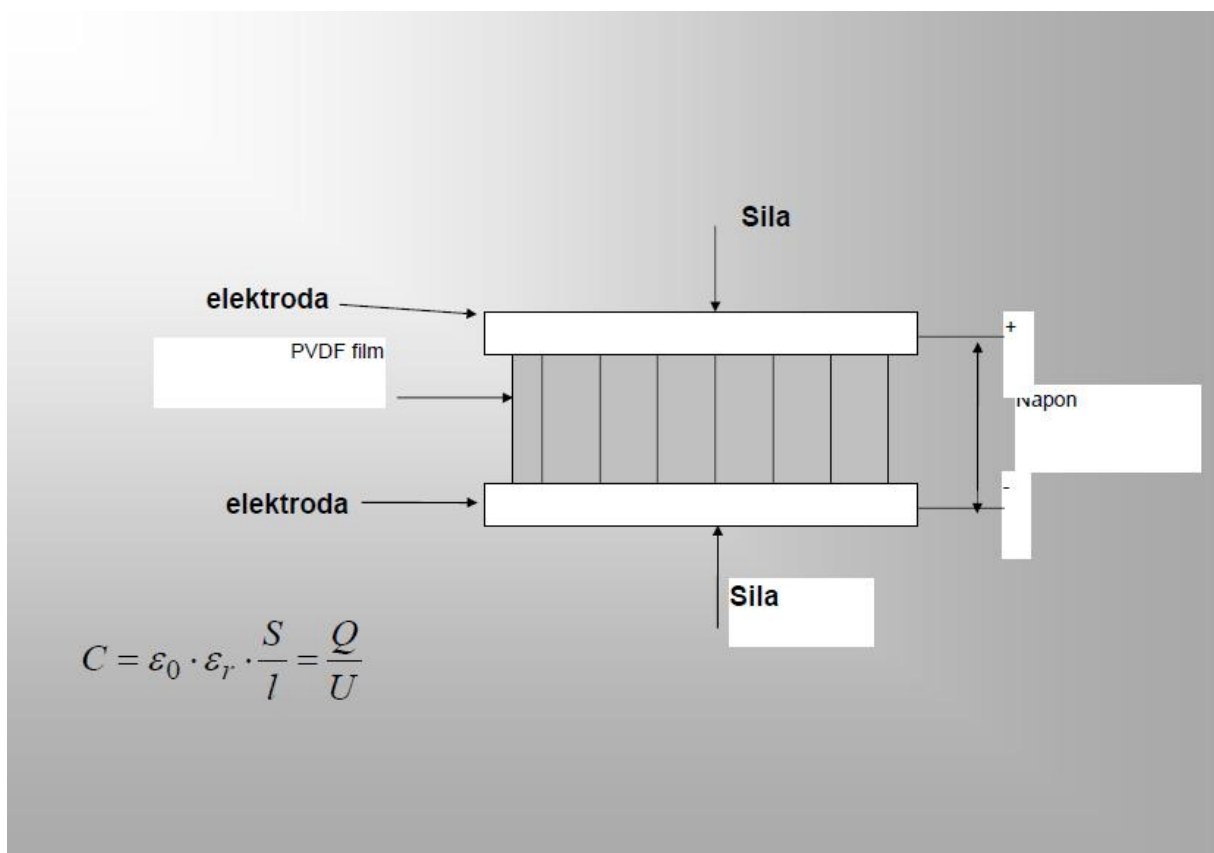
Poli(viniliden- fluorid) (PVDF) pripada u skupinu polifluoretilena. To je skupina polimernih materijala s ugljikovodičnom strukturom makromolekula u kojima su vodikovi atomi djelomično ili potpuno zamijenjeni atomima fluora. PVDF se dobiva polimerizacijom viniliden- fluorida,  $\text{CH}_2=\text{CF}_2$ , slobodnim radikalima u suspenziji ili emulziji pod tlakom i uz temperaturu i do  $100^\circ\text{C}$ . Polimer proizveden u suspenziji više je kristalan i boljih svojstava, dok se polimer dobiven u emulziji lakše prerađuje, pretežno ekstruzijom i injekcijskim prešanjem. Tipična mehanička i električna svojstva PVDF filma debljine 9- 110  $\mu\text{m}$  vidljiva su u tabeli 1., [7].

Svojstvo	Mjerna Jedinica	PVDF
<b>MEHANIČKA SVOJSTVA</b>		
Gustoća	$\text{g/cm}^3$	1,75
Vlačna čvrstoća	$\text{N/mm}^2$	50...60
Produljenje pri raskidu	%	30...60
Tlačna čvrstoća	$\text{N/mm}^2$	60
Modul elastičnosti	$\text{N/mm}^2$	2000...3000
Tvrdoća (shore)		80
Temperatura stalne upotrebe	$^{\circ}\text{C}$	-30...+140
<b>ELEKTRIČNA SVOJSTVA</b>		
Relativna dielektrična konstanta (relativna permitivnost) $\epsilon_r$		12...13
Apsolutna dielektrična konstanta (apsolutna permitivnost) $\epsilon$	$10^{-12} \text{ F/m}$	106...113
Nabojna piezoelektrična konstanta $d_{31}$	$10^{-12} \frac{\text{m/m}}{\text{V/m}}$	23
Nabojna piezoelektrična konstanta $d_{33}$	$10^{-12} \frac{\text{m/m}}{\text{V/m}}$	-33
Naponska piezoelektrična konstanta $g_{31}$	$10^{-3} \frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2}$	216
Naponska piezoelektrična konstanta $g_{33}$	$10^{-3} \frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2}$	-330
Elektromehanički koeficijent sprezanja $k_{31}$	%	12
Elektromehanički koeficijent sprezanja $k_t$	%	14
Kapacitet	$\text{pF/cm}^2$ pri 1KHz	380 za $28\mu\text{m}$

Tabela 1. Mehanička i električna svojstva PVDF filma



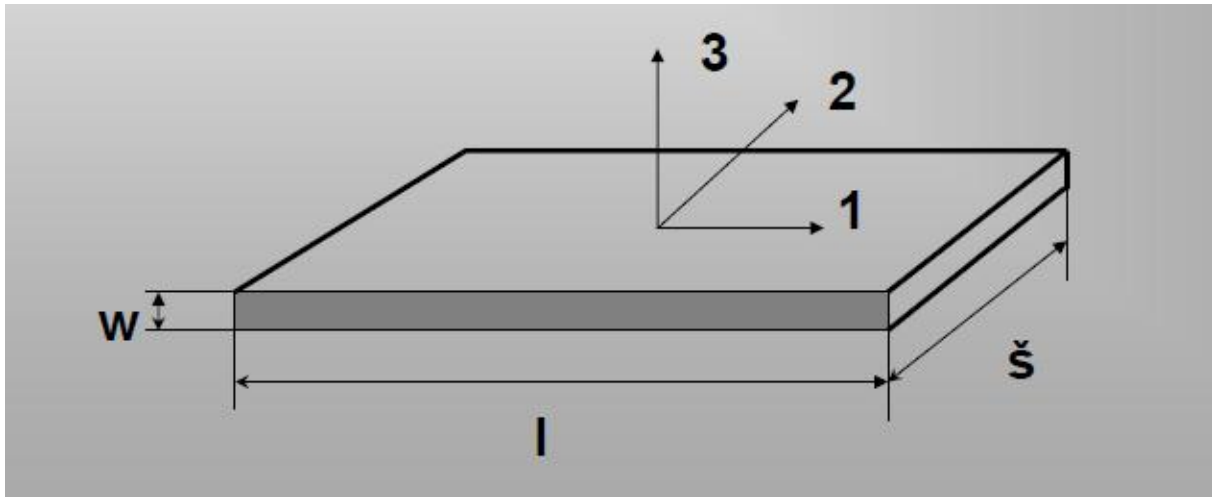
Polimer PVDF nije prirodni piezoelektrik pa se provodi proces polariziranja njegovog  $\beta$  stanja (vidljivo na slici 6., [9]). Tanki PVDF film prvo se razvlači u smjeru dužine pri 60 °C da bi se dobila orijentacija kristala u određenom smjeru. Nakon razvlačenja materijal se kali. Da bi svojstva bila snažno izražena na tanki film PVDF-a stavlja se elektrode (Al, Ni, Au...) te se izlaže jakom električnom polju na određeno vrijeme. Piezoelektrična svojstva dobivena ovim postupkom na sobnoj temperaturi ostaju očuvana do 500 MHz te nestaju na graničnoj temperaturi 120 °C, koja se još naziva Curieova temperatura. Nivo piezo aktivnosti će ovisiti o količini produljenja, vremenu izloženosti električnog polja, jakosti polja i temperaturi.



**Slika 6. Proces polariziranja, [8]**

### 3.2.1. PVDF parametri

Piezoelektrični materijal je općenito anizotropan, a to znači da su mu svojstva različita u pojedinim smjerovima. PVDF uzorak je potrebno orijentirati u prostoru:



Slika 7. Orijentiranje PVDF uzorka, [8]

Primjer:

- pobuda poljem u smjeru 3, a titranje u smjeru 1 daje konstantu  $d_{31}$  i to je transverzalni mod titranja (primjenjuje se u nižem području frekvencija  $\approx 50\text{KHz}$ )
- pobuda u smjeru 3 i odziv u smjeru 3 daje longitudinalnu pobudu (više frekvencijsko područje)

Obično su parametri u nekom pojedinačnom smjeru izraženiji nego u ostalim smjerovima.

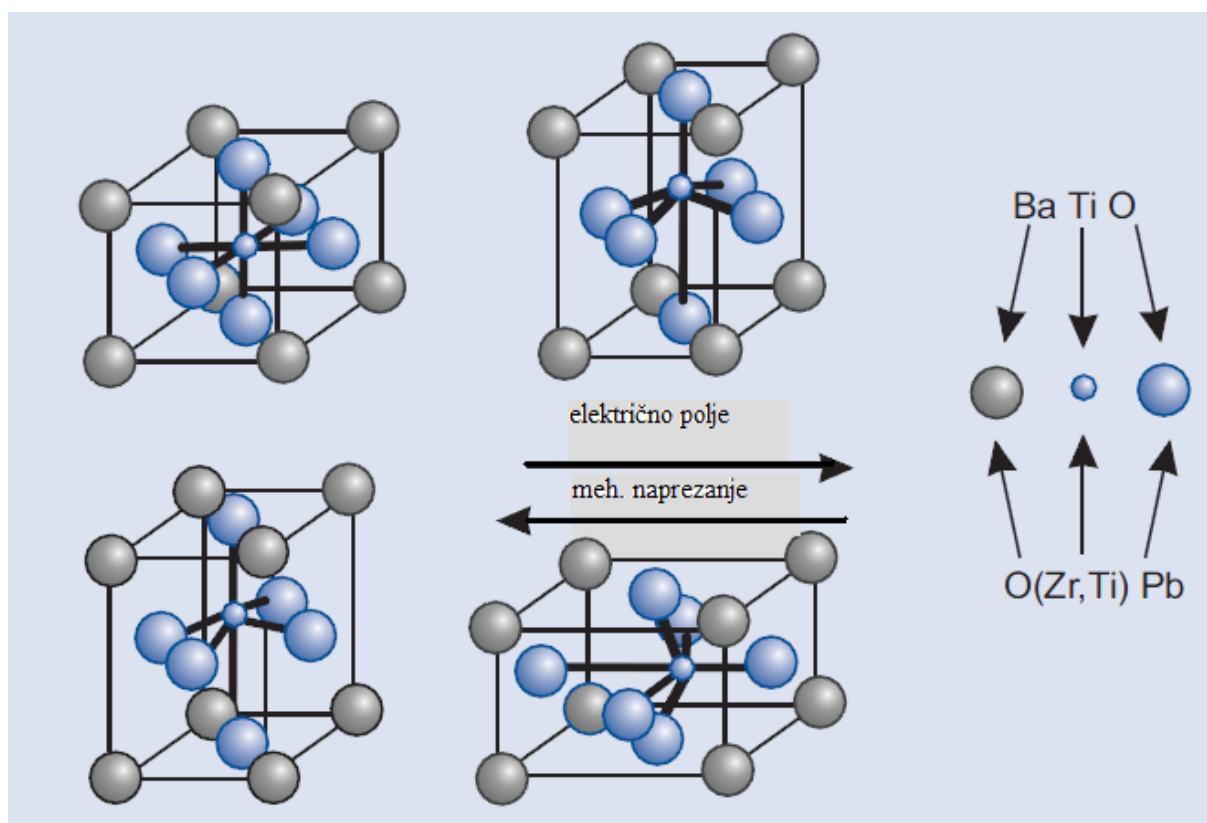
Praktično svojstvo PVDF pretvornika jest da pokriva široko frekvencijsko područje te da im se osjetljivost ne mijenja s frekvencijom (do 1 GHz). Rezonantne vrijednosti ovise o debljini filma; što je film tanji, to su rezonantne vrijednosti veće (do 100 MHz).

Za dobivanje ultrazvučnih valova velikih energija emitiranog impulsa, tijekom većeg vremenskog intervala, češće se koriste piezokeramike, [8].

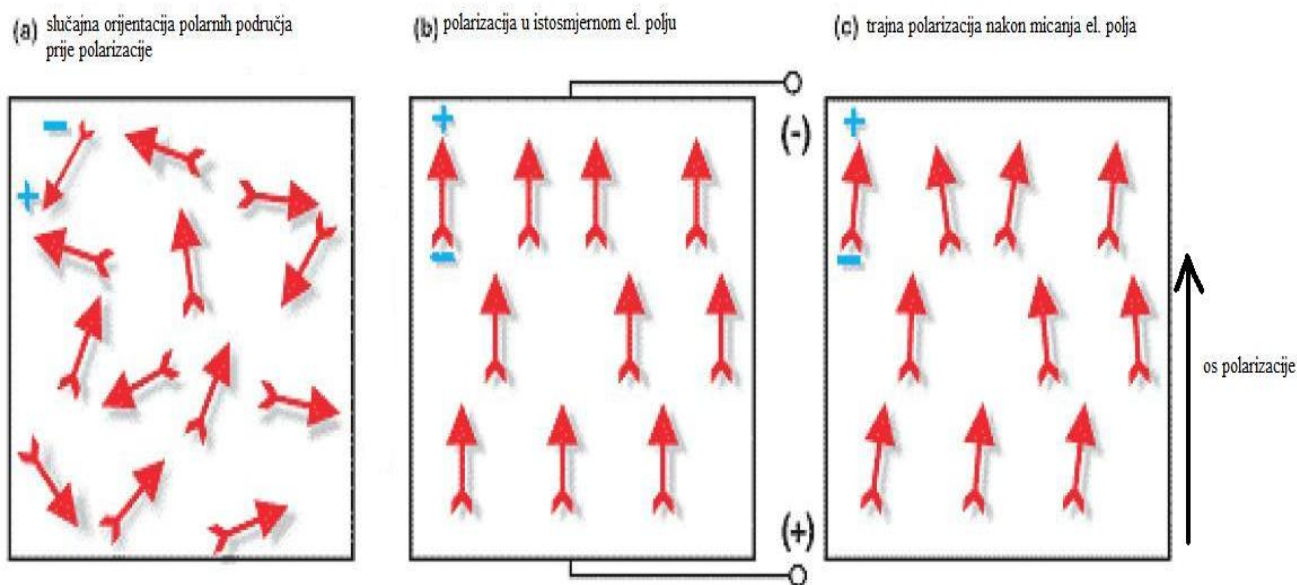
### 3.3. Olovni cirkonat- titanat (PZT)

Danas najvažniji piezoelektrični keramički materijali temelje se na sustavu kristala mješavnica olovnog cirkonata i olovnog titanata, što se zajedničkim imenom naziva olovni cirkonat-titanat (PZT). Specifična svojstva ove keramike, npr. velika relativna dielektričnost, ovise o molarnom omjeru olovnog cirkonata i olovnog titanata, kao i o supstituciji i udjelu dodatnih elemenata. To znači da je moguće proizvesti više modifikacija materijala s različitim specifikacijama.

Olovni cirkonat- titanat prerađuje se u polikristalnom obliku. Dva uobičajena postupka oblikovanja su tlačno lijevanje i lijevanje folija. Sirovci pečenjem poprimaju keramička svojstva. Piezokeramika poprima svoja tehnički relevantna piezoelektrična svojstva tek nakon procesa polarizacije, slika 9., [9].



Slika 8. Struktura PZT i  $\text{BaTiO}_3$  prije i nakon što je električno polje dovedeno na kristal, [10]



**Slika 9. Proces polarizacije, [6]**

Polarna područja u keramičkom elementu su podvrgnuta snažnom istosmjernom električnom polju, obično malo ispod Curie-ove temperature. Tijekom polarizacije područja se poravnavaju u smjeru polja. Kada se ukloni električno polje, većina dipola ostane u konfiguraciji prikazanoj na slici 9. (c). Element sad ima trajnu polarizaciju.

Piezokeramiku je uobičajeno podijeliti u dvije skupine prema ferroelektričnim svojstvima na "meku" i "tvrdu". "Meku" keramiku je relativno lako polarizirati te je karakteriziraju veliki elektromehanički koeficijenti sprezanja, velike piezoelektrične konstante, visoka permitivnost, velike dielektrične konstante, slab mehnički faktor kvalitete te slaba linearnost. "Meka" keramika stvara veće pomake i šire frekvencijsko područje u odnosu na "tvrdu" keramiku te se "meka" keramika primarno koristi za senzore. "Tvrda" keramika generalno ima suprotna svojstva od "meke" keramike, uključujući Curie-ovu temperaturu iznad 300 °C, manje piezoelektrične nabojne konstante te veće mehaničke faktore kvalitete. Teže ju je polarizirati te je kompatibilna s većim mehaničkim opterećenjima i većom voltažom. Treba napomenuti da se "tvrda" keramika može pripremiti po nekim karakteristikama kao i "meka" i

obratno. Stabilnost svojstava "tvrde" keramike čini ju prikladnom za aplikacije koje koriste *velike energije*, [6].

Usporedba karakteristika "meke" i "tvrde" keramike vidljiva je u tabeli 2., [6]:

Karakteristike	"Meka" keramika	"Tvrda" keramika
<b>Piezelektrične konstante</b>	Veće	Manje
<b>Permitivnost</b>	Veća	Manja
<b>Dielektrične konstante</b>	Veće	Manje
<b>Dielektrični gubici</b>	Viši	Niži
<b>Elektromehanički faktori sprezanja</b>	Veći	Manji
<b>Električna otpornost</b>	Vrlo visoka	Niska
<b>Mehanički faktor kvalitete</b>	Nizak	Visok
<b>Polje prisile</b>	Niže	Više
<b>Linearnost</b>	Slaba	Bolja
<b>Polarizacija/ depolarizacija</b>	Lakša	Teža

**Tabela 2. Usporedba karakteristika "meke" i "tvrde" keramike, [6]**

Primjer "tvrde" PZT keramike prema katalogu "PI Ceramic" vidljiv je u tabeli 3., [10]:

TIP MATERIJALA		PIC 181	PIC 141	PIC 241	
Parametri					
Fizikalna i dielektrična svojstva					
Gustoća	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	7.80	7.80	7.80	
Curie temperatura	T <sub>c</sub> (°C)	330	295	270	
Permitivnost (okomito na smjer polarizacije)	$\epsilon$	1500	1500	1550	
Dielektrični faktor gubitka	tan $\delta$	3	5	5	
Elektromehanička svojstva					
Faktori sprezanja	k <sub>p</sub>		0.56	0.55	0.5
	k <sub>t</sub>		0.46	0.48	0.46
	k <sub>31</sub>		0.32	0.31	0.32
	k <sub>33</sub>		0.66	0.66	0.64
	k <sub>15</sub>		0.63	0.67	0.63
Nabojne piezoelektrične konstante	d <sub>31</sub>	10 <sup>-12</sup> C/N	-120	-140	-130
	d <sub>33</sub>		265	310	290
	d <sub>15</sub>		475	475	265
Naponske piezoelektrične konstante	g <sub>31</sub>	10 <sup>-3</sup> Vm/N	-11.2	-13.1	-9.8
	g <sub>33</sub>		25	29	21
Akustično mehanička svojstva					
Frenkvencijske konstante	N <sub>p</sub>	Hzm	2270	2250	2190
	N <sub>1</sub>		1640	1610	1590
	N <sub>3</sub>		2010	1925	1550
	N <sub>t</sub>		2110	2060	2140
Konstanta proporcionalnosti	S <sub>11</sub> <sup>E</sup>	10 <sup>-12</sup>	11.8	12.4	12.6
	S <sub>33</sub> <sup>E</sup>	m <sup>2</sup> /N	14.2	13.0	14.3
Mehanički faktor kvalitete	Q <sub>m</sub>		2000	1500	1200

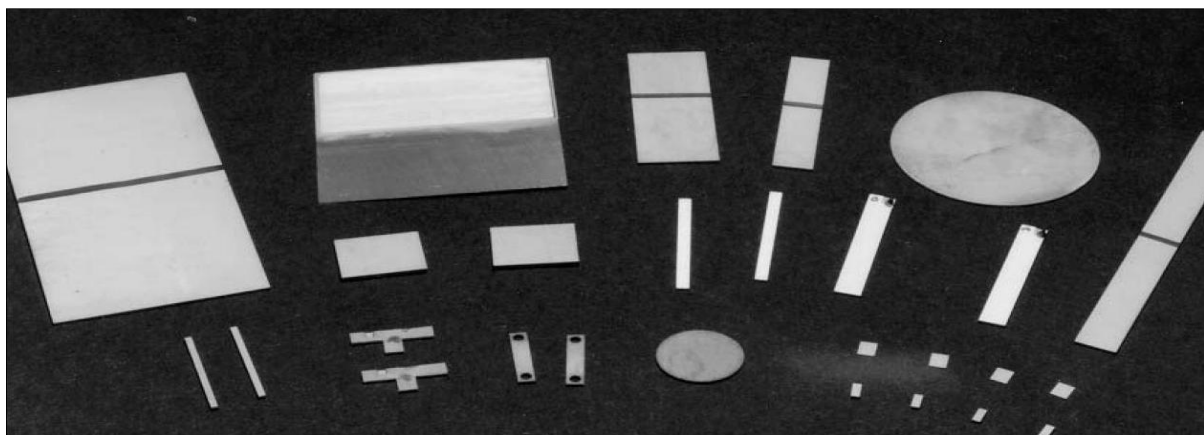
**Tabela 3. Primjer "tvrde" PZT keramike, [10]**

## 4.0. PIEZOELEKTRIČNI UREĐAJI

Prema primjeni, piezoelektrične uređaje možemo podijeliti u dvije kategorije:

- a) senzori
- b) aktuatori

Važno je istaknuti kako postoji i kombinacija dvaju kategorija, poput ultrazvučnih pretvornika koji istovremeno djeluju kao aktuatori kako bi proizveli ultrazvučni val i kao senzori kako bi detektirali ultrazvučni val.



Slika 10. Piezoelektrični pretvornici, [11]

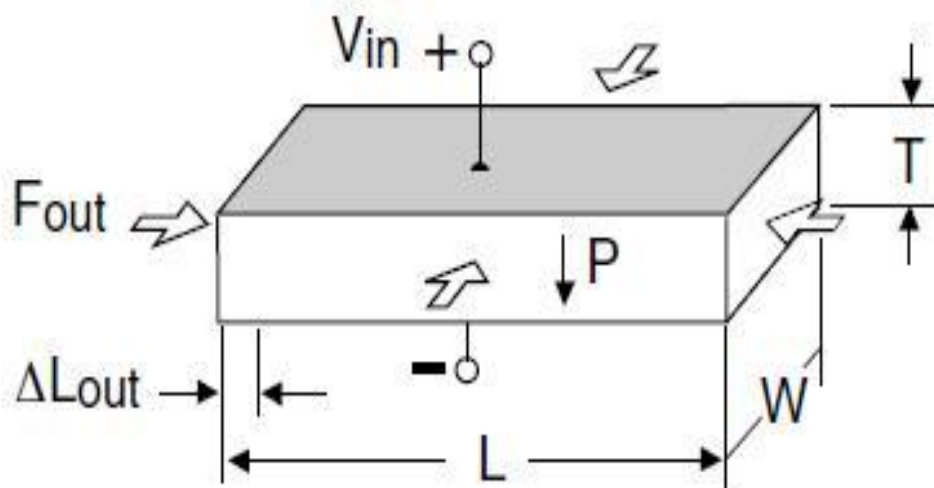
### 4.1. SENZORI

Senzori pretvaraju fizikalne parametre kao što su ubrzanje ili tlak u električni signal. U nekim sensorima fizikalni parametar djeluje direktno na piezoelektrični element; u drugima akustični signal stvara vibracije u elementu te se vibracije pretvaraju u električni signal.

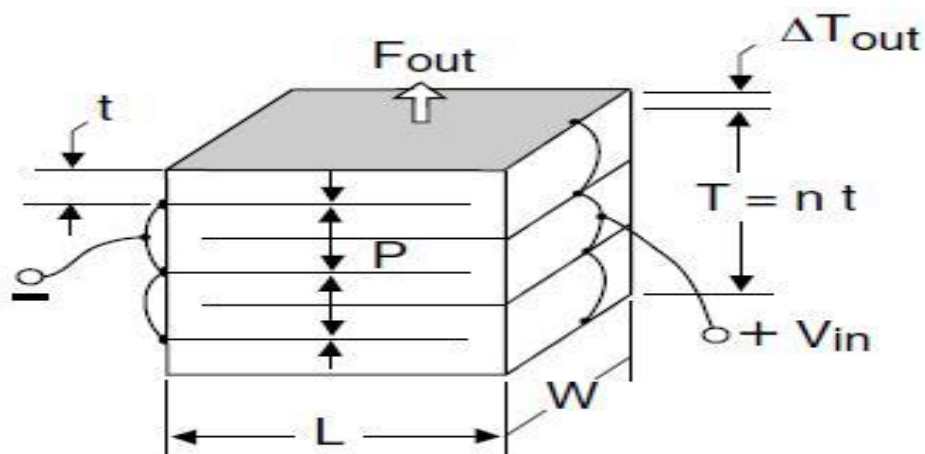
### 4.2. AKTUATORI

Piezoelektrični aktuatori pretvaraju električni signal u precizno navođeni pomak u cilju da precizno namjeste alate. Mogu se koristiti za hidrauličke ventile te su konstruirani u veličinama manjim od  $1 \text{ cm}^3$ . Aktuatori mogu biti polarizirani na način da proizvedu pomak

po debljini, dužini i širini, ili se mogu rastegnuti i stisnuti kako bi stvorili električnu energiju. Elementi mogu biti napravljeni u jednom sloju, dva sloja te višeslojni. Što je više slojeva, pomak je veći u redu veličina mikrona do nekoliko desetaka mikrometara te sila u redu veličina od nekoliko stotina do nekoliko tisuća. Primjeri elemenata vidljivi su na slikama 11., 12. i 13., [11]:

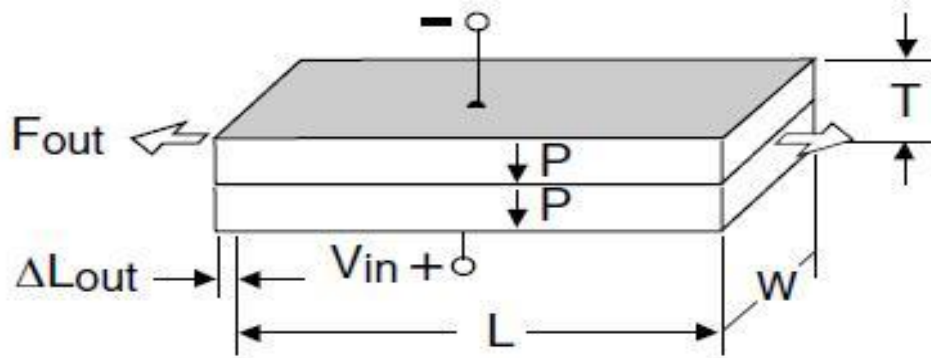


Slika 11. Transverzalni  $d_{31}$  aktuator, [11]



Slika 12. Višeslojni aktuator, [11]





Slika 13. Dvoslojni transversalni aktuator, [11]

### 4.3. ULTRAZVUČNI PRETVORNIK

Ultrazvučni pretvornik je uređaj koji pretvara energiju u ultrazvuk. Termin je više prikladan za piezoelektrični pretvornik koji pretvara električnu energiju u vibracijsku mehaničku energiju, često zvuk ili ultrazvuk. Širine snopa pri frekvencijama od nekoliko desetaka kHz kreću se između  $1^\circ$  i  $20^\circ$ .

Piezoelektrični pretvornik je kompaktan, jednostavan i vrlo pouzdan te minimalnom energijom možemo proizvesti visoke frekvencije zvuka. Zato što je piezoelektrični efekt reverzibilan, pretvornik može poslužiti za stvaranje ultrazvučnog signala iz električne energije te pretvoriti dolazeći zvuk u električnu energiju. Neki uređaji su dizajnirani pomoću jednog piezoelektričnog pretvornika koji služi kao senzor i aktuator, dok drugi imaju dva pretvornika kojima jedan služi kao senzor, a drugi kao aktuator.

Piezoelektričnim pretvornicima možemo stvarati ultrazvučne vibracije koje služe za čišćenje, bušenje ili mljevenje keramike te ostalih materijala, zavarivanje plastike te u medicinskoj dijagnostici.

Kada piezoelektrični keramički element izložimo izmjeničnoj električnoj struji, njegove dimenzije se mijenjaju ciklično, po cikličnoj frekvenciji polja. Frekvencija na kojoj keramički element najefikasnije pretvara električnu energiju u vibracije (ultrazvuk) je rezonantna frekvencija. Uobičajeno, deblji element ima nižu rezonantnu frekvenciju od tanjeg elementa jednakog oblika, [6].

Veze između primjenjenog napona te odgovarajućeg pomaka u keramičkom elementu (debljina, dužina i širina) dane su formulama:

$$\Delta h = d_{33} V \quad (1.26)$$

$$S = d_{33} E \quad (1.27)$$

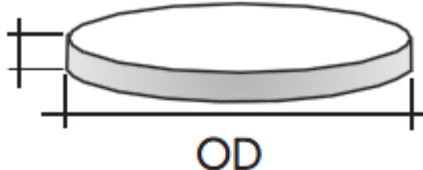
$$\Delta l / l = d_{31} E \quad (1.28)$$

$$\Delta w / w = d_{31} E \quad (1.29)$$

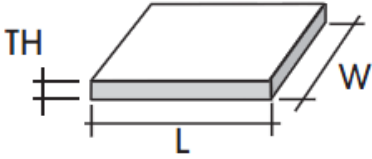
- $l$ : početna dužina keramičkog elementa
- $w$ : početna širina keramičkog elementa
- $\Delta h$ : promjena u visini (debljini) keramičkog elementa
- $\Delta l$ : promjena u dužini keramičkog elementa
- $\Delta w$ : promjena u širini keramičkog elementa
- $d$ : nabojna piezoelektrična konstanta
- $V$ : narinuti napon
- $S$ : deformacija
- $E$ : električno polje

### 4.3.1. DIMENZIJE PRETVORNIKA

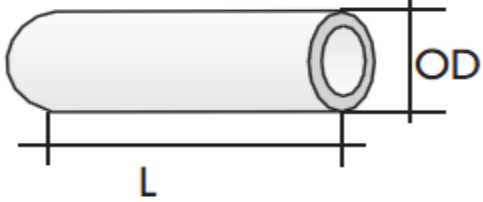
Dimenzije pretvornika kreću se u granicama prikazanim slikama 14., 15. i 16., [10]:

 TH OD	Disk / Štap	
	TH (mm)	OD (mm)
maksimalna debljina	30	10 to 80
	20	5 to 80
	10	2 to 5
minimalna debljina	0.15	2 to 20
	0.3	2 to 60
	0.5	2 to 80

Slika 14. Dimenzije diska/štapa, [11]

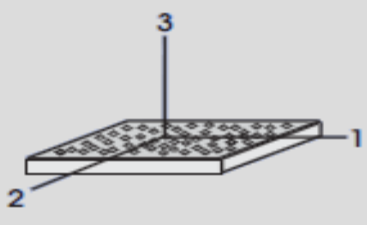
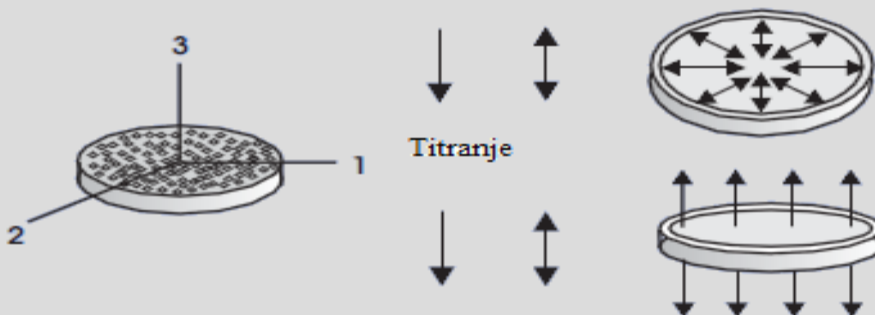
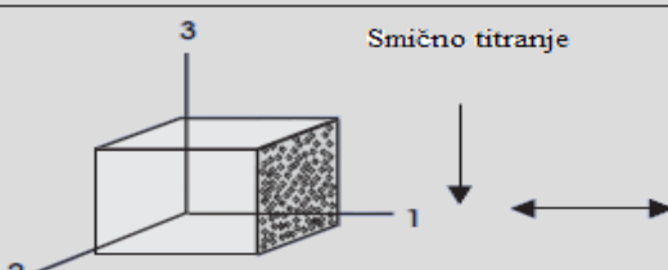
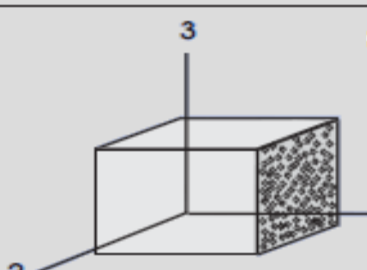
	Pločica / Štap		
	TH (mm)	L (mm)	W (mm)
maksimalna debljina	40	1 to 80	1 to 20
	40	1 to 60	1 to 60
minimalna debljina	0.15	1 to 20	1 to 20
	0.3	1 to 80	1 to 30
	0.5	1 to 60	1 to 60

Slika 15. Dimenzije pločice/štapa, [11]

	Cjevčica	
	OD (mm)	ID (mm)
maksimalni promjer	< 78	< 70
minimalni promjer	> 2	> 0.8
dužina	1 to 70 mm	

Slika 16. Dimenzije cjevčice, [11]

Uz standardne oblike, moguće je proizvesti pretvornike različitih oblika, dimenzija, po narudžbi.

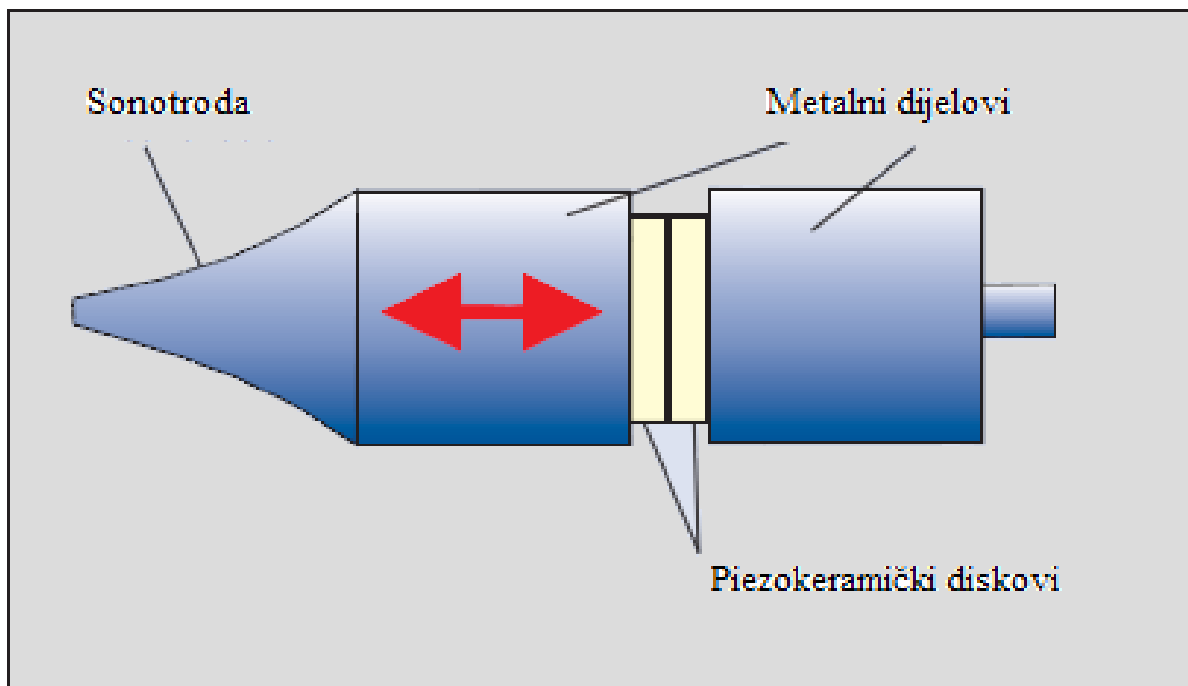
Osi	Tip pretvornika	Koeficijenti
	<p style="text-align: center;">Titranje</p> <p style="text-align: center;">Polaritet Polje Deformacija</p> <p style="text-align: center;">↓   ↑   ↓</p> <p style="text-align: center;">Longitudinalno titranje</p> <p style="text-align: center;">↓   ↑   ↔</p>	<p><math>d_{33}, g_{33}, k_{33}</math></p> <p><math>s_{33},</math></p> <p><math>\epsilon_{33}</math></p> <p><math>d_{31}, g_{31}, k_{31}</math></p> <p><math>s_{11},</math></p> <p><math>\epsilon_{33}</math></p>
	<p style="text-align: center;">Radijalno titranje</p> <p style="text-align: center;">↓   ↑</p> <p style="text-align: center;">Titranje</p> <p style="text-align: center;">↓   ↑</p> 	<p><math>d_{31}, g_{31}, k_{31}</math></p> <p><math>s_{11}, \rho</math></p> <p><math>\epsilon_{33}</math></p> <p><math>d_{33}, g_{33}, k_{33}</math></p> <p><math>s_{33}, \rho</math></p> <p><math>\epsilon_{33}</math></p>
	<p style="text-align: center;">Smično titranje</p> <p style="text-align: center;">↓   ↔   ↑</p>	<p><math>d_{15}, g_{15}, k_{15}</math></p> <p><math>s_{44}, s_{55}, \rho</math></p> <p><math>\epsilon</math></p>
	<p style="text-align: center;">Titranje stijenke</p> <p style="text-align: center;">Longitudinalno titranje</p> <p style="text-align: center;">Radijalno titranje</p>	<p><math>d_{33}, g_{33}, k_{33}</math></p> <p><math>s_{33}, \rho</math></p> <p><math>\epsilon_{33}</math></p> <p><math>d_{31}, g_{31}, k_{31}</math></p> <p><math>s_{11}, \rho</math></p> <p><math>\epsilon_{33}</math></p>

Slika 17. Titranje piezoelektričnih komponenti, [10]

Piezoelektrične komponente sastoje se od PZT-a i tankog filma metala (elektrode). Elektrode se nanose na piezokeramiku tipične debljine 10  $\mu\text{m}$ . Metali korišteni za elektrode obično su Al, Au i Ag.

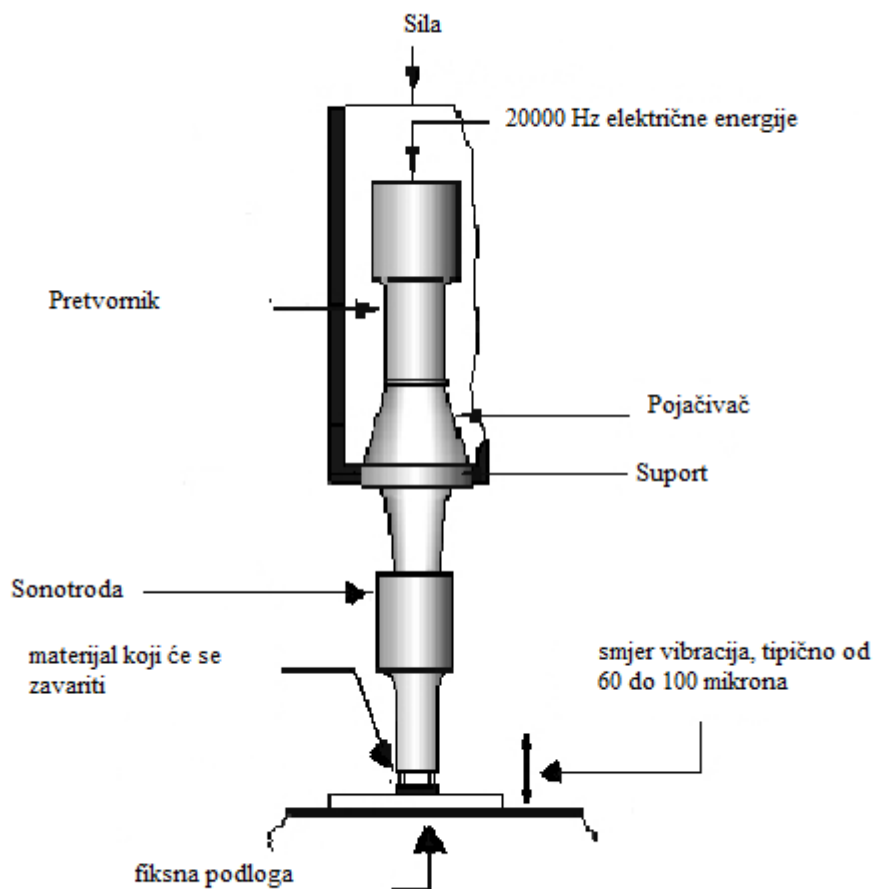
#### 4.4. UPORABA PIEZOELEKTRIČNIH PRETVORNIKA VELIKIH ENERGIJA

Praktični primjeri se mogu pronaći u ultrazvučnom čišćenju, obradi materijala (ultrazvučno zavarivanje, bušenje itd.), području medicine (stomatologija, kirurški instrumenti) te sonaru. Kod ultrazvučnog bušenja dobivene snage se kreću od nekoliko stotina W do nekoliko tisuća W. Primjer alata ultrazvučnog bušenja prikazan je na slici 18., [10]:



Slika 18. Sonotroda s piezokeramičkim diskovima, [10]

Kod ultrazvučnog zavarivanja dobivene snage se kreću između 2 i 6 kW.



**Slika 19. Primjer ultrazvučnog zavarivanja, [12]**

Za dobivanje velikih energija frekvencije se kreću u veličinama reda kHz. Važno je primijetiti da ultrazvučni pretvarači moraju imati linearne dimenzije bar desetak puta veće od valne duljine da bi se zvuk odašiljao, tj. da je radni otpor mnogo veći od reaktivnoga. Ako to nije slučaj, veliki dio energije zvuka titra između odašiljača i sredstva i ne upućuje se u sredstvo. U praksi za frekvenciju 1,5 MHz čelo pretvarača će imati promjer približno 15 mm, a za 5 MHz oko 1 cm. [8]

## **5.0. ZAKLJUČAK**

U današnje vrijeme piezoelektrični efekt je postao jedna od osnova moderne tehnologije. Brojne primjene efekta našle su mjesto kako u komercijalnoj upotrebi, tako i u istraživačkoj. Svakim danom stvaraju se novi materijali sa sve boljim piezoelektričnim svojstvima koji povećavaju granice proizvodnje.

Piezoelektrični pretvornici su jeftini za proizvodnju, a strahovito puno doprinose modernim tehnologijama. Očekivano je da će u budućnosti biti uz bok konvencionalnim metodama obrade materijala. Veliki je raspon uporabe kako u strojarstvu, tako i u elektrotehnici te čine poveznicu elektrostrojarstva. Osim piezokeramika i polimera, danas se teži proizvodnji kompozita (keramika i polimer) u cilju dobivanja materijala koji imaju superiorna svojstva u odnosu samo na piezokeramike i piezopolimere.

Velika prednost je što više nismo ovisni o materijalima iz prirode, već je omogućeno stvaranje umjetnih materijala koji se odlikuju niskom proizvodnom cijenom. Proces je toliko razvijen da je moguće konstruirati različite oblike pretvornika, ovisno o potrebama korisnika.

Svakodnevni život danas je nezamisliv bez njihove upotrebe.



## LITERATURA

- [1] David J., Cheeke N., *Fundamentals And Applications Of Ultrasonic Waves*, CRC Press LLC, 2002.
- [2] Lesić, I., Diplomski rad, *Vizualizacija akustičkih pojava*, Zagreb, lipanj 2006.
- [3] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Frekvencija>
- [4] Đerek, V., Seminar iz opće fizike III, *Piezoelektrični efekt*, listopad 2002.
- [5] <http://www.tfrc.gov/infrastructure/nde/pubs/04042/02.htm>
- [6] <http://www.americanpiezo.com/>
- [7] Tehnička enciklopedija, 1963. – 1997.
- [8] [http://www.fer.hr/download/repository/3\\_Ultrazvucni\\_pretvaraci.pdf](http://www.fer.hr/download/repository/3_Ultrazvucni_pretvaraci.pdf)
- [9] Lesar, M., Filetin, T., Kramer, I., Tehnička keramika
- [10] <http://www.piceramic.com/>, katalog
- [11] <http://www.piezo.com/>, katalog
- [12] <http://www.twi.co.uk/content/pjkultrason.html>